

圧入支持杭設計法の提案

Approach to the 'Press-in' pile design method

平成15年12月26日

社会システム

学籍番号 : 1056017

若生 和夫

目 次

はじめに	1
第 1 章 圧入工法の原理と支持杭（杭基礎）	4
1.1 圧入工法概説	5
1.2 圧入原理	7
1.3 圧入工法の支持杭造作方法への適用	8
1.4 杭設計の問題点	10
1.5 圧入支持杭設計法への展開	12
第 2 章 圧入支持杭の造作原理および特性図の作成	13
2.1 基本定義	14
2.2 圧入支持杭造作方法	22
2.2.1 杭の圧入（「引き抜きを伴う圧入」）	23
2.2.2 打ち止め管理	25
2.2.3 先端繰返し荷重	26
2.3 繰返し回数Nの決定と残留変位の確認	27
2.4 杭の鉛直バネ常数の推定	30
2.5 圧入支持杭特性図の作成	33

第3章 圧入支持杭の造作	3 4
3.1 杭実験データ及び地盤状況	3 5
3.1.1 支持杭造作と支持力確認スキーム	
3.1.2 杭データおよび地盤状況	
3.2 「引き抜きを伴う圧入」による摩擦低減	3 6
3.2.1 実験での確認	3 7
3.2.2 圧入最終荷重の確認	3 9
3.3 繰返し荷重負荷による杭先端地盤の弾性化の確認	4 0
3.3.1 地盤の弾性化の確認	4 1
3.3.2 繰返し回数の決定	4 5
3.4 弾性バネ常数決定方法の確認	4 6
3.4.1 杭の弾性バネ常数決定モデル	4 7
3.4.2 杭の弾性バネ値の決定	4 9
3.5 圧入効率係数	5 0
第4章 載荷試験による支持杭としての検証	5 1
4.1 特性図の作成	5 2
4.1.1 特性図の諸量	5 2
4.1.2 圧入支持杭特性図の完成	5 3
4.2 載荷試験による検証	5 4
4.2.1 検証する項目	5 4
4.2.2 杭の載荷試験概要	5 5
4.2.3 載荷試験結果	5 6
4.2.4 支持杭特性図での検証	5 9

第5章 圧入支持杭の設計法	6 0
5.1 圧入支持杭設計法の基本	6 1
5.1.1 基本検討項目	6 1
5.1.2 検討項目の詳細	6 2
5.1.3 圧入支持杭の基本設計スキーム	6 5
5.2 杭変位量（許容変位量）の決定	6 6
5.3 集合杭と信頼性評価	6 8
5.3.1 圧入支持杭の配列	6 8
5.3.2 集合杭の信頼性評価（支持力評価）	6 9
第6章 設計法の適用	7 2
6.1 工事概要	7 3
6.1.1 計画概要	7 3
6.1.2 建物概要	7 4
6.1.3 地下部構造設計概要	7 4
6.1.4 杭地業計画数量	7 7
6.1.5 設計荷重と解析結果	7 7
6.1.6 杭工事の実施	8 1
6.2 圧入支持杭設計法での評価	8 2
6.2.1 確認項目	8 2
6.2.2 杭材量の検討	8 3
6.2.3 限界荷重の設定	8 4
6.2.4 杭の弾性変位量の決定	8 6
6.2.5 杭の最大弾性変位量の検討	8 7

6.2.6	BM杭の実施と実際の杭施工	88
6.2.7	圧入支持杭特性図の作成	90
6.2.8	集合杭の信頼性評価	91
6.3	設計法での評価(総括)	94
第7章 終章(設計法のまとめ)		95
7.1	設計法の概念のまとめ	96
7.2	設計法の基本スキームのまとめ	99
7.3	最後に	100
APPENDIX		
A	繰返し荷重による弾性化	102
B	繰返し荷重による鉛直バネ	111
C	油圧発生メカニズムと圧入効率係数	116
D	杭の鉛直載荷試験	127
参考文献		140

「圧入支持杭の設計法の提案」

はじめに

基礎の目標・目的は、「上部構造物の荷重を地盤に均等に配分し、かつ上部構造物に不利な変形を生じさせない沈下耐力を持つこと」と規定できる。この事は、「基礎は、上部構造とバランスが保たれている事、基礎そのものが荷重耐力と沈下抵抗力を持つ事」と言い換えることが出来る。

直接基礎の場合は基礎が上部構造物と一体であるため、この関係は構造物と地盤の関係に置き換えることが出来る。即ち、基礎の性能目標は、地盤の性能・耐力そのもので捉えればよい。換言すれば、地盤の性状把握が直接基礎設計の中心となる。一方杭基礎の場合は、杭が上部構造物と地盤の間に介在し、基礎と地盤の関係は、上部構造 vs. 杭、杭 vs. 地盤の関係に分割される。このため構造物と地盤の関係は直接的ではなく間接的な関係となっている。この中間介在物によって杭基礎の設計は直接基礎の設計に比較すると明確さを欠く原因となっている。

杭と地盤の関係は不確定要素が多く、推定の域を脱していない。これは、杭先地盤や杭周面地盤を直接的に測定する術を持たないために、杭と地盤の力学関係に推定値を用いざるを得ないという事情による。杭と地盤の関係が推定値を交えずに明確に規定できれば、杭基礎は直接基礎の明解さと同様に、信頼性を大幅に向上させることが出来る。本研究は、この杭と地盤の関係を明確化させようとするものである。

杭基礎の支持力機構は摩擦杭と先端支持杭に大別される。摩擦杭は、支持層が不明な場合、極端に深い場合等の妥協的な支持力機構であるが、摩擦力をどのように評価するかと言うロジックに極端な推定値が介在している。杭基礎を直接基礎の明確さに比肩させるのであれば、支持力機構は摩擦を排除した先端支持杭であるべきである。摩擦力の推定は、飽く迄、暗黙裡に認知された肯定的期待値にすぎない。杭の支持力を確定的で信頼性を第一義に置いたものとするためには、設計値の中から不確定の要素を排除する必要がある。このためには摩擦力を安易な推定値で評価せず、仮に摩擦力を評価せざるを得ない場合があったとしても十分に理解した上で取り扱うべきである。しかしながら、杭基礎

設計の基本は、上載荷重に対して杭体と杭の先端地盤の軸力だけで抵抗する先端支持杭であるべきであり、摩擦抵抗力に依存した摩擦杭は二義的に考えるべきである。

現在の設計法の欠点は、推定値にすぎない摩擦力を確定値的に取り扱い、更にこの摩擦の影響を肯定的に考えすぎていることにある。摩擦杭は、将にこの推定値だけで100%構成されている。しかしながら、先端支持杭と認知されている杭も、実際には摩擦力を評価しないと言う設計上の了解事項の上に成り立っている。このために、杭先端地盤の支持抵抗力の正しい評価にはなっていない。荷重に対応する先端支持力と杭軸力との力学関係は、杭中間部分で減衰する杭軸力のために一対一の関係にはなっておらず、このため先端地盤の杭軸力に対する実際の抵抗力は、摩擦力によって減衰される分だけ甘くなっている。

単に摩擦力を評価しないだけの設計法¹では、先端地盤の抵抗力の適正評価は出来ない。形式的に摩擦を評価しないと言う方法論は、実際は摩擦力の肯定的期待値によって、将来的には安全側に働くとする楽観的評価によって成立している。一見正しく見える方法論であるが、先端地盤の抵抗力を正しく評価出来ない以上、支持力評価としては、楽観的推定値の域を脱してはいない。経験的に合理的に見えるこの種の杭基礎の設計は、推定値が常に内在していると言う現実によって、実際の信頼性はそれほど高いものではないと言える。

杭基礎の基本は、杭を用いて構造物を支持するということであり、更に上部構造物に対する支持力信頼性を如何に担保するかという問題に帰結出来る。従って杭基礎にとっての重要な設計・施工スキームは、先端支持杭の特徴を最大限に発揮させ、かつ付随した以下のような機能で考えるべきであろう。

- 支持力が確実に確定できる
- 構造物の変形に対して杭基礎との関連が確立されている
- 杭基礎と上部構造物との抵抗力の信頼性が確認されている

先端支持杭を杭基礎設計の第一義に据えて考える必要があり、この事は、今まで摩擦杭としての設計を余儀なくされている杭に対しても先端支持杭として設計する（出来る）必要がある事を示している。このためには、支持層そのものの定義を拡大する必要がある。即ち、N値や地質調査の事前調査結果だけで支持層を定義するのではなく、設計荷重に十分抵抗出来る地耐力を持つ層を、支持層として定義（拡大）する必要がある。その層の上に造作する（される）杭は、全て先端支持杭として設計出来ると言う確証が必要であり、その事を確

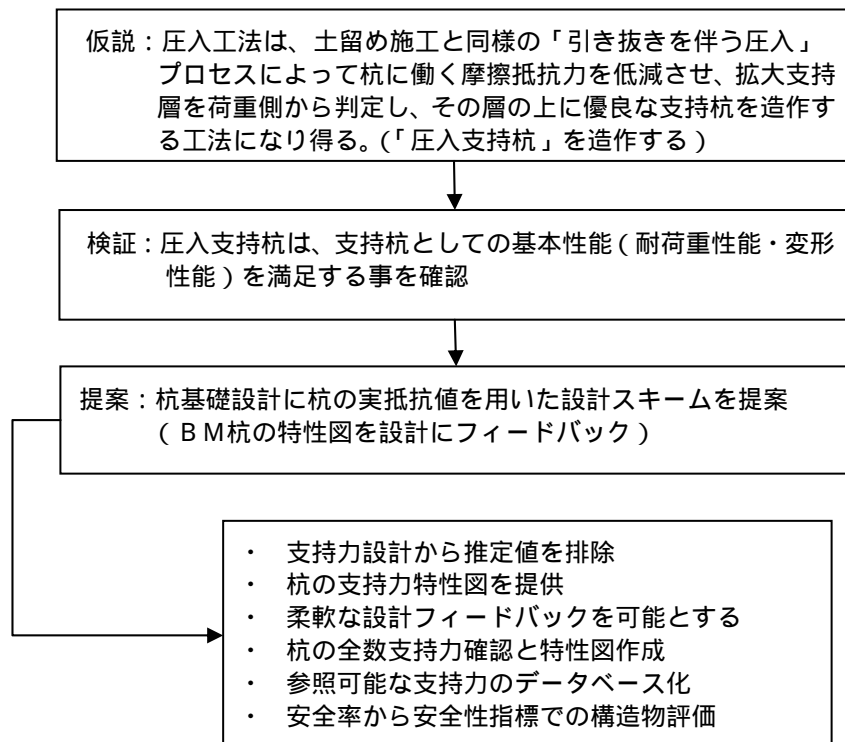
¹ 打撃式は支持杭の典型であり、施工時に支持力が確認できる、現時点では唯一の工法および設計法である。杭と地盤との関係に推定値を排除して直接的に測定するという方法論は、杭基礎の本来の目的に合致している。しかし、騒音振動問題、杭の破損問題、事故の多発問題、施工精度の問題等から現在では主流の工法とはなっていない。杭基礎の本来の目的には合致しているものの、問題を多く抱えている工法と言える。

認する必要がある。

支持層の定義が拡大・拡張されると、その地層での地耐力と上載荷重もしくは杭の軸力との関係が、重要な問題となる。この関係が荷重側から定義出来ること、支持層は荷重もしくは杭抵抗値で規定できることになる。即ち、岩盤に相当する支持層は事前決定であるが、拡大支持層は施工時に荷重側の測定によって初めて明らかとなる。その層上に造作された杭は、荷重側で規定した支持層に最適に着床しており、明らかに先端支持杭となる。

圧入工法は、土留め施工に用いる杭体を圧入（押し込み）する方法である。この工法は、杭の抵抗値と圧入力（載荷重）を対応させる事が出来る。従って、施工時に支持層²（拡大支持層）を確認する事が出来る。更に、この工法は杭体に働く摩擦を最小化するプロセス（「引き抜きを伴う圧入プロセス」）を工法の最大特徴としている。即ち、この工法によって先端支持杭を拡大支持層上（確認支持層が極端に深い場合）に造作出来ると言える。

本研究は、圧入工法を用いて先端支持杭を造作する方法を論じ、その造作された杭が支持杭としての基本性能を満足する事を検証する。更に、支持杭設計を行う為の杭の設計方法と施工方法を論じ、上部構造物との間の抵抗力（支持力）信頼性をどの様に担保するかを考察する。本論は、以下のスキームで検証する。



² 2.1 「基本定義」で定義する。

第 1 章 圧入工法の原理と支持杭（杭基礎）

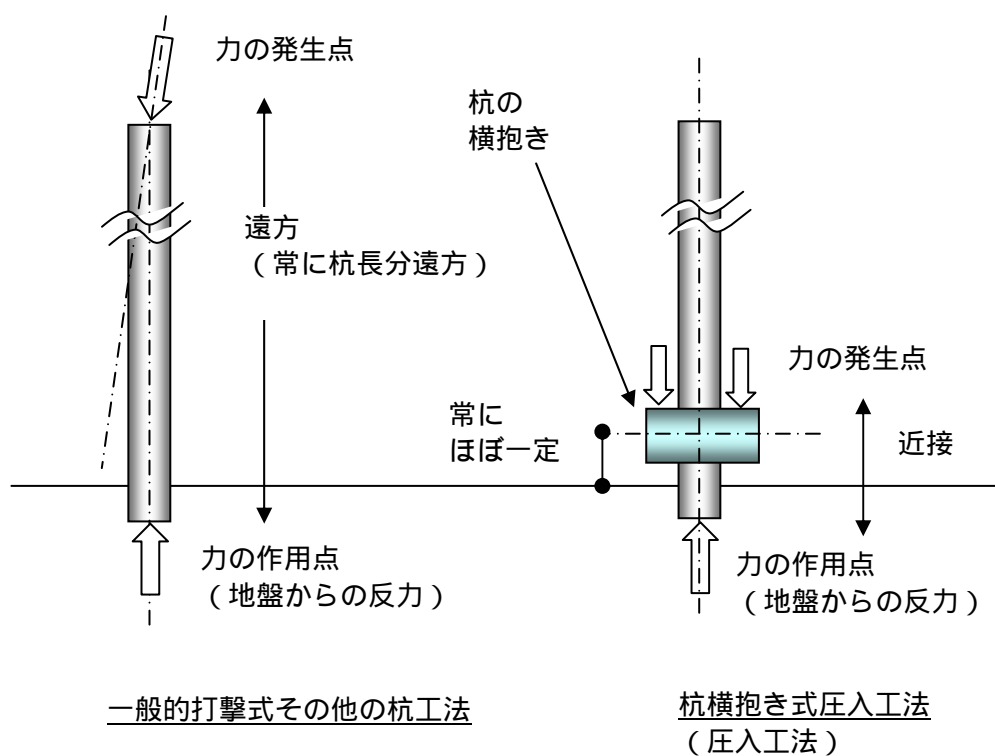
本章は、圧入工法の概説および支持杭造作工法への拡大適用の可能性を概観する。圧入工法を支持杭造作工法に拡大適用する事で、現状の杭設計の問題点である推定値と確定値の混同、設計の硬直性（原地盤データを設計に適正にフィードバック出来ない）、設計と施工の極端な乖離等を解決する手段としての設計法を提案する。

本章は、圧入支持杭設計法の展開の方向を考える。

1.1 圧入工法概説

圧入工法とは、圧入機を用いて杭を土中に貫入させる工法であり、一般的には油圧を用いる。この工法は、杭を上部から押し込む方法と杭を横抱きして押し込む方法に2分される。しかしながら上部から押し込む工法は現在では殆ど使われておらず、本論で議論する圧入工法は、このうちの杭を横抱きして土中に押し込む方法に限定して議論する。

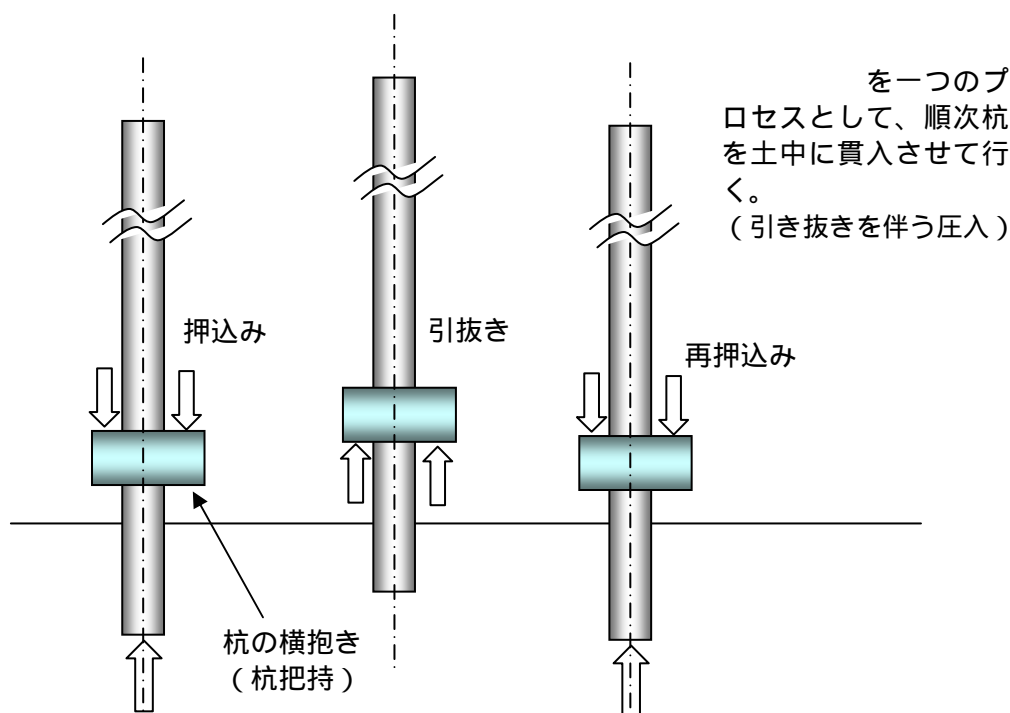
杭を横抱きする事の長所は、力の発生点と力の作用点が近接するという点にあり、この事によって特に初期に於いて高い鉛直精度を確保できるという最大の長所と特徴を持っている。



上図に示すように横抱き式圧入工法は、他の工法に比べて初期に於いて力の発生点と力の作用点が近接している。このため力の作用方向の誤差の影響が非常に小さく、初期の杭貫入に対して非常に高い鉛直精度を確保できる事が分かる。更に横抱き式圧入工法（以降圧入工法とする）は、この鉛直精度をより高精度に維持する機構を機械本体の機構に持っている。この機構は、杭を引き抜くと言う機構であり、他の杭工法にない圧入工法の一大特徴となっている。

他の工法は初期精度の確保に失敗した時、修正は殆ど不可能である。一方、圧入工法は杭を引き抜く機構を本体に持っている。この事により常に鉛直精度

を修正しながら杭を押し込む事が可能であり、この引き抜くと言う動作を押し込む動作とワンセットで考える事によって、杭の鉛直精度は飛躍的に向上する。これが、横抱き式圧入の最大の利点であり、一般の杭工法が修正できなかった施工中の鉛直精度の確保と修正を、施工のプロセスの中で実現する事が出来る最大の利点となっている。即ち、この引き抜きと押し込みをワンセットのプロセスの中で実現しているのが圧入工法であり、この事が圧入工法の鉛直施工精度を飛躍的に高める基幹技術であると言い換える事が出来る。

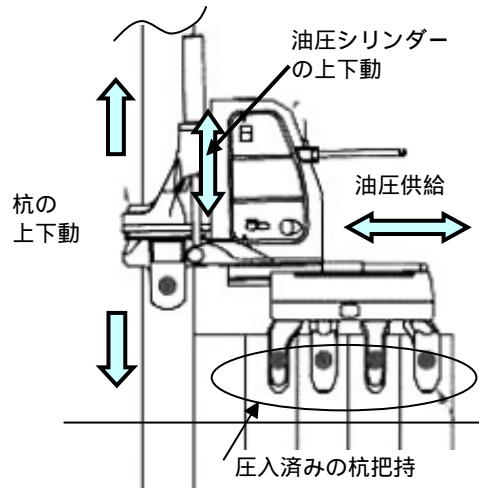


この押し込み、引き抜きの繰り返し（以降「引き抜きを伴う圧入」とする）の利点は杭の造成に必要な力にも発揮される。鉛直精度を高めるために用いられるこの「引き抜きを伴う圧入」は、地盤内の杭と周面の地盤との間でフリクションカットの働きも同時に行う。杭に働く大部分の抵抗力は杭周面に働く摩擦力であり、この摩擦力を「引き抜きを伴う圧入」でカットすると、杭に働く抵抗力はわずかな先端抵抗力のみとなり、極めて小さな力で杭を地盤に押し込む事が可能となる。この副次的効果によって、圧入工法による杭造作は、最小の力でかつ精度をコントロールしながら施工する事が出来る事になる。

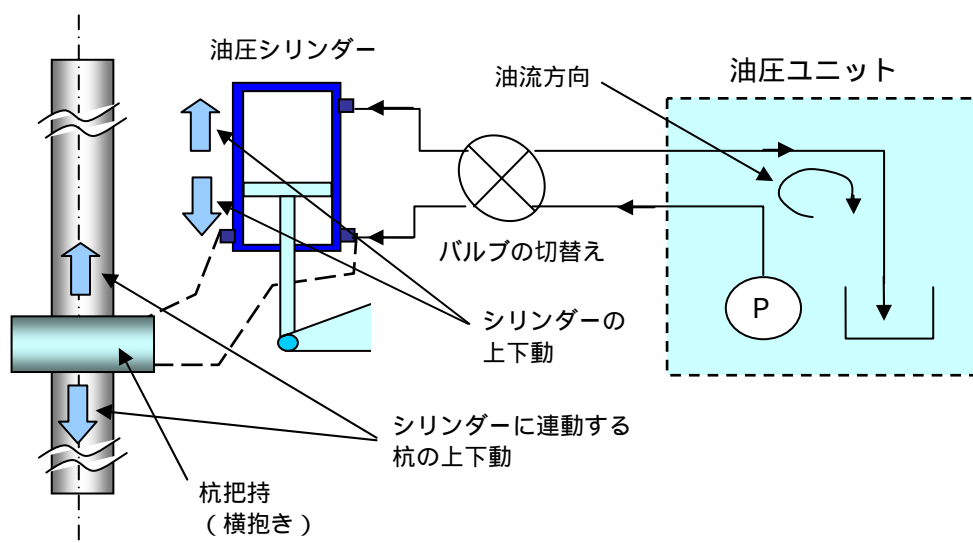
圧入工法が実際に適用されるのは、主に土留め施工としてである。高い鉛直精度を要求される建築限界ギリギリの部位に対する土留め施工や、狭隘地、クリアランスがほとんどゼロの隣地境界等での土留め施工を圧入工法を適用する事で可能にしている。

1.2 圧入原理

圧入原理は、極めて合理的である。圧入機は既に圧入済みの杭を把持し、その杭の引き抜き抵抗力を反力として新たな杭を圧入する。この繰り返しによって土留め杭を完成させる。杭圧入の反力を既存杭から調達する事により機械本体の重量を杭圧入の主要な反力とする必要がなくなり、結果的に機械本体を最小化させる事が出来る。機械本体に求められるものは、杭を把持するための油圧と、杭を上下させるための油圧機構と、発生力（杭の反力）に対して本体が破損・変形しない材料・構造の強度だけである。



杭に対する油圧発生は本体のバルブ操作だけの単純な経路変更によって実現できる。この事は、押し込みも引き抜きも油の流入・流出方向の変更だけで実現できる事を意味している。圧入の基幹技術である杭の押し引き動作（引き抜き動作と押し込み動作を一プロセスの中で実現する技術）は、油圧発生装置と本体との間の、油の流入・流出の大きなサークルの一部分の経路替えだけで実現する事が出来る。これが杭を押し込むと言う一方向の仕事を瞬時に逆方向の仕事に切り替える事を可能としている。即ち、油圧発生装置からの油の流出量をコントロールしたり、逆流させたりすることなく瞬時に杭に対する発生力の方向を変更する事が可能となっている。



1.3 圧入工法の支持杭造作方法への適用

圧入工法は、優れた鉛直精度と、杭造作荷重の低減（杭周面に働く摩擦をカットする事で実現）によって、既存工法では実現できなかった部位での土留め工事を可能としている。高鉛直精度によって、建築限界ギリギリの部位での土留め施工が可能となり、更に杭の抵抗力を減少させることにより高深度への杭体（通常は矢板）の圧入を可能としている。



鉄道建築限界での土留め施工

圧入工法（杭体に働く摩擦抵抗を低減・最小化する事で、地盤深度への杭体の貫入を容易にする工法）によって、高深度への杭体（矢板）の圧入が可能となっているという事実は、実際の地盤では摩擦抵抗のプロポーションが、杭体の先端に働く先端抵抗力よりも大きくなっている事を示している（摩擦抵抗力が杭体の先端抵抗力よりも卓越的に働いている）。この卓越的に働く摩擦抵抗力を最小化すると、杭はわずかな先端抵抗のみで抵抗することになるため、結果的に非常に小さな力で杭は土中に貫入して行く。この事を、圧入工法は杭を上下動させる事で実現している。



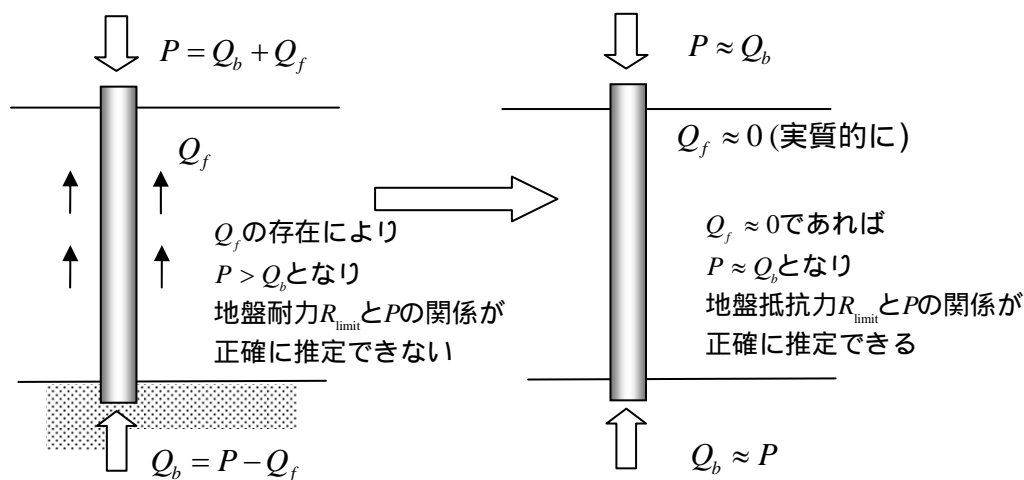
狭隘地土留め施工

土留め施工の場合は杭体（矢板）の長さが決められているため、杭体のコントロールは機械側で行う事となる。即ち、機械の発生力が抵抗力に対して十分に大きい状態で（「発生力 抵抗力」の関係が成立したままの状態）杭体を打ち止める事になる。

施工時に最小化された摩擦力（もしくは積極的に最小化した摩擦力）は時間変化とともに回復するため、抵抗力を最小化した状態のまま打ち止めても、現実的には（鉛直支持耐力を要求されないため）土留めとしては問題とはならない。

この摩擦を最小化させるという施工法は、即ち、杭体の先端抵抗力だけを卓越的に働かす施工法は、土留め壁（構造）造作工法の枠を離れて先端支持杭の造作に非常に有効である筈である。先端支持杭には摩擦は不要であり、むしろ積極的に低減することで、荷重と先端抵抗力の関係が明確となる。この技術を拡大支持層³に用いれば、圧入工法は支持杭（先端支持杭）造作工法となり得る事を示唆している。

³ 2.1 「基本定義」で定義する。



先端支持杭は、先端の支持力のみ依存する杭であり摩擦力を必要としていない。しかし、現実的には摩擦力を無視する事が出来ず、両者の複合が支持力として現れている。これは先端支持力だけを評価しようとした時に（一般的には、摩擦力を無視するという方法であるが）、先端支持力だけを純化出来ず、先端支持力評価の中に暗黙的に摩擦抵抗力が内在されてしまう事で生じる。

仮に摩擦力が非常に小さければ（近似的に摩擦ゼロと仮定出来れば）、先端支持力は純化された状態で抽出出来るが、現実的には摩擦による抵抗力は無視できるほどには小さくはない。このため内在する摩擦抵抗力によって先端支持力の評価が過大評価される危険性があり、杭としては危険側となる可能性がある⁴。

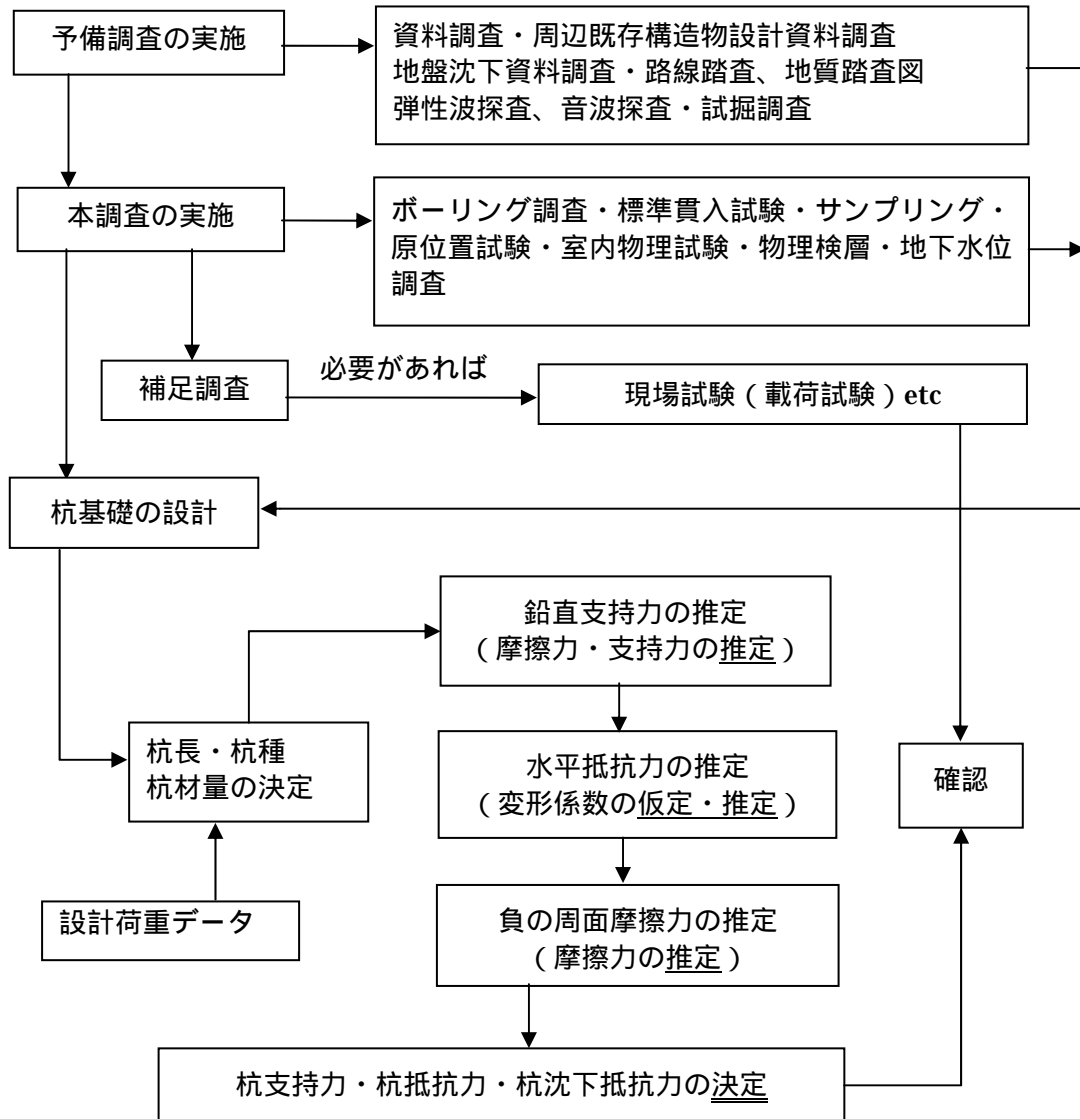
圧入工法を支持杭に適用させて「引き抜きを伴う圧入」を行い、摩擦抵抗を最小化させると、先端支持力評価は近似的に先端抵抗力のみに純化できる筈である。この事は、先端抵抗力の適正な評価とともに、杭としても摩擦による不確定要素を排除する事で安全側の評価となる事を示唆している。

本論は、圧入工法の基幹技術である「引き抜きを伴う圧入」を用いて支持杭（先端支持杭）を設計しようとするものである。同時に支持杭として要求される荷重耐力性能と荷重変動に対応した杭の変形性能を、実測・確定した特性図で提供しようとするものである。圧入工法を用いて支持杭（先端支持杭）を造作し（圧入支持杭とする）、この造作履歴によって圧入支持杭の特性図を作成する。この特性図を用いれば、杭設計は推定値を排除し、確定値で設計可能となるはずである。本論は、杭造作の方法論とともに、杭設計に確定値をフィードバックできる設計スキームを提案するものである。

⁴ 摩擦抵抗力が外力の影響で激減した場合（設計上は問題がない筈であるが）、先端抵抗力も同時に激減する事になる。つまり、摩擦抵抗力のプロポーシオンが先端抵抗力に暗黙的に内包されているため見かけ上先端抵抗力が同時に激減する。即ち、先端抵抗力の過大評価を行ったと言える。

1.4 杭設計の問題点

現状の杭設計を概観し、本論で提案する設計法で改善しなければならない基本的な問題点をフォーカスする。現状の杭基礎設計のスキームは以下の様になっている。



一見問題がない様に見える設計スキームであるが幾つかの大きな問題点が散見できる。

第一の問題点は、杭支持力を推定値のみで処理している事である。この推定値が最終的に決定値になって仕舞う。この決定値に対する工学的保証は、単純に現場試験との比較だけであり、必要がなければ比較無しで処理して仕舞う恐

れがある。現場試験の結果は、設計で決定した値を大きく上回る事が求められており、その差が大きければ大きい程決定値を保証する根拠となっている。

第二の問題点は、設計が一方向だけに流れている事である。この流れには、設計を評価・修正・変更するスキームが存在していない。基礎設計の拠り所は事前調査結果のみであり、この調査は地盤に関わるもので在って、杭や杭基礎に関わるものではない。この杭とは無関係の地盤データだけで杭や杭基礎を決定する方法が現在の設計スキームとなっている。

地盤データ(土質常数等)から算出される杭の支持力は(バネ常数も含めて)すべて推定値である。この得られた推定値に対する信頼性は、50%正しい 50%誤りであると言う事が暗黙の了解事項となっている。設計は設計者の経験に依存しており、単純に数値を評価するだけでは推定値そのものに対する信頼性は確保出来ない。このため、設計者が設計根拠を独自に論理化する事になる。この時に大きく安全側に傾く事になる。数力所のみデータ(地盤すべてを代表する値として仮定)で支持力を推定すると言う漠然とした方法論に対して、設計の信頼性を高めるためには、設計者の経験に依存した設計手法が要求されていると言える。即ち、危険回避が設計に反映されて、杭設計が大きく安全側に傾く事になる。この推定支持力は、現場試験(杭の鉛直載荷試験)によるのみ実耐力との関係が検証出来る。

第一の問題点で指摘した通り、載荷試験は決定値の検証ではなく、推定値を用いた杭設計が現状を大きく逸脱していない事の確認の意味合いとして扱われている。このため、設計荷重(設計支持力以下)が実耐力(載荷試験の結果から推定される杭の許容耐力)を下回っていれば、その差の多寡は問題にされず、むしろその差が大きいくほど設計に信頼性を与えると言う結果になる。載荷試験のデータが設計変更フィードバックされるのは、もしくは設計変更を要求されるのは、実耐力(支持力)が設計支持力を下回った時だけであると言える。

この二つの問題点は杭基礎設計の根本的な問題であり、欺瞞のない設計を行うためにはこれらを全て解決しなければならない。即ち、推定値を支持力決定の根拠とするのではなく、確定値を支持力決定のスキームに組み込む必要がある。更に、地盤の直接的なデータが材料設計・寸法設計・耐荷重設計等に対して常にフィードバック出来る設計スキームが、存在しなければならないと言う事を意味している。

1.5 圧入支持杭設計法への展開

杭設計の現状の問題点を解決するためには、二つの点が解決されなければならない。一つは、推定値ではない確定値で杭設計を行うと言う点。もう一つは、杭の特性データ（杭の支持耐力、変形性能）を常に設計にフィードバックする必要があると言う点である。

この二点を満足させるためには、第一には支持力の確定値を持った杭が造作出来る必要があり、第二にはこの確定値が杭の特性（抵抗）として抽出出来る必要がある。同時に、この杭抵抗の特性値が杭施工時に直接測定される必要があり、この杭の特性データが設計にフィードバック出来る形でまとめられている必要がある。これら二点が満足されて初めて、土質だけの調査であった事前調査結果が圧入支持杭の事前施工のデータによって補強され、杭の支持耐力と変形性能を含めた杭基礎の基本設計データとしてまとめられて、設計にフィードバック可能となる。

圧入工法は、工法の出自そのものが摩擦を低減させて杭を土中に貫入させる工法であり貫入力と抵抗力の関係が一意的に決定できる。この事は、杭の抵抗力が杭の先端抵抗力に特化出来、かつその抵抗力が杭の造作荷重に一致する事を示している。この事は、支持力確定値を持った杭が造作可能である事と、この測定データを設計にフィードバックする事で、推定値を排除した杭基礎設計が可能である事を示唆している。同時に、この測定データが施工をコントロールするベンチマークの役割を果たす事になり、支持力優先の杭施工を管理出来る事を示している。

圧入支持杭設計法は、支持力確定値を持った杭を造作する工法的な方法論とその造作過程で得られた杭の特性データを杭の固有の特性として取り扱う事で成立している。この杭の特性データを杭基礎設計の設計データに用いる事により、設計から推定値を排除する事が可能となる。この事が、基礎設計の信頼性を高める事になり、更に、杭の特性データ（支持力特性図）を杭施工の基準値（ベンチマーク）とすることで、杭施工そのものも信頼性を向上させようとするものである。

第2章 圧入支持杭の造作原理 および特性図の作成

本章では、圧入支持杭の造作方法について考察する。前章での問題提起は、支持杭の基本性能（支持耐力及び変形性能）を確定値としなければならないと言う事であった。この基本性能を確定値とするためには、杭の造作方法そのものを再考する必要がある。

圧入工法が持つ優れた摩擦低減能力と杭を自在に操作出来る油圧機構と発生力（杭に負荷される軸力）を直接数値管理出来る圧入機の特徴を生かすと支持杭を造作する最適の工法としての圧入工法が見えてくる筈である。即ち、圧入機からの発生力を、摩擦を最小化するプロセスによって先端部分での杭抵抗力との間の純粋な対応で捉えると、杭の支持力は発生力側の圧力変化だけで観察できることになる。この事が圧入支持杭造作方法の根幹の技術となっている。

本章は、用語の基本定義と用語の運用の拡大もしくは再定義を行う。これらの基本用語を用いる事により圧入支持杭の造作方法を検討する。この杭造作によって得られた直接測定データが、杭の特性図を構成する事になる。

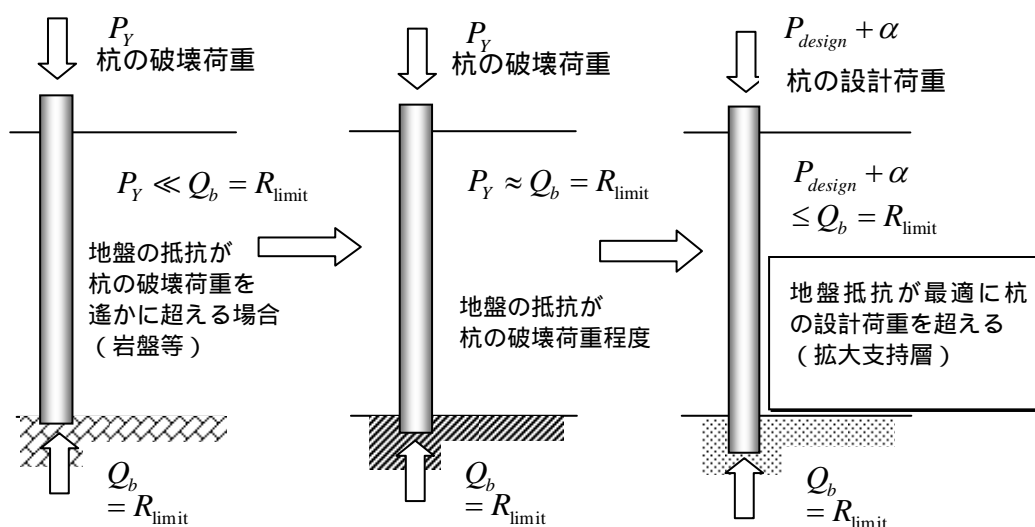
2.1 基本定義

杭と地盤の関係を明確に規定するためには、用語を明確に定義し直す必要がある。杭と地盤だけの関係で用語を再定義する。

「支持層（拡大支持層）」

支持層とは、杭を支持する層である。杭に発生する軸力以上の抵抗性能を持つ層であり、かつ変形抵抗能力は、杭の変形性能を上回る必要がある。この二つの能力によって、杭に伝わる軸力は、地盤を破壊することなく、地盤を過大に変形させることなく、杭の設計弾性耐力の限界まで抵抗する事が出来る。この時、杭上部に載荷される外力は、地盤の抵抗力によって杭の内部応力だけで抵抗できる事になる。

この支持層の定義運用の範囲は、杭基礎の用途によって異なる。支持層の支持能力は運用荷重によって変化し、唯一支持能力を規定できるものは、抵抗能力と変形能力である。即ち、地盤は上部荷重との関係で基礎地盤の（支持層の）性能と能力が変化し、上部荷重強度以上の抵抗能力および変形能力を有していれば、地盤は荷重を支持できる能力を持つと評価できる。



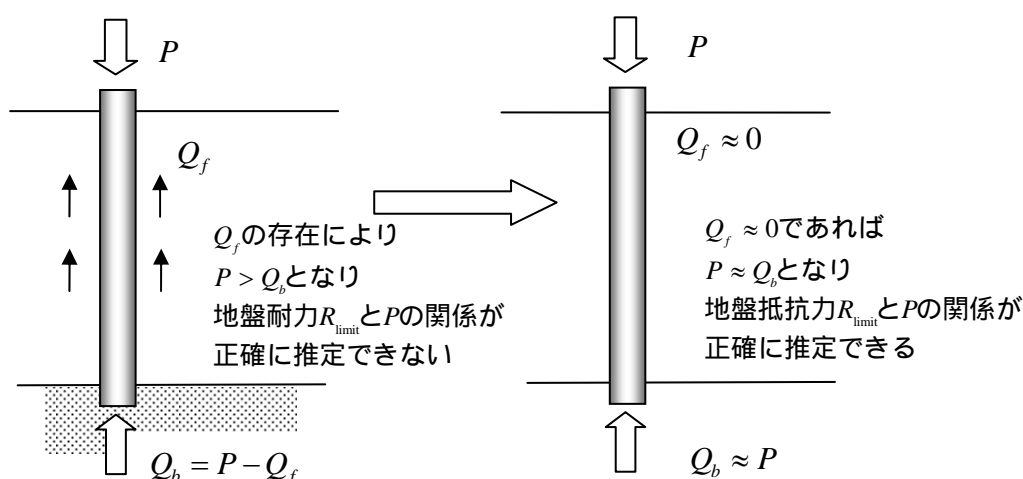
支持層の定義を以下とする。

『支持層（拡大支持層）とは、上部荷重強度によって発生する杭の設計軸力に対して、接触する地盤が設計杭軸力以上の荷重抵抗能力を有し、かつ荷重変形抵抗能力が杭材量の設計変形抵抗以上である層とする。設計荷重強度を遙かに上回る抵抗力を支持層に求める必要はなく、支持層の定義範囲は、運用荷重によって変化する。』

「支持杭（先端支持杭）」

支持杭とは支持層に支持された杭であり、この支持層は先の定義に従い杭の荷重耐力性能以上の抵抗力を持った層である。従って、支持杭の支持能力は支持層の能力と無関係ではなく、常に、上部荷重強度と支持地盤の荷重抵抗能力の関係から決定される。支持杭の基本性能は、上部荷重強度をロス無く支持地盤に伝えることであり、更に、この荷重強度によって杭が破損しない事が必要である。支持杭の能力を正しく評価するためには、軸力のロスのない伝達機能と軸力抵抗能力の評価が必要になる。

摩擦力のような不確定さを内包させたまま杭を評価すると、軸力伝達評価に曖昧さが生じる事になる。支持層と杭の間の軸力伝達評価を正確に行うためには、摩擦力を排除するか、もしくは摩擦力を正確に測定・確定する必要がある。摩擦影響を控除（排除）し、純粋な軸力を杭先端部で評価する事で初めて杭は安全側にも危険側にも不確定に振れることなく適正に評価されることになる。



しかしながら、杭周面に働く摩擦影響を正確に測定することは殆ど不可能に近い。摩擦力が存在する限り、正確な支持力は測定出来ない。このため、支持力評価が曖昧なものとなっている。摩擦力は正確に測定できないながらも、摩擦影響を最小化する事は可能である。摩擦力がゼロに近似できると、支持杭に働く軸力は減衰せずに杭先端に伝達する。支持杭の地盤との力学関係を正確に記述するためには、摩擦力の影響が最小化している事が望ましいと言える。

支持杭の定義を以下とする。

『支持杭（先端支持杭）とは、支持層の上に造作された杭であり、上部荷重をロス無く地盤に伝えることが出来る杭である。杭は、上部荷重強度によって発生する内部応力によって破壊しない強度を有する事が求められる』

「圧入支持杭」

圧入支持杭は、圧入工法によって造作された支持杭であり、先の支持杭の定義を満足する。杭周面の摩擦力を可能な限り低減させ、杭の抵抗力を杭先端の抵抗力のみに依存・特化した杭であり、かつその大きさは測定可能である。

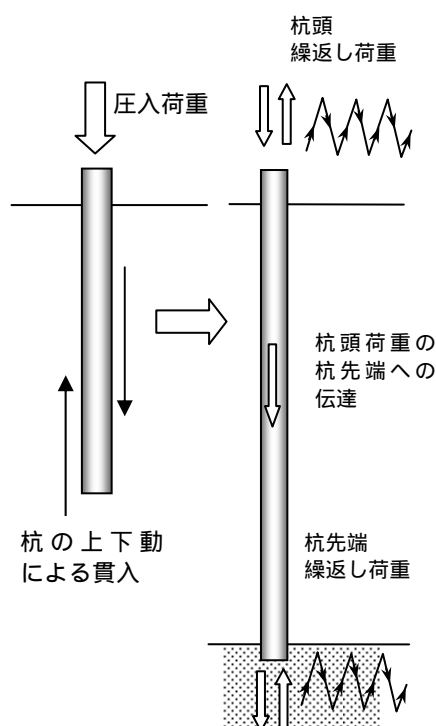
圧入支持杭は杭材量の定義ではなく、杭施工法の定義でもあり、その施工法によって実現される支持杭機能の特徴を統合した定義となっている。杭は、上下動を繰り返しながら（「引き抜きを伴う圧入」を繰り返しながら）造作される。この過程で杭の周面に働く摩擦力は最小化されて、ほとんど無視できるオーダーとなる。摩擦影響が懸念される地層ほどこの上下動による杭造作が有効になる⁵。

摩擦を最小化する事によって杭に作用する軸力は、土中分散することなく先端部分に伝えられる。この先端軸力によって杭が造作されるため先端抵抗力と杭に作用させた軸力の関係が、ほぼ一対一に対応することになる。

杭が最終到達点（拡大支持層）に達した時、圧入荷重は最大点に達する。この圧入荷重を杭の先端支持力とするために繰返し荷重を先端地盤に負荷する。この繰返しによって最大圧入荷重は支持力として安定する。このプロセスが圧入支持杭を造作する時の最大の管理項目となる。

圧入支持杭の定義を以下とする。

『圧入支持杭とは、圧入工法で造作される支持杭であり、杭を造作する過程で杭を上下動させて杭周面の摩擦力を最小化させた杭である。杭に働く軸力は直接杭先端の地盤に作用し、その抵抗力は測定可能である。この先端抵抗力は、杭先端に荷重を繰返し負荷することで固定でき、その過程で杭先端部の地盤は弾性性状を示す。このプロセスを含めて圧入支持杭とする。』



⁵ 摩擦力の源泉は、杭拘束力（土圧）と土粒子の構成に依存しているため、この上下動（打ち抜き圧入）による杭造作が地盤の自立性を促進する事になる。即ち、摩擦抵抗が懸念される層ほど自立性が高いため、この打ち抜き圧入によって摩擦が最小化される。

「繰返し荷重と弾性化（杭先端地盤耐力の改善）」

地盤強度（地盤抵抗力）が、杭材量の性能よりも上回っている場合は、地盤は変形も抵抗力も杭材量を上回ることになる。この層の上に杭が乗れば支持杭となる。岩盤のような一体の個体であれば、杭がこの層に到達したことを確認するだけで地盤耐力 > 杭耐力が成立し、単純に支持杭となる。

先に支持層を設計荷重強度と地盤抵抗力の関係だけで定義した通り、支持層は岩盤（岩盤に相当する層を含む）である必要はなく、杭先端部の杭材と地盤の力学関係だけで定義できる。支持層としての運用範囲は、岩盤のみを支持層とするのではなく上部荷重によって決定されることになる。

砂質地盤のような粒子集合体の場合は粒子間空隙を粒子が時間変化に伴って移動する。このため、粒子の配向替えが終了するまでは荷重抵抗力は安定しないと言える。即ち、杭がこの層に着地しただけでは無条件に安定状態とは言えず、将来的に沈下する危険性を伴うことになる。岩盤以外を支持層として運用するためには、杭を打つ、杭を層に着地させる動作の他に粒子の配向替えを促進させ、地盤の抵抗力が安定し、かつ設計荷重強度を上回る事を確認する動作と方法が必要となる。

砂質地盤であれば振動が最も効率的にこの配向替えを促進する。しかし、杭の土中深度が深い場合、振動負荷による方法は副次的悪影響を及ぼす事になる⁶。

土粒子（砂粒子）は、点接触で構成されている。このため荷重に対する変形は固体変形ではなく、粒子群の接触面の移動による外郭構造の体積変化や相対位置の構成変化によってもたらされる。任意の荷重方向に対応して土粒子（砂粒子）は粒子移動を行い、配向替えの後にその方向に対して安定状態になる。即ち、振動を加えなくとも荷重によって、粒子移動は生じる事になる。荷重に抵抗する形で生ずるこの土粒子（砂粒子）の配向替えは、振動のように急激にかつ劇的に行われるのではなく、ゆっくりと長時間をかけて行われることになるが、最終的には安定した粒子構成となる。

土粒子に与えられる荷重は、動的荷重である必要はなく静的に負荷されるだけでよい。土粒子は常に荷重に対して安定状態となるために粒子移動を行っており最終的に安定する。逆に言えば粒子移動がなければ安定状態であると言える。この事から静止荷重に対して安定であれば粒子移動は生じない。砂粒子は、時間依存性が小さい材料であるため荷重に対する粒子移動もしくは体積変形が短時間で行われる。これを更に加速するために繰返し荷重の負荷が有効である。

⁶ 杭振動は先端には効率的に伝達せず、中間で多くを消費する。このため振動エネルギーは、杭先端地盤の粒子の配向替えよりも中間地層の締め固めと、更に振動の水平方向への伝搬を生じ、地盤沈下や遠方での振動問題を引き起こす。この方法は高効率であっても採用にはリスクを伴うことになる。

圧入支持杭はこの先端土粒子構成に直接的に荷重を負荷するものである。振動に頼らずに、土粒子の再配列、再配向を鉛直荷重だけで実現するものであり、この鉛直荷重を静的に繰り返し載荷する事で実現出来る。圧密沈下のように単一荷重を対数時間掛けるのではなく、荷重を繰り返すことによって時間加速させようとするものである⁷。

繰り返し荷重の定義は、以下とする。

『繰り返し荷重は、圧入支持杭造作の最終段階に杭の先端に負荷する地盤の抵抗力増加のための荷重である。荷重は圧入最大荷重の近傍値を採用し、荷重昇圧、最大値到達、荷重リリースの繰り返しで構成される。このステップの繰り返しは、先端地盤の土粒子の配向が変化し安定するまで継続する』

地盤耐力は、繰り返し荷重によって変化する。繰り返し荷重によって杭先端部分の地盤に残る残留変位分を除去出来ると同時に、繰り返し荷重の負荷によって積極的に土粒子の配向替えが促進される。この過程で杭下地盤は、弾塑性状態から弾性状態へ移行していき、地盤耐力が大幅に改善される⁸。この地盤耐力は、サンプリング等では確認出来ない地耐力であり、杭に荷重を繰り返し載荷する事によって初めて可能となる。これを杭先端地盤の弾性化と表現する。

弾性化の定義は以下とする。

『杭先端地盤の弾性化は、繰り返し荷重の負荷によって達成される。この荷重は土粒子を構成している外郭構造に積極的に作用し、土粒子群の配向替えを促進する。配向替えが完了すると、土粒子構造は、繰り返し荷重の範囲に対して弾性的に抵抗できる。この状態を弾性化状態とする』

⁷ 物体は、荷重の繰り返しの方が、同一荷重下にあるよりも疲労の度合いが大きい。繰り返しによって内部応力を解放して更に載荷する事で疲労が加速する。この原理により、振動を用いずとも繰り返し荷重だけで土粒子（砂粒子）の配向替えが促進される。支持層に到達した杭は、（支持層が粒子構成の場合は）繰り返し荷重を加えることで杭先端地盤が改善され、土粒子の骨格構造によって抵抗する見かけ上の抵抗から、土粒子の配向替えが終了した真の抵抗力となって荷重抵抗できる。

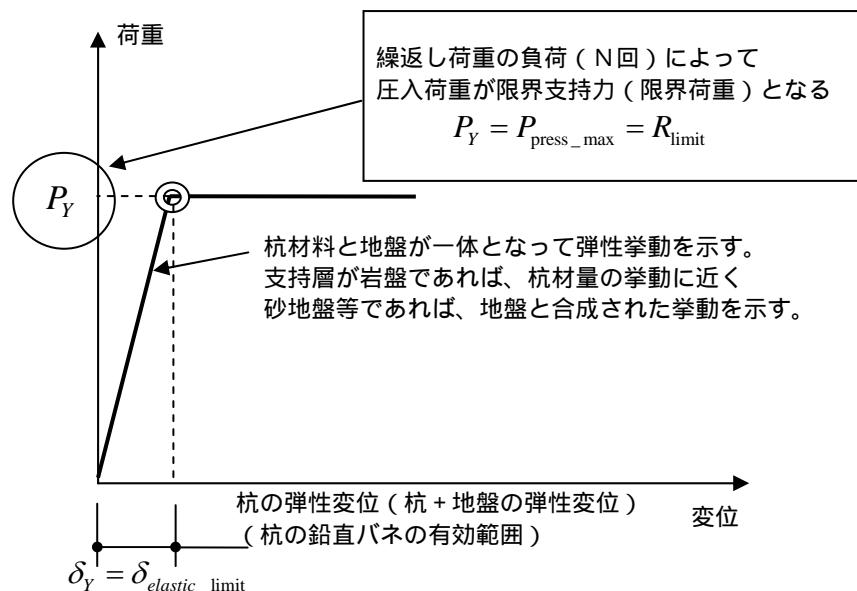
⁸ この事は、計画支持力に満たない層であっても砂層であれば繰り返し荷重の原理が生かせる事を示唆している。砂質地盤の強度は粒子強度に依存するのではなく、粒子配列と粒子間隙に依存している。このため繰り返し荷重による方法を用いれば、粒子間配列の配向替えを促進でき、負荷荷重に対して抵抗できる土粒子の抵抗配列に改善することが出来る。繰り返し荷重時の杭の沈下は、杭下の地盤（砂質地盤）の砂粒子の配向替えに伴う空隙の減少と捉えることが出来る。

「圧入支持杭特性図」

圧入支持杭は、摩擦を低減する杭造作方法と、繰返し荷重によって杭先端部分に残存する残留変位を取り除く、もしくは積極的に杭先端地盤を改善するプロセスによって造作される。この過程で造られた杭は、杭頭に作用する外荷重による軸力を殆ど純粋な形で杭先端に伝達する事が出来、更に杭先端の地盤はこの軸力に対して殆ど一対一に抵抗する。このため荷重と抵抗の一致、杭変位と地盤変位の一致が見られる事になる。

圧入支持杭特性図は、この「荷重 - 変位」の関係を示している。杭に働く荷重と地盤抵抗力が一致することにより荷重増分に対する抵抗力の増分が一致し、両者は全く同一のものとなる。更に、変位も同一となる事で杭材量と地盤が一体となって荷重に対する変形抵抗性を示す事になる。

この二つの同一性により、「荷重 - 変位」の関係は、杭材量の材料特性にほぼ対応した形で示すことが出来る。更に、この同一化された関係は、杭を造作したときの荷重値（圧入最終荷重）まで継続する。この値を超えたとき、地盤は降伏し始める。



杭一本ごとに定められる圧入支持杭特性図の概念図

圧入支持杭特性図は、圧入最終荷重（繰返し荷重とほぼ同一）までは地盤の抵抗特性は杭材料の弾性性能を示し、この荷重以降は地盤が降伏する。このため、この荷重点を杭の降伏点として捉えることで成立している⁹。

杭は、外部荷重に対して杭材量の弾性範囲のみで設計している。従って、圧入支持杭特性図で示される杭の弾性範囲（杭材量の弾性範囲であり杭先端地盤の弾性範囲でもある）は、杭頭荷重の設計荷重が、特性図に示される弾性範囲以内であれば、設計荷重に対して抵抗値が完全弾性挙動を示すことを保証していると言える¹⁰。

圧入支持杭は、目標深度もしくは拡大支持層となり得る地層に到達した時の荷重最大値を杭の抵抗値（先端支持力）としている。この荷重を繰返し荷重で固定することにより最大支持力保証値としている。即ち、この荷重を地盤の限界荷重として捉える事になる。

圧入支持杭特性図の定義は以下とする。

『圧入支持杭特性図は、杭先端到達層での杭の限界荷重と限界変位を規定している。この限界荷重は、杭が支持層（目標とする地層）に到達したときの最大圧入荷重（圧入最終荷重）であり、この荷重は同一荷重を繰返し負荷することで固定される。この値を杭の先端支持力＝杭の限界荷重とする。更に、繰返し荷重によって杭先端地盤を弾性化させたため、「荷重 - 変位」曲線は限界荷重まで線形となる。

尚、この特性図は、圧入支持杭一本毎に作成され、特性図を構成する限界荷重（杭の弾性範囲）と限界変位（弾性変位の限界値）を圧入支持杭の基本常数とする』

⁹ 実際の地盤降伏点は、この荷重点を超えたところに存在する

¹⁰ 地盤の弾性範囲は、杭材量の弾性限界に等しい必要はなく、設定荷重に対して弾性挙動を示すだけでよい。従って、設定荷重を超えたところで地盤は塑性状態になっても構わない。杭としての弾性を保証するのは、地盤の弾性範囲、即ち設定荷重までの地盤の弾性である。

「BM杭（ベンチマーク杭）」

杭の基本常数（鉛直支持耐力及び変形性能）を設計にフィードバックするために圧入される支持杭であり、設計荷重の検討、杭サイズ・杭長・杭種・杭材量等の検討のために設計初期に打設される圧入支持杭である。

BM杭は構造物の仮設計終了時点で計画され、現場で収集されたデータとそのデータを基に作成される支持杭特性図が直ちに設計にフィードバックされる。この時点で初めて杭基礎の設計が開始されまた決定される事になる。

BM杭の施工は、予備調査・本調査で推定される地層構成及び想定支持層の確認の意味合いを持ち、杭施工の軸力の履歴から地層と杭抵抗力の関係が明らかとなる。支持杭としての基本常数算定の他に地質調査データだけでは分からない地盤の微妙な不陸や構成が杭の抵抗として記録される。

BM杭によって杭設計が確定された後は、BM杭が施工基準杭となる。全ての施工杭はBM杭の施工データを管理値として施工される事になる。従って、BM杭は、杭の特性図作成だけではなく施工管理データも併せて収集する事になる。施工杭がBM杭に準じて施工されるためには、支持層に至るまでの杭軸力変化の履歴、支持層に到達した時の最大荷重、最大荷重を固定するための繰返し荷重の回数及び杭の弾性戻り量のデータ等が採取されなければならない。

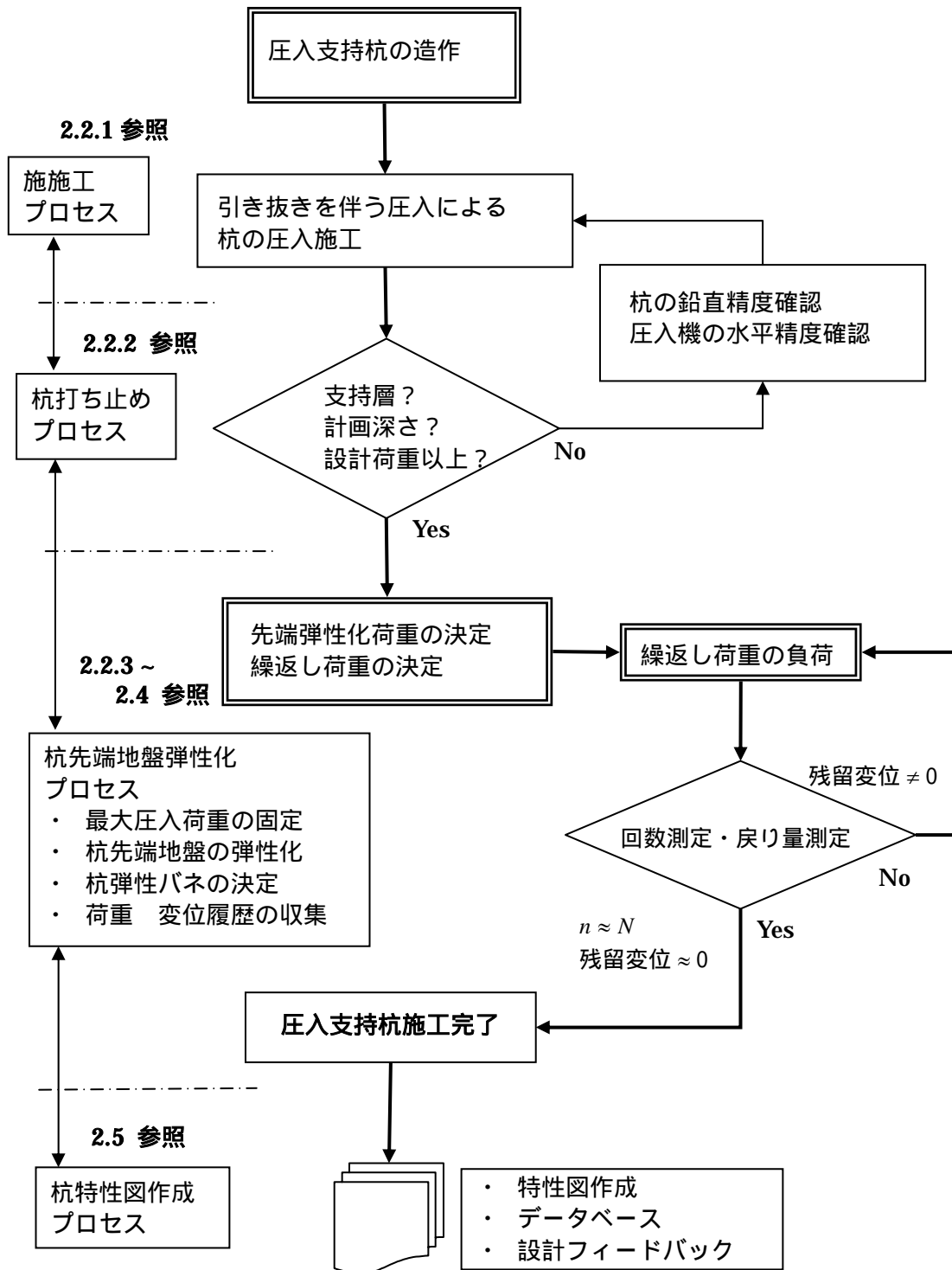
BM杭の定義を以下とする。

『BM杭は、設計の初期に打設される圧入支持杭であり、収集されたデータを設計にフィードバックするために設計・計画・施工される。BM杭によって作成される圧入支持杭特性図は、杭基礎設計の根拠を与え、この値を用いて杭基礎は最終決定される。

更に、BM杭は、施工基準データの収集も併せて行い、これらのデータ（拡大支持層の大凡の深さ、支持層に至る地盤の抵抗、最大荷重、繰返し回数と杭の弾性戻り量の関係等々）を施工管理データとすることで全ての施工杭に対して同一基準を設定出来る。BM杭は、設計フィードバックとして施工基準値として定義出来る』

2.2 圧入支持杭造作方法

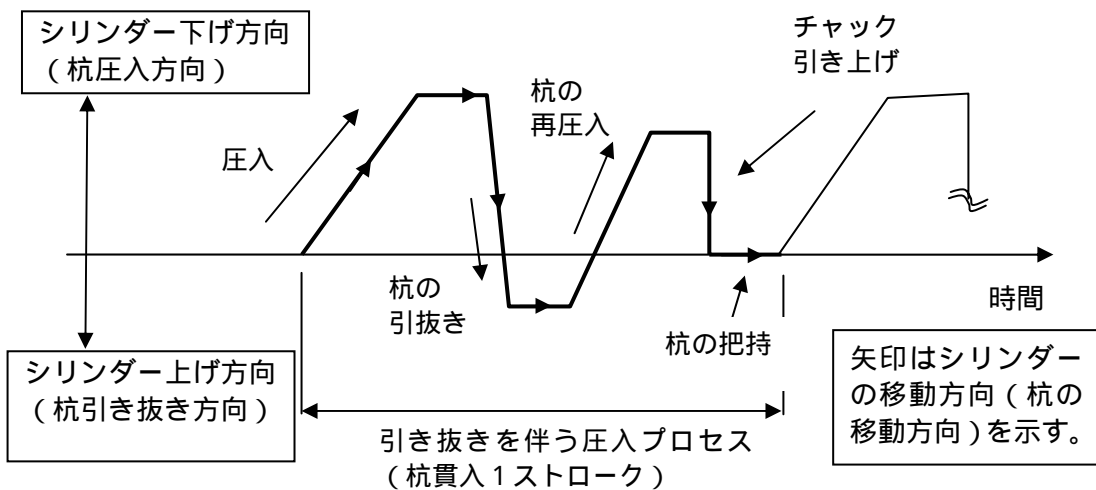
杭の造作は、以下のプロセスで構成される。



2.2.1 杭の圧入（「引き抜きを伴う圧入」）

杭に働く摩擦力を低減させるためには、押し込みと引き抜きを交互に繰り返す必要がある。圧入の初期に於いて杭の全抵抗（杭先端抵抗力+杭周面摩擦力）は圧入機から発生する圧入力に比べて遙かに小さい。このため引き抜き動作は不要と考えられ勝ちであるが、摩擦影響は杭長に対して積分されていく。このため、杭深度にともなって摩擦力が急増する。結果的に杭先端に伝達されていく軸力が急激に減少していくことになるため徹底的に初期の段階から摩擦低減を計る必要がある。即ち、所期の目的である先端抵抗のみに依存する杭を造作するためには、圧入初期の段階から摩擦低減を計っていかなければならない。

杭の打ち抜き過程は、下図によって示される。

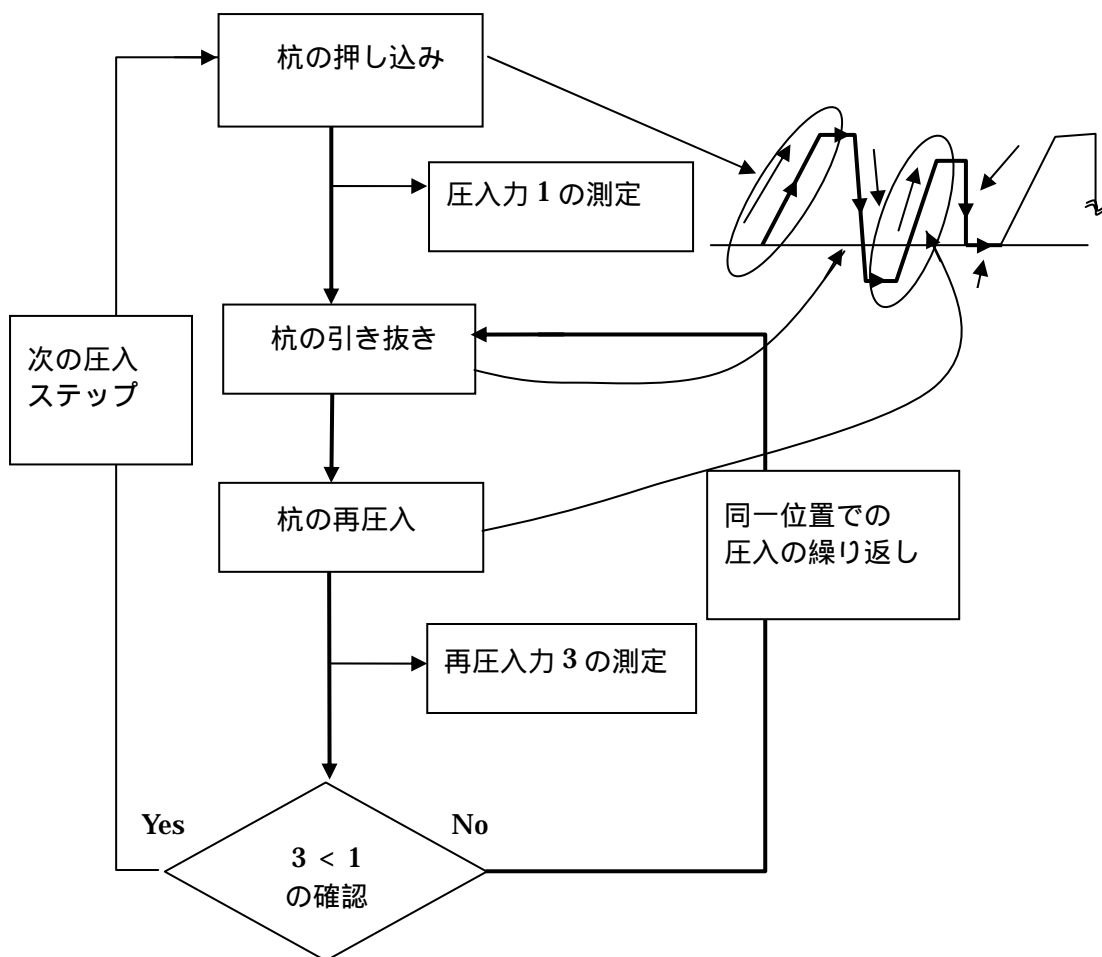


圧入のプロセスは、圧入機のシリンダーのストロークを1サイクルとして繰り返される。最初の押し込みを1ストローク分行ったときの油圧の変化は1で示される。この時の油圧値（圧入力）は杭の全抵抗を示している。このままの状態を杭を1ストローク引き抜く過程が2で示される。この過程で杭は同じ経路をたどって引き抜かれるため杭は自重と摩擦力のみで抵抗する。摩擦が静的に働いている場合は、2の油圧力（引き抜き力）は1の油圧力（圧入力）よりも小さい¹¹。

¹¹ 土質によってはの方が大きな油圧力を必要とする場合がある。粘性地盤に見られる傾向である。原因は、ア圧入時に杭周りの地盤が圧入方向に変位し楔のように抵抗力に方向性が生じる、イ杭と地盤の接触精度が良すぎるために引き抜き時に先端空隙が真空になる、ウ引き抜きによるサクシオン効果で土中水を吸引し瞬間的に杭拘束力が働く等が考えられるが、本論では特殊地盤を考慮せず、一般論として > とする。

次に1ストローク押し込むと杭は1のプロセスで到達した位置に杭は納まる。この時の3の油圧力(圧入力)は、1のプロセスでの油圧力よりも小さくなる¹²。

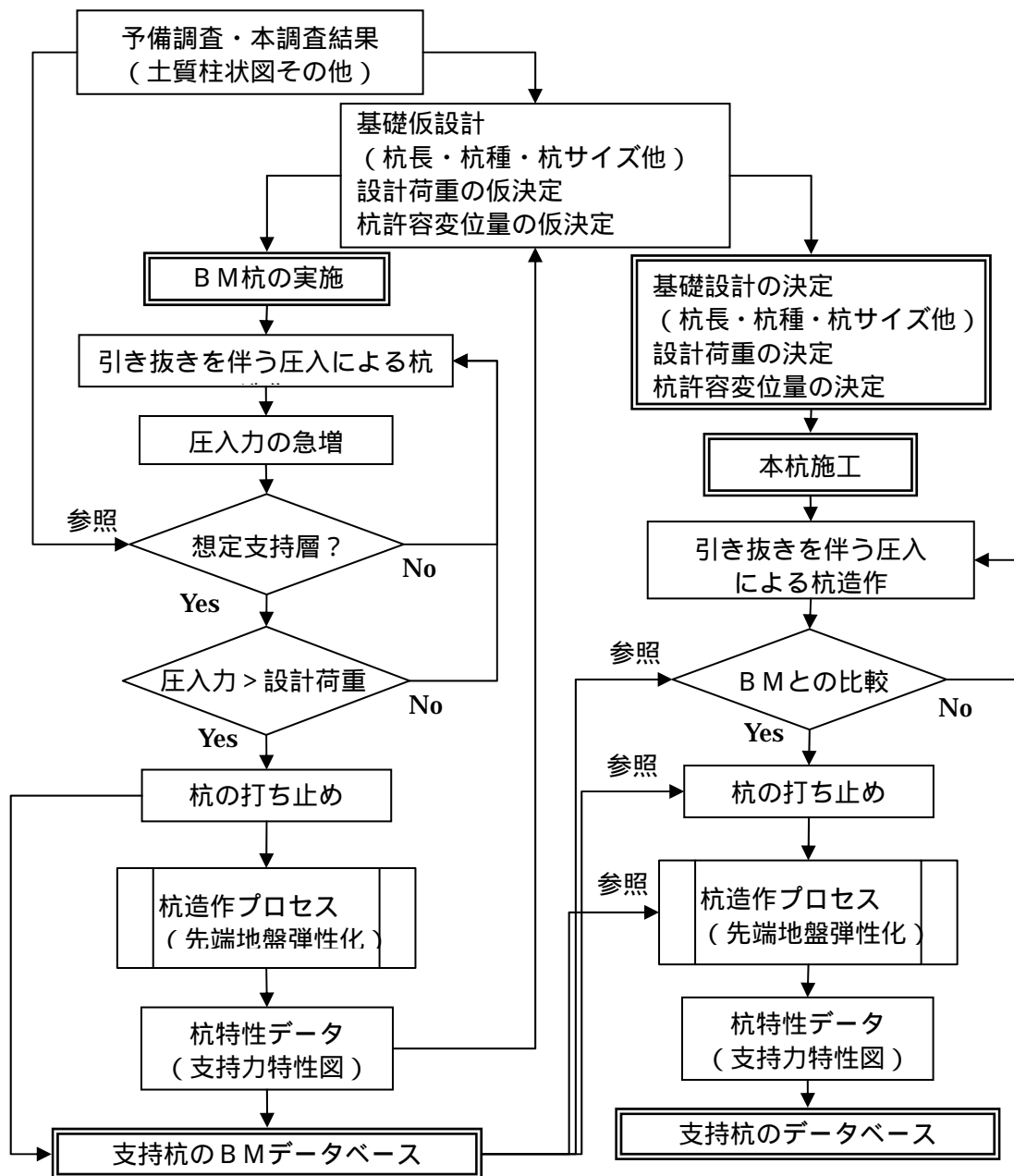
この $3 < 1$ を確認することで、「引き抜きを伴う圧入」プロセスによる摩擦抵抗力の減少が確認される。再圧入した杭は、常に最初の圧入力を下回らなければならない、これを確認することで、打ち抜きの1プロセス(杭貫入1ストローク)が完成する。



¹² 再圧入 が よりも大きくなる場合は、杭が同一経路を辿っていない事を示し、この時点で のプロセスからのやり直しが必要となる。

2.2.2 打ち止め管理

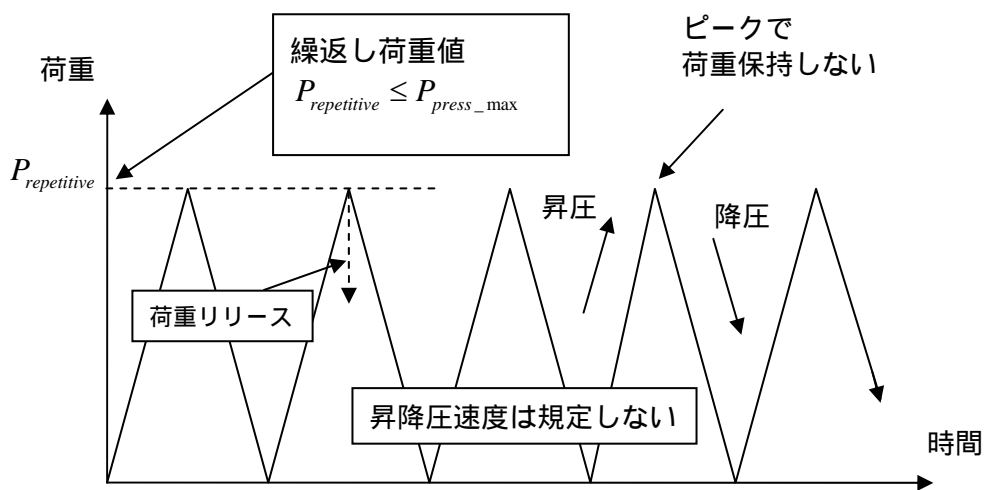
繰り返し過程で打ち抜きされた圧入支持杭は、支持層に到達すると圧入力
の急激な上昇が観察される。予備調査もしくは本調査によって得られている土質
柱状図等のデータからこの油圧上昇が支持層到達によってもたらされたものか
別の原因（予備調査で想定出来なかった地層もしくは転石等）によるもので
あるかを判断出来る。この時得られた圧入力設計荷重を上回っておりかつ地質
データから支持層として有効であると認められる層厚（杭径比で10倍程度）
であれば、この層に杭を造作しても支持杭として機能出来ると判断出来る。



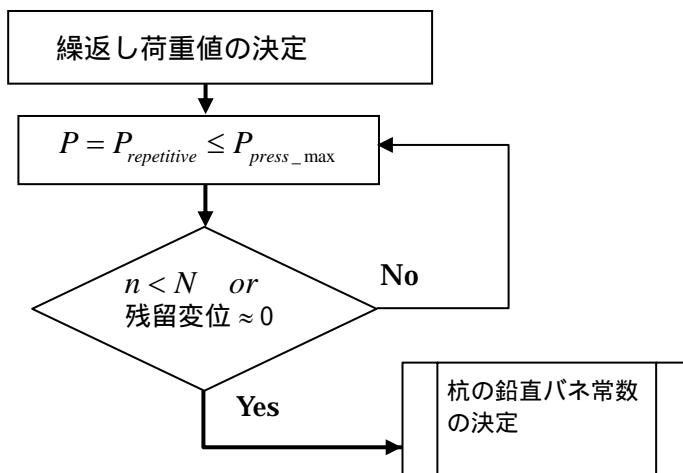
2.2.3 先端繰返し荷重

杭が支持層に達した事を確認した後に、繰返し荷重を負荷する。2.1 で定義したように繰返し荷重は、圧入最終荷重同等もしくは若干下回る荷重値での昇圧、降圧の繰り返しである。荷重を保持せずに単純昇降圧を繰り返す。これによって杭先端地盤の土粒子（砂粒子）の再配列が加速される。

粒子の配向替えが行われると荷重方向に対する抵抗力が増大するため地盤の変形性能が向上する。これは繰返し荷重によって地盤が弾塑性状態から弾性状態に変化した結果である。



繰返し荷重値のみを管理項目とし、昇降圧の速度は規定しない。ピークで荷重を保持せずに直ちに降圧を開始する。この降圧は荷重リリースでもよい。



荷重を繰り返すことが重要であり、荷重保持する必要はない

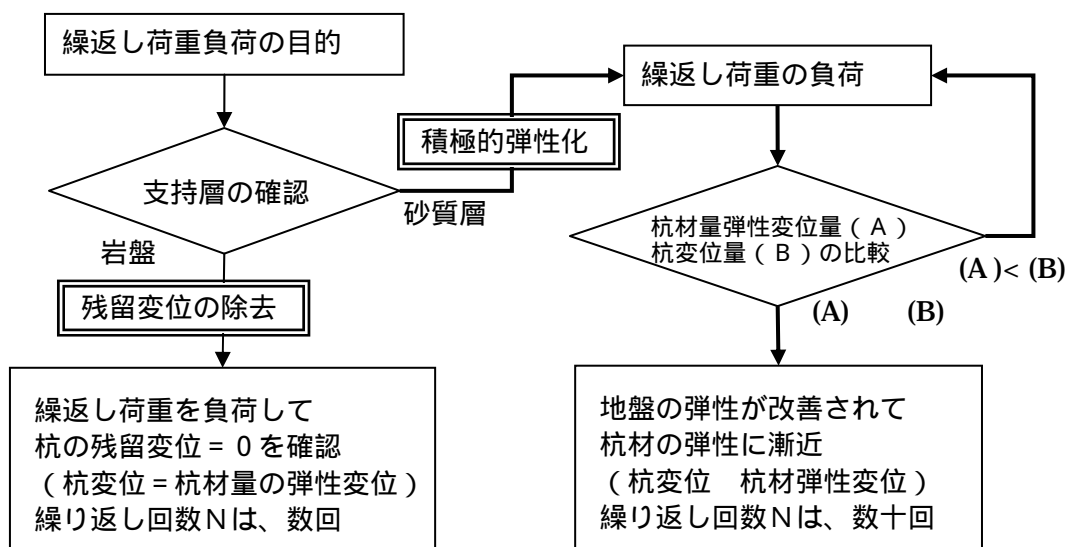
繰返し荷重負荷は、規定回数の繰返しか、残留変位の確認を以て終了する。

2.3 繰返し回数Nの決定と残留変位の確認

繰返し荷重を負荷する目的は、杭先端に残留する変位をゼロにする事と、繰返し荷重を負荷することによって先端地盤の抵抗力を改善する事の二点である。これら二つの目的は、先端地盤（支持層）の性状によって異なる。岩盤のような優良な支持層であれば、抵抗力を改善する必要が無く、残留変位のみをゼロにすればよい。しかしながら、支持層としては無条件に考えられない層であってもその層が十分な層厚を持ち（杭径比10倍程度）かつ砂質層であれば、先端支持力改善の余地がある。即ち、N値が10程度であっても層厚が大きければ、積極的に地盤抵抗力の改善を図る事が出来る筈である。

支持杭をどの層に貫入させるかと言う問題は、設計初期に検討すべき問題ではあるが、「2.1 基本定義」で行った定義で支持層を杭材料の許容弾性範囲程度と規定したことにより、支持層として活用できる層は格段に広がることになる。即ち、圧入最終荷重が設計荷重よりも十分に大きく¹³、かつその層厚が十分に大きければ、上部荷重との関係で支持層となり得る。例えN値が小さく（例えN値が10程度）現行基準では支持層と認めがたい層であっても砂層であれば、繰返し荷重による先端地盤の抵抗力改善が有効であり、荷重と抵抗力の関係で捉えれば拡大支持層とする事が出来る。

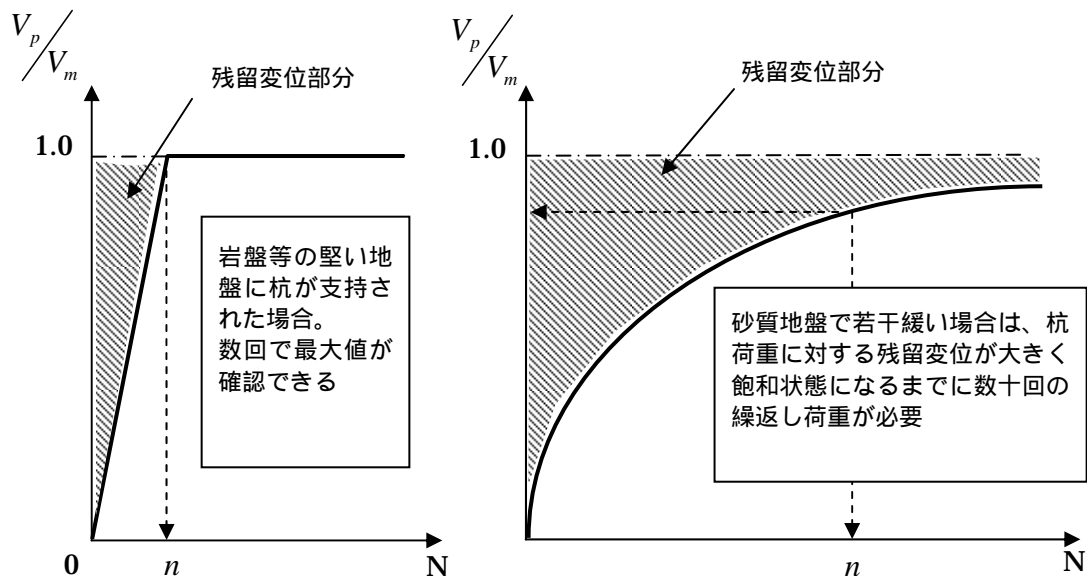
この程度の砂地盤であっても繰返し荷重を負荷すると、負荷荷重までの荷重範囲で地盤の弾性性状が見られる。この時の地盤弾性は杭の弾性に漸近して行き最終的には杭材量の弾性とほぼ同一になる。即ち、拡大した支持層の定義に合致することになる。



¹³ 圧入は、先端地盤を圧縮しながら進行するため、地盤のサンプリング等のデータでは想定できない地盤の抵抗力を、実際の圧入抵抗として観察することが出来る。

杭の弾性（地盤の弾性）は、土質サンプリングを行うことなく杭頭での「荷重 - 変位」の関係だけで表現できる。杭頭で観察される弾性戻り量が弾性変位となった時に、杭が材料と地盤を含めて弾性化したと考えられる。岩盤層のように明らかに杭の剛性を上回っている場合、荷重に対する変位は、杭先端地盤の残留変位（杭施工時に生じた残留変位）が除去された段階で先端が固定端となり、杭材量（杭体）だけの弾性変位が観察される。この時の杭の弾性挙動は、杭材量の弾性挙動そのものとなっている。

一方、砂質地盤の場合は、杭先端地盤の残留変位が除去されても変位は進行する。これは、先端地盤の土粒子（砂粒子）が荷重に対して粒子の集合体（土粒子で構成される外郭構造）として抵抗すると同時に間隙水圧でも抵抗しているためであり、荷重に対して変位が素直に追従して行かない。このため繰り返し回数が岩盤に比べて多くなる。



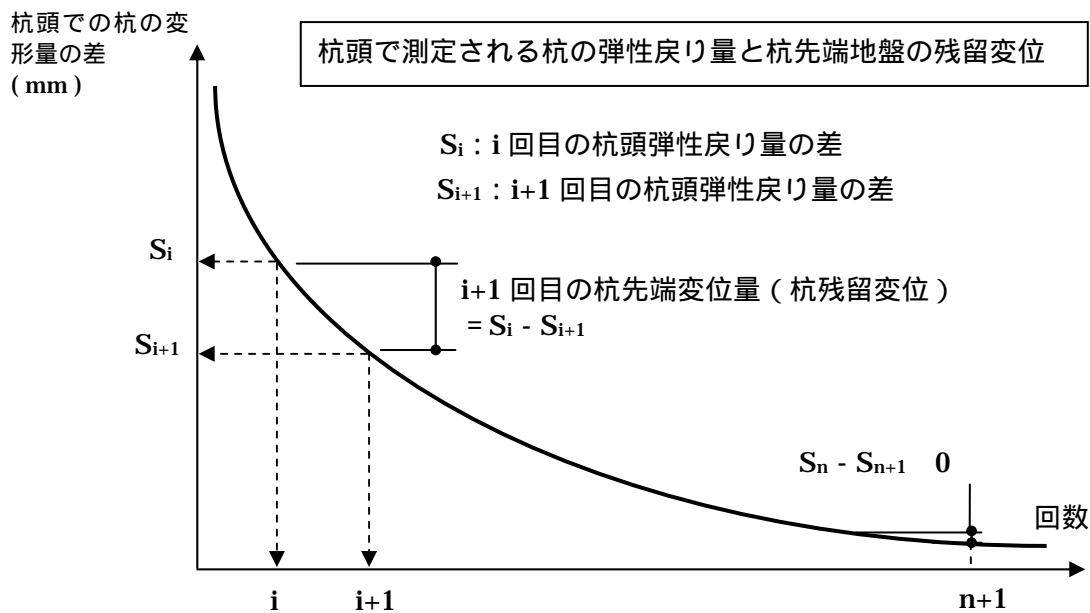
便宜上、杭材料の繰り返し荷重に対する弾性バネ値を V_m 、杭全体の荷重に対するバネ値（杭材バネと地盤バネの合成バネ）を V_p とすると、杭のバネ値は、荷重に対して V_m に近づいていく。地盤弾性（弾性バネ値）が杭材量の弾性よりも遙かに大きくとも、杭頭での荷重に対する杭のリアクションは、杭材のバネ値のリアクションを超えることはない。即ち、繰り返し荷重におけるバネの最大値は杭材量のバネ値が支配する。このため、この比の最大値は1となる。岩盤ではほとんど数回で最大値になるが、砂質地盤ではゆっくりとこの最大値に近づいていくことになる。バネ比がある値¹⁴となった辺りから微増状態となる。

繰り返し回数 n の決定は、バネ比がどの程度で飽和状態に近づいていくのかをグラフ上で検討する事で決定出来る。（ $n=N$ としてBM杭の繰り返し回数データとする）

¹⁴ 実験では、 $= 0.8$ 程度で飽和点に近づいて行く。これ以降は、微増状態となる。

B M杭（繰返し回数、圧入最大荷重、杭深度等を決定するための実験杭）での実際の測定は、杭頭での杭の弾性戻り量を測定する事で行う。繰返し荷重を負荷したときの杭先端部分に残留する変位は、杭頭で杭材量の弾性戻り量の差となって現れる。

杭先端地盤を積極的に強化しなければならない若干緩い砂質層の場合は、昇圧時の杭の変形量と荷重除荷時の杭の戻り量に差が生じる。この差がゼロと認められる時の回数が、繰返し回数となる。



杭先端地盤に残留変位が生じる地盤は、杭の剛性よりも剛性は小さい。地盤が弾性化してくると残留変位が小さくなってきて、最終的には杭の剛性と等しくなる。この時杭頭で観察されるのは、繰返し荷重による杭材の弾性変位と弾性戻りだけとなる。この様子を観測することにより、繰返し荷重の回数が決定できる。

この回数が B M杭の基礎データとなり、実施工での繰返し荷重回数 N の基本値となる。

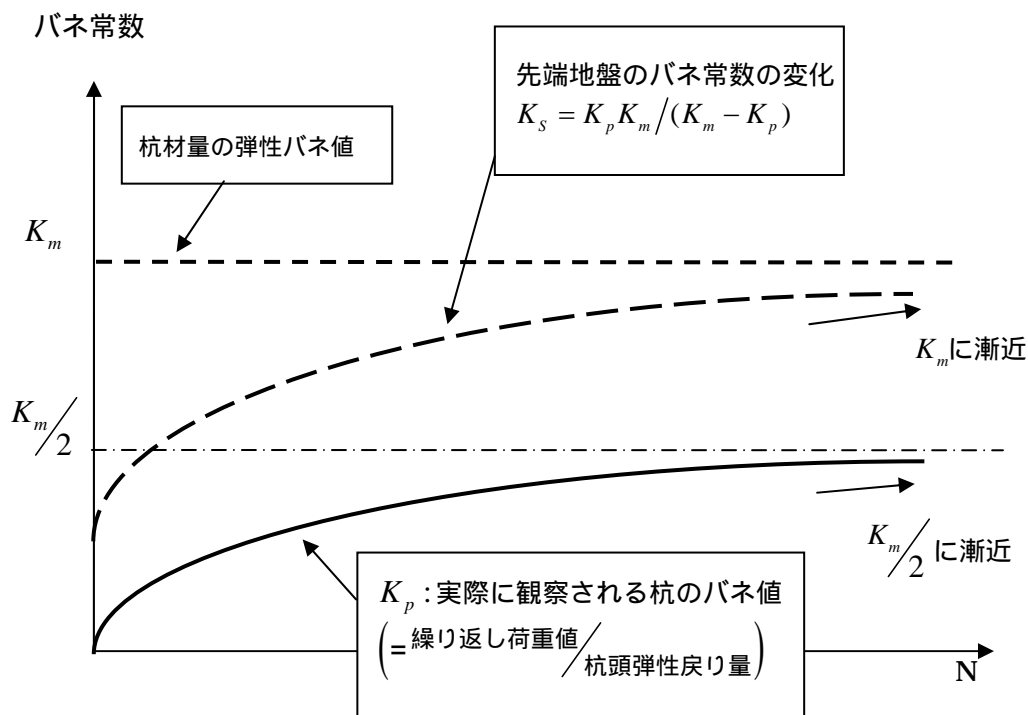
2.4 杭の鉛直バネ常数の推定

岩盤に支持された支持杭と繰返し荷重によって杭先端地盤が弾性化した支持層に造られた支持杭とでは、鉛直バネ常数の推定方法が異なる。岩盤は杭材量を遙かに超えるバネ常数を持っている。従って、バネとして有効に機能するのは杭材量だけである。一方、繰返し荷重によって弾性化される支持層は、当初は杭材量よりも低いバネ常数となっている。このため繰返し荷重値に対して杭が常に弾性挙動をするのに対し、先端地盤は弾塑性変形となり沈下を伴うバネとなって、結果的に杭は変形を進行する。

繰返し荷重によって杭先端地盤で土粒子の再配列が加速すると、地盤は弾塑性状態から弾性状態に移行して行く。地盤が、杭材と同一バネ常数にまで弾性化が進行すると、杭は見かけ上地盤を含めて一本の杭と同等になり弾性挙動を示すことになる。

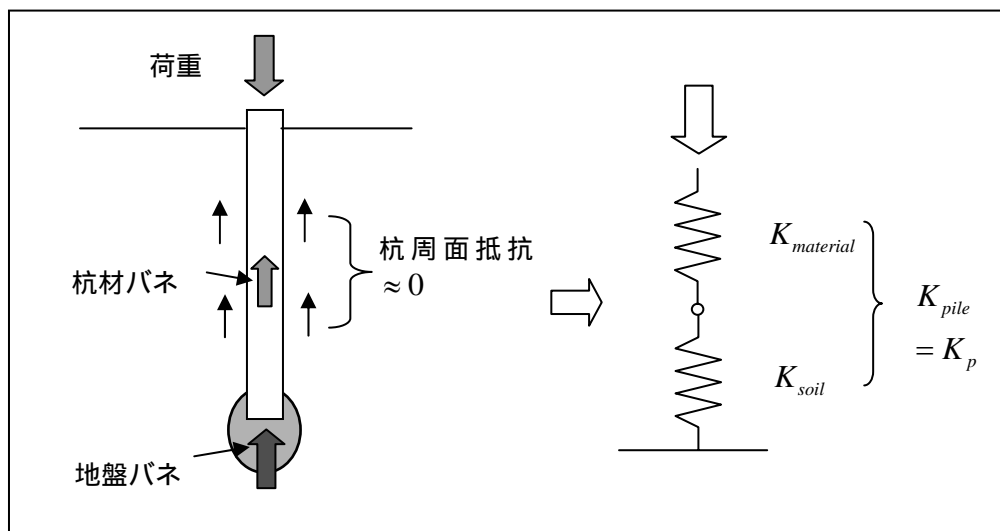
この状態が、繰返し荷重値に対する杭の弾性であり、この荷重範囲で杭は地盤と連動して弾性となる。繰返し荷重を圧入最終荷重にほぼ等しく設定すると、この繰返し荷重によって得られる弾性限界は、同時に圧入最終荷重までの杭の弾性範囲を保証する事になる。

繰返し荷重による杭先端地盤のバネ常数の変化の概念図は下図で示される。



杭材のバネ常数は一定であり、杭のバネ常数は地盤のバネによって変化する。杭材の弾性は変化しないが、地盤は繰返し荷重によって弾性化されていく。従って、徐々に地盤バネが改善されていき、結果として杭のバネ常数は変化していく。しかし、この合成されたバネ常数は、 $K_m/2$ を超える事はない。

杭造作時点で摩擦を最小化しているため杭と地盤のモデルは、直列バネとなっている。



圧入支持杭として荷重に抵抗する時の杭のバネ常数は、下式で示される。

$$K_p = \frac{K_m K_s}{K_m + K_s} = \frac{K_m}{\left(\frac{K_m}{K_s} + 1\right)}$$

岩盤の場合：	$K_s \gg K_m$	$K_s \approx \infty$ の時 $K_p \approx K_m$
砂質地盤の場合：	$K_s \leq K_m$	$K_s \rightarrow K_m$ の時 $K_p \rightarrow K_m/2$

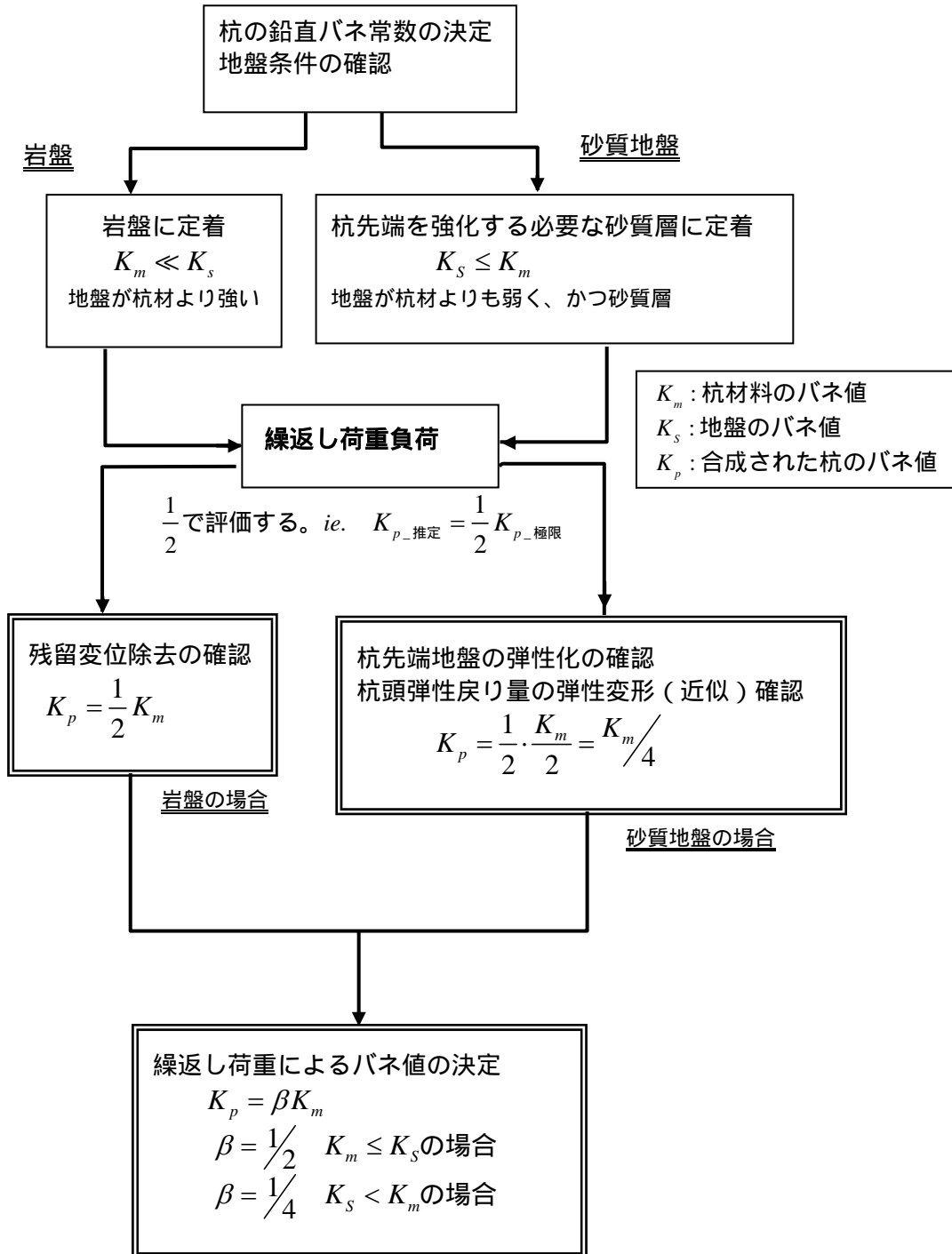
岩盤に支持された杭は、 $K_s \approx \infty$ $K_p \approx K_m$ となり、杭材（杭体）がバネを支配する。先端地盤が繰返しによって弾性化した場合、改善された K_s は極限值で K_m となる。故に、 $K_s \rightarrow K_m$ $K_p = K_m/2$ となり、バネ常数は杭材の半分となる。

K_p 値は地盤性状により極限值で $K_{p_極限} = K_m$ or $K_{p_極限} = K_m/2$ となるが、飽くまで極限推定値であるため $K_{p_推定} = \beta K_{p_極限}$ で補正する必要がある。

繰返しによる弾性化は、高々80%程度の達成率であることから、この値を1/2で評価すれば安全である。故に繰返し荷重による弾性バネ値の決定は、

$K_{p_推定} = \frac{1}{2} K_{p_極限}$ となる。バネ値決定のスキームは次表に示される。

鉛直バネ常数決定スキーム

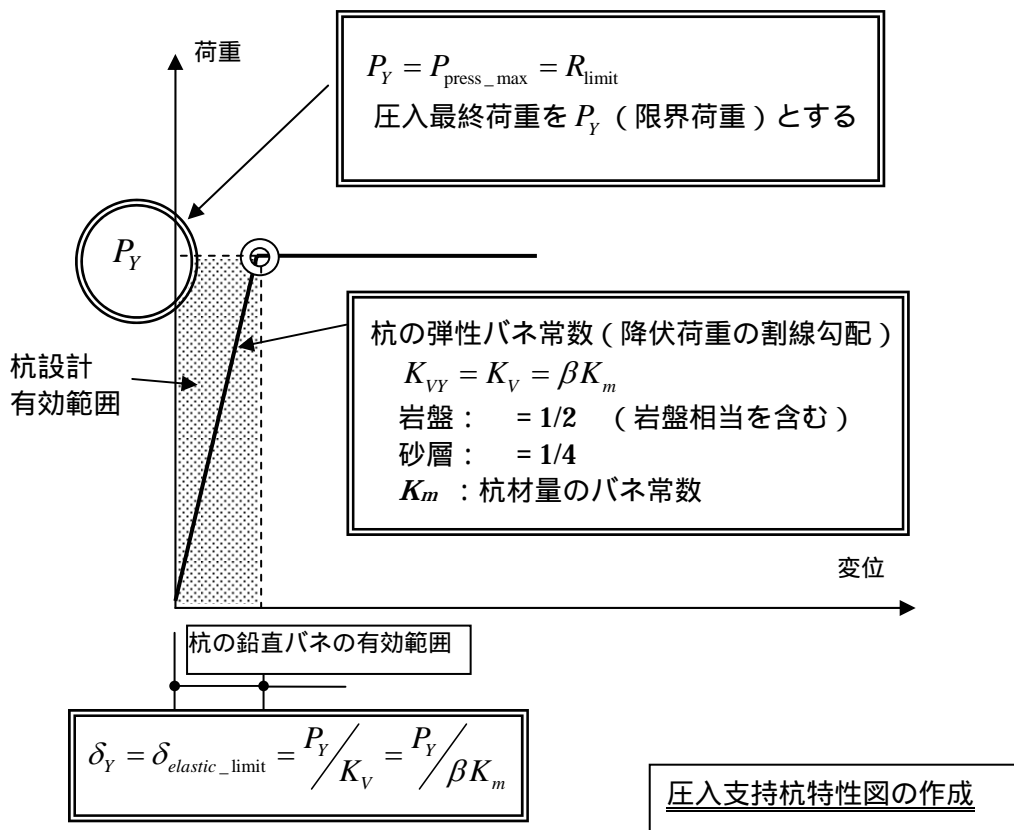


2.5 圧入支持杭特性図の作成

圧入支持杭の特性図は、限界荷重（限界抵抗力）と杭の弾性変位量で作成される。繰返し荷重によって杭頭先端地盤が弾性化すれば、圧入最終荷重までは杭は弾性変位する。この荷重範囲内は完全弾性体と仮定してよく、限界荷重を超えると（圧入最終荷重を超えた辺り）杭の変形（沈下）は急激に進行する。

杭が弾塑性変形状態になると変形量（沈下量）の推定が非常に難しくなる。しかし、杭の設計は弾性範囲で行われる事から、弾塑性状態の杭を使用する目的もメリットもなく、この範囲での変形量を推定しても意味がない。

圧入支持杭は、圧入最終荷重までは弾性である。その後は変形進行することになるが、その辺りの荷重を設計で使うことはあり得ない。従って、圧入最終荷重までは弾性、その荷重を境に杭は塑性となると考えても問題が無く、むしろ耐荷重に対する設計目安と杭抵抗力に対する信頼性を議論する時には、この仮定の方が良いと言える。



第3章 圧入支持杭の造作

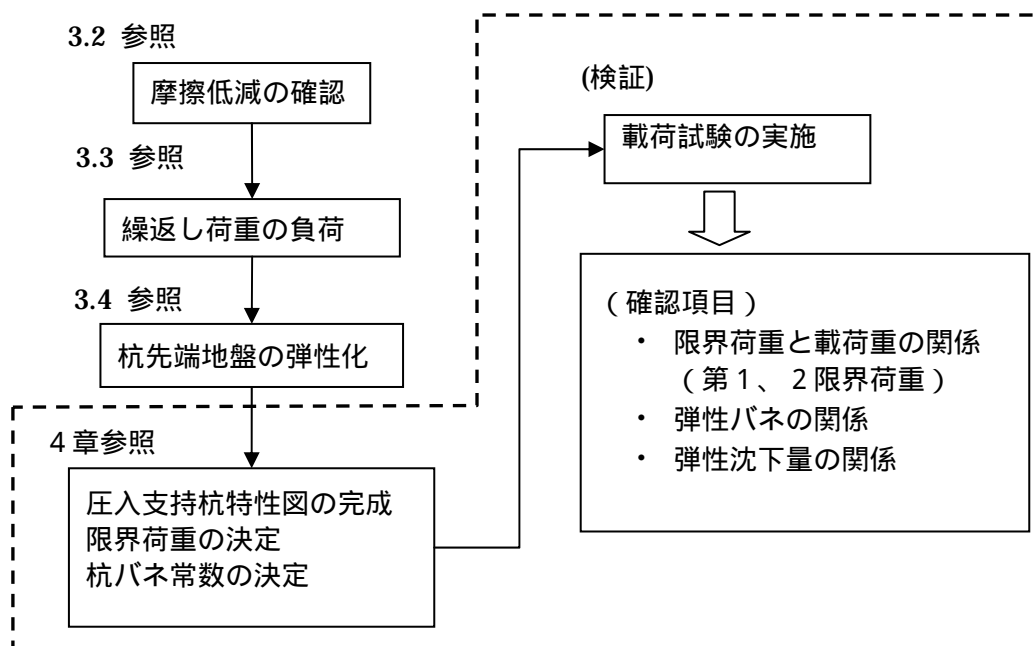
本章では、実際に圧入支持杭を造作し、更に以下の確認を行う。

-) 引き抜きを伴う圧入による杭の摩擦低減（杭施工方法）
-) 繰返し荷重負荷による杭先端地盤の弾性化
-) 弾性バネ常数の決定方法

3.1 実験杭データ及び地盤状況

3.1.1 支持杭造作と支持力確認スキーム

以下の確認スキームによって杭を造作し、支持力特性図を作成した後、杭の鉛直載荷試験を実施して測定値の比較を行ない杭としての検証を行う。



3.1.2 杭データおよび地盤状況

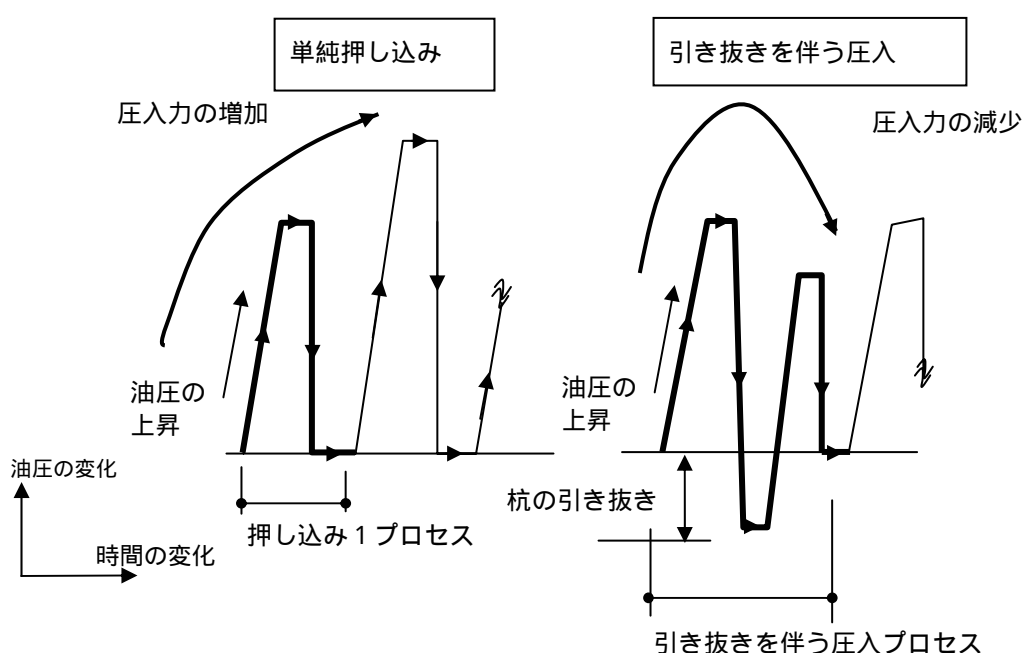
実験杭は、300xL7000 鋼管杭（内 6000mm を圧入）を用いた¹⁵。地盤は、シルト質砂質層と砂層で構成され、GL-16m 地点に砂礫層が存在する。標準貫入試験のデータ上では、表層を除きこの砂礫層まで $N = 8$ 程度の緩い層となっている。砂礫層の最深部 GL-17m 地点に $N = 44$ の固い層が存在している。

本実験杭は、この $N = 8$ 程度の非常に緩い層に杭を貫入させ、先端地盤の支持力改善効果と杭変形抵抗力（弾性変位）の杭材量への同期を確認している。

¹⁵ 318.5, t10, A=99.73 cm² 鋼管杭（JIS G 3444-1977 一般構造用炭素鋼管）

3.2 「引き抜きを伴う圧入」による摩擦低減

杭先端に軸力を伝達させるためには、中間で力のロスがあってはならない。このため杭の周面に働く摩擦力を極力低減する必要がある事は前章で議論した。圧入工法は、圧入というネーミングに由来する、押し込むと言う動作と、更に引き抜くと言う動作が一つのプロセスの中に存在している。この引き抜くという動作によって杭の周面に働く摩擦抵抗力を低減させる事が出来る。



摩擦抵抗は、杭の長さ方向に積分されて行くため単純に押し込んでいくと摩擦力は増大していく。杭を押し込んでいくプロセスの中に引き抜きの動作を入れる事で杭の摩擦は、加算されることなく低いレベルで一定値となる。この事は、圧入力の変化を調べる事でその効果が確認できる。

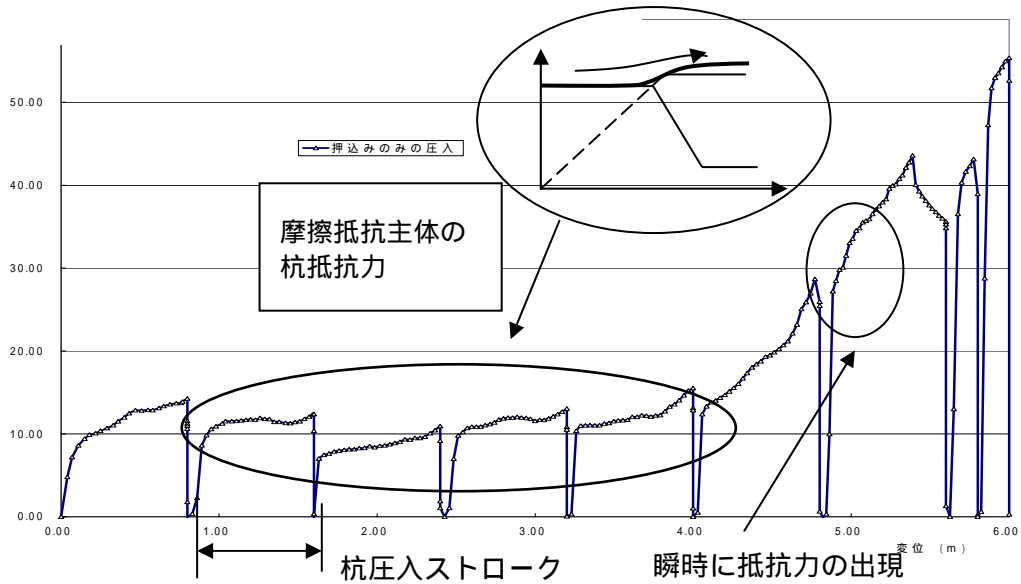
杭先端の抵抗は、地層状況が大きく変化しない限り深さに対して増大していく。即ち、「圧入力の変化 = 抵抗の変化」と捉えると、圧入力は増大していく。一方、摩擦力は杭との接触面積に比例するものの、杭周面の拘束土圧による影響が大きいため同一地層間ではほぼ一定の値が現れる。

この事は、圧入力が直線的に増大していくときは、先端抵抗が支配的であり、圧入力が微増状態で貫入していくときは、摩擦力が支配的であることを示している。ほぼ同一地層の地盤での確認では、押し込みのみの圧入では摩擦影響が支配的に現れてフラットな抵抗を示し、引き抜きを伴った圧入を行った場合は、先端抵抗のみで抵抗しているため抵抗力の直線的な増大が確認されている。

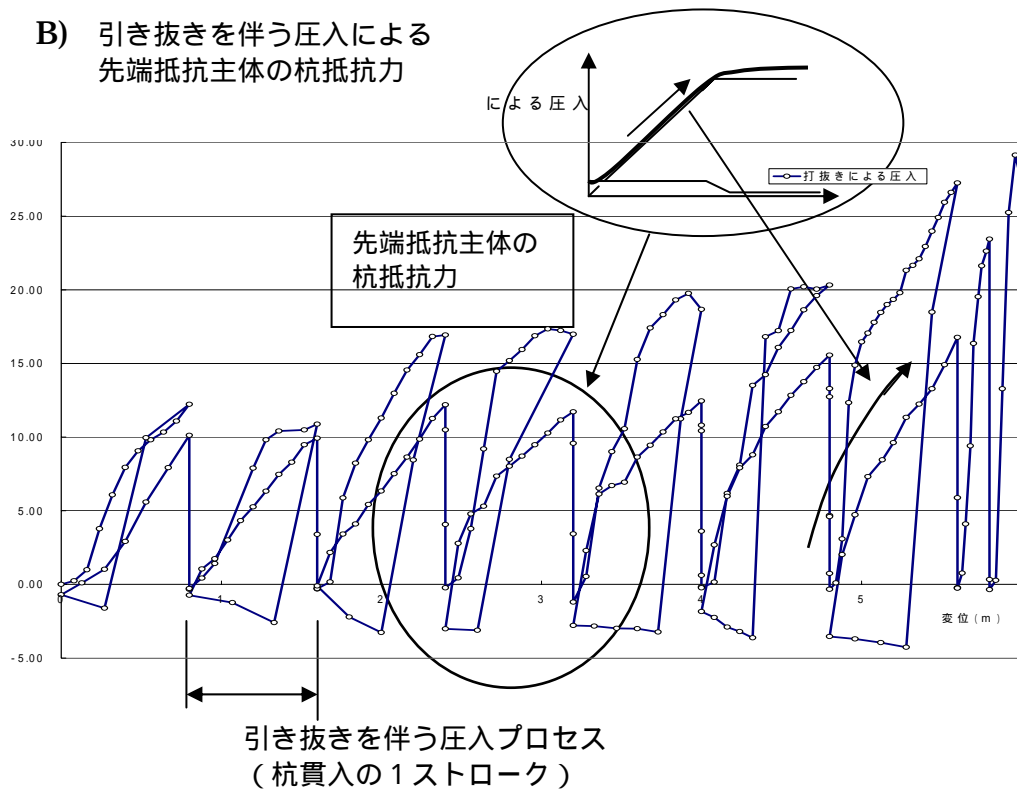
3.2.1 実験での確認

押し込み圧入による摩擦主体の杭抵抗力、「引き抜きを伴う圧入」による杭先端抵抗主体の杭抵抗発現の実験確認は、以下の様に示される

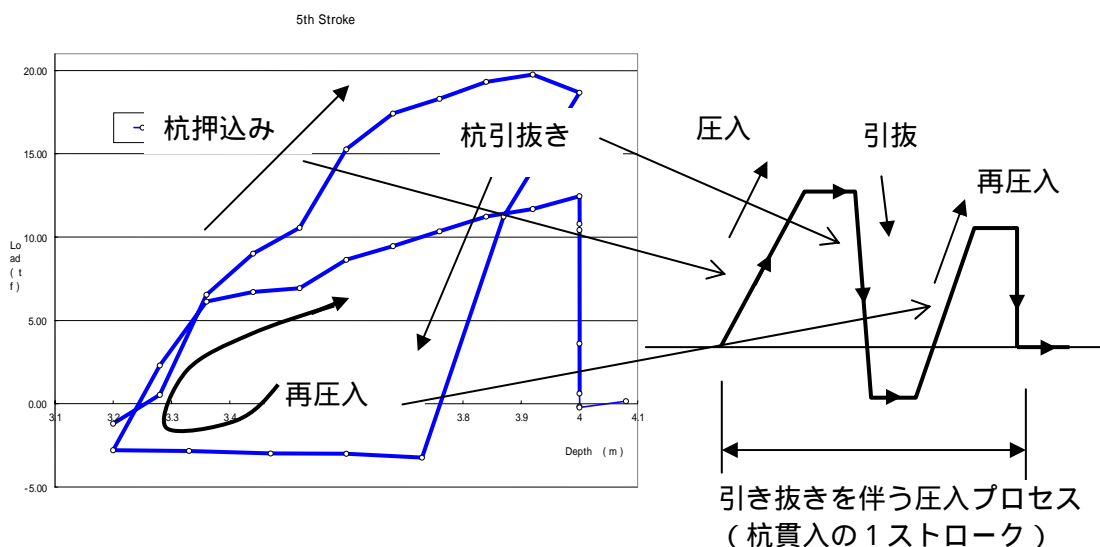
A) 押し込み圧入による摩擦主体の杭抵抗力



B) 引き抜きを伴う圧入による先端抵抗主体の杭抵抗力



「引き抜きを伴う圧入」の一プロセスを抜き出して、押し込みと引き抜き時の圧入力の変化を下図に示す。引き抜きのプロセスと対応して、摩擦が低減している事が確認できる。



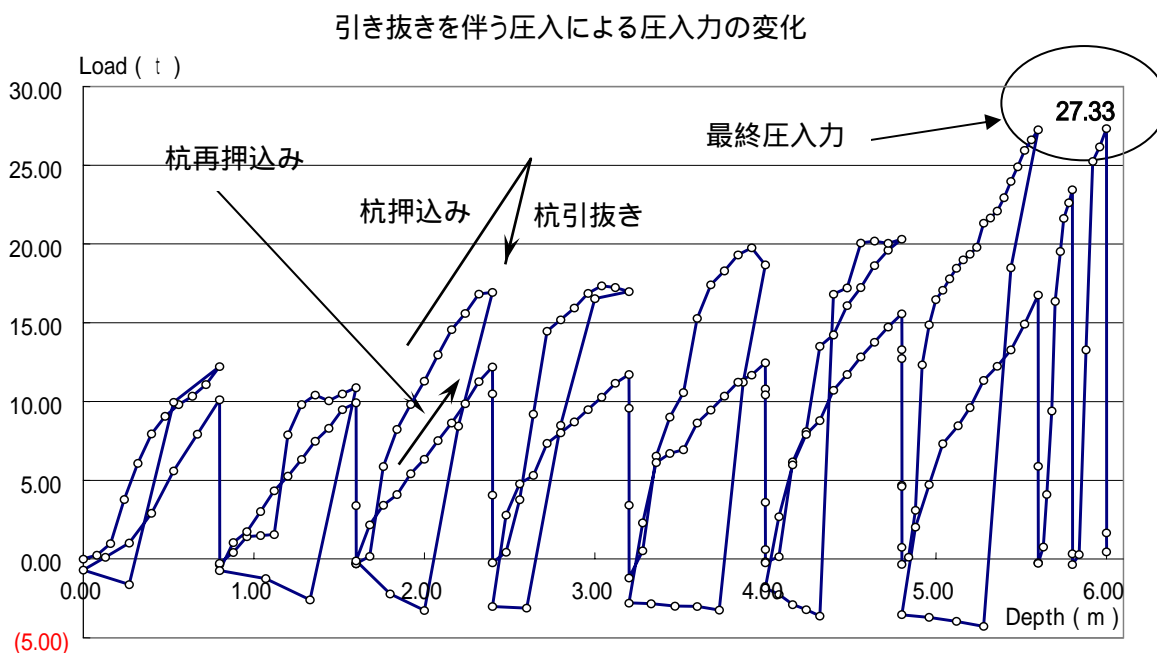
上図は、すでに摩擦影響が減少している中間のプロセスを抜き出したものである。すでに摩擦低減がなされているため、最初の押し込みに顕著な摩擦抵抗性は出ていないが、ストロークの後半に摩擦影響が出て抵抗がフラットになっている。この杭を引き抜き再度押し込む事によりフラットの部分が消え抵抗の直線化、更に圧入力が減少していることが確認できる。引き抜きと再圧入によって、最初のストロークで生じた摩擦抵抗力の低減と圧入力の減少が確認出来ている。

二つのプロセスの比較から次の事が確認できる。押し込みのみの圧入では、杭の周面に働く摩擦影響を低減させる事は出来ない。このプロセスだけでは地盤に衝撃や振動を加えていないため、摩擦の影響が積分されて行き、摩擦は寧ろ最大化して行く。一方、引き抜きを伴った圧入では、各プロセスで摩擦を最小化するため、杭長にわたって摩擦は積分されず、杭の抵抗は先端の抵抗だけとなる。

この事は、引き抜きを伴いながら圧入を行う1プロセスの中で摩擦影響が低減でき、更に、杭が支持層(目標層)に到達するまでこのプロセスが繰返えされる事で、杭が同一経路を「引き抜きを伴う圧入」のプロセス回数分(数回から数十回)上下することになる。この動作によって、容易に地盤内の土粒子間に内部せん断を起こす事が出来、これによってほぼ摩擦抵抗を最小化出来ることを示している。

3.2.2 圧入最終荷重の確認

「引き抜きを伴う圧入」により、GL-6mの砂層に杭が到達する。その時の圧入荷重値は、下図に示される。この最終で確認された圧入力はその層における最終圧入荷重（最大圧入力）となる。



$$p_{press_max} = 268 \text{ kN} (= 27.33 \text{ tf}) \approx 270 \text{ kN}$$

この荷重を「杭の打ち止め荷重」とし、この荷重値を繰返し荷重により固定する。

3.2.3 繰返し荷重値の決定

繰返し荷重値は、杭先端地盤の弾性化を促進するために負荷され、その値は最大圧入力（最終圧入荷重）を上回らない範囲で、最大荷重の近傍で決定される。

$$P_{repetitive} \leq P_{press_max}$$

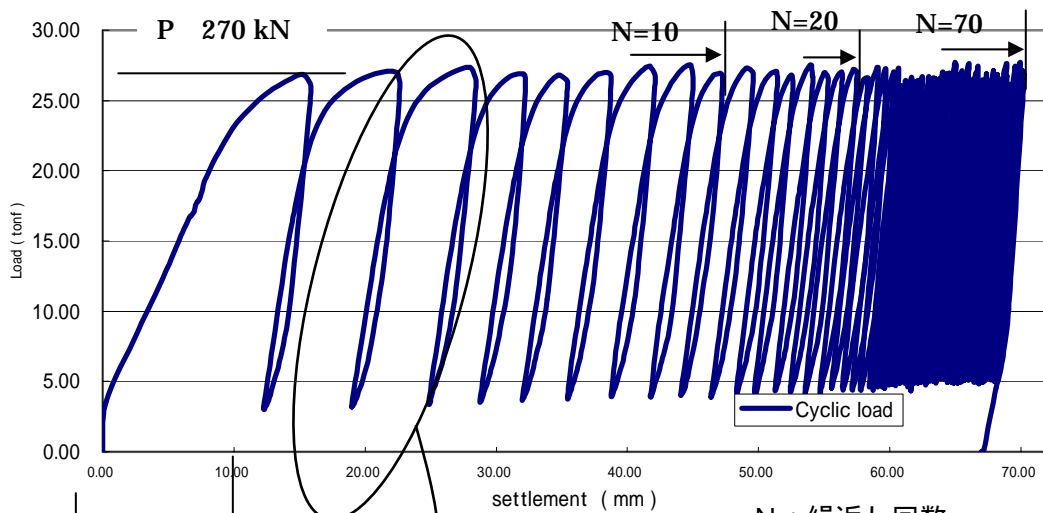
よって、最も「最大圧入力」に近い値、 $P_{repetitive} \approx 270 \text{ kN} (= 27 \text{ tf})$ を繰返し荷重の荷重値とする。

3.3 繰返し荷重負荷による杭先端地盤の弾性化の確認¹⁶

「引き抜きを伴う圧入」を行ない、杭が支持層に到達した後に、杭の先端に最終圧入荷重相当(先に決定した繰返し荷重値)の圧入力を繰り返し載荷した。この載荷により杭先端地盤が弾性性状に変化する事が確認された。確認実験では杭頭にロードセル、杭変位は変位計を設置し、データロガーでデータを収集した。

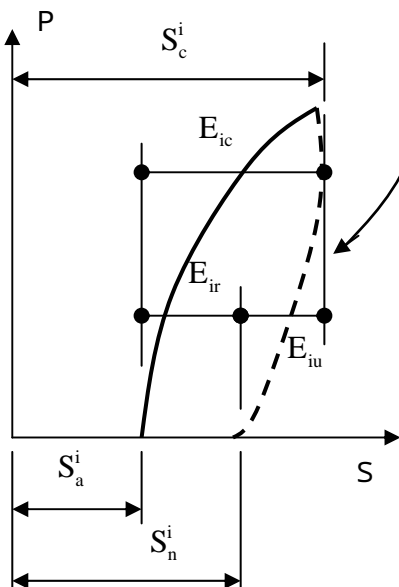
繰返し荷重のパターンは、昇圧と荷重リリースを繰り返した。繰返し荷重の一回毎のデータは、以下のパターンとなっている。

Cyclic load vs. settlement



Initial settlement = 12mm

N : 繰返し回数



$$\begin{cases} E_{ic} = S_c^i - S_a^i \\ E_{ir} = S_n^i - S_a^i \\ E_{iu} = S_c^i - S_n^i \end{cases}$$

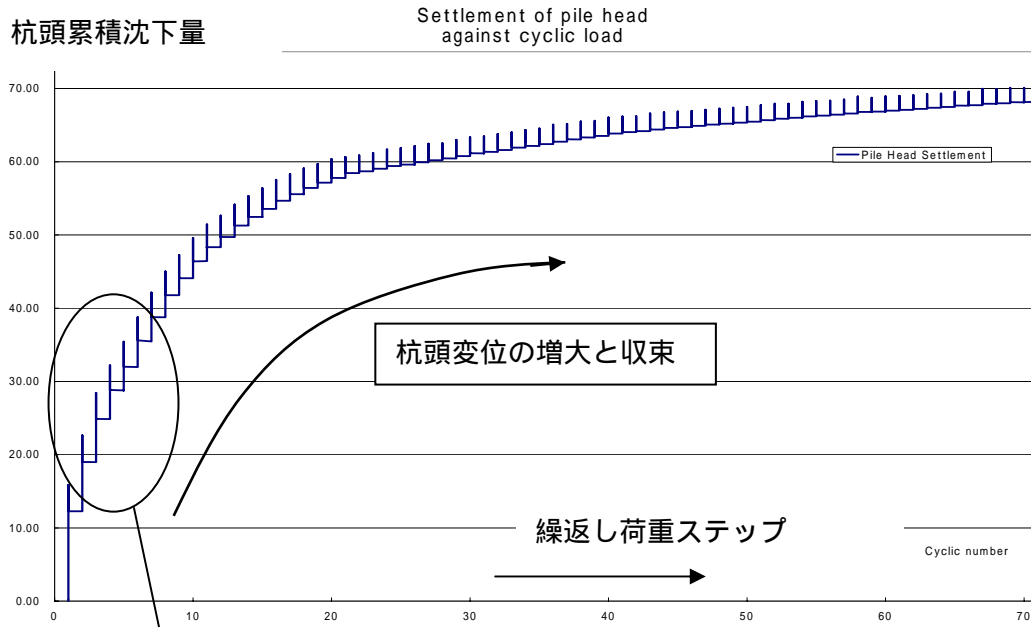
但し、

- S_c^i : i 回目の杭頭総変位置量
- S_a^i : i 回目の杭頭変位初期値
- S_n^i : i 回目の杭頭総変位置量
- E_{ic} : i 回目の杭頭相対変位置量
- E_{ir} : i 回目の残留変位置量
- E_{iu} : i 回目の回復変位置量

16 APPENDIX 参照

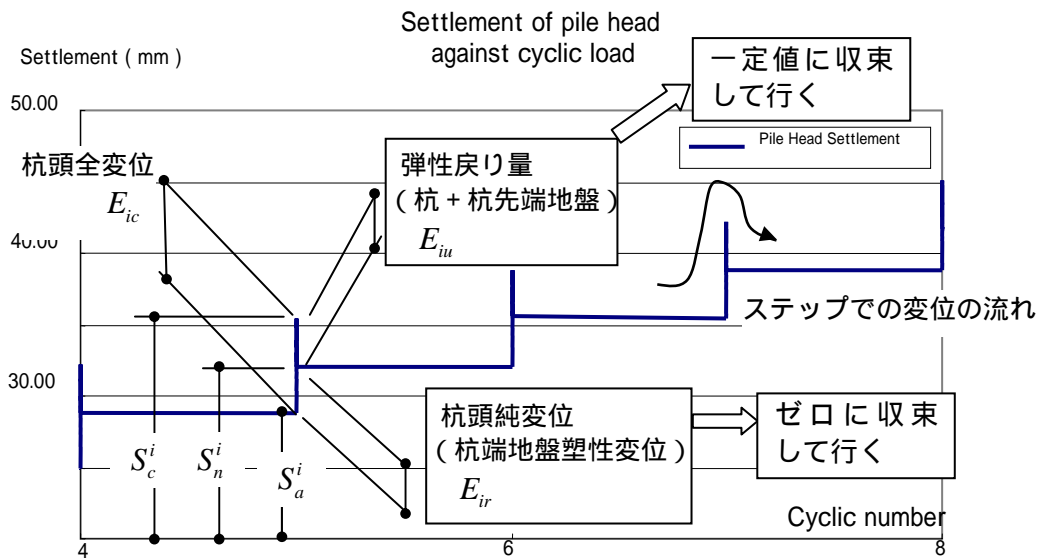
3.3.1 地盤の弾性化の確認

繰返し荷重の荷重ステップ毎の変化を、横軸に繰返し回数、縦軸に杭頭変位の変化としてプロットすると以下となる。



プロセス拡大

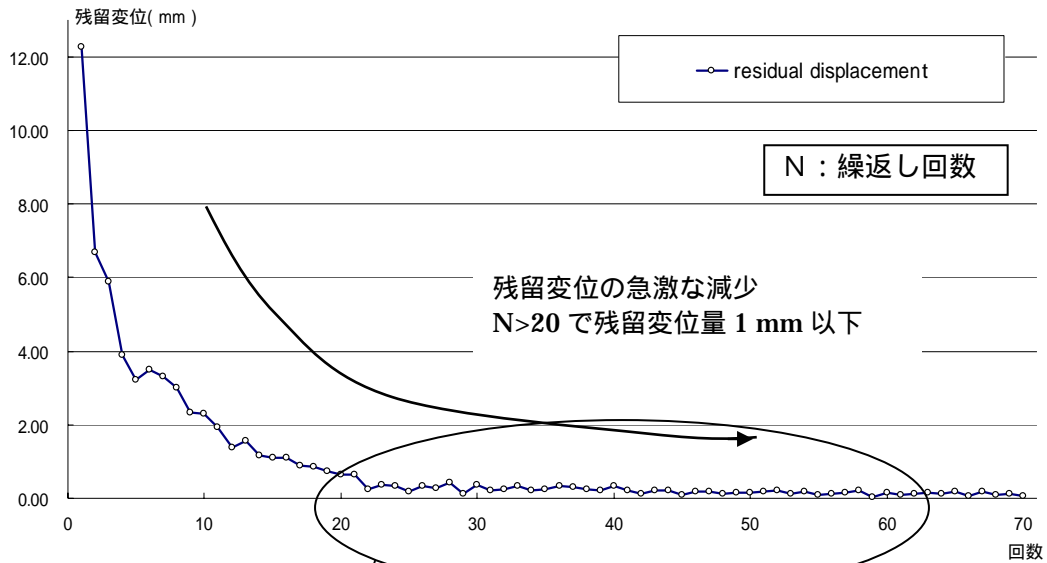
$$\begin{bmatrix} E_{ir} \rightarrow 0 \\ E_{iu} \rightarrow const \end{bmatrix} \text{が観察できる}$$



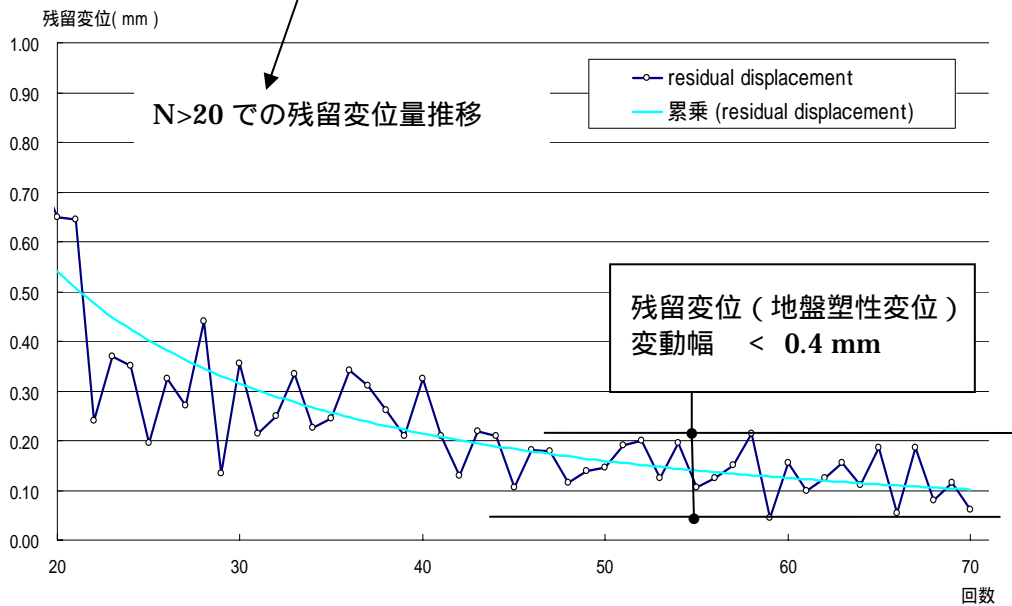
ある回数を超えると先端地盤の変位は限りなく小さくなって行く。この事は、杭頭で観測される杭の弾性戻り量が一定値に収束していくことでも分かる。

更に、残留変位量（杭先端の実質沈下）をプロットする事で、杭の先端が変位に抵抗していることが分かる。

杭頭残留変位の推移



杭頭残留変位の推移



繰返し荷重によって地盤変形（塑性変位）が収束していく事が、残留変位量が減少していく事により確認できる。この収束先がどこにあるのかを推定する。

杭頭純変位（地盤の塑性変形量）のグラフから、沈下量は回数の増加に伴って増加量が減少している。即ち、沈下増分が、回数に比例して減少している。この事から、累積沈下量の逆数は、回数に比例していると言える。

この関係を直線関係にあると見立てて、両者の関係を以下の式で推定する。

$$\begin{aligned} \frac{n}{S_n} &\propto n \\ \therefore \frac{n}{S_n} &= a + bn \quad \text{or} \quad S_n = \frac{n}{a + bn} \end{aligned}$$

$(\frac{n}{S_n})$ vs $(n: \text{繰返し回数})$ のプロットに対して、直線回帰式で推定できる。

この回帰式は、 $\frac{n}{S_n} = a + bn = 0.0801 + 0.0136n$ で表される¹⁷。

即ち、累積沈下の逆数（杭頭純沈下の累積の逆数）は、回数にほぼ完全に比例していることが分かる。

この回帰式を用いると、無限遠点での沈下収束値が推定できる。

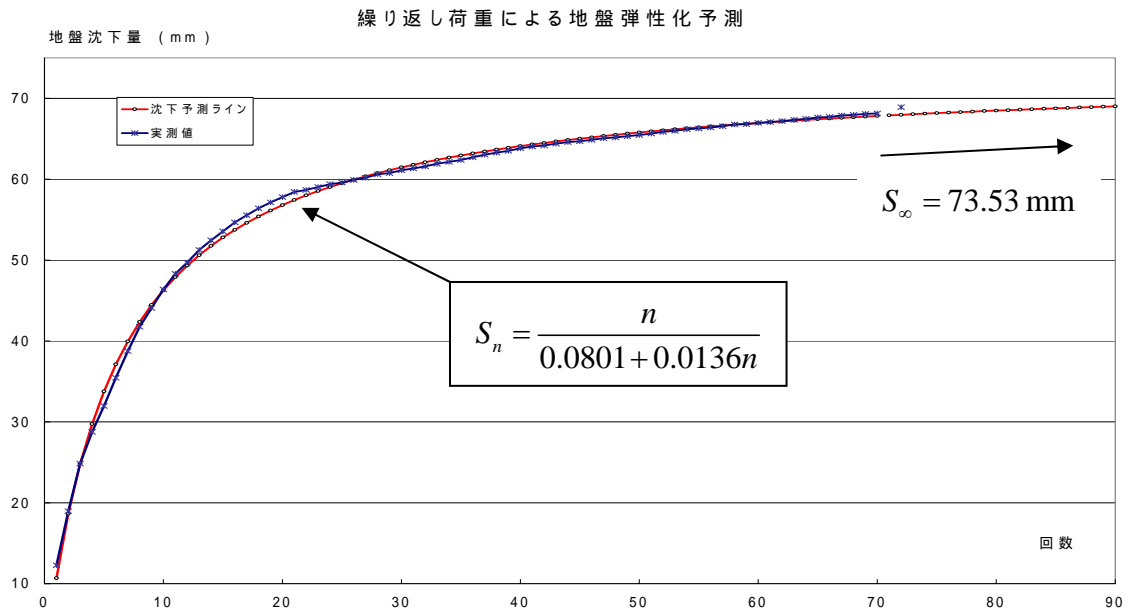
$$\begin{aligned} \frac{n}{S_n} &= a + bn = 0.0801 + 0.0136n \\ \therefore S_n &= \frac{n}{0.0801 + 0.0136n} \\ n \rightarrow \infty \text{ の時 } S_n &\rightarrow S_\infty \text{ とすると } S_\infty = \frac{1}{0.0136} = 73.53 \text{ mm} \end{aligned}$$

限りなく繰返し荷重を加えると $\{ S_\infty = 73.53\text{mm} \}$ に収束する。これが杭の最終沈下量となる。

このとき先端地盤の塑性変位はゼロとなり、即ち、杭頭残留変位がゼロとなり杭と地盤が合成した弾性戻り値が常に一定値となり、地盤は弾性状態となったと言える。

回帰直線は、累積沈下に戻す事によって回帰曲線で表される。この曲線は、繰返し回数と杭の純沈下量（杭先端地盤の塑性変形）の理論的推定値を与えることから、実際の測定値との比は弾性化に至るまでの、弾性達成に対する比を与えることになる。

¹⁷ APPENDIX 参照



実測値と回帰式との比が、弾性達成の比を表す事になる。弾性達成率を χ とすると

$$\chi = S_n / S_\infty$$

$\chi = 1$ 弾性 (達成率 100%)

$\chi = 0$ 塑性 (達成率 0%)

と表現できる。

N	χ
1	0.167
2	0.258
3	0.338
4	0.391
5	0.435
6	0.482
7	0.527
8	0.568
9	0.599
10	0.631
11	0.657
12	0.676
13	0.697
14	0.713
15	0.728
16	0.743

17	0.755
18	0.767
19	0.777
20	0.786
21	0.795
22	0.798
23	0.803
24	0.808
25	0.810
26	0.815
27	0.819
28	0.824
29	0.826
30	0.831
31	0.834
32	0.837
33	0.842

34	0.845
35	0.848
36	0.853
37	0.857
38	0.861
39	0.864
40	0.868
41	0.871
42	0.873
43	0.876
44	0.879
45	0.880
46	0.882
47	0.885
48	0.886
49	0.888
50	0.890

51	0.893
52	0.896
53	0.897
54	0.900
55	0.901
56	0.903
57	0.905
58	0.908
59	0.909
60	0.911
61	0.912
62	0.914
63	0.916
64	0.917
65	0.920
66	0.921
67	0.923

68	0.924
69	0.926
70	0.927

N : 繰り返し回数
 : 弾性達成率
 (理論累積沈下に対する累積沈下の比)

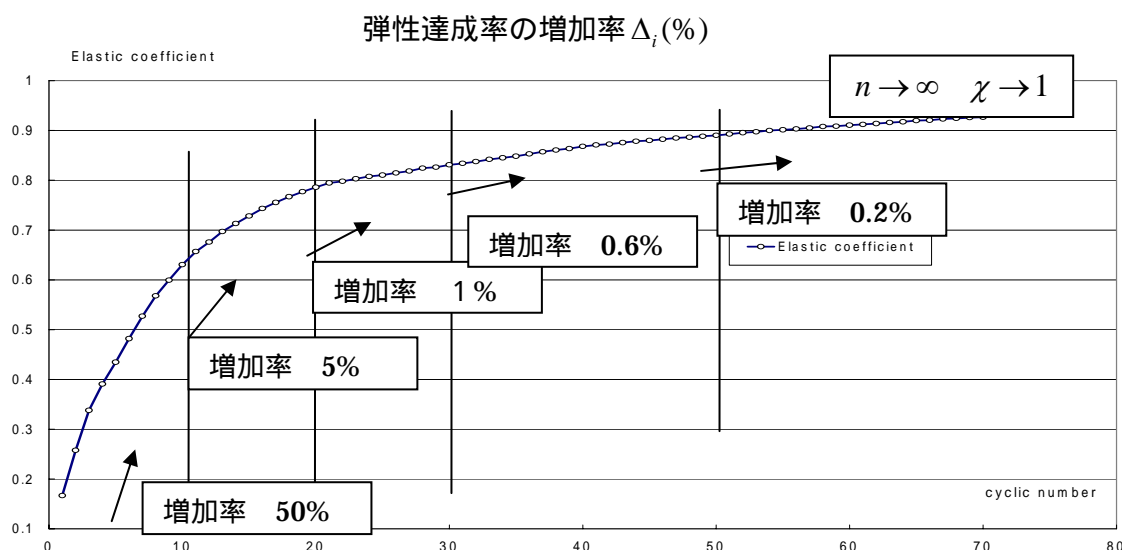
3.3.2 繰返し回数の決定

最初の数回は、ほとんど塑性状態にあり、N=20 を越えたあたりで達成率が漸増状態になる。N=30 を越えると増加はごくわずかになる。(N : 繰返し回数)

i 番目の増加率を $\Delta_i = \frac{(\chi_i - \chi_{i-1})}{\chi_{i-1}}$ (%) で定義すると

N	2	5	10	20	30	40	50	60	70
Δ_i (%)	55	11	5.2	1.1	0.6	0.5	0.2	0.2	0.1
χ_i (%)	26	44	63	79	83	87	89	91	93

N=30 を超えると増加率は、殆ど微増状態になる。更に、弾性達成率も 80% を超えて微増状態になる。



増加率がゼロに収束していき、弾性達成率も 0.8(80%)を境に漸増状態となっていく。この事から、この地盤では、N = 30 でほぼ弾性が達成されたと考えても良い¹⁸。

繰返し回数は、弾性化の状態を見極められる状態での回数である必要がある。この杭がBM杭であると仮定すれば、弾性化が少ない回数で現れたとしても数十回はデータを取る必要がある。しかる後に、弾性達成率80%を目処に繰返し回数を決定すればよい。この回数は、本施工時でのBMデータとなる。

¹⁸ この回数は、地盤状況が良ければ減少し、逆に粒子密度が低密度の層であれば増加すると予想される。

3.4 弾性バネ常数決定方法の確認¹⁹

前節までで繰返し荷重によって杭先端が弾性状態となることが確認された。この節はこの杭の弾性バネ値（地盤と杭材量が合成された弾性バネ）を推定する。弾性バネは、岩盤（堅固な支持層：杭材の剛性を上回る層）と砂質層（杭先端が杭頭荷重で弾塑性変形する層）では考え方が異なる。これらの層に対しても杭のバネ常数を杭材のバネ常数を用いて表す事で、地盤の土質の力学的常数に依存しない²⁰杭のバネ常数を決定する事が出来る。このバネ値の妥当性は繰返し荷重載荷データの「荷重 変位」履歴の割線勾配によっても確認出来る。

杭のバネ常数（杭材量 + 杭先端地盤の合成されたバネ常数）は、先端地盤が杭材の弾性係数より大きい場合と小さい場合で扱いが異なる。先端地盤が杭材よりも高い剛性を持っていると、杭のバネは地盤に影響されずに杭材のバネと同一となる。一方、地盤剛性が杭材よりも小さければ、地盤改善がなされたとしても改善された剛性は杭材の剛性を超えることはなく、極限值として高々杭材の剛性に漸近していくだけとなる。

¹⁹ APPENDIX 参照

²⁰ 例えば杭先端地盤の土質をサンプリングし室内物理試験を行っても、基本的な土質常数以上のデータを得る事は出来ない。弾性係数を求めるために三軸試験で繰返し荷重を負荷しても拘束圧を決定出来ないために結果の信頼性は低いと言える。

一方、「道路橋示方書」では過去の杭の鉛直載荷試験結果から杭の軸方向バネ常数（杭の弾性バネ常数）を推定式として与えている。

$$K_v = (A_p E_p / L) \quad K_v: \text{軸方向バネ常数(N/cm)}$$

: 施工法別係数（根入れ比 L/D によって規定）
 A_p, E_p : 杭断面積および杭材量（杭体）の弾性係数

即ち、杭材料（杭体）の弾性バネ常数に係数を掛けたものを杭の弾性バネ常数としている。

故に、 $K_v = K_m$ （ K_m : 杭材量（杭体）の弾性バネ常数）となり、係数は以下となる。

打込み鋼管杭： $=0.014(L/D)+0.78$	E_p （鋼管杭） $=2.1 \times 10^5$ Mpa ($=2.1 \times 10^6$ kgf/cm ²)
打込みPHC杭： $=0.013(L/D)+0.61$	E_p （PHC杭） $=4.0 \times 10^4$ Mpa ($=4.0 \times 10^5$ kgf/cm ²)
中堀鋼管杭： $=0.009(L/D)+0.39$	E_p （PC杭） $=3.3 \times 10^4$ Mpa ($=3.3 \times 10^5$ kgf/cm ²)
場所打ち杭： $=0.031(L/D)-0.15$	E_p （場所打ち杭） $=2.7 \times 10^4$ Mpa ($=2.7 \times 10^5$ kgf/cm ²)

これらは、杭の鉛直載荷試験結果を回帰式で推定したものであるが、各々の係数を決定するために用いられた杭試験の結果は、実際は非常に大きなバラツキを示している。

仮に 300, L=10m の杭でこの推定値を評価する。（鋼管、PHC 杭を打撃で打ち込んだ場合）

$$K_m = A_p E_p / L \quad 1.5 \times 10^6 \text{ N/cm (鋼管杭)}, 2.8 \times 10^5 \text{ N/cm (PHC 杭)}, =1.24 \text{ (鋼管杭)}, 1.04 \text{ (PHC 杭)}$$

故に、 $K_v = K_m \quad 1.9 \times 10^6 \text{ N/cm (鋼管杭)}, 2.9 \times 10^5 \text{ N/cm (PHC 杭)}$

両者とも係数は 1.0 以上となり、 $K_v > K_m$ となって杭としてのバネは杭材量の弾性バネを超えてしまう。つまり、ある長さ以上打ち込むと杭材量の材料特性を超えた性能が得られると言う事を示しており、俄には信じがたい。これは杭バネを支持力の統計値から算出した為に、バネを弾性評価ではなく拘束力の評価で行っている所為と思われる。摩擦が卓越すると杭拘束力が初期に卓越して、バネ評価を行う変位量に対して大きな抵抗力を示す事になる。このため初期の割線勾配が立ち上がり、見かけ上バネ評価が高くなったものと思われる。推定式が載荷試験結果をベースにしている事から（「荷重 - 変位」の関係が一方向に増大する変位のデータだけに基づいている）弾性を評価するための変位の戻りを正しく評価しているとは言えない。例えば、この式で杭の軸バネを評価すると、座屈ギリギリの細長比を持った杭が、最大の抵抗力を示すという事になる。

3.4.1 杭の弾性バネ常数決定モデル

杭の周面に摩擦が無く、軸力が直接杭の先端に作用するため、杭と地盤は、直列のバネとしてモデル化される²¹。

杭の弾性バネ常数は、

$$K_{vy} = K_v = K_p = \beta K_m$$

$$\left. \begin{array}{l} \beta = 1/2 : \text{岩盤 (岩盤相当を含む)} \\ \beta = 1/4 : \text{砂質層} \end{array} \right\} \text{地盤の reluctant を考慮して決定した}$$

$$\left. \begin{array}{l} K_{vy} = K_v : \text{弾性範囲のバネ常数は降伏荷重のバネ常数と同一} \\ K_m : \text{杭材のバネ常数} \end{array} \right\}$$

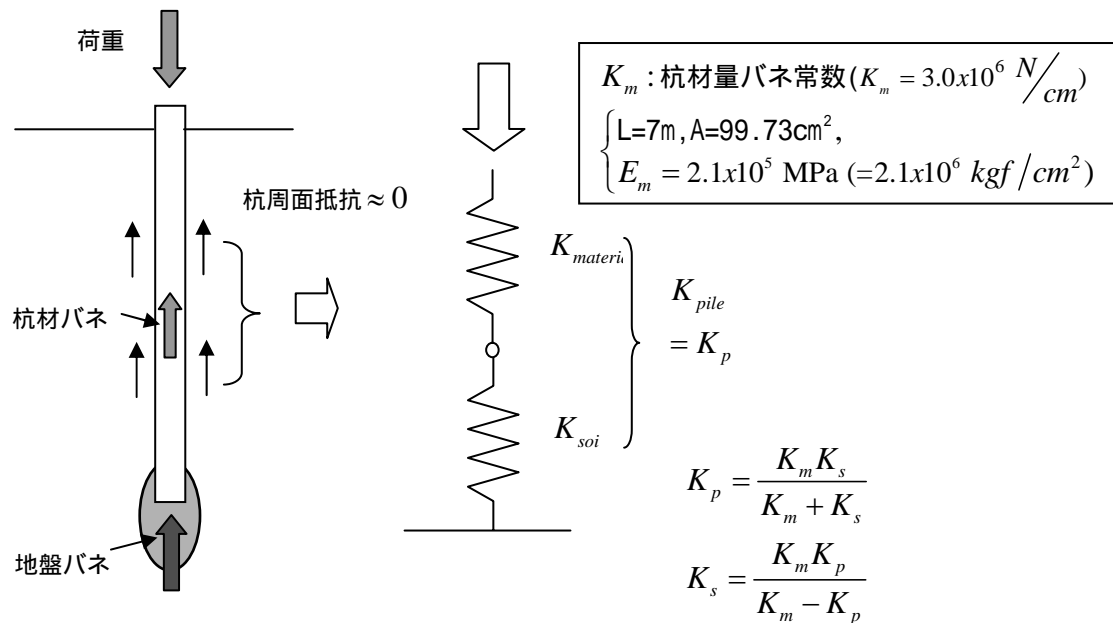
杭の限界沈下量は、

$$\delta_y = P_y / K_{vy} = P_y / \beta K_m$$

で示される。

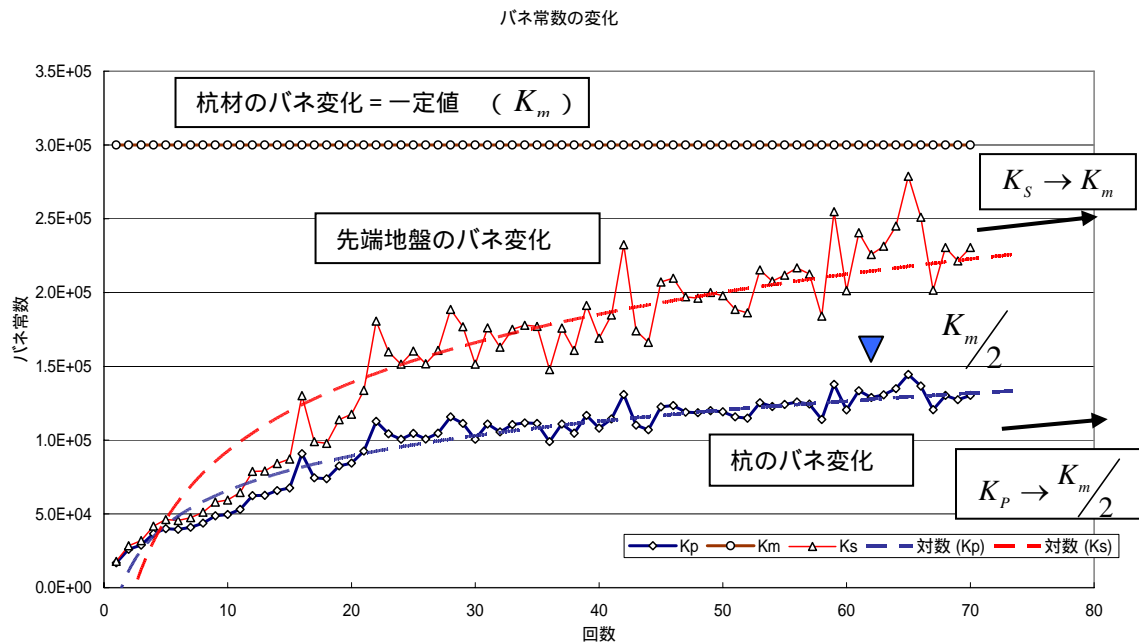
を 1/2 もしくは 1/4 で評価したのは、繰返しによる弾性達成が高々80%程度である事と繰返し荷重解放後の地盤の reluctant を考慮した為である。

繰返し荷重による変位データからバネ値の変化を確認する。



²¹ 「2.4 杭の鉛直バネ常数の推定」参照

K_p 値は、繰返し荷重実験の実測データを元に $K_p = P_i / E_{ic}$ とする。
縦軸はバネ常数を表し、横軸は繰返し回数をしめす。



杭のバネ変化は、 $K_m/2$ に漸近していく。先端地盤のバネは、杭材のバネ値に極限で収束する。

杭先端地盤が繰返し荷重によって弾性化すると、地盤の剛性は杭材量の剛性に漸近して行く事が観察されている。

$$K_s \rightarrow K_m \quad (n \rightarrow \infty)$$

K_s : 先端地盤のバネ常数, K_m : 杭材バネ常数

杭と地盤が直列のバネとして接合されているため、杭としてのバネ値は杭材の弾性バネ値の $1/2$ に漸近していく。

$$K_p = \frac{K_m K_s}{K_m + K_s} = K_m \left/ \left(\frac{K_m}{K_s} + 1 \right) \right. \quad K_s \rightarrow K_m \text{ ならば } K_p \rightarrow K_m/2$$

一方、岩盤のような杭材量に対して遙かに剛性の高いものは、杭の弾性バネ常数はそのまま材料の剛性が表れる事になる。

$$K_p = \frac{K_m K_s}{K_m + K_s} = K_m \left/ \left(\frac{K_m}{K_s} + 1 \right) \right. \quad K_s \approx \infty \text{ ならば } K_p \approx K_m$$

3.4.2 杭の弾性バネ値の決定

杭先端地盤の弾性化で検討した弾性達成率で考えると、 $\eta = 0.8\sim 0.9$ の達成率は $N > 23$ (N : 繰返し回数)で得られる。この時のバネ常数の変化率は0.6%程度である。

しかし、先端地盤バネの変化は、 $N=23$ 辺りでは安定しておらず、未だに硬化中である事が読み取れる。合成されたバネ常数は $N>23$ で安定してくるが、先端地盤は安定しているとは言い難い。

$N>30$ 辺りから地盤も安定し始める。この時の杭バネは、非常に安定している。地盤のバネ変動に対して合成された杭のバネは大きく変動しておらず、多少の変動は吸収していることが分かる。即ち、地盤が安定化に向かえば、合成された杭のバネは、非常にファームなバネ常数を与えることが分かる。

このまま杭バネは、杭材量の1/2のバネ値に限りなく漸近していくことになる。先端地盤の繰返し荷重の回数に比例して漸近していくが、 $N>20$ で合成バネとしての安定した値が得られることにより、徒に繰返し回数を増やしていくことは得策ではないと思われる。

地盤が安定した事を確認する事で、合成された杭のバネ値がファームとなると言える。この地盤安定回数が、 $N>30$ で得られることがグラフから読み取れる。砂地盤は粒子配列の配向が変化する事で構造的な強さを示すことになるが、土粒子構造が再構築された事を完全には確認できない。このため、 $N>30$ で安定したと判断した後であっても、土粒子のreluctantを考慮する必要がある。

この評価として、最大限の繰返しパフォーマンスを行ったとしても極限值に対して高々1/2程度しか弾性改善が出来ないと考えるべきであり、この様に考える事で安全側の評価となる。即ち、岩盤であっても杭材の1/2のバネ性能、砂地盤であれば、杭材の1/4のバネ性能を達成目標とすることで、時間変化に対する地盤reluctantを吸収できると考える。

この確認実験では、地盤の安定を確認した $N>30$ の繰返し荷重により、 $K_p = 1.1 \times 10^6 \text{ N/cm}$ ($= 1.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$)が得られた。しかし、設計値としては $K_p = 0.75 \times 10^6 \text{ N/cm}$ ($= 0.75 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$)を採用する²²。

²² K_p 値 (杭のバネ値) は極限で $Km/2$ (杭材量の1/2) となり、これを達成度を考慮して更に1/2で評価する。即ち、 $K_p = Km/4$ とする。

故に、 $K_p = Km/4 = 3.0 \times 10^6 / 4 \text{ N/cm} = 0.75 \times 10^6 \text{ N/cm}$ とした。

3.5 圧入効率係数²³

今までの議論は、圧入力（杭頭に直接杭の軸力として働く）という前提で進めてきた。しかし、圧入機から発生した圧入力は100%杭頭荷重にはならない。これは油圧シリンダーが杭軸に直列しておらず、横側から並列して加圧する構造になっているためである。即ち、力の発生点と力の作用点が同一でない事により回転力が発生し、この回転を止めるために機体側の剛性や機体の固定が必要になる。機体は杭にクランピングされ、この時に水平分力が発生し、圧入力が鉛直成分と水平成分に分解される。このため、圧入力が100%鉛直力にならずに若干の加力ロスが生ずることになる。

杭に実際に働く鉛直力（載荷重）はこの鉛直分力であり、更にチャック（杭把持装置）の剛性、シリンダーが上下動するリーダーマストの摩擦損等が合算されて抵抗となる。これらの抵抗や固有の損失等があるため圧入力（杭に対する載荷重、杭頭荷重）は、シリンダー発生力とは必ずしも一致しない。

しかしながら、これらのロスは機械固有のロスと考えられる。即ち、突発的に発生し、再現性のないロスではなく、定常的、再現的に発生するロスであると言える。このロスを把握する事により、圧入力と発生力の関係が関連づけられる。

このロスによって評価すべき圧入力と発生力の関係を圧入効率係数 ξ を用いて表すと、

$$P_{press} = \xi F_{cylinder}$$

P_{press} : 圧入荷重

$F_{cylinder}$: シリンダー発生力

ξ : 効率係数 ($\xi = 0.8 \sim 0.9$ 機械によって異なる)

この効率係数は機械固有の係数と考えられるが、本実験で確認した係数は $\xi = 0.9$ であった。この係数を正確に把握し実施工に用いると、現場で機械側の発生力（油圧シリンダーからの発生力）をトレースするだけで、杭頭荷重・杭先端荷重、更に反力として生じる杭先端地盤の抵抗力を測定することが出来る。

本論文での圧入力もしくは地盤の抵抗力等は、この事実を暗黙裏に認めた上で、機械側の発生力ではなく杭頭に直接負荷される圧入力を以て載荷重としている。

²³ APPENDIX 参照

第4章 載荷試験による支持杭としての検証

本章では、杭造作時に確認した最大圧入力（杭の弾性限界値）と杭の弾性バネ値を用いて（圧入支持杭設計法の手法もしくは圧入支持杭造作法）支持力特性図を作成する。

特性図から得られる杭の荷重耐力と変形性能を載荷試験によって検証する。

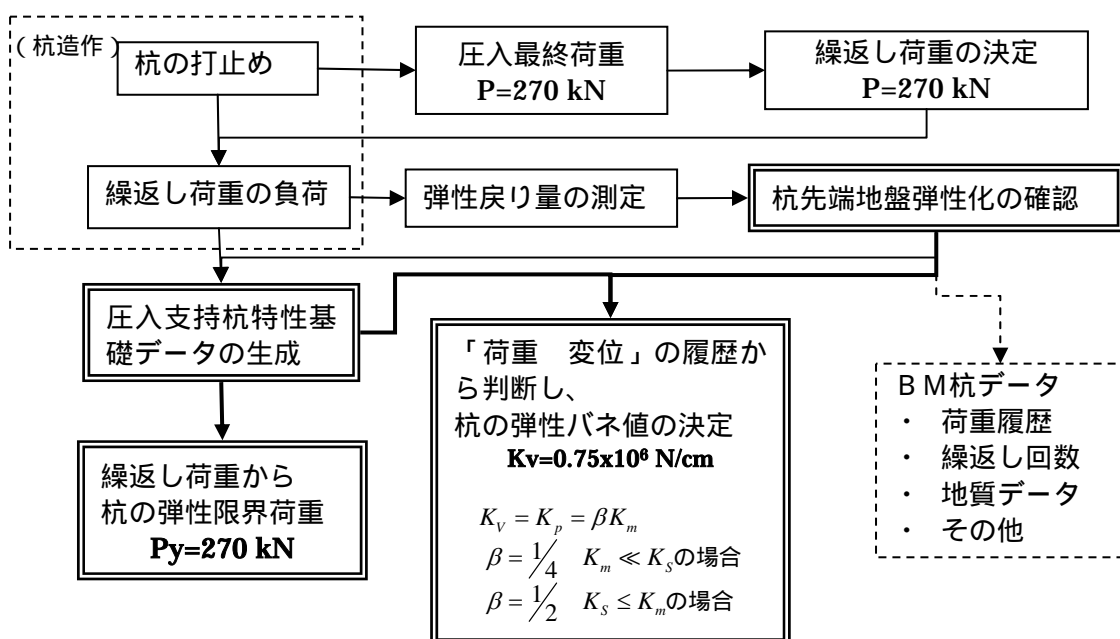
4.1 特性図の作成

圧入支持杭特性図は、杭の弾性限界荷重と弾性限界変位（杭の弾性バネ値）から構成されている。これらのデータは、杭を造作した時に得られたデータを基に作成される。

4.1.1 特性図の諸量

弾性限界荷重は、圧入最終荷重（想定支持層で観察された最大荷重）から繰返し荷重を決定し、この繰返し荷重を負荷する事で杭先端の地盤の弾性化を積極的に推進する。この時の弾性戻り量の観察から杭の「荷重 変位」の関係が弾性挙動を示している事を確認して、弾性限界荷重として固定し決定される。即ち、最終荷重がそのまま弾性限界荷重となるのではなく、最終荷重から決定した繰返し荷重を負荷した時の杭頭変位の観察によって、その荷重値を弾性限界荷重として固定する事になる。

杭の弾性バネ値は、杭（杭体 + 先端地盤）が弾性挙動を示す事を確認出来た時点で「荷重 変位」履歴の割線勾配で推定出来る。しかし、非排水状態での繰返し荷重が粒子構造体の粒子再配列を 100%完了させていると断定する事は不可能である。土中に存在する水の存在は繰返し荷重による土粒子再配列を阻害し続けるであろうし、粒子そのものの固体としての弾性が粒子構造体の安定に方向性をもたらす事も考えられる。この事からも、繰返し荷重によって達成された状態から除荷後に再度再配列の方向に向かう事が考えられる。この地盤の *reluctant* を考慮すると、安全側の推定が必要となる。以上の議論から前章までで測定した特性図の基本諸量決定のスキームと決定値は以下の様になる。



4.1.2 圧入支持杭特性図の完成

特性図を完成させる基本量が確定している。即ち、杭の弾性限界値（杭の鉛直支持力の限界値：限界荷重）と杭の鉛直バネ常数（杭の弾性バネ常数）から杭の弾性限界変位を求める事が出来る。

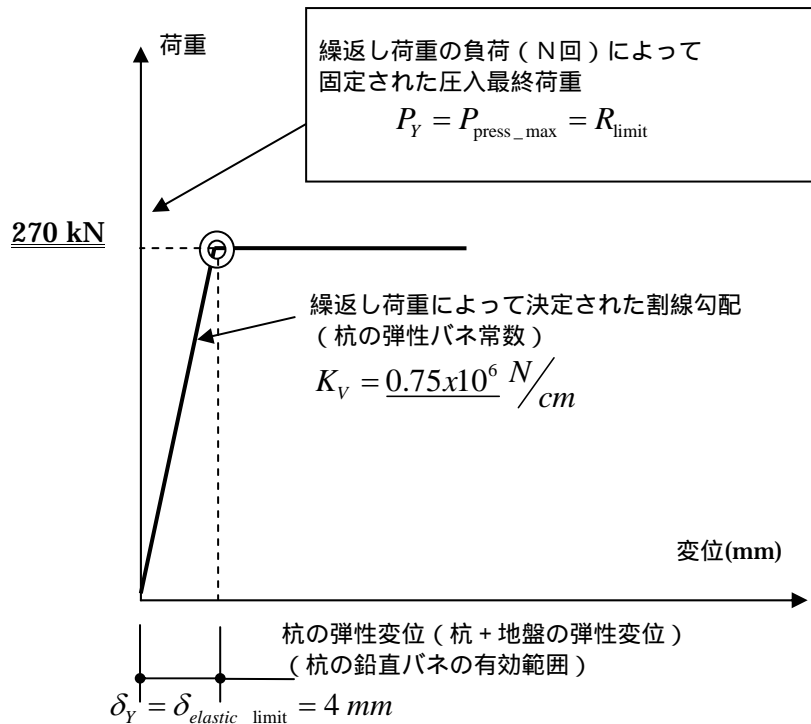
$$P_Y = \delta_Y \cdot K_V \quad \text{ie.} \quad \delta_Y = \frac{P_Y}{K_V}$$

$$P_Y = 270 \text{ kN} = 2.70 \times 10^5 \text{ N}, \quad K_V = 0.75 \times 10^6 \text{ N/cm}$$

$$\therefore \delta_Y = 0.36 \text{ cm} \approx 4 \text{ mm}$$

圧入支持力特性図は、この
 P_Y (杭の弾性限界荷重：限界荷重)、 δ_Y (杭の弾性限界変位)
 の2量で作成出来る。

圧入履歴から決定された圧入支持杭特性図



4.2 載荷試験による検証

4.2.1 検証する項目

載荷試験によって検証出来るのは、一般的には支持力だけである。ただし、杭の鉛直バネ常数は載荷試験のデータを検討する事で推定可能である。

杭の支持力は、杭の鉛直載荷試験で測定される杭の第2限界抵抗力（ある想定変位量に対する杭の最大抵抗力：杭の第2限界荷重）を以て評価する。この時の杭の評価値（杭の支持力）は、この第2限界抵抗力の1/3である。更に、測定データから荷重と変位が概ね線形近似出来る最大値をグラフ上から読み取って杭の第1限界抵抗力とし、杭の鉛直バネ常数を算出する根拠としている。

圧入支持杭の支持力だけを載荷試験で評価するのであれば、この杭の第1、第2限界抵抗力を求めてその大きさを評価すればよい。しかし、この評価では圧入支持杭の特性は評価出来ない。即ち、圧入支持杭の荷重限界値と変形限界が、載荷試験でどの様に評価出来、かつ特性図で示される杭の基本量の意味が検証されなければならない。

第1の検証点は、杭の弾性挙動である。杭を造作した時の繰返し荷重によって杭は弾性限界荷重まで弾性挙動を行う事が確認されている。この挙動が時間変化の影響を受けずに地盤の中で固定出来ていなければならない。載荷試験で検証するためには杭の第1限界抵抗力で比較すれば、近似的な比較が可能である。第1限界抵抗力は、必ずしも杭の弾性を表現しているとは言い切れないが、逆に杭が弾性であればこの値は線形で再現される事になる。

第2の検証点は、杭の支持力である。杭の支持力の算定には杭の第2限界抵抗力を1/3で評価する事で行われている²⁴。これは杭の使用範囲を杭の弾性範囲に固定するための方便であり、この事は逆に杭としての機能が弾性範囲に限定していることを示唆している。

圧入支持杭の線形部分と第2限界抵抗力を比較して、杭としてどこまで有効であるかを検証する。

²⁴ この根拠は、鉛直載荷試験で得られる「荷重 沈下」曲線を一般化して、第1限界抵抗力の1/2までは杭は線形挙動し、それ以降はワイブル曲線で近似出来る形となるという事を根拠としている。杭を線形部分で設計するために、1/3と言う値を採用する必要がある。

この曲線上では、第1限界抵抗力は第2限界抵抗力の2/3の地点にあり、第1限界抵抗力が直接測定できないことから第2限界抵抗力で線形部分を推定するという方法がとられている。即ち、

$$\text{(杭の線形部分の比率)} = \frac{\text{(第1限界抵抗力)}}{2} \times \frac{2\text{(第2限界抵抗力)}}{3\text{(第1限界抵抗力)}} = \frac{\text{(第2限界抵抗力)}}{3}$$

4.2.2 杭の載荷試験概要²⁵

杭の載荷試験による確認を繰返し荷重負荷直後（摩擦回復による影響が最も少ない場合）と、2週間放置した杭について実施した。

載荷方式は、連続多ステップ方式とした。ピーク荷重で荷重保持せず昇圧、荷重解放の繰返しによる載荷重の漸増を行い「荷重 - 沈下」曲線を作成した。地盤工学会「杭の鉛直載荷試験・同解説」の規定に従い、載荷試験の結果は「杭の第1限界抵抗力」「杭の第2限界抵抗力」「杭の鉛直バネ常数」を求め、圧入支持杭特性図との比較を行った。

圧入支持杭は、特性図に示されるように弾性範囲においては全区間有効支持力になる。これは、杭の弾性変位と荷重との関係が明確に関連づけられている事に由来し、かつ最終荷重（圧入最終荷重）を静的に繰返し載荷している事に由来する。

前節で議論した通り、この荷重特性・変形特性を杭の載荷試験で検証する訳であるが、地盤工学会「杭の載荷試験」に規定する第1、第2限界抵抗力と圧入支持杭の支持力の概念は異なる。しかしながら、現在の設計基準（杭耐力の決定基準）がこの限界抵抗力を基準として作られていることから、本実験の結果は、地盤工学会「杭の鉛直載荷試験・同解説」の規定に従い整理し、その値と圧入支持杭特性図との比較を行う事とする。（前節 4.2.1 での検証項目）

「第1限界抵抗力」の算出は、「荷重 - 沈下(変位)」の関係を $\log P$ および $\log S$ の関係で捉え、グラフ上で折れ点の生ずる点が限界値（限界抵抗力）であると推定した²⁶。

「第2限界抵抗力」は、杭の沈下量（変位量）の限界値規定（杭径の10%に相当する沈下量 = $0.1D$ 変形量）で、グラフ上の交点から推定した²⁷。

²⁵ APPENDIX 参照

²⁶ 対数グラフ上にプロットされた点を2種類の直線で推定し、この2直線の交点を抵抗力とする。直線の決定に恣意性が得るため厳密には決定できない。

²⁷ 「荷重 - 沈下」曲線のプロット後、規定沈下量（ $0.1D$ ）を限界値として、この沈下を生じさせる荷重値をグラフ上から推定する。一般的には、この荷重近傍で杭は急速変形（沈下）を始めるため「第1限界抵抗力」と同様に厳密には推定できない。しかし、現行基準では、この値を更に1/3で評価するため、厳密に規定する必要はない。

4.2.3 載荷試験結果

圧入支持杭造作履歴（圧入支持杭特性図）と各載荷試験の結果は以下の通り。

項 目	7.24.03 施工	7.24.03 実施	8.07.03 実施		
	圧入支持杭	打抜 - 1	打抜 - 2	打抜 - 3	打抜 - 4
圧入最終荷重	$P_{press_MAX} = 270 \text{ kN}$				
弾性限界荷重	$P_Y = 270 \text{ kN}$				
第 1 限界抵抗力		320 kN (S=5.1mm)	320 kN (S=3.5mm)	320 kN (S=4.0mm)	320 kN (S=4.5mm)
第 2 限界抵抗力		358 kN (S=30mm)	419 kN (S=30mm)	416 kN (S=30mm)	435 kN (S=30mm)
弾性変位限界	$\delta_Y = 4 \text{ mm}$				
杭弾性バネ値 $K_v (N/cm)$	0.75×10^6	0.6×10^6	0.8×10^6	0.8×10^6	0.7×10^6

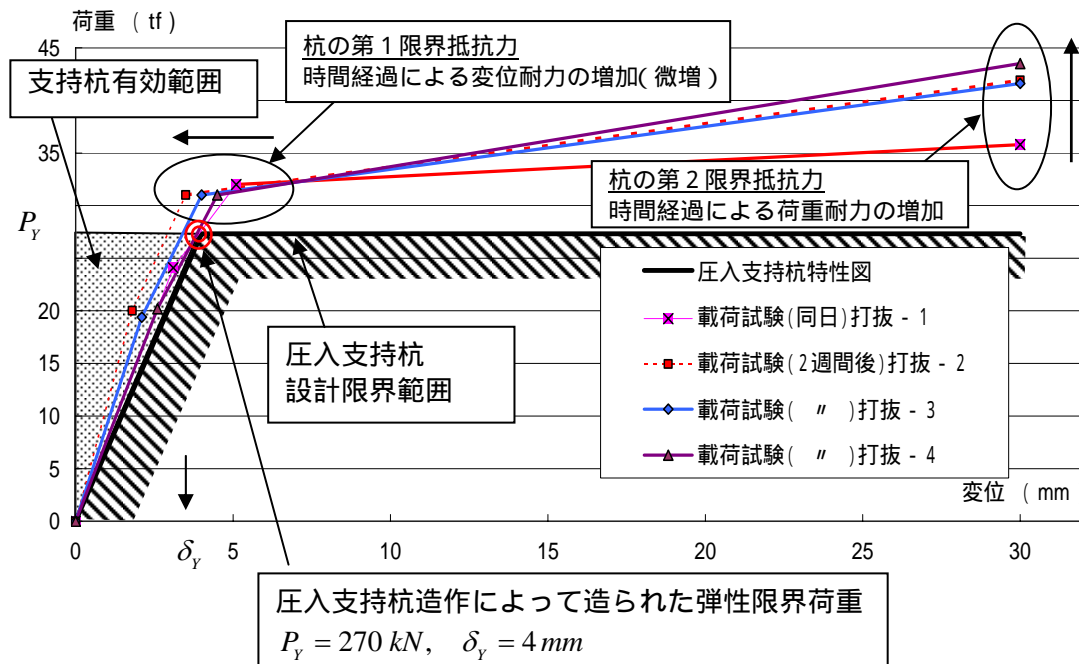
載荷試験で確認した杭の第 1 限界抵抗力は、4 実験とも同一の値となった。抵抗力に対応した杭の沈下量に若干の変動はあるものの、4 mm の近傍となっている。

杭の第 1 限界抵抗力は厳密に杭の弾性抵抗を示していないが、逆に杭が弾性状態であれば、第 1 限界抵抗力が弾性抵抗を示す指標となり、この値が同一値となることは当然のことと言える。圧入支持杭は杭先端地盤を弾性化させており、この弾性状態が保存されていると言う事が、4 試験とも第 1 限界抵抗力が同一である事で推定出来る。沈下量の若干のバラツキは、載荷初期の杭抵抗の違いや、やや厳密さを欠く第 1 限界抵抗力算出方法に起因していると思われる²⁸が、全体的な傾向として、弾性化された杭は時間が経過しても弾性挙動を再現していると言える。

第 2 限界抵抗力は時間とともに増加している。これは、摩擦回復による影響であると思われる。圧入支持杭特性図からは、杭の第 2 限界抵抗力に対応するデータは得られないが、試験で確認する限界抵抗力が杭の弾性限界荷重を上回っていれば問題はないと言える。

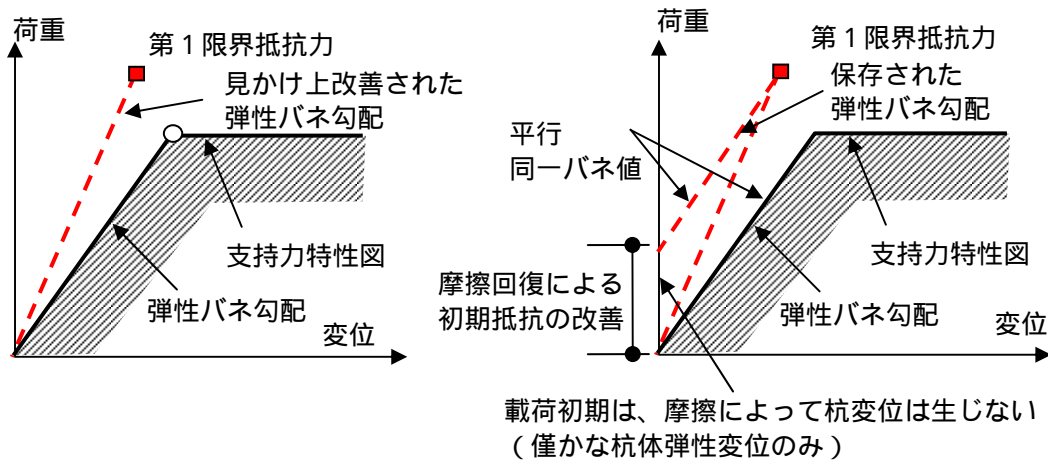
²⁸杭の第 1 限界抵抗力は「logP-logS」曲線から二直線を抽出し、その直線交点から限界抵抗力と沈下量を読み取るという曖昧さを持っている（現行基準）

載荷試験結果と圧入支持杭特性図



杭の第1限界抵抗力は上図の左側に示され、第2限界抵抗力は右側に示されている。圧入支持杭の特性図は斜線で示された直線であり、載荷試験の結果は第1、第2限界抵抗力とも特性図を上回っている。

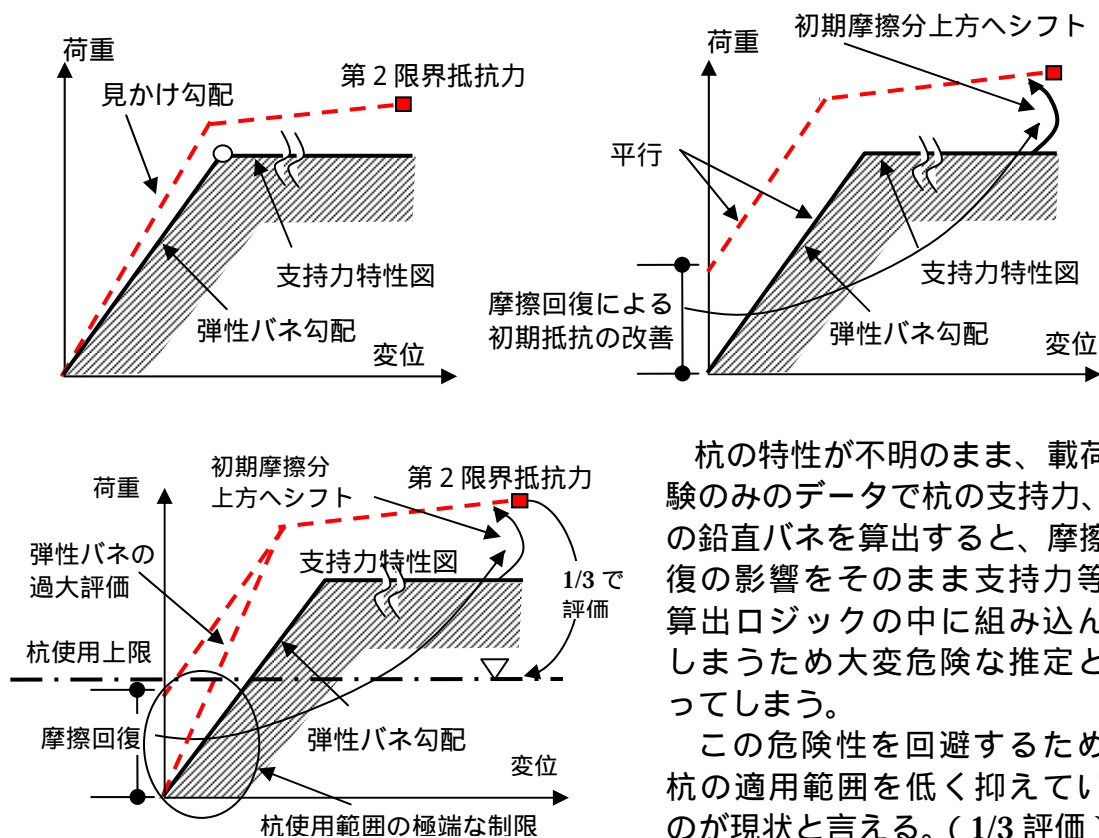
第1限界抵抗力に至る直線は、特性図の直線の外側を通過しており、更にほぼ特性図の直線と同一となっている。これは杭先端地盤の弾性化の影響が保存されている事を示しており、更に若干ながら摩擦回復による見かけ上の剛性が向上している事を示している。しかしながら杭の弾性挙動は純粋に杭材量と先端地盤の弾性に依存するため、摩擦回復によって弾性が改善されたのではなく、勾配は一定のまま摩擦力が初期抵抗を改善したと見るべきであると思われる。



杭の第2限界抵抗力は摩擦回復の影響が大きく現れている。しかし、圧入支持杭特性図に示されている様に、杭の第2限界抵抗力は塑性域であり、この値は単に塑性変形に見合った荷重値を示しているにすぎない。この状態は、杭の先端部分での抵抗力がある荷重（圧入支持杭の弾性限界値）以上で抵抗出来なくなり、単純に変形を進行させている状態であると言える。

実際の杭（圧入支持杭）は完全弾塑性挙動（圧入支持杭特性図）をしないため、弾性限界以降も完全な塑性状態ではなく、抵抗しながら変形する状態となり若干の荷重の増大が観察される。しかし、この領域が塑性域であることは「荷重 - 変位」の変動幅からも明らかであり、この領域の値が杭の最重要値であるとは俄には信じがたい。

第2限界抵抗力が時間とともに増加する原因は、第1限界抵抗力の見かけ上の剛性が増加するのと同様の現象で、初期抵抗力の改善が大きく寄与していると思われる。摩擦力は杭の変形が進行しない段階で威力を発揮するが、杭が変形（沈下）し始めると威力は激減する。以降は杭材量の剛性と杭先端地盤の抵抗力だけで荷重に抵抗する事になる。即ち、杭の荷重特性だけで抵抗する事になる。杭特性は、先に検討した様に第1限界抵抗力が保存されている事から、塑性域を含めて全体的に保存されていると考えられる。従って、摩擦の影響（摩擦回復の影響・効果）は、杭特性を変化させるのではなく単純に摩擦抵抗分上方にシフトただけであると推定出来る。



杭の特性が不明のまま、載荷試験のみのデータで杭の支持力、杭の鉛直バネを算出すると、摩擦回復の影響をそのまま支持力等の算出ロジックの中に組み込んでしまうため大変危険な推定になってしまう。
この危険性を回避するために杭の適用範囲を低く抑えているのが現状と言える。(1/3評価)

4.2.4 支持杭特性図での検証

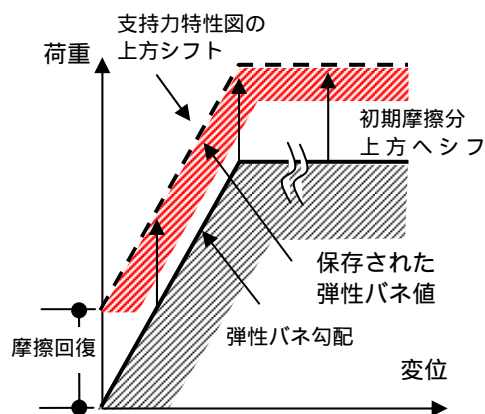
圧入支持杭特性図が杭支持力の特性を十分表現出来ている事は、前節で載荷試験結果と照合する事で明らかとなった。本節はこれをより具体的に検証する。

圧入工法を用いて造作された支持杭は、繰返し荷重によって最終荷重が弾性限界荷重に固定される。この時の荷重履歴から弾性状態が確認されたならば、弾性バネ値は自動的に決定される。このバネ値は杭体（杭材量）のバネ値に係数を乗じて求められる。即ち、杭のバネは杭体（杭材量）に依存し、杭長に反比例し杭断面積と杭材量の剛性に比例する²⁹。

第1の検証点である杭の弾性挙動は、バネ値が保存されるという点であった。これは実験結果から弾性バネ値は時間に依存せず土中で保存され再現される事が確認された。見かけ上改善される弾性バネ値も摩擦回復による初期抵抗の増加を考慮すると、造作時の弾性バネ値がそのまま再現出来ていると推定する事が可能である。特性図での弾性バネ勾配がそのまま有効となっている。

第2の検証点は、杭の支持力であった。支持力の上限は、杭弾性の上限であり塑性域を考慮する必要はない。前述の弾性バネ値が保存されているため弾性限界も保存出来ていると言える。この事は、杭の第1限界抵抗力が繰返し荷重によって固定された杭の弾性限界値（ $P_Y = P_{repetitive} \approx P_{press_Max}$ ）よりも大きな値となっている事で確認出来る。従って、杭造作時に作成した支持力特性図は、割線勾配（杭の弾性バネ値）も弾性限界値も時間依存せずに保存出来ている事を示している。

この事は、この特性図が、造作した杭の「固有の支持力特性」を表している事を意味し、摩擦回復等杭に有利な条件となったとしても特性図は変化せず、上方に平行移動した形で特性が表現できることを示している。杭としての機能の限界点は、弾性限界点であり、塑性域での荷重値を曖昧なまま1/3で評価する必要は無く、杭造作時に決定した弾性限界荷重を上限支持力とすることが出来る。



$$^{29} K_v = \beta K_m = \beta \left(\frac{A_p E_p}{L} \right)$$

バネ値を改善するには杭材量（ E_p ）を変更する事が有効であるが、コストを考慮すると杭長を短くする事が最も効率的である事が分かる。このバネ値は材料依存であることから時間経過に関係なく保存維持される。

第5章 圧入支持杭の設計法

前章までの議論によって圧入工法で造作された支持杭（圧入支持杭）は、支持杭として機能し、かつ造作履歴等から作成される「圧入支持杭特性図」は、荷重除去後も保存される事を確認した。

圧入支持杭設計法の二本の柱のうちの一つは、支持杭の荷重・変位特性を再現性のある造作方法によって、「支持杭特性」として土中に固定する方法論（杭造作方法および杭造作工法）であった。もう一つの柱は、支持力特性図が作成出来ると言う杭設計法の特徴を生かして、今まで一方向であった設計の問題点を解消し、杭および杭基礎としての実測データを設計にフィードバックさせる設計スキームを構築するというものである。

本章は、圧入支持杭の基本設計理念と設計をフィードバックさせる設計スキーム及び杭打設後の集合された杭群の評価方法について検討する。

5.1 圧入支持杭設計の基本

圧入支持杭設計の基本は、支持杭を造ることにある。杭の支持力機構は、広義の定義として摩擦杭と支持杭に分かれるが、圧入支持杭はこのうちの支持杭に属し、更に、圧入支持杭の造作方法に由来した、純粋に先端支持力にのみ依存した狭義の支持杭に特化している。

圧入支持杭の設計の基本は、摩擦影響を最小化して杭先端に負荷を集中させ、そこから抵抗力としてフィードバックされる力と発生力を一致させることで最大発生力 = 最大抵抗力の関係を導き、更に、その先端抵抗力を直接的に測定することで成立している。最終圧入荷重（杭の最終抵抗力）を繰返し荷重負荷で固定し、これを杭の特性を支配する基本量（弾性限界荷重と弾性限界変位）として特性図を完成させる。

この特性図作成で圧入支持杭の造作は完了するが、本来は杭設計を工法で規定するのではなく、工法を選択する設計のロジックで決定すべきである。杭材量を決定し、杭の設計耐力を決定し、杭基礎としての上部構造物に対応した変位特性を設計で規定する必要がある。これらの設計要求に対して、杭設計のロジックが対応していればよく、そのロジックを実現する再現性のある杭造作方法が、杭工法となるわけである。

5.1.1 基本検討項目

圧入支持杭の設計は、杭の耐力との関係で基本検討項目が定められる。

- 1 杭の抵抗力が設計荷重を上回ること

$$P_{design} < P_{allowable} = R_{limit} \quad (\text{設計法では } P_{design} < P_Y)$$

- 2 杭部材応力が部材の許容応力度以内に収まること

$$\sigma_{actual} < \sigma_{design} < \sigma_{allowable}$$

- 3 杭変位が上部構造の要求する変位以下であること

$$\delta_{actual(\text{推定})} < \delta_{design} \quad (\text{設計法では } \delta_{design} \leq \delta_Y)$$

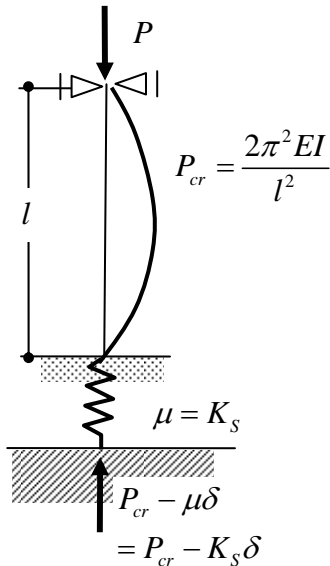
- 4 上部荷重に対して杭基礎全体の支持力信頼性が確認できること

$$\text{安全性指標 } \beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - S}{\sigma_R} = 2.3 \sim 3.1 \text{ を確認}$$

前記4つを満足することで、杭が荷重に対して破損せず、上部荷重に対して抵抗力を持ち、変形が許容値に収まり、最終的に構造物と基礎を信頼性評価で結び付けることが出来る。この4つの検討を圧入支持杭設計の基本スキームとする。

5.1.2 検討項目の詳細

前記のうち2は、設計の初期において検討され、杭材の選定とサイズの決定に用いられる。杭サイズ選定に関しては座屈応力度の検討を行う。



圧入支持杭は、杭周面摩擦を最小化しているため安全サイドの検討として、杭周面の弾性反力を想定せず、Eulerの長柱座屈理論が適用できる。

この時の圧入支持杭のモデルは、1端ピンローラ-1端固定の長柱となる。しかし、先端に地盤バネがあるため変位が生じ、座屈荷重が緩和される。

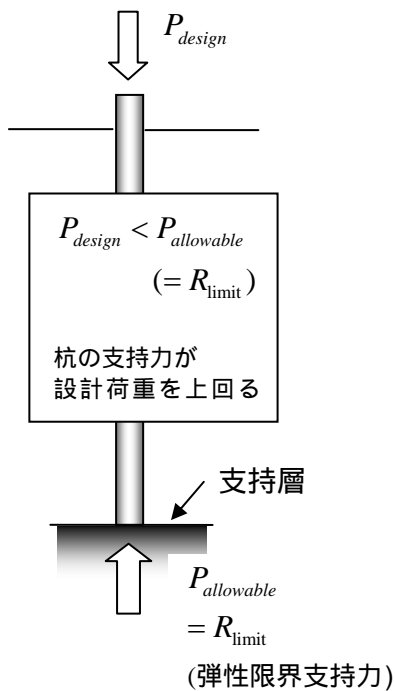
座屈荷重の推定値は以下とする。

$$P_{cr} - K_s \delta_y = \frac{2\pi^2 EI}{l^2}$$

$$\therefore P_{cr} = \frac{2\pi^2 EI}{l^2} + K_s \delta$$

この荷重によって決まる杭サイズが最小杭サイズとなる。

1 設計支持力



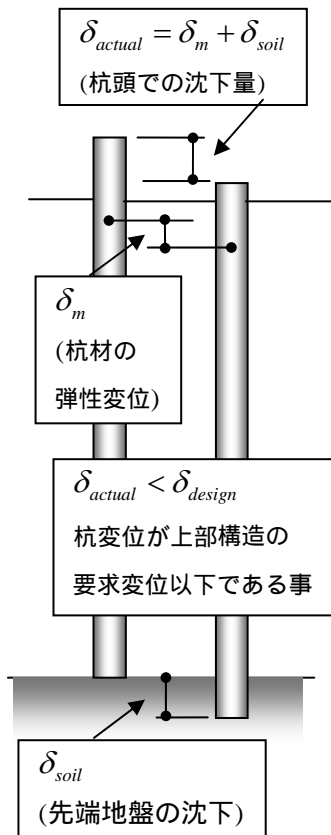
圧入支持杭は支持杭であるため1の検討が最重要の検討項目となる。この支持力決定は、現状は支持力推定式によって算出されるが、圧入支持杭設計ではBM杭を施工して仮の支持力値を決定する。

このBM杭（ベンチマーク杭：実験杭）が支持力の第一決定値となる。この値がフィードバックされ設計の見直し、荷重値の最終決定等が行われる。杭の許容荷重は、BM杭施工後は、弾性限界荷重（ P_Y ）となり、この値と設計荷重との比較となる。

$$P_{design} \leq P_Y$$

実施工においては、すべての杭に対して実耐力を測定し、全数設計荷重を上回ることを、もしくはBM杭データと同等であることを確認する。BM杭は、実施工の施工目安としても用いられる。

3 杭変位



3 の検討も B M 杭によって確認される。一般には、杭の変位は杭体（杭材量）の変位と杭先端地盤の変位が加算されて表現される。荷重に対する各々の変位分担が必要になるが、B M 杭施工後は、これが一元化される。

B M 杭造作後は、杭の変位は杭体と地盤に分ける必要がなくなり、両者の合成として表現される。

左図は、通常の杭の変位に対する考え方である。杭の弾性変位と地盤の弾塑性変位が複雑なプロポーションで分担する。このため変位量を推定せざるを得ない。

B M 杭からの変位データは、特性図を構成する基本量であり確定値である。このため地盤を含めて杭としての「荷重 変位」が規定される。杭変位の限界値は、杭の弾性変位の限界値でもある。杭が荷重変動に対して弾性で抵抗するため、弾性限界変位までは線形で抵抗出来る。

即ち、設計で規定する杭の変位に対しては、B M 杭データから作成された杭の特性図の基本量の一つである杭の弾性限界変位量を比較すれば良い事になる。

$$\delta_{design_max} \leq \delta_Y \text{ (杭の弾性限界変位)}$$

通常の設計では逆の考え方で、推定沈下量が設計沈下量を下回っていれば OK となる。しかし、圧入支持杭では設計沈下量が実測値である杭の限界変位を下回ってはいなければならない。この関係が逆転すると杭は沈下する。

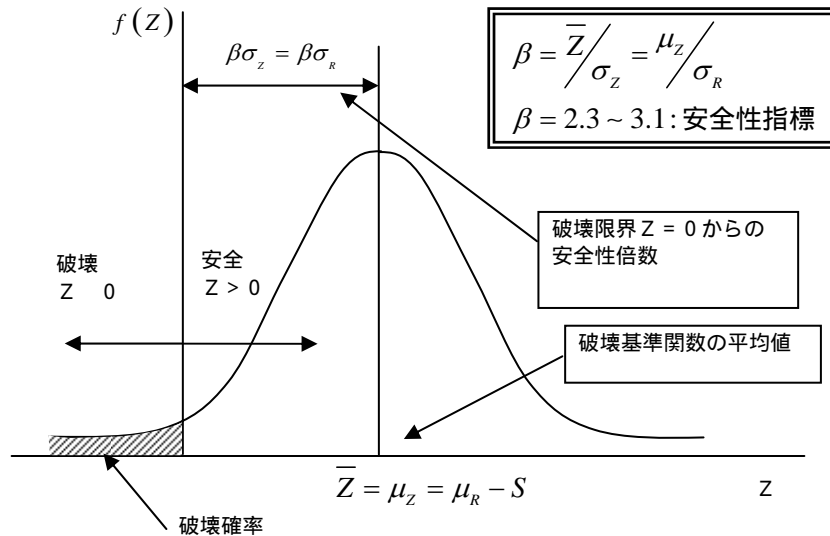
通常設計では $\delta_{推定} < \delta_{design_max}$ であれば OK

圧入支持杭設計では $\delta_{design_max} \leq \delta_Y$ が必要

即ち、圧入支持杭設計法では、実測データ（ δ_Y ）で設計の設定変位を検証するのにに対して、現状の設計法では、設計変位に対して推定値の大きさを規定しており、設計変位の妥当性もしくは変位推定値の妥当性は不問のままとなる。このため現実的には、検証出来ていない。

圧入支持杭設計法では、実施時には全数の杭に対して限界変位を確認出来る。この確認も B M 杭のデータを基準として、杭頭弾性戻り量の測定で簡単に行う事が出来る。従って設計基準として、すべての杭の弾性戻り量が限界荷重を负荷した時に設計変位量以下であることを設計・施工の原則とすることが出来る。

4 信頼性評価



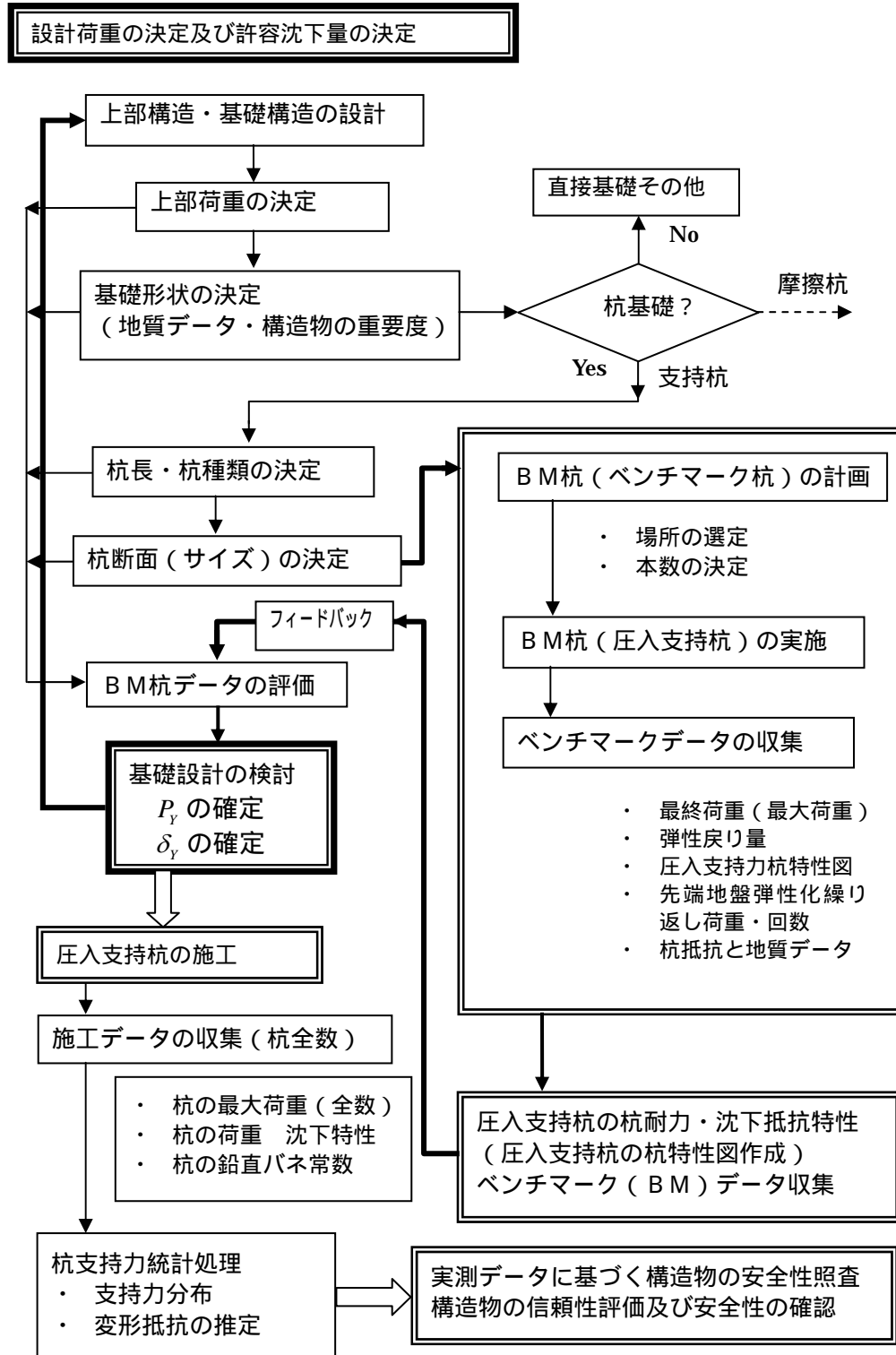
4 の検討は、基礎全体の信頼性照査に用いる。圧入支持杭の施工杭の全数が、設計荷重を上回ることが施工中に確認できる。この検討（集合杭の信頼性評価）は、圧入支持杭全体で構成される集合杭の信頼性照査として最終確認項目とすることが出来る。

圧入支持杭による杭基礎設計の基本は、施工時に収集したデータのみを用いて検討することを原則としている。従って、推定要素を排除し実測確定値のみを用いて基礎を評価するとともに個々の設計要求を満足させる。更に最終的には上部構造物との安全信頼性を信頼性評価を行う事で照査する事が、基本スキームとなる。

現状の設計法は、推定値だけで構成されているため、第1章第4節（1.4 杭設計の問題点）で議論した一方向の設計スキームに矛盾は生じないが、実測値を設計に反映させる設計スキームでは、設計値の信頼性・信憑性・確実性が常に実測値との間で検証される事になる。このため安全率で数値を曖昧化させるという便宜手法は意味を持たない事になる。

推定値だけで構成された杭基礎は、施工完了後も推定値の集合のみであるが、確定値を用いて設計・施工を行うと施工完了後は、杭基礎全体に亘り実耐力（実耐力の限界ポテンシャル）を求める事が出来る。これが で行う基礎と構造物を含めた安全性に対する信頼性評価となる。

5.1.3 圧入支持杭の基本設計スキーム



5.2 杭変位量（許容変位量）の決定

基礎の許容変位量は上部構造の重要度によって単純に規定される場合と個別に規定する場合がある。いずれの場合も基礎の変位量は、上部構造に規定される変位量を超えてはならない。しかし、この規定は、杭の荷重耐力と厳密にリンクして議論されているわけではない。通常的设计では、荷重による杭の変位性能と杭の支持力は別の議論として取り扱われており、各々の推定・算出根拠も別な議論として扱われている。圧入支持杭の場合は、荷重耐力と杭の変形性能は同一の議論である。両者は独立に存在するのではなく、互いに従属している。

上部構造の許容変位量は構造設計の考え方に依存するため絶対量では規定できないが、圧入支持杭の圧入履歴から決定される許容変位量（弾性限界変位量）は、杭が支持層で支持された時の固有の絶対量となる。杭が持つ、変位に対する絶対的な上限値であるため、如何なる場合も構造設計によって決定される変形量をカバーしている必要がある。上部構造から規定される変形の許容量（最大変位と考える）が圧入支持杭の弾性変位限界以上であるときは、杭は変位に抵抗出来ないことを意味し、設計の変更が必要になる。しかし、この時の杭に対する設計荷重が、杭の弾性限界荷重以下であれば、逆に構造物の変形量は荷重値から規定される変位量によって規定される。どちらの値を優先するかは、設計のポリシーであり、更に、両者が極端に違う場合は設計変更が要求される。しかし、この節は変位重視の考え方で議論を進めることとする。

許容変位量は、上部構造物によって規定される。この時、圧入支持杭の支持力特性図から決められる変形量（変位量）が杭変位の限界値となる。

$$\delta_a = \min \left[\delta_Y (= \delta_{\text{elastic_limit}}), \delta_{\text{allowable_superstructure}} \right]$$

即ち $\delta_a = \delta_Y < \delta_{\text{allowable_superstructure}}$ or $\delta_a = \delta_{\text{allowable_superstructure}} < \delta_Y$

$\delta_Y (= \delta_{\text{elastic_limit}})$ は、圧入支持杭特性図作成時に決定した杭の実際の弾性バネ常数から求められた値であり、 $\delta_{\text{allowable_superstructure}}$ は、上部構造物の重要度その他から規定された目標値もしくは設計値である。

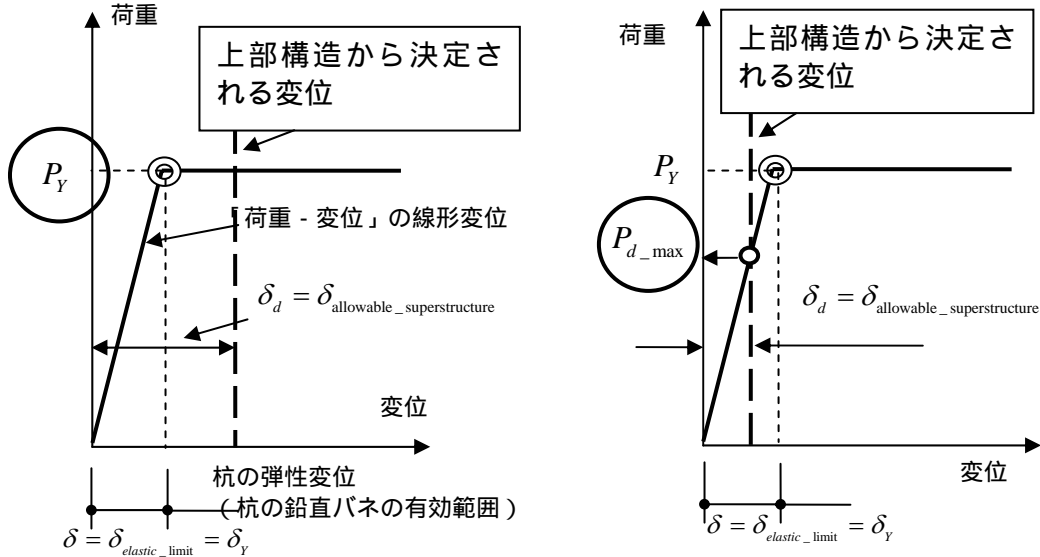
変位に対する規定値がない場合は、 $\delta_a = \delta_*$ 、 $\exists \delta_* \leq \delta_Y$ となる。この時、杭に働く荷重値は $P_{\text{design_settlement}} = K_V \cdot \delta_a$ となる。この値が、設計荷重と大きな矛盾がなければ、杭に働く設計荷重は見直す必要はない。

上部構造から規定される変位量が、圧入支持杭の変位特性よりも可成り厳しい場合は、変形量の制限値から杭の上限荷重を規定し直す必要がある。この上限荷重は、杭の特性図から算出する。この上限荷重が、設計上載荷重よりも小さい場合は、杭設計の見直し、もしくは上部構造の見直しが必要になる。

許容変位量と設計荷重

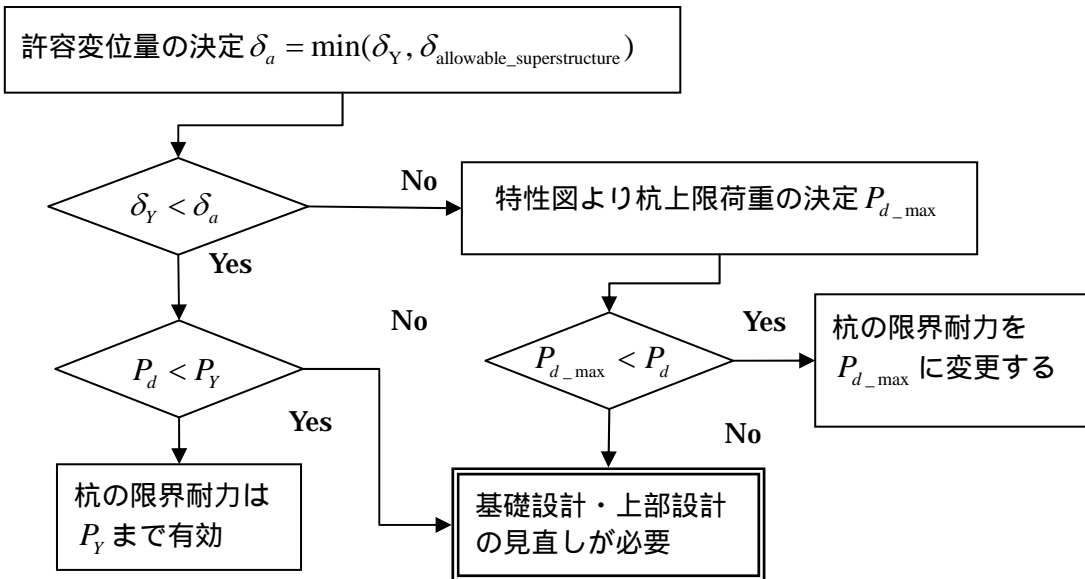
$\delta_Y \leq \delta_d$ の場合
 $\delta_a = \delta_Y$

$\delta_d \leq \delta_Y$ の場合
 $\delta_a = \delta_d$ 但し、 $P \leq P_{d_max}$



圧入支持杭特性図

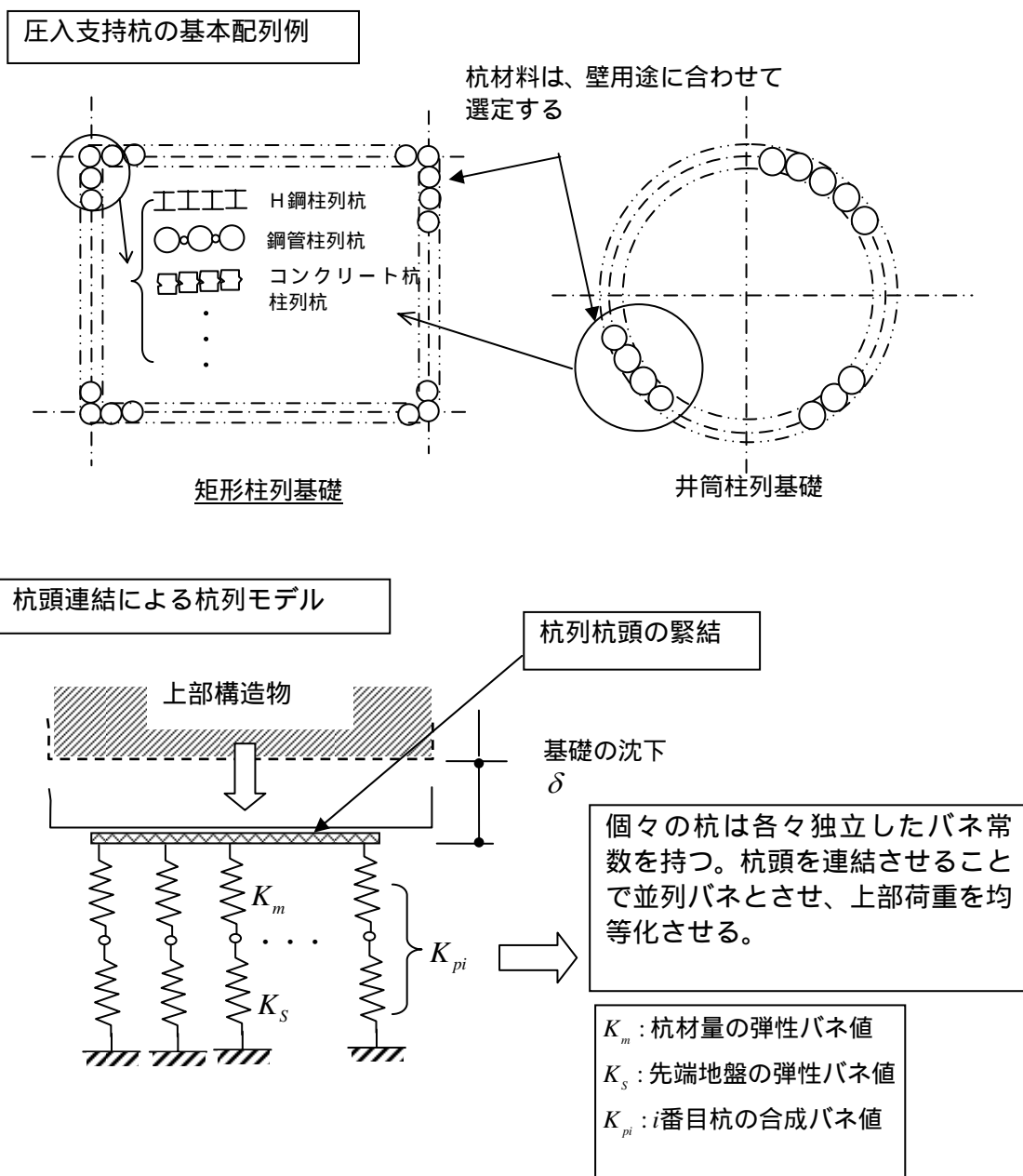
設計変位が、圧入支持杭特性図で示される弾性変位よりも大きければ杭耐力は P_Y までが有効になる。設計変位が、特性図よりも厳しければ、杭耐力の最大値の見直しが必要になる。この時、設計荷重がこの値を上回っている場合は、基礎構造・上部構造とも見直しをする必要がある。



5.3 集合杭と信頼性評価

5.3.1 圧入支持杭の配列

圧入支持杭は圧入工法の特長により連続杭打設の柱列型基礎が一般形となる。杭列を閉合させることで杭基礎全体が一体となる構造となっている。杭列頭部を緊結させ、杭列全体が頭部において連続することで上部荷重が均等配分出来る構造となっている。



5.3.2 集合杭の信頼性評価（支持力評価）

圧入支持杭は、単杭施工ではなく集合杭として施工される。このため単体での評価ではなく、杭全体の信頼性を確認する必要がある。各々の杭は杭造作の施工時に支持力を確認しており、杭のバネ常数も施工履歴の中で決定が可能である。よって、杭単体の支持力は直接的に設計値に対する数値の比較によって確認が可能である。が、連続施工された杭が集合されて一体となったときの全体の信頼性は、数値比較だけでは確認できない。これを確認する必要があり、むしろこの評価が最も重要な杭基礎（集合杭）の支持力評価となる筈である。

圧入支持杭は、摩擦影響を無視できるため杭一本ごとの支持力は先端支持力値だけで表現できる。（摩擦抵抗力の分布を無視できるため、支持力分布の統計量は先端支持力の支持力平均値と支持力の分散だけで表現できる）これらを集合的に評価することで設計荷重に対する安全性と信頼性を確認できる。信頼性は、安全性指標によって評価され、これは作用側と抵抗側の荷重差の分布の確率的な評価となる。

構造物の安全性に關与する不確定量を抵抗要素と作用要素に以下のように分ける。

R：抵抗強度に關係するものを代表（限界抵抗力の集合）

S：作用荷重に關連するものを代表（設計値一定：S = 一定）

これらは互いに獨立している。両者の關係を評価する確率変数を定義する。

$$Z = R - S$$

$R > S$ ならば $Z > 0$ 安全

$R \leq S$ ならば $Z \leq 0$ 破壊もしくは限界状態

Zを破壊基準関数とする。

例え荷重値が獨立に変動する場合であっても、常時荷重（地震時荷重に対しては割り増し）のみを考慮する場合であっても、上記の破壊基準関数で評価できる。常時荷重のみを考慮する場合は $S = \text{一定}$ であるため破壊基準関数は、杭の抵抗強度だけの分布形で規定できる。圧入支持杭は、杭配列で示したように集合杭となるため一つの基礎構造体に杭が数多く配置される³⁰。各々の杭は厳密には異なる抵抗強度（支持力特性）を有しており、全体の抵抗力は統計的分布する。

抵抗力の分布は、母数が十分に大きいことから正規分布形になる。この時、設計荷重に変動がない場合（ $S = \text{一定}$ ： $\bar{S} = \mu_s = S(\text{設計荷重})$ ， $\sigma_s = 0$ ）関数Zの

³⁰ 例え、駐輪場基礎体であれば、直径約7mの円筒基礎で、H鋼杭53本を使用する。

標準偏差と平均値は非常に簡単な形で表現できる。一般的に、この比を安全性指標として定義する。この指標は、変動係数の逆数となっており、設計荷重と抵抗力に変動が小さければ大きな値を与える。

$$\beta = \bar{Z} / \sigma_Z$$

β : 安全性指標

\bar{Z} : 破壊基準関数の平均値 ($\bar{Z} = \bar{R} - \bar{S}$)

σ_Z : 破壊基準関数の標準偏差

定義した破壊基準関数 Z の統計量は、

$$\bar{Z} = \mu_Z = E[Z] = E[R - S] = \mu_R - S$$

$$\sigma_Z^2 = V[Z] = E[(Z - \mu_Z)^2] = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2\rho_{RS}\sigma_R\sigma_S = \sigma_R^2$$

$$\therefore \bar{Z} = \mu_R - S, \quad \sigma_Z = \sigma_R \quad \left[\begin{array}{l} \because \text{作用荷重 } S \text{ の分布は、} S = \text{一定} \\ \text{よって、} \mu_S = S, \sigma_S^2 = 0 \text{ となる} \end{array} \right]$$

(破壊基準関数の平均も標準偏差も杭の統計量だけで示される)

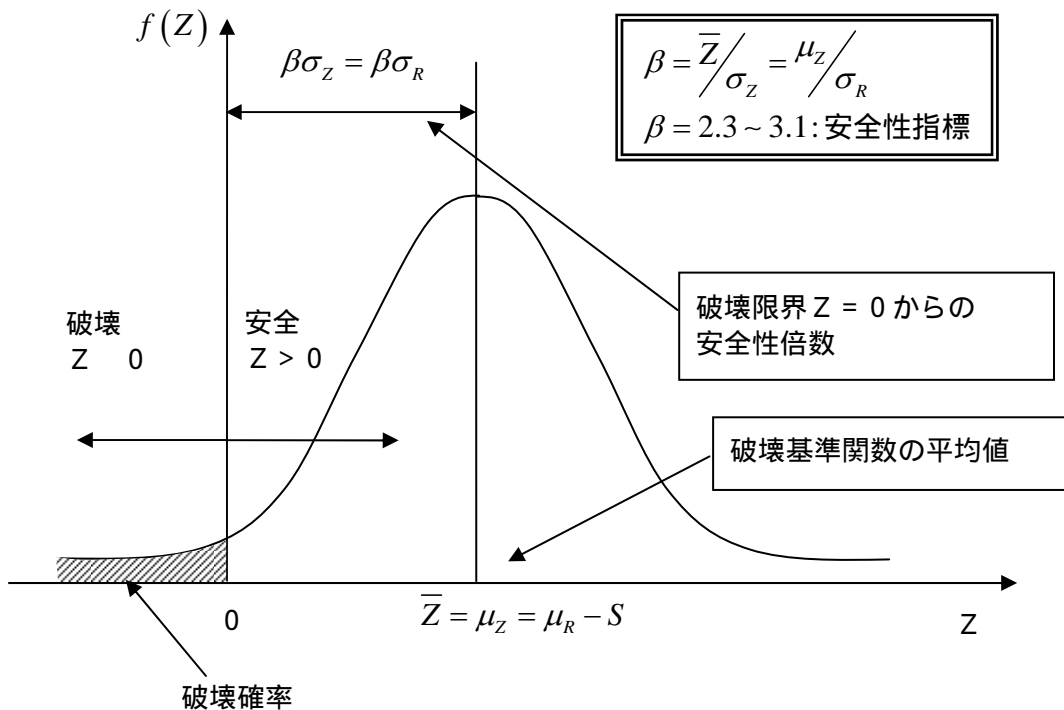
安全性指標を $\beta = \bar{Z} / \sigma_Z$ で定義した故、 $\bar{Z} = \mu_Z = \beta\sigma_Z = \beta\sigma_R$ となる。これは、施工済みの杭データの標準偏差が、破壊基準関数の平均値周り（破壊に対する安全比率）にどれだけ破壊限界から離れて存在しているかと言うことを示している。

破壊基準関数 Z の負の部分 ($Z = R - S < 0$) は破壊状態であり、確立密度関数を積分する事で破壊確率を求めることができる。

正規分布は $f(Z) = \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\sigma_z^2}(z-\mu_z)^2}$ ($-\infty < z < \infty$) で与えられ 標準正規確率密

度関数は、 $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 但し、 $u = \frac{z - \mu_z}{\sigma_z}$ で表される。

$Z = 0$ の時に破壊するため破壊の確率密度関数の基準化変数 u は、 $u = -\mu_z / \sigma_z = -\bar{Z} / \sigma_z = -\beta$ となり、破壊確率を与える。この時の値を逆算して安全性指標 が求められる。



正規確率密度関数から求められる破壊確率とそれを与える u の値、即ち β の値は以下の通り。

破壊確率	10%	1%	0.1%	0.01	0.001%
安全性指標	1.28	2.33	3.09	3.72	4.26

集合杭の評価を、信頼性評価で行えば $\beta = \frac{(\mu_R - S)}{\sigma_R} = 2.3 \sim 3.1$ の値で基礎の安全性は 99% ~ 99.9% 確保できることになる。

圧入支持杭を集合した基礎は、杭の施工履歴（全杭の支持力特性値）を整理した後、信頼性評価係数 ≥ 2 以上（3 以上あれば、ほぼ破壊確率を無視できる）が確保できれば、上部・下部構造を含めた形で、杭基礎の信頼性が確認できる。

第6章 設計法の適用

本章は、圧入支持杭の設計法のスキームに従って、杭工事の事例を再評価し、圧入支持杭が集合した時の信頼性評価について考察する。

圧入支持杭は、すべての杭が弾性限界支持力値と弾性変形限界値を持っている。これは、圧入工法の利点を最大限に生かした杭造作方法によって実現しており、前章までの議論でこの事は明らかにしている。

支持力と変形性能に対して、推定値ではなく確定値を持っていることから、杭基礎としては極めて信頼性の高いものとなっている。しかしながら、集合された杭を適正に評価する事を今までは行っていない。圧入支持杭設計スキームは、この評価方法として、信頼性評価手法を用いる事を提案している。

平成15年12月18日に竣工した東京都港区港南での9階建てビルの基礎に、圧入支持杭を集合杭として杭基礎とした工法が用いられた。この時の工法は圧入支持杭造作工法とは厳密には区別される工法ではあるが、この時の施工データを元に設計法の適用と信頼性評価を行う事とする。

最初に設計の概要と施工結果を記す。設計の是々非々は問わず、忠実に設計を再現する事とし、この設計に対して行った施工の実績データを用いて、本件工事に圧入支持杭設計法を用いた場合にどの様に設計と施工が展開していくのかを検討する。

本工事例を実施するために事前に行った建築評定では、基礎を構造物と基礎部のハイブリッドで捉えて、実際には基礎のみの評価は行っていない。このためこれまでの議論とは若干の乖離はあるものの、建築評定では議論されなかった集合杭の全体評価に関して、可能な限りの検討評価を行う。

6.1 工事概要

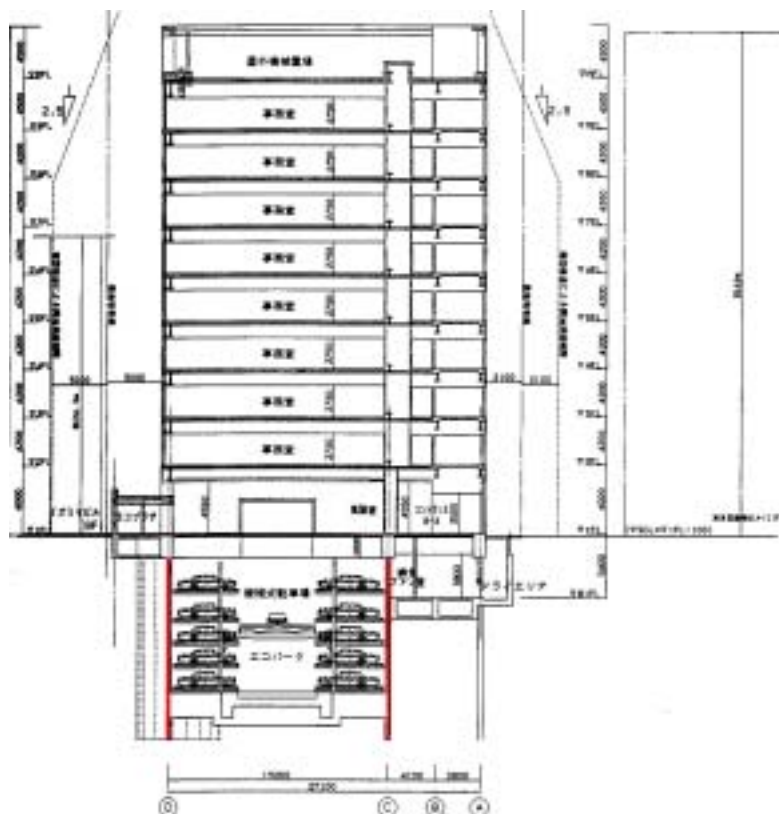
本節では、本件工事の実設計・実施工を再現する。次節で圧入支持杭設計法を適用した場合の、想定される設計と評価を考察する。

6.1.1 計画概要

工事名	(仮称)港南1丁目プロジェクト
場所	東京都港区港南1丁目5番6,7
地域	商業地区、防火地域、港湾隣接地域
主用途	事務所
建築主	大同興業株式会社、技研製作所株式会社
設計者	日建設計、技研製作所、構造空間設計室
監理者	日建設計
施工者	大林組

建築評定申し込書からの抜粋を行う。

「本建物はJR品川駅から...地下1階地上9階のオフィスビルである。...地下はエコパーク(駐車場50台)2基、エコサイクル(駐輪場114台)1基と...で構成される。地下構造は、技研式圧入工法による鉄骨柱列構造を採用...上部の荷重に耐える新しい構造となっている。」



6.1.2 建物概要

敷地面積	1,625.95 m ²
建築面積	1,233.83 m ²
延床面積	9,915.65 m ²
基準階床面積	1,136.20 m ²
階数	地下1階・地上9階・塔屋1階
建物高さ	軒高 GL + 39.69 m 最高高さ GL + 44.50 m 基礎深さ GL - 15.1 m
構造種別	基礎・地業 技研式圧入工法による鉄骨柱列構造 架構 鉄骨造

6.1.3 地下部構造設計概要

(構造評定書より抜粋)

「地下部は、技研式圧入工法による鉄骨柱列構造を利用し、...この鉄骨柱列構造を柱および耐力壁として用いている。また、円形のエコパーク2基とエコサイクル1基に加え、コア部の直線部と...平面的にバランスよく配置し、これらと一体とする事で強度の高い構造となっている。1階床レベルの大梁と小梁は、...鉄骨柱列構造の境界部として考え、剛性および耐力のあるSRC造とし、地上部の力をスムーズに地下部へ伝達する計画とした。

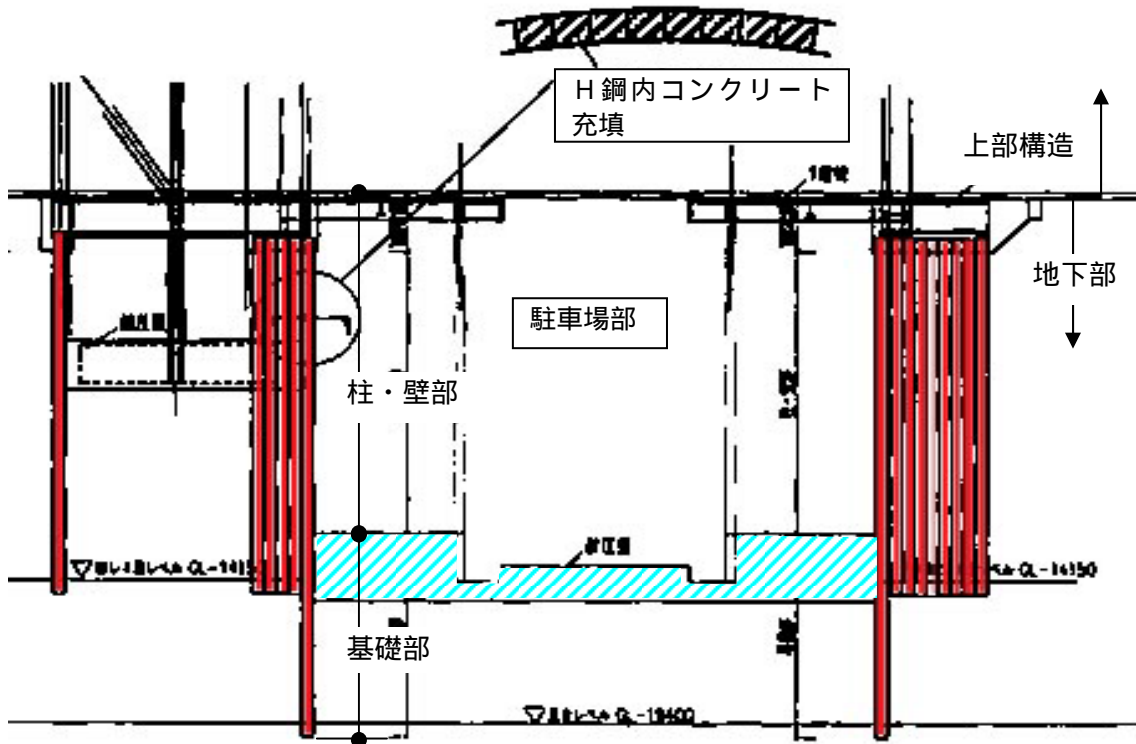
1. 今回の基礎形式は、一般構造物と異なり柱下に軸力を支える杭を設けず、鉄骨柱列構造の面で支える構造である。このため...鉄骨柱列構造の上部には梁成2000mm幅1000mmの剛性および耐力の大きいRC梁を設け、柱軸力の伝達を容易なものとし...
2. 上部荷重の大きい部分は、エコパークより角を出し、応力の緩和...
3. エコパークの耐圧版は、...鉄骨柱列構造をより強固なものにするために鉄筋およびスタッドにより溶接し、一体となる様に...

なお、上部構造の反力を安全に支持地盤に伝達できるように、建築基準法に基づき...構造部材に生じる応力が許容応力度を超えていない事を確認する...上部構造物が保有水平耐力に達した時...大部分の部材(鉄骨柱列構造)が弾性範囲内(短期許容応力度以内)にあることを確認...

- (A) 長期荷重 { G + P + D }
- (B) 短期荷重1 { G + P + K (1次設計) + D }
- (C) 短期荷重2 { G + P + K (2次設計) + D }

G : 固定荷重、P : 積載荷重、K : 地震荷重、D : 土圧・水圧

鉄骨柱列構造の地下部分の断面図は、以下に示される。



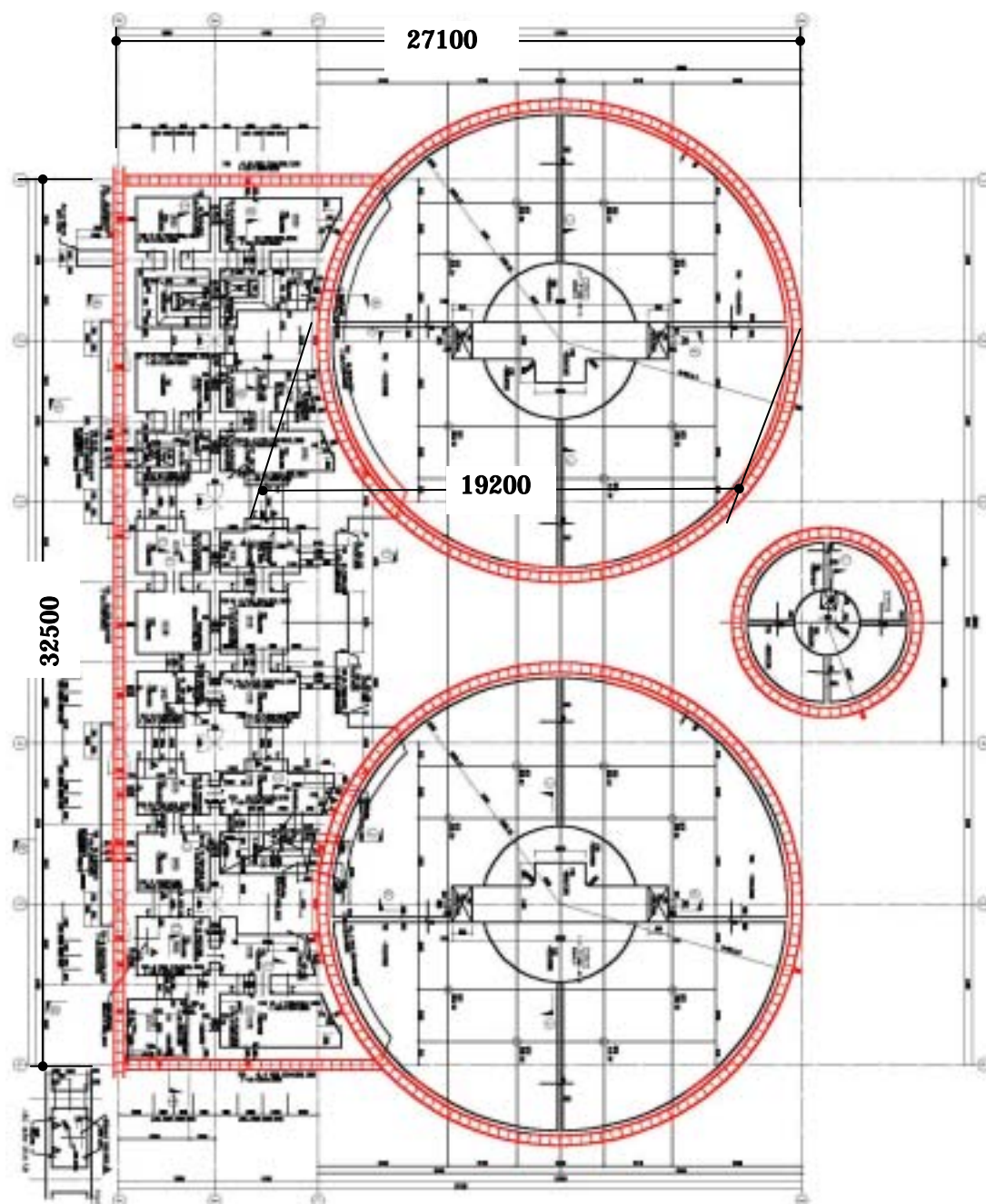
地下解析モデルは鉄骨柱列構造を骨組モデル化し、充填コンクリート・H鋼の断面性能等をすべて梁部材に置換して設計している。上部荷重の基礎部での抵抗は、上図で示す駐車場底盤部以深のみで抵抗し、駐車場内部は構造物として捉えている。従って、設計主体は基礎部の荷重耐力設計ではなく、内部構造物の変形抵抗性能に重点が置かれている。

基礎部分での単独評価は行わず、構造物全体が荷重を受けた時に基礎部分に存在する軸バネによって変形が制御され、構造物（鉄骨柱列構造）の変形に影響を与えらるゝとして、変形法を用いて解析している。

解析に用いた、地盤バネは以下としている。

- ・ GL-19m(土丹層) $1.9 \times 10^6 \text{ N/cm}$ ($=1.9 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$)
- ・ GL-14m(砂礫層) $1.7 \times 10^6 \text{ N/cm}$ ($=1.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$)

基礎全体の伏図は、以下の通り。



6.1.4 杭地業計画数量

支持層	杭長さ	H-388x402x15x15 (SS400)			計
		エコパーク	エコサイクル	直線・その他	
東京礫層	12.95 m	288 (144@2)	53	110	451 本
上総層	18.20 m	-	-	184	184 本

6.1.5 設計荷重と解析結果

【杭の許容支持力度】

支持層	長期	短期	杭先端位置	備考
東京礫層	50 tf/本(500kN/本)	100 tf/本(1000kN/本)	GL - 14.65	砂礫層
上総層	50 tf/本(500kN/本)	100 tf/本(1000kN/本)	GL - 19.90	土丹層

【地震荷重】

階	階高 H (m)	各階質量 W _i (kN)	総質量 W (kN)	1次設計			2次設計	
				せん断力係数 C _i	せん断力 Q (kN)	転倒モーメント M (kN-m)	せん断力 Q (kN)	転倒モーメント M (kN-m)
8	4.30	13260	13260	0.438	5810		9880	
7	4.20	8220	21480	0.373	8010	25000	13620	42500
6	4.20	8220	29710	0.332	3870	53600	16780	39600
5	4.20	8220	37930	0.302	11450	100100	19470	170200
4	4.20	8220	46160	0.277	12790	148100	21740	251800
3	4.20	8430	54590	0.255	13920	201800	23660	243100
2	4.20	8430	63020	0.235	14830	260300	25210	442500
1	4.20	8430	71450	0.217	15530	322600	26400	548400
0	5.59	8620	80080	0.200	16020	387800	27230	650300
						477300		811400

地上部総質量
80080 kN

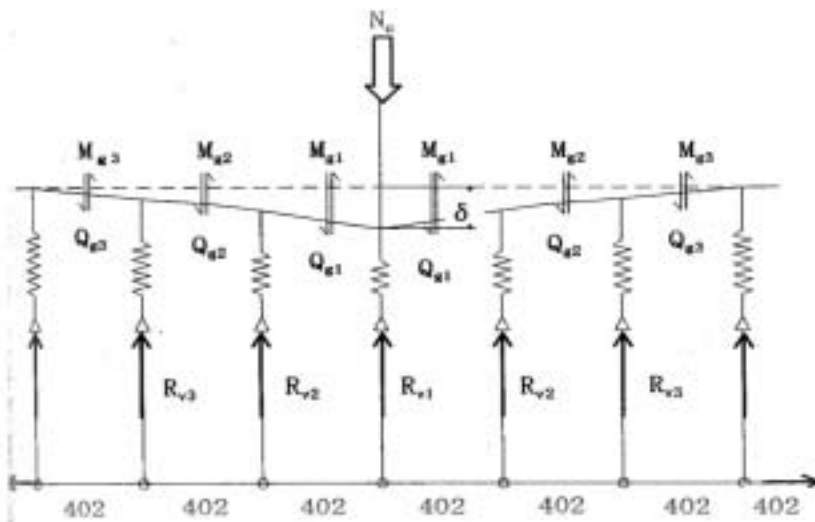
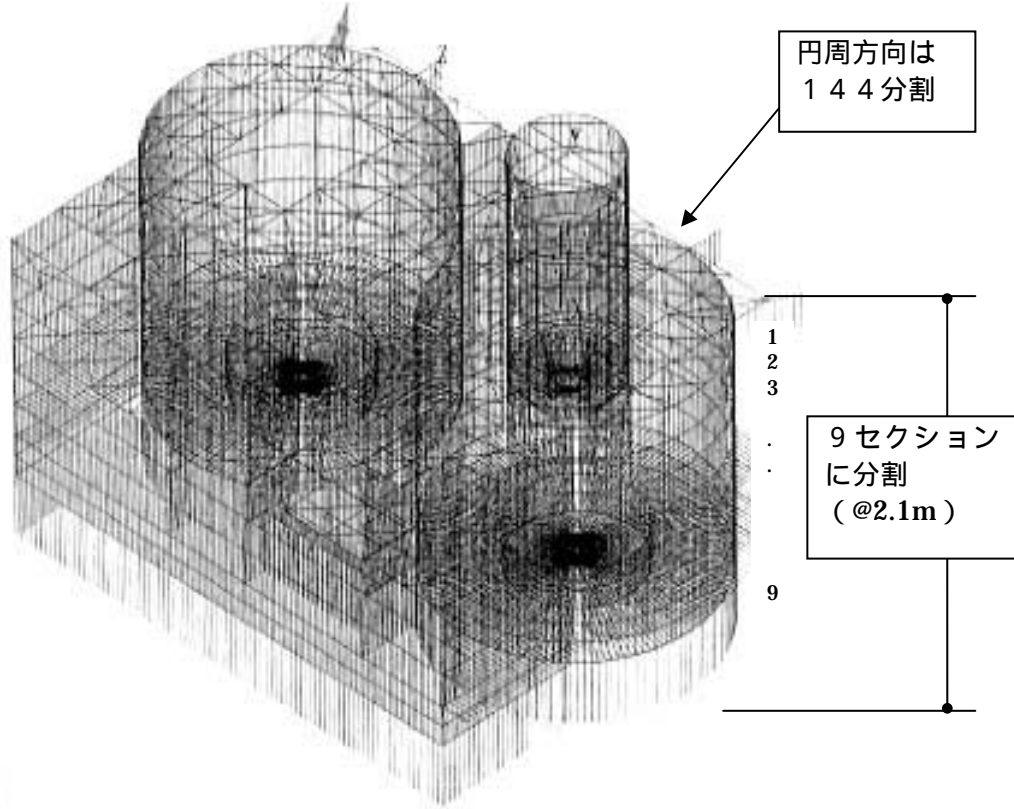
階	階高 H (m)	各階質量 W _i (kN)	1次設計		2次設計	
			震度	P _i (kN)	震度	P _i (kN)
1	5.60	30770	0.125	3850	0.219	6740
B1		10900	0.125	1360	0.219	2390
柱網式 柱列構造	2.1mごとに各節点に 地震力を加えている	50280	0.125	6290	0.219	11010

地下部総質量
50280 kN

質量比
地上：地下
= 8：5

【解析結果】

杭支持力に関する部分だけ抽出する。



N_e : 1階柱からの軸力

M_{e1}, M_{e2}, M_{e3} : 各部材に発生している曲げモーメント

Q_{e1}, Q_{e2}, Q_{e3} : 各部材に発生しているせん断力

R_v : 鉄骨柱列へ伝達された軸力 (反力)

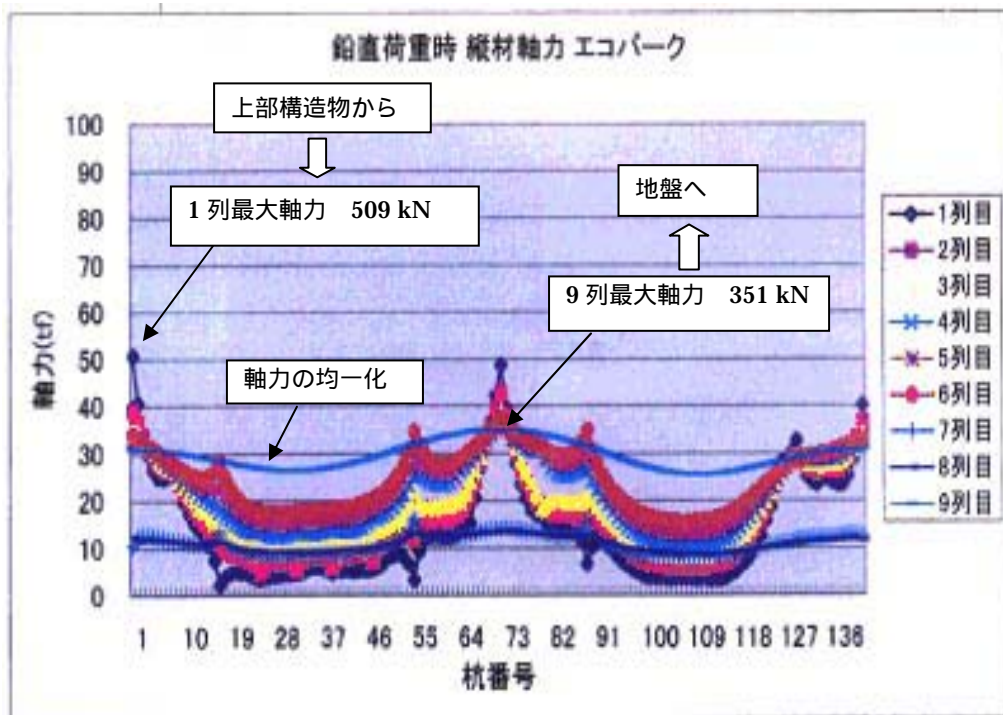
上部構造からの荷重は、柱から最初に荷重伝達梁（トランスファーガーダー）に伝達され、そこから鉄骨柱列構造の杭頭部に伝達される。荷重濃度に若干の差はあるものの、均等化された分布荷重が杭頭に伝達される。杭に作用する軸力は、骨組構造の中で分散され、先端部に伝達する時はほぼ均一でかつ減衰した荷重となって地盤に作用する。

1列目の柱直下付近に大きな軸力が働き、最大と最小値は、 $N_{max}=509 \text{ kN}$ ($=50.9[\text{tf}]$)、 $N_{min}=22 \text{ kN}$ ($=2.2[\text{tf}]$)となっている。この軸力は骨組構造の中で分散吸収されて、9列目（地盤との接点）では $N_{max}=351 \text{ kN}$ ($=35.1[\text{tf}]$)、 $N_{min}=255 \text{ kN}$ ($=25.5[\text{tf}]$)となる。

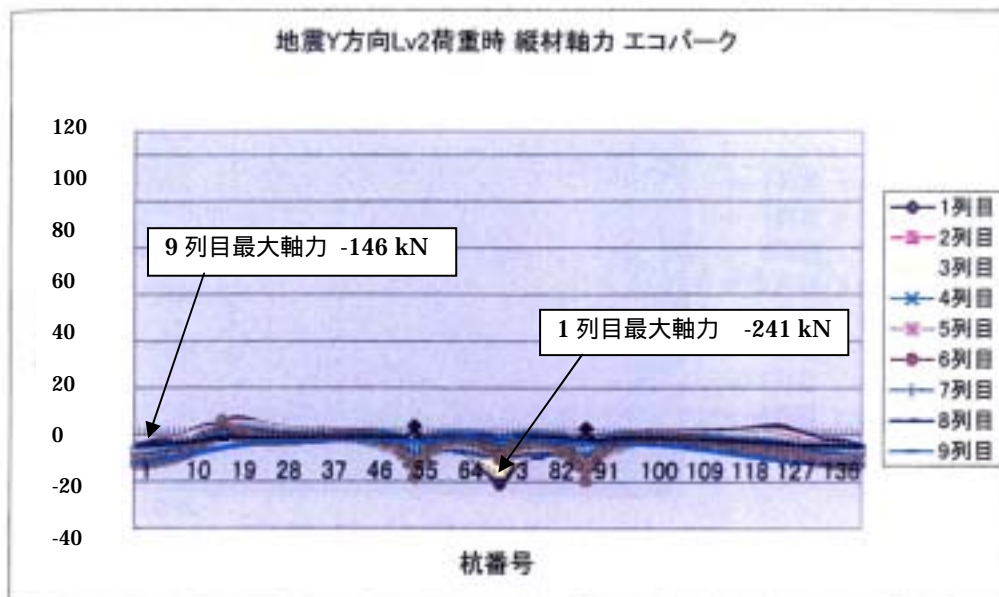
即ち、杭が集合し杭同士がコンクリートを介在して一体となっているため、杭頭の荷重は集合杭の中で分散し、均一化される。

常時荷重に対する鉄骨柱列構造（エコパーク：円筒構造体）での軸力伝達の様子は、下図に示される。

円筒体頂部に弾性梁を經由して伝達される上部荷重は、柱下直下付近で集中的に作用するが、応力が構造体（円筒体）内部に分散していき、最終の9列目では平均化される。



地震時は、円筒体の構造的特徴が顕著に表れ、応力が円筒体内部に分散して均一化する。Y方向LV2の地震荷重は、1列目 $N_{max}=-241$ kN ($=-24.1$ [tf])、 $N_{min}=63$ kN ($=6.3$ [tf])に対して9列目では $N_{max}=-146$ kN ($=-14.6$ [tf])、 $N_{min}=-23$ kN ($=-2.3$ [tf])となっている。



解析では、杭として地盤に働く荷重(杭軸力)は、常時 $N_{max}=350$ kN ($=35$ tf)、地震時は引き抜きの方が最大値となるため、鉛直荷重としては 350 kN ($=35$ tf)が最大値となる。

設計荷重を 50 tf/本(500 kN/本) (長期)とし、慣例で短期荷重を 100 tf/本(1000 kN/本)としているが、長期荷重を常時荷重と捉えれば、設計上は妥当な荷重値であると言える。(短期荷重という荷重の取り扱いに疑問は残る)

杭設計は、常時荷重を基にした設計荷重を満足できれば全く問題なく、地震荷重に対しては、上部構造物の応答と併せて検討すべきと言える。

【最大変位置】

解析結果から、最大変位置は以下のように決められた。

	1F 床変位 (cm)			基礎部杭先端変位 (cm)		
	δ_{x_max}	δ_{y_max}	δ_{z_max}	δ_{x_max}	δ_{y_max}	δ_{z_max}
土圧・水圧	0.03	0.04	0.02	0.36	0.54	0.10
鉛直荷重	0.03	0.04	0.65	0.06	0.06	0.65
X方向地震荷重 (LV1)	0.42	0.04	0.18	0.42	0.05	0.18
Y方向地震荷重 (LV1)	0.11	-0.50	-0.31	-0.11	-0.50	-0.31

6.1.6 杭工事の実施

現行の杭基準からの議論が中心となり、設計荷重 50 tf/本(500kN/本)に対する保証を杭造作荷重 150 tf(1500kN)とする事で評定決着を見た。解析上は、50 tf/本(500kN/本)の支持力確保が出来れば問題がない筈ではあったが、杭工事に対する信頼性、地盤把握の難解さ、杭としての実績がない等の理由により、施工荷重は 150 tf(1500kN)と決定された。設計が、摩擦を考慮しない純粋な軸力として 50 tf/本(500kN/本)を要求しているのに対して、杭に働く摩擦力を評価できないという理由により、施工荷重値の評価の 1/3 のみを純粋軸力として認めると言う裁定であった訳である³¹。

上記により施工は、150 tf (1500kN の近傍値) を杭頭に負荷して行った。

(A) 打ち止め管理

打ち止め管理に関して、現行基準に照らして支持層貫入量が決められ、1D 以上貫入 (500 mm 貫入) が義務づけられ、これにより圧入完了後 (支持層到達後) に、更に 150 tf (1400 kN) の加圧を動的に繰り返し負荷³²し、地盤に杭を貫入させた。(以下施工要領書から抜粋)

b-1) 簡易動的圧入³³ (上総層)

圧入引拔を繰り返す動的圧入を行い累計沈下量が 500mm となった時点で完了とする。但し、圧入途中で 500mm の貫入量を確保することが難しいと判断される場合は累計沈下量が 250mm を越えた時点から最大 7 回の動的圧入を行う。

この間で 1 回当りの沈下量が 50mm 以下に収束したら、動的圧入をやめ、簡易静的圧入を 1 回行い、沈下のないことを確認する。

各ブロック毎の管理杭は 1 回毎の加圧に対し得られる沈下量と累計沈下量を記録する。なお、1 回当りの加圧軸力は 1,300 ~ 1,400 K N とする...

(B) 圧入最大荷重

支持層到達時に 150 tf (1400 kN) を加圧し最大荷重とした。(以下抜粋)

a) 静的圧入

動的圧入後、再度隣接する杭同士でマーキングを行う。

このあと、静的圧入 (0 ~ 1400 K N を 15 秒間でゆるやかに加圧) し、3 分間これを保持する。軸力を解放する迄、マーキングのずれを測定し上記静的圧入により 3mm を越える沈下量があった場合は再度繰り返す...

打ち止め管理は、支持層到達 動的圧入 (杭先端に衝撃を加えて圧入) 規定貫入量を確保 最大荷重保持 (クリープ進行・安定) という手続きで行った。

³¹ 根拠はないが、明らかに安全側であるという理由により決定された。

³² 打ち抜きを繰り返して地盤の剪断破壊を行い、杭を貫入させる方法 (先端に衝撃を与える)

³³ 簡易動的圧入としたのは、動的圧入では先端地盤の剪断破壊が進行し、杭沈下を止める事が出来なくなると言う事態に遭遇した為である。土丹層 (固結粘土層) は砂質地盤とは異なり、土粒子の構造配列によって強度を発現している訳ではないため、一旦構造が破壊されると強度は急激に低下し、杭沈下を止められなくなる。このため動的圧入の杭先端への衝撃を抑え貫入量優先の施工法としている。

6.2 圧入支持杭設計法での評価

圧入支持杭設計法は、上部設計から決定される設計荷重に対して適正に支持力を担保する目的で行われる。そのため杭の実際の支持力を正確に把握し、その数値を純粋工学的に評価しようとするものである。基準やルールの曖昧さの中に杭支持力の評価を封じ込めるのではなく、実際の確定値を評価の対象にしようとするものである。圧入支持杭設計法の設計スキームに従い、このプロジェクトの再評価を行う。

6.2.1 確認項目

設計スキームに従い、以下の確認項目を検討する。

- 1 杭の抵抗力が設計荷重を上回ること

$$P_{design} < P_{allowable} = R_{limit} \quad (\text{設計法では } P_{design} < P_Y)$$

- 2 杭部材応力が部材の許容応力度以内に収まること

$$\sigma_{actual} < \sigma_{design} < \sigma_{allowable}$$

- 3 杭変位が上部構造の要求する変位以下であること

$$\delta_{actual(\text{推定})} < \delta_{design} \quad (\text{設計法では } \delta_{design} \leq \delta_Y)$$

- 4 上部荷重に対して杭基礎全体の支持力信頼性が確認できること

$$\text{安全性指標 } \beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - S}{\sigma_R} = 2.3 \sim 3.1 \text{ を確認}$$

杭の抵抗力は設計荷重を遙かに上回る必要はなく、適正に満足していればよい。圧入支持杭設計法には安全率の概念がないため、設計荷重値を杭設計の目標設定値にすればよい。本プロジェクトでは、長期支持力 50 tf/本(500kN/本)、短期支持力 100 tf/本(1000kN/本)と定められている。実際の解析結果³⁴とは大きく異なる数値設定であるが、この短期支持力を支持力設計の設定値とする事とする。

$\therefore P_{design} = 500 \text{ kN} < P_{allowable} = R_{limit} = 1000 \text{ kN} \leq P_Y$ となるように杭設計する。

部材の内部応力は、この設定値 (P_Y) がほぼ 100% 働く。周面の摩擦力による軸力の低減・減少となる曖昧さが無いため、設定値が部材の安全性を支配する。座屈検討等は、設定値で評価する。

集合された杭群の変位は、並列バネ群となるため変形抵抗性は非常に大きい。しかし、柱直下に高濃度で荷重が集中した時は部分杭で抵抗する事になる。従って、設計変位に対しては単杭抵抗で評価する。

支持力は、基礎全体に分布する。この分布形が上部荷重の分布と確率的に関連づけられる。本設計は、エコパーク 1 基で事例検討する。

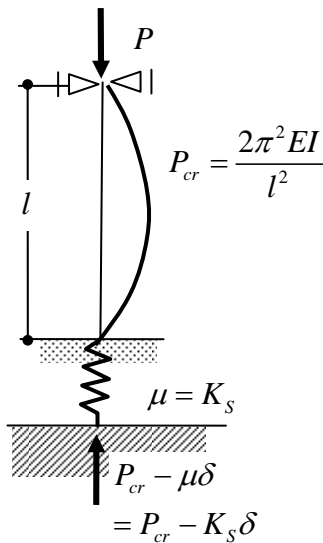
³⁴ 常時荷重の最大値：351 kN, LV2 地震時：-241 kN (引き抜き力)

6.2.2 杭材量の検討

杭として用いるH鋼の断面性能

	A [cm ²]	Ix[cm ⁴]]	Iy[cm ⁴]]	Zx[cm ³]	Zy[cm ³]	Ix[cm]	Iy[cm]
H-388x402x15x15	178.5	49000	16300	2520	809	16.6	9.54

【座屈許容荷重】



「引き抜きを伴う圧入」で造作される杭は、杭周面に弾性バネを仮定しない単純な長柱として取り扱う事により、安全側の材料検討となる。

オイラーの長柱座屈理論を用いて検討する。

支持層深さ：18.25 m

設計杭長：18.50 m

杭の弾性バネ値：

$$K_m = \frac{AE_m}{l} = \frac{178.5 \times 2.1 \times 10^6}{1.85 \times 10^3} = 2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm} = 2.0 \times 10^6 \text{ N/cm}$$

最終地盤バネ値³⁵： $K_s = K_m / 3$

杭先端変位：ゼロ近似値として $\delta = 0.5 \text{ mm}$

$$\begin{aligned} P_{cr} &= \frac{2\pi^2 EI}{l^2} + K_s \cdot \delta \\ &= \frac{2\pi^2 \times 2.1 \times 10^6 \times 1.63 \times 10^4}{(1.85 \times 10^3)^2} + \frac{2.0 \times 10^5}{3} \times 0.5 \times 10^{-1} \\ &\approx 200 \text{ tf} = 2000 \text{ kN} \end{aligned}$$

設計荷重 100 tf に対して 200 tf の座屈耐力がある故、杭材量は圧入荷重に耐える事が出来、かつ設計荷重を満足する³⁶。

従い、杭部材応力度は、2000kN 迄は座屈耐力があり、

$$\sigma_{actual} < \sigma_{design} < \sigma_{allowable} : P_{design} < P_Y \approx 1000 \text{ kN} < P_{cr} = 2000 \text{ kN}$$

を満足する。

³⁵ 杭の最終バネ値を $K_m / 4$ としたことにより、地盤のバネ値は $K_m / 3$ となる。

³⁶ 杭先端がフリーに回転する様な場合（岩盤上に直接軟弱地盤がある場合等）は、両端がピンの長柱となるため座屈荷重は $1 / 2$ となる。即ち、 $P_{cr} = 100 \text{ tf}$ となる。杭先端を攪乱した場合等も同様の事が生じる。杭材選定の見直しを含めて検討が必要である。

6.2.3 限界荷重の設定

弾性限界荷重と弾性限界変位は同時に設定する事が出来る。弾性限界変位は、杭先端地盤の弾性化によって決定される。更に、この弾性化を行った時の荷重値が弾性限界荷重であるため、両者は同一のものとなる。

しかしながら、荷重の固定と変位限界の決定は別のスキームによって考えられるため、ここでは各々独立した存在として捉える事とする。

) 圧入最大荷重（杭造作荷重）の決定

設計荷重は、500kN/本（50 tf/本：長期荷重）、1000kN/本（100 tf/本：短期荷重）で与えられているが、圧入支持杭には長期・短期の区別はない。一般の杭支持力の場合は、支持力を推定値で処理している関係で、短期の場合には2倍（1000kN/本）の荷重耐力を見込んで良いと言う事を表現している³⁷。このため、実際は50 tf/本（長期荷重）だけで設計されている。

圧入支持杭は、500kN で設計すると限界荷重が500kN となる。従って、短期間であっても、抵抗力期待値だけで1000kN/本は保証できない。1000kN/本を設計値としなければならない設計的合理性はここでは議論しないが、1000kN/本を保証するためには、1000kN/本の杭を実際に造らなければならない。換言すると、1000kN/本の杭が出来れば（杭の抵抗力が保証出来れば）、設計条件をすべて満足させる事が出来る。

1 杭の抵抗力が設計荷重を上回ること

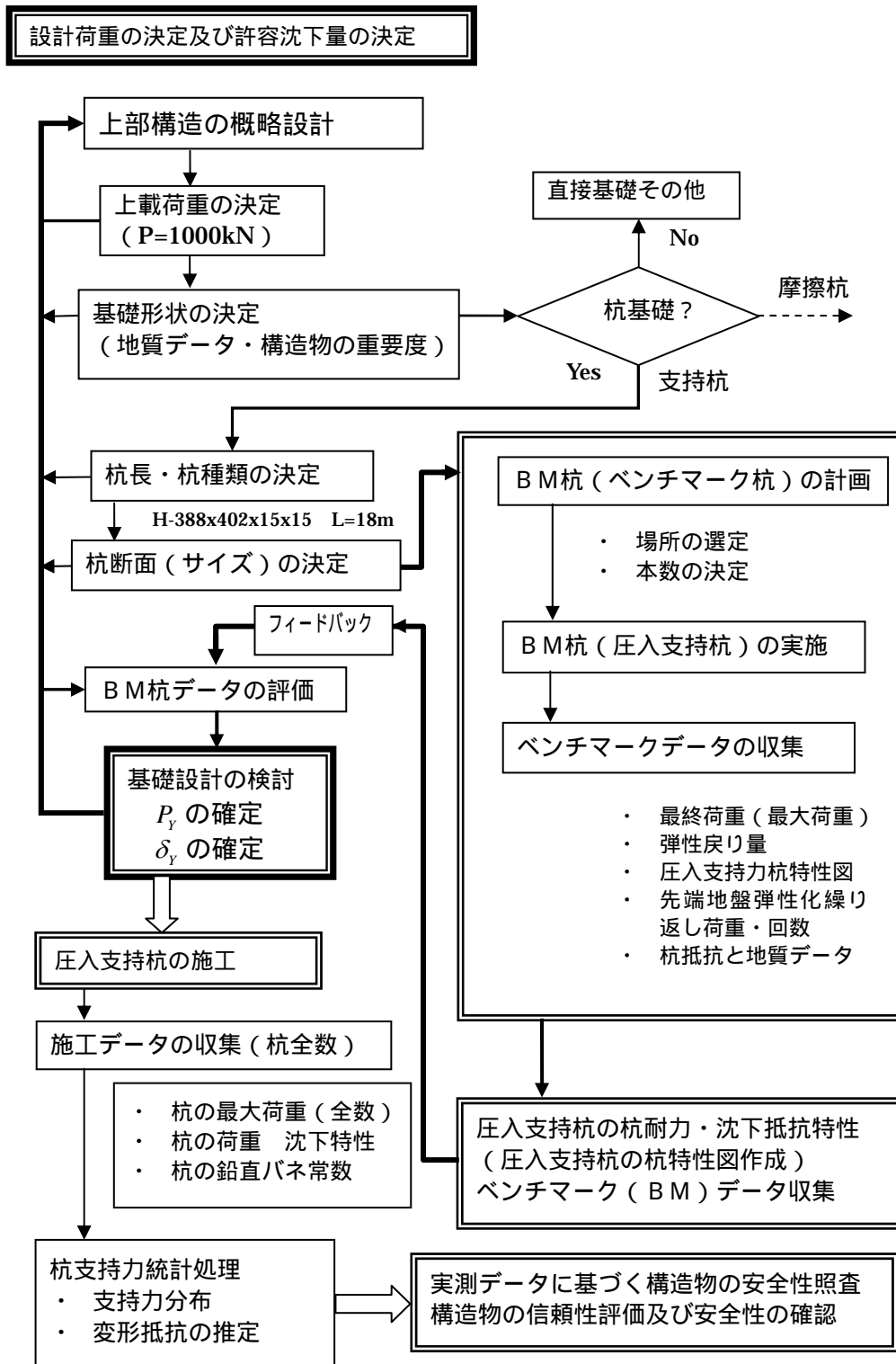
$$P_{design} < P_{allowable} = R_{limit} \quad (\text{設計法では } P_{design} < P_Y)$$

この条件を満足させるために $R_{limit} = P_Y = 1000kN(100 tf)$ の杭を造作する。

目標支持層で1000kN の杭が出来れば、BM杭を施工すれば結論づける事が出来る。

³⁷ 本プロジェクトの建築評定では、短期荷重を常時保証するという過剰な決着を見た。

）BM杭の施工スキーム



6.2.4 杭の弾性変位量の決定

限界荷重との関係で杭の弾性変位量は決定されるが、杭先端地盤の除荷時の抵抗 reluctant を考慮して、杭の弾性バネ値を決定する。このバネ値は、材料のバネ値に関連し、極限状態で杭の弾性変位量は杭材の弾性変位量の 1/2 もしくは同一値に近似できるが、これを低減係数で評価する。

杭の弾性バネ常数は、以下で表現する。

$$K_{vy} = K_v = K_p = \beta K_m$$

$$\begin{cases} \beta = 1/2 & : \text{岩盤} [K_m \leq K_s \text{の場合}] \text{ (岩盤相当を含む)} \\ \beta = 1/4 & : \text{砂質層} [K_s < K_m \text{の場合}] \\ K_{vy} = K_v & : \text{弾性範囲のバネ常数は降伏荷重のバネ常数と同一} \\ K_m & : \text{杭材のバネ常数} \end{cases}$$

杭の限界沈下量は、

$$\delta_Y = \frac{P_Y}{K_{vy}} = \frac{P_Y}{\beta K_m}$$

解析に用いた、地盤バネ (K_s) は以下としている。

- GL-19m(土丹層) $1.9 \times 10^6 \text{ N/cm} (=1.9 \times 10^5 \text{ kgf/cm})$
- GL-14m(砂礫層) $1.7 \times 10^6 \text{ N/cm} (=1.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm})$

杭材の弾性バネ値は、

$$K_m = \frac{AE_m}{l} = \frac{178.5 \times 2.1 \times 10^6}{1.85 \times 10^3} = 2.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm} = 2.0 \times 10^6 \text{ N/cm}$$

よって、 $K_s < K_m$ であるから $\beta = 1/4$ となる。が、しかし、目標地盤がほぼ岩盤相当と言って良いため $\beta = 1/2$ で評価する方が自然と言える。

杭の弾性バネ値は、以下のように決定される。

$$K_p = K_v = K_{vy} = \frac{K_m}{2} = 1.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm} = 1.0 \times 10^6 \text{ N/cm}$$

6.2.5 杭の最大弾性変位量の検討

圧入支持杭設計スキームでは、杭の弾性変位量が設計要求を満足している事を確認する必要がある。

3 杭変位が上部構造の要求する変位以下であること

$$\delta_{actua(推定)} < \delta_{design} \quad (\text{設計法では } \delta_{design} \leq \delta_y)$$

上記が満足されているか確認する。

集合された杭は単体で沈下する事はなく、更に全体が並列バネとなっているため実際の沈下抵抗性は非常に高いと言える。しかし、設計上単杭に生じる沈下に対して検討を行う。

設計で想定した最大沈下量は、解析結果から以下となっている。
(鉛直最大荷重：Nmax=350 kN (=35 tf))

	1F 床変位 (cm)			基礎部杭先端変位 (cm)		
	δ_{X_max}	δ_{Y_max}	δ_{Z_max}	δ_{X_max}	δ_{Y_max}	δ_{Z_max}
土圧・水圧	0.03	0.04	0.02	0.36	0.54	0.10
鉛直荷重	0.03	0.04	0.65	0.06	0.06	0.65
X方向地震荷重 (LV1)	0.42	0.04	0.18	0.42	0.05	0.18
Y方向地震荷重 (LV1)	0.11	-0.50	-0.31	-0.11	-0.50	-0.31

鉛直最大荷重：Nmax=350 kN (=35 tf)に於ける杭の変位量は、

$$N_{max} = K_p(K_V) \cdot \delta_{max}$$

$$\delta_{max} = \frac{N_{max}}{K_p} = \frac{3.5 \times 10^5 \text{ N}}{1.0 \times 10^6 \text{ N/cm}} = 0.35 \text{ cm}$$

この杭の弾性限界変位量は、

$$P_Y = K_V \cdot \delta_Y$$

$$\delta_Y = \frac{P_Y}{K_V} = \frac{1.0 \times 10^6 \text{ N}}{1.0 \times 10^6 \text{ N/cm}} = 1.0 \text{ cm}$$

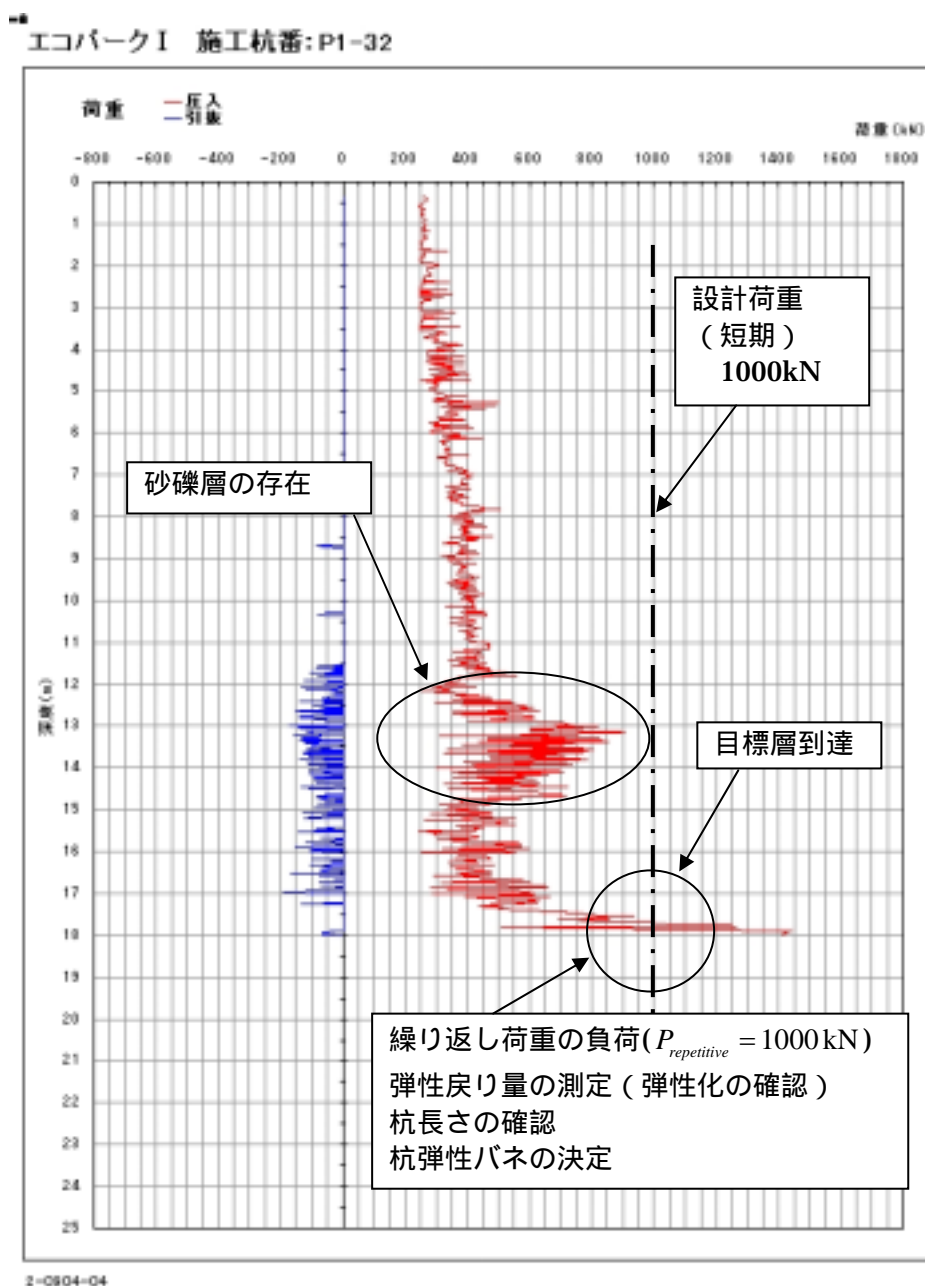
$\therefore \delta_{design} = 0.65 \text{ cm} < \delta_Y = 1.0 \text{ cm}$ 変位は弾性範囲に収まる。

6.2.6 B M杭の実施と実際の杭施工

前節までの検討は、B M杭を実施すると確定できる。しかし、本例のプロジェクトではB M杭を実施せず、「5.1.6 杭工事の実施」に示した施工方法で杭造作を行っている。

本節の検討は、杭造作履歴から推定される地盤状況・圧入状況からB M杭同等の情報が得られると仮定して議論を進める。

圧入履歴図は、以下のようになっている。

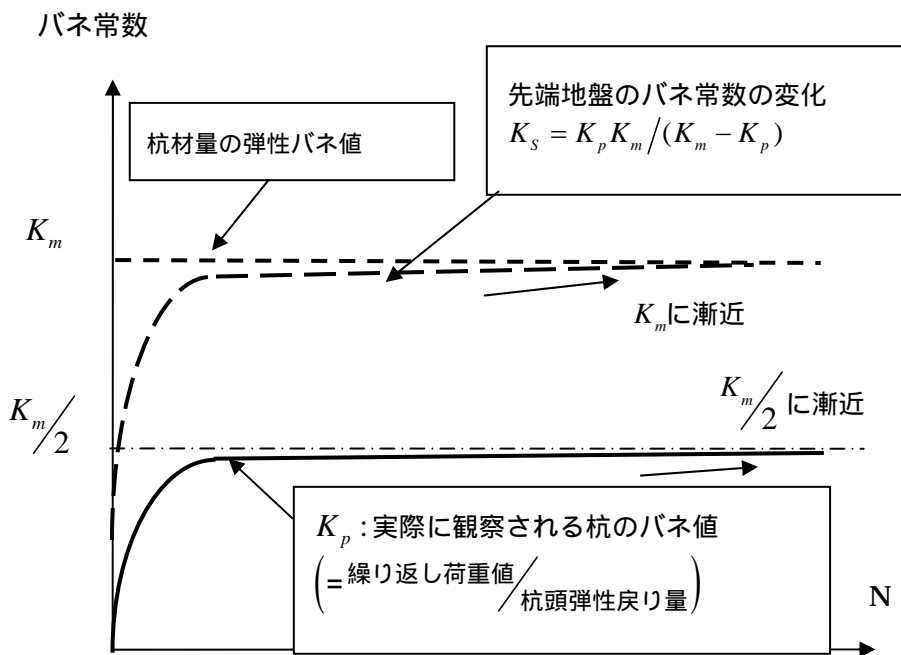


履歴図では 1500kN まで加圧しているが、設計上は 1000kN で十分であり、この荷重値を繰り返し荷重によって固定すれば、弾性限界荷重 P_y は 1000kN に固定される。

この繰り返し荷重による先端地盤の弾性化は、杭に働く摩擦力を最小化しているため杭頭と杭先端の弾性変動が一対一に対応する。よって、杭頭だけの観察で確認できる。

杭先端の地盤の剛性が小さい時（杭材量に対して）は杭頭沈下が長時間観察されるが、剛性が杭材量に近い場合もしくは上回っている時は、短時間で弾性挙動が確認できる。

本プロジェクトの場合、 $K_s = 1.9 \times 10^6 \text{ N/cm}$, $K_m = 2.0 \times 10^6 \text{ N/cm}$ であるから、殆ど数回で飽和すると予想できる。



更に、バネ値も $K_p = K_v = K_m/2$ で設定しても問題がないと言える。

B M杭で決定するのは、繰り返し荷重負荷の回数の決定であり、これによってバネ常数の決定、弾性限界荷重の固定が出来、圧入支持杭特性図を作成する事が出来る。

更に、荷重履歴から支持層に至るまでの中間層の抵抗状況、支持層の深さ等が情報として得られ、このデータベースを元に実施工のガイドラインとする事が出来る。

6.2.7 圧入支持杭特性図の作成

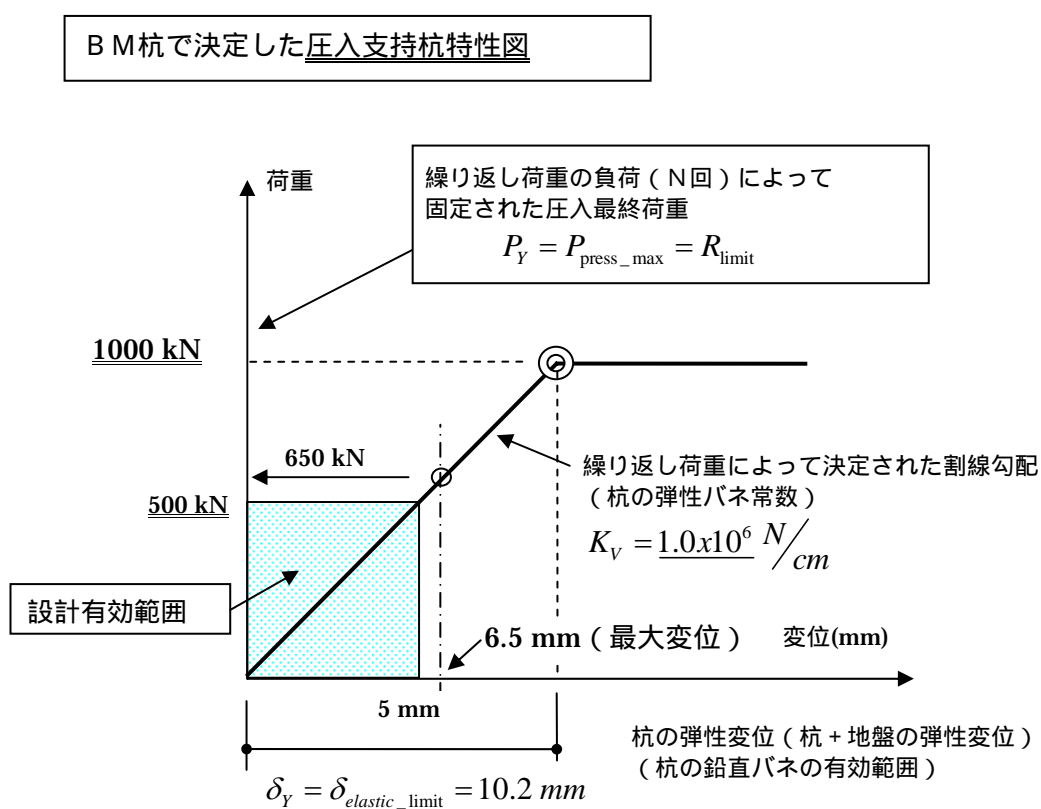
B M杭でのデータを元に圧入支持杭特性図を作成する。(このケースでは想定で作成するが、本質的な差はない)

固定された圧入最終荷重 (弾性限界荷重): 1000 kN (102 tf)

繰り返し荷重によって確定した杭バネ値: $K_p = K_v = 1.0 \times 10^6 \text{ N/cm}$

弾性限界変位量: $\delta_y = 1.02 \text{ cm}$

変位限界量 (最大変位) から決められる荷重³⁸: $P_{\max} / pc = 650 \text{ kN}$



1000kN で造作した杭に対して設計有効範囲 (常時荷重) が 500kN、最大変位を与える杭頭荷重が 650kN であり、両者とも限界荷重以下である。杭特性として見ると非常に余裕があり全く問題ないと言える。但し、最大変位 6.5mm に対して設計を行えば、設計で 1000kN の支持力を杭に求める必要が無く、オーバースペックであると言える。現実的には 650 kN + の支持力で十分である。

³⁸ 最大変位を 0.65 cm とした時、集合杭の 1 本だけで支持したとすると、杭頭に 650kN 載荷時にこの変位となる。この値は長期荷重値 (500kN) を上回っているため、常時変位ではない。杭の弾性限界変位が、約 1 cm であるため、最大変位が生じても杭は弾性抵抗する。

6.2.8 集合杭の信頼性評価

本例で想定した 1000kN 杭での信頼性評価と、実施工で行った 1500kN 杭での信頼性評価を設計荷重（長期）と解析最大値の場合について行う。

1500kN 杭に関しては、実データを用い、1000kN 杭に関しては想定深さに於ける到達荷重をそのまま固定したと仮定してデータ想定を行う。評価は、基本的な集合形であるエコパーク 1 基（杭 1 4 4 本）について行う。

下表は、計画支持層辺りで 1000kN を目処に支持杭を造った場合の実績圧入履歴図からの推定値（設計法による施工を想定）、実施工は、実データを示す。

No	設計法	実施工									
1	96.9	145.4	38	102.0	148.0	76	86.7	142.9	114	102.0	149.0
2	102.0	144.9	39	102.0	148.0	77	102.0	148.0	115	102.0	146.9
3	96.9	146.9	40	102.0	148.0	78	102.0	149.0	116	102.0	142.9
4	96.9	148.0	41	110.2	150.0	79	107.1	148.0	117	112.2	148.0
5	102.0	148.0	42	107.1	148.0	80	102.0	149.0	118	102.0	146.9
6	122.4	148.0	43	102.0	142.9	81	102.0	142.9	119	102.0	148.0
7	117.3	145.9	44	102.0	148.0	82	102.0	148.0	120	96.9	142.9
8	122.4	148.0	45	91.8	150.0	83	102.0	148.0	121	91.8	148.0
9	127.6	148.0	46	102.0	148.0	84	96.9	142.9	122	102.0	148.0
10	96.9	148.0	47	102.0	142.9	85	102.0	148.0	123	102.0	150.0
11	102.0	142.9	48	102.0	148.0	86	102.0	150.0	124	96.9	149.0
12	102.0	142.9	49	102.0	148.0	87	102.0	150.0	125	107.1	149.0
13	102.0	142.9	50	102.0	142.9	88	102.0	148.0	126	102.0	153.1
14	102.0	142.9	51	102.0	144.9	89	102.0	142.9	127	102.0	142.9
15	91.8	142.9	52	102.0	148.0	90	102.0	142.9	128	102.0	144.9
16	86.7	142.9	53	102.0	142.9	91	102.0	153.1	129	102.0	149.0
17	81.6	142.9	54	102.0	150.0	92	102.0	150.0	130	107.1	149.0
18	122.4	148.0	55	102.0	148.0	93	102.0	151.0	131	102.0	150.0
19	102.0	142.9	56	96.9	153.1	94	102.0	148.0	132	102.0	149.0
20	96.9	142.9	57	102.0	153.1	95	102.0	148.0	133	107.1	150.0
21	112.2	142.9	58	102.0	148.0	96	112.2	148.0	134	102.0	148.0
22	107.1	142.9	59	102.0	145.9	97	107.1	148.0	135	102.0	148.0
23	117.3	149.0	60	102.0	150.0	98	102.0	149.0	136	102.0	142.9
24	102.0	142.9	61	102.0	148.0	99	102.0	148.0	137	102.0	150.0
25	102.0	148.0	62	102.0	148.0	100	102.0	149.0	138	102.0	142.9
26	102.0	148.0	63	102.0	149.0	101	102.0	149.0	139	102.0	148.0
27	102.0	148.0	64	102.0	148.0	102	102.0	150.0	140	102.0	149.0
28	107.1	148.0	65	102.0	153.1	103	102.0	148.0	141	102.0	142.9
29	102.0	148.0	66	102.0	148.0	104	102.0	146.9	142	102.0	142.9
30	112.2	148.0	67	102.0	148.0	105	102.0	146.9	143	102.0	151.0
31	96.9	142.9	68	107.1	148.0	106	102.0	148.0	144	102.0	144.9
32	102.0	148.0	69	102.0	150.0	107	102.0	148.0			
33	102.0	142.9	70	102.0	148.0	108	102.0	146.9			
34	102.0	148.0	71	102.0	148.0	109	102.0	149.0			
35	102.0	148.0	72	102.0	148.0	110	102.0	150.0			
36	102.0	142.9	73	102.0	153.1	111	102.0	148.0			
37	96.9	148.0	74	102.0	149.0	112	102.0	148.0			
			75	102.0	142.9	113	142.9	148.0			

単位：tf
No は、エコパークの杭番号

標本数（標本数：144）は十分に大きく正規分布すると考えられる。このデータを統計処理する。

	設計法を適用して 支持層（GL-18m）に 約 1000kN の杭を造作する （圧入履歴図より推定した）	実施工の実績データ 支持層に指定荷重値で 指定深さを動的貫入
平均値（ μ_R ）	1026.4 kN (102.64 tf)	1472.2 kN (147.22 tf)
標準偏差（ σ_R ）	65.5	27.3

破壊基準関数を以下で定義する。

$$Z = R - S$$

$R > S$ ならば $Z > 0$ 安全

$R \leq S$ ならば $Z \leq 0$ 破壊もしくは限界状態

R：抵抗強度に関係するものを代表（限界抵抗力の集合）

S：作用荷重に関連するものを代表（設計値一定： $S = \text{一定}$ ）

作用荷重は実際には変動するが（自然条件の変化等）杭設計では一定荷重値で捉えても問題はない。Sの値を設計荷重（500kN）および最大変位を与える荷重値（650kN）で評価する。

「5.3.2 集合杭の信頼性評価(支持力評価)」で定義した安全性指標を用いる。

$$\beta = \bar{Z} / \sigma_Z$$

β : 安全性指標

\bar{Z} : 破壊基準関数の平均値 ($\bar{Z} = \bar{R} - \bar{S}$)

σ_Z : 破壊基準関数の標準偏差

$Z = R - S$ を評価すると、

$$\bar{Z} = \mu_Z = E[Z] = E[R - S] = \mu_R - S$$

$$\sigma_Z^2 = V[Z] = E[(Z - \mu_Z)^2] = \sigma_R^2 + \sigma_S^2 - 2\rho_{RS}\sigma_R\sigma_S = \sigma_R^2$$

$$\therefore \bar{Z} = \mu_R - S, \quad \sigma_Z = \sigma_R$$

故に、設計法の場合は

$$\bar{Z} = \mu_R - S = 1028.4 - 500 = 528.4$$

$$\sigma_Z = \sigma_R = 65.5$$

$$\beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{528.4}{65.5} = 8.07$$

となる。

破壊確率は、標準正規確率密度関数 $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ の $\Phi(u)$ の値として得られる。

統計数値表（日本規格協会）から $u(-\beta)$ に対応する $\Phi(u)$ を求めると、例えば $u = 4.99$ に対して $\Phi(u) = 0.30 \times 10^{-6}$ となり、当設計の $u = 8.07$ では $\Phi(u) \approx 0$ となる。即ち、関数は破壊しない、破壊確率ゼロであることを示している。

設計荷重 500kN に対して 1000kN の杭を造作する事は、単純に安全率が 2 倍であるという議論ではなく、基礎だけに限定すると、絶対に破壊しない水準を持っていると言える。上部構造物が、破壊確率をゼロでは設計しない事を考えると、基礎だけに過大な抵抗力³⁹を求める事は極めて不自然な設計であると言える。

下に信頼性評価をまとめる。

	設計法を適用して 支持層（GL-18m）に 約 100tf の杭を造作する （圧入履歴図より想定）	実施工の実績データ 支持層に指定荷重値で 指定深さを動的貫入
平均値（ μ_R ）	1028.4 kN	1472.2 kN
標準偏差（ σ_R ）	65.5	27.3
設計荷重（50 tf）		
安全性指標	8.07	35.61
破壊確率	0	0
変位限界（65tf）		
安全性指標	5.77	30.12
破壊確率	0	0
(参考)設計荷重 ⁴⁰ (1000kN)		
安全性指標	0.43	17.30
破壊確率	0.33 (33%)	0

³⁹ 材料特性の 1/2 だけ評価しているに等しい。即ち、杭の支持力特性の過小評価。

⁴⁰ 設計荷重としての根拠を持たないが、仮に 1000kN で照査しなければならないと仮定した場合。

6.3 設計法での評価（総括）

圧入杭を支持杭とした構造物の杭性能に対して再評価を行ってきた。このプロジェクトは厳密には「圧入支持杭設計法」に準拠した設計にはなっておらず、杭先端地盤の弾性化を確認した施工とはなっていない。しかしながら、支持層として目標にした層（土丹層）の、事前確認された弾性バネ値が、杭材のバネ値と近似している事から（ $K_s = 1.9 \times 10^6 \text{ N/cm}$, $K_m = 2.0 \times 10^6 \text{ N/cm}$ ）手続きに若干の相違はあるものの、地盤が圧入施工時に杭バネにほぼ近似した値となっているとしても不自然な想定ではない。

従って、結果的に先端地盤は弾性化し、杭と地盤が一体化して、杭としての弾性バネ値が確立していると考えても良い。実施工に於いてもこのプロシジャーを全杭にわたって行っているため、全杭とも杭の基礎常数（支持力の確定値と弾性バネ値）を持っていると考えて良い。

杭基礎にとって最も重要な要求性能である上部構造物の変形に対する抵抗性と荷重抵抗性は、各々の杭が持つ基礎常数から評価が出来る。更に、杭が集合した時の評価を信頼性評価で行う事により、基礎全体として、設計荷重に対してどれだけの安全性・信頼性を担保出来ているかを確認する事が出来る。これらを実施工データを参考にして、更に圧入支持杭設計法の設計スキームに従って、評価を行った訳である。

安全性指標は、変動係数の逆数の概念である。即ち、施工精度が良ければ（各杭の支持力確定値にバラツキがなければ）例え、設計荷重と杭抵抗力に差が無くとも大きな安全性指標を与える事になる⁴¹。この事が、安全性指標で評価する時の最も重要な点であると言える。この評価例では、設計荷重を2倍（500kNの設計荷重に対して1000kNの支持力を求める）で評価した事で単純に安全率が2となっていると言う議論ではなく、破壊確率的見れば異常な過大設計となっている事を示している。これは、杭支持力に対する一般的な疑心（支持力が確定出来ない為に、常に過剰な要求を杭支持力に求める）の表れであり、杭の支持力が数値で求まったとしても（計算上の推定値）この数値を信頼できないとする現在の設計法の問題点でもある。

安全性の評価・信頼性の評価は、本来一般の構造物・機械設計物と同一のスキームで考えるべきであり、基礎だけが推定不能の別次元の設計を行うと言う不自然さを改めるべきであると言える。本設計法では、この安全性を、信頼性を通して検討すると言うスキームが有効であると言う事が確認できたと言える。

⁴¹ $\sigma = Z/\mu$ とした時、 σ は、 μ の逆数に比例する。 μ は杭支持力のバラツキの大きさを示している。このため精度良く管理された杭は、この値を最小化できる。よって、RとSに大きな差が無くとも σ の値を大きく取れる。施工精度の確かさも安全性指標で評価出来る。

第7章 終章（設計法のまとめ）

本章は、設計法の概念的なまとめを行う。

本設計法の提案は、圧入工法の最大の特徴である、造作中に杭を任意に上下動させるという特徴をベースに出来上がっている。この工法の特徴が、先端を弾性化させ、杭の支持力を確定し、変形量を限定する。

この設計法に含まれる個別の技術は、前章までに個々に検討を行った。最終的な確認は杭の載荷試験を実施する事で完結した。

前章で試みた設計法の適用は、本設計法に100%合致した施工例では無いが、設計法でのプロシジャーの多くは実施工の中で実践されている。このため、想定ではあるが、実践例として捉えても良いと言える。更に、設計法で提唱した杭基礎としての信頼性評価によって、上部構造体と地下構造体の支持力を介した関係が明確に出来たといえる。

7.1 設計法の概念のまとめ

杭基礎の現状での問題点は、支持力の曖昧さにあると言って良い。上部構造設計の厳密さに比べて、杭支持力は推定値と安全率で構成されている。支持力を確定値とするためには、杭の鉛直載荷試験を行わなければならない。しかし、全数確認が不可能であることから、一般的には載荷試験は設計支持力の確認試験という意味合いが強い。これは、載荷試験と杭支持力理論から算出される数値に整合性がないためであり、厳密に比較する術を持たないが故である。

本設計法は、抵抗と荷重の概念の一致、変形と抵抗の概念の一致、杭支持力評価の信頼性の担保を目的としている。

）設計荷重と支持力

杭基礎は、上部構造の設計条件から支持性能その他が決定される。上部設計からは、設計荷重に対して100%耐える事を要求され、更に変形性能も設計値を担保する事を要求される。

これらの要求に対して、浅い基礎であれば地盤改良、地盤調査によって100%満足させられる設計が可能となる。しかし、杭基礎は何を以て設計対応とするのか論理性を持っていない。荷重耐力を100%担保する論理性が無く、変形性能も載荷試験を行わなければ確定できない。

即ち、漠然とした杭抵抗力の概念に対して明確な上部からの設計要求を対応させるためには、過大設計を容認せざるを得ないと言う事情が暗黙の内に長年に亘って確立してきたと言って良い。

圧入支持杭設計法の支持力概念は、設計荷重との対応である。杭の支持力が明確に規定できれば、設計対応が可能である。推定値・予想値を排して確定値を設計値と対応させる事で、設計要求を100%担保できると言える。

圧入支持杭設計法は、設計荷重に対して杭支持力の確定値を対応させると言う基本スキームで出来上がっている。従って、安全率と言う概念を持たない。安全性・信頼性の評価という形でのみ評価される。

）変形量の規定

杭の変形が問題となるのは、杭材量の変形ではなく地盤の変形である。地盤は、常時弾塑性状態にあり弾性ではあり得ない。従って、荷重に対する変形性が予想しづらく、支持力と同様に推定値を用いるか、むしろ推定すらも出来ないと言うのが現状である。

杭に働く摩擦力もこの変形抵抗性に（支持力も同様）曖昧さをもたらす原因となっている。杭の変形が先端地盤の変形に対応せず、杭周面の地盤内剪断変形に吸収されるために変形量を予想しづらく、かつ再現性を予想できない。

本設計法は、曖昧さを排除するため最も曖昧である摩擦力を極力排除している。このために用いられる方法が「引き抜きを伴う圧入」という方法であり、この方法によって杭周面に働く摩擦力は排除される。これによって、杭の軸力は、ほぼ 100%杭の先端に伝達できる事になる。

杭軸力が 100%であれば、杭頭荷重は 100%先端荷重となる。この事は支持力で議論した事と同じである。しかし、変形抵抗を考えた時この状態のままでは変形性を推定・確定できない。先の議論で地盤は弾塑性状態であるとした。即ち、常時、地盤は弾塑性状態にあると言って良い。これを杭の支持力上限まで弾性状態にする必要がある。（必要最小限の弾性化）

地盤は土粒子で構成されており、全面固体という層はむしろ希である。このため弾性化を促進する手続きが必要となり、本設計法の繰り返し荷重の負荷が有効になる。弾性化は必要最小限であればよく、圧入最終荷重程度を繰り返す事で実現できる。

この手続きによって杭先端が弾性化状態となるため、今まで推定すら出来なかった杭の弾性変位量をすべての杭に対して決定する事が出来る様になる。

地盤によっては、杭先端が到達した深さで、杭の支持力上限で、すでに弾性状態となっている事がある。岩盤や固結地盤等であるが、これらの層であっても弾性化手法が有効であり、この手続きによって杭先端の残留変位が除去されて、真に弾性状態にある事が確認できる。

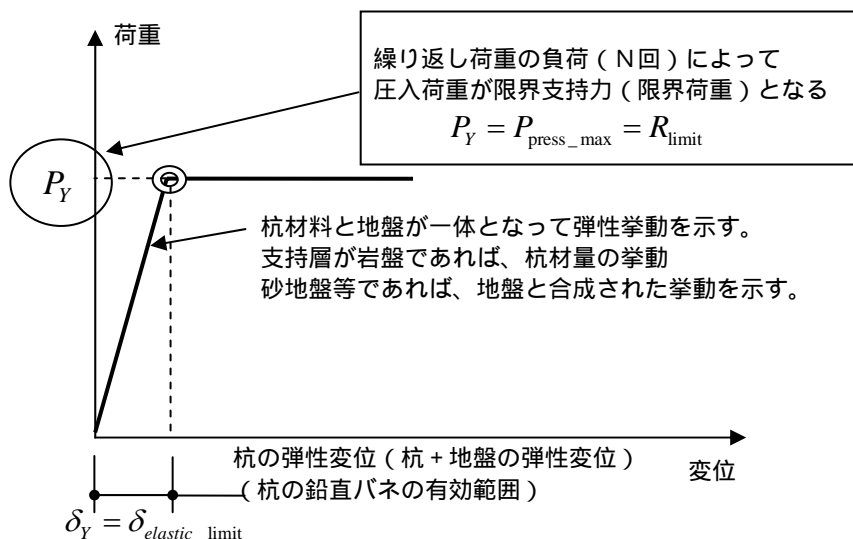
圧入支持杭設計法は、支持力を確定するだけでなく、杭先端地盤を積極的に弾性化しその弾性状態を確認する事によって杭の変形性能を規定できるのである。

）圧入支持杭特性図

支持力と変形特性が杭毎に規定できれば、杭の「荷重 - 沈下」性状は一意的に決定する事が出来る。特性図は、杭の弾性限界抵抗力と弾性変位量だけで構成されている。

この特性図によって、上部設計にフィードバックが可能となる。

杭一本ごとに定められる圧入支持杭特性図の概念図



）BM杭の役割

設計支持層、設計荷重、設計変位が目標値を満足出来るかという評価は必ず行わなければならない。このために、支持層確認、杭支持力確認、杭の弾性変位量の確認は必須の事項となる。設計荷重と杭支持力の関係は重要である。安全率の不毛な議論を行わないためにも支持層で想定できる杭支持力と設計荷重の関係を精査する必要がある。

安全性の議論を破壊確率の議論に展開するためにもBM杭の基礎データは重要となる。このBM杭データが、その後の杭施工のガイドラインとなる。

）信頼性

集合した杭の信頼性評価は、施工精度の評価でもある。安全性指標値は、変動係数の逆数で定義されている。このことから、変動が少なければ指標値は大きなものを与える事になる。信頼性評価は、強度の信頼性だけでなく施工の信頼性も併せて評価すると言える。

7.2 設計法の基本スキームのまとめ

圧入支持杭設計法で造作した杭は、支持力確定値と変位特性を持っている。このため、杭の評価を確定値を以て行う事が出来る。

設計法の基本検討は、以下となる。

- 1 杭の抵抗力が設計荷重を上回ること

$$P_{design} < P_{allowable} = R_{limit} \quad (\text{設計法では } P_{design} < P_Y)$$

- 2 杭部材応力が部材の許容応力度以内に収まること

$$\sigma_{actual} < \sigma_{design} < \sigma_{allowable}$$

- 3 杭変位が上部構造の要求する変位以下であること

$$\delta_{actual(\text{推定})} < \delta_{design} \quad (\text{設計法では } \delta_{design} \leq \delta_Y)$$

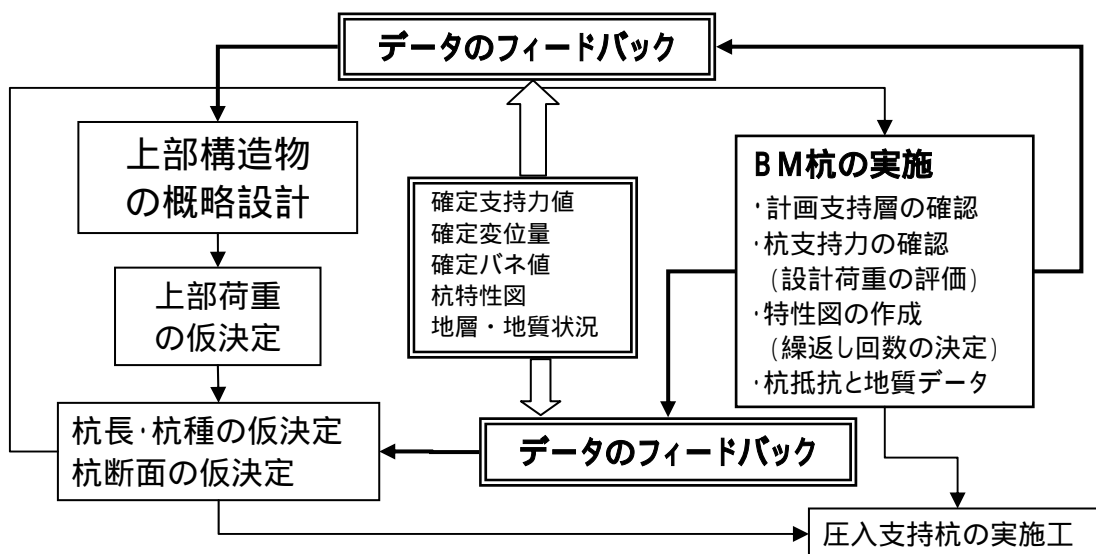
- 4 上部荷重に対して杭基礎全体の支持力信頼性が確認できること

$$\text{安全性指標 } \beta = \frac{\bar{Z}}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - S}{\sigma_R} = 2.3 \sim 3.1 \text{ を確認}$$

、 は、圧入支持杭特性図上で判断できる。 は事前検討であり設計荷重を決定する際に検討される。

～ は、BM杭を施工する事で確認する事が出来、このデータは施工ガイドラインとなると同時に、設計フィードバックに用いる事が出来る。

は、最終施工評価である。集合された杭の全体支持力の信頼性評価であると同時に、設計そのものの評価を行う事が出来る。更に、データのバラツキは安全性指標と一対一に対応しているため施工評価の係数としても用いる事が出来る。



7.3 最後に

本設計法は、施工法と密接に関連している。杭基礎が曖昧なまま放置されてきたのは、過剰設計を安全性という未定義用語の中に封じ込める事により、暗黙裏に安全という概念の拡大を行ってきた所為であるといえる。地盤と杭の関係は、不確定要素の上に成り立っていると言う了解が、背後には存在している。

不確定要素を確定要素に変える試みは、地盤材料の研究、地盤と杭の力学関係の研究等によって数多くなされてはいるが、必ずしも成功しているとは言い難い。この原因は、施工法とリンクしていない事が上げられる。

不確定要素を排除する工法、不確定要素を確定要素に変える工法があれば、これらの疑問は氷解するはずである。本設計法は、この不確定要素を排除する工法をベースに、不確定要素を確定要素に変える方法論を中心に構成した。

杭設計は、極めて単純な設計と言える。設計荷重に耐える事を担保するだけでよい。しかし、本当に担保できているのか、過剰となっていないのか、評価割れしていないのかと言う点に関しては、曖昧なまま来ていたと言える。

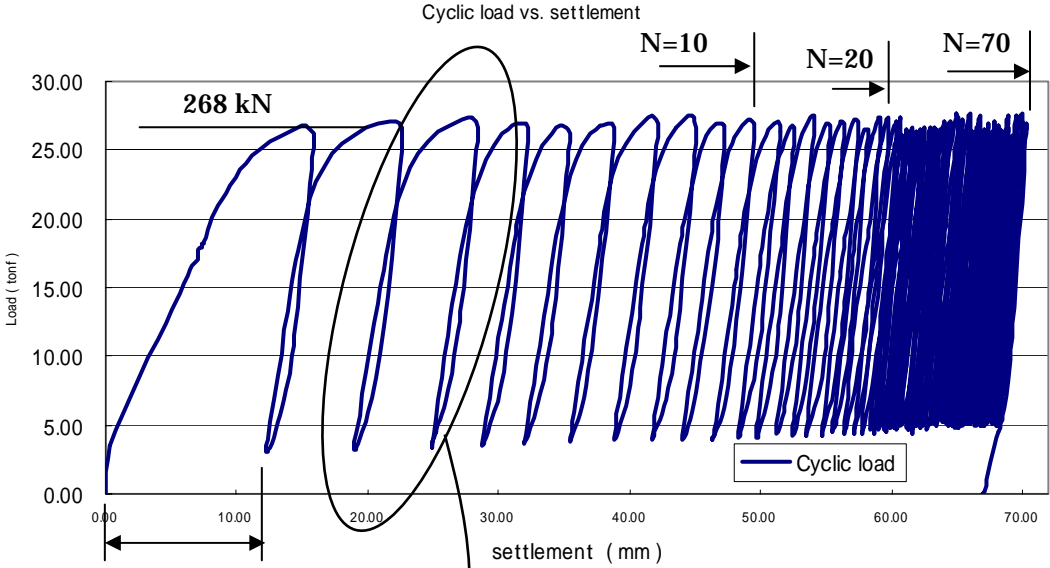
本設計法により、杭の支持力と変形特性が確定値として取り扱える様になったと確信している。これにより上部構造物と地下構造物（杭基礎）の関係がより明確となり、一体として設計する可能性も開かれたものと確信している。

APPENDIX

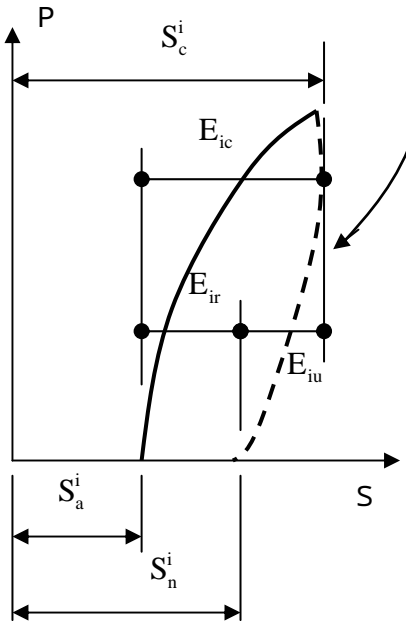
- APPENDIX A** 繰り返し荷重による弾性化
- APPENDIX B** 繰り返し荷重による鉛直バネ
- APPENDIX C** 油圧発生メカニズムと圧入効率係数
- APPENDIX D** 杭の鉛直載荷試験

『繰り返し荷重による弾性化』

繰り返し荷重の一回毎のデータは、以下のパターンとなっている。



Initial settlement = 12mm



$$\begin{cases} E_{ic} = S_c^i - S_a^i \\ E_{ir} = S_n^i - S_a^i \\ E_{iu} = S_c^i - S_n^i \end{cases}$$

但し、

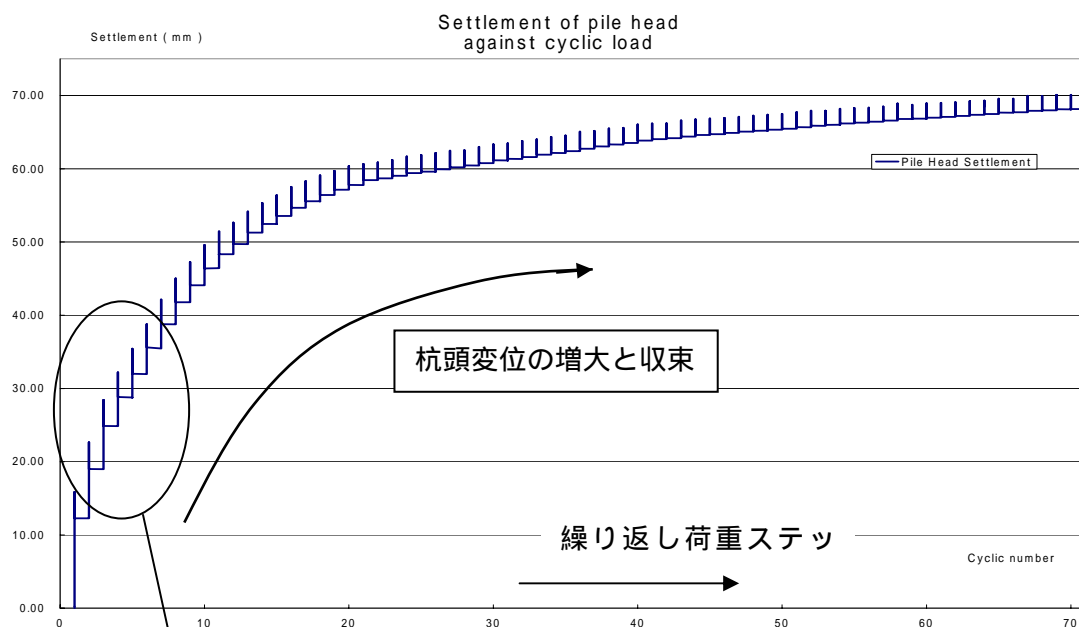
- S_c^i : i 回目の杭頭総変位量
 - S_a^i : i 回目の杭頭変位初期値
 - S_n^i : i 回目の杭頭総変位量
-
- E_{ic} : i 回目の杭頭相対変位量
 - E_{ir} : i 回目の残留変位量
 - E_{iu} : i 回目の回復変位量

繰り返し荷重データは、以下の通り。

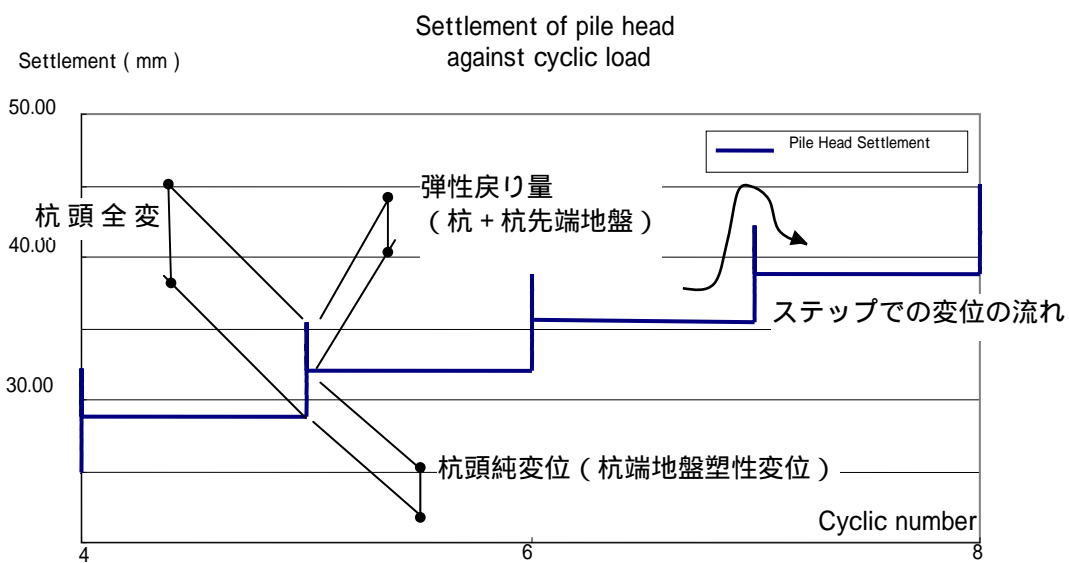
回数	杭頭初期変位	杭頭総変位量	杭頭最終変位	杭頭相対変位	杭頭回復変位	杭頭残留変位	$\frac{n}{S_n^i}$	$\frac{S_n^i}{S_n^\infty}$
	S_a^i	S_c^i	S_n^i	E_{ic}	E_{ir}	E_{iu}		
1	0.00	15.87	12.27	15.87	12.27	3.60	0.0815	0.1669
2	12.27	22.64	18.97	10.37	6.70	3.68	0.1055	0.2579
3	18.97	28.45	24.85	9.48	5.89	3.60	0.1207	0.3380
4	24.85	32.20	28.75	7.35	3.90	3.45	0.1391	0.3910
5	28.75	35.44	31.97	6.69	3.22	3.47	0.1564	0.4347
6	31.97	38.77	35.45	6.81	3.48	3.33	0.1693	0.4820
7	35.45	42.15	38.76	6.70	3.31	3.39	0.1806	0.5271
8	38.76	45.03	41.76	6.27	3.01	3.27	0.1916	0.5679
9	41.76	47.25	44.08	5.49	2.32	3.17	0.2042	0.5995
10	44.08	49.58	46.38	5.50	2.30	3.21	0.2156	0.6307
11	46.38	51.46	48.31	5.09	1.94	3.15	0.2277	0.6570
12	48.31	52.64	49.71	4.33	1.40	2.94	0.2414	0.6760
13	49.71	54.15	51.27	4.44	1.56	2.88	0.2536	0.6972
14	51.27	55.32	52.45	4.06	1.18	2.88	0.2669	0.7132
15	52.45	56.40	53.56	3.95	1.11	2.84	0.2801	0.7283
16	53.56	56.55	54.66	2.99	1.11	1.89	0.2927	0.7434
17	54.66	58.31	55.55	3.65	0.89	2.76	0.3060	0.7555
18	55.55	59.10	56.40	3.55	0.85	2.70	0.3191	0.7670
19	56.40	59.72	57.14	3.32	0.74	2.58	0.3325	0.7771
20	57.14	60.36	57.79	3.22	0.65	2.57	0.3461	0.7859
21	57.79	60.66	58.44	2.87	0.65	2.22	0.3594	0.7947
22	58.44	60.86	58.68	2.43	0.24	2.19	0.3749	0.7980
23	58.68	61.19	59.05	2.52	0.37	2.15	0.3895	0.8030
24	59.05	61.68	59.40	2.64	0.35	2.29	0.4041	0.8078
25	59.40	61.88	59.59	2.49	0.20	2.29	0.4195	0.8104
26	59.59	62.16	59.92	2.57	0.32	2.24	0.4339	0.8148
27	59.92	62.46	60.19	2.55	0.27	2.28	0.4486	0.8185
28	60.19	62.39	60.63	2.20	0.44	1.76	0.4619	0.8245
29	60.63	62.98	60.76	2.36	0.13	2.22	0.4773	0.8263
30	60.76	63.34	61.12	2.58	0.36	2.23	0.4909	0.8312
31	61.12	63.47	61.33	2.35	0.21	2.14	0.5055	0.8341
32	61.33	63.80	61.58	2.47	0.25	2.22	0.5196	0.8375
33	61.58	64.02	61.92	2.44	0.34	2.11	0.5330	0.8420
34	61.92	64.35	62.14	2.44	0.23	2.21	0.5472	0.8451
35	62.14	64.54	62.39	2.40	0.24	2.16	0.5610	0.8484

36	62.39	65.07	62.73	2.68	0.34	2.34	0.5739	0.8531
37	62.73	65.18	63.04	2.46	0.31	2.15	0.5870	0.8573
38	63.04	65.50	63.30	2.46	0.26	2.20	0.6004	0.8608
39	63.30	65.60	63.51	2.30	0.21	2.09	0.6141	0.8637
40	63.51	66.04	63.83	2.54	0.32	2.21	0.6267	0.8681
41	63.83	66.18	64.04	2.35	0.21	2.13	0.6402	0.8709
42	64.04	66.19	64.17	2.15	0.13	2.02	0.6545	0.8727
43	64.17	66.59	64.39	2.42	0.22	2.20	0.6678	0.8757
44	64.39	66.75	64.60	2.36	0.21	2.15	0.6811	0.8786
45	64.60	66.85	64.71	2.25	0.11	2.14	0.6955	0.8800
46	64.71	66.94	64.89	2.24	0.18	2.05	0.7089	0.8824
47	64.89	67.09	65.07	2.20	0.18	2.02	0.7224	0.8849
48	65.07	67.25	65.18	2.18	0.12	2.07	0.7364	0.8864
49	65.18	67.38	65.32	2.20	0.14	2.06	0.7502	0.8883
50	65.32	67.49	65.47	2.17	0.15	2.02	0.7638	0.8903
51	65.47	67.72	65.66	2.25	0.19	2.06	0.7768	0.8929
52	65.66	67.92	65.86	2.26	0.20	2.06	0.7896	0.8956
53	65.86	67.93	65.98	2.08	0.13	1.95	0.8033	0.8973
54	65.98	68.19	66.18	2.21	0.19	2.02	0.8160	0.9000
55	66.18	68.29	66.28	2.12	0.11	2.01	0.8298	0.9014
56	66.28	68.34	66.41	2.06	0.13	1.94	0.8433	0.9031
57	66.41	68.50	66.56	2.09	0.15	1.94	0.8564	0.9051
58	66.56	68.91	66.77	2.35	0.21	2.14	0.8687	0.9081
59	66.77	68.74	66.82	1.97	0.05	1.92	0.8830	0.9087
60	66.82	68.93	66.97	2.12	0.16	1.96	0.8959	0.9108
61	66.97	69.00	67.07	2.03	0.10	1.93	0.9095	0.9121
62	67.07	69.09	67.20	2.02	0.13	1.89	0.9227	0.9138
63	67.20	69.24	67.35	2.05	0.16	1.89	0.9354	0.9160
64	67.35	69.30	67.46	1.95	0.11	1.84	0.9487	0.9174
65	67.46	69.40	67.65	1.94	0.19	1.75	0.9609	0.9200
66	67.65	69.58	67.70	1.93	0.06	1.88	0.9749	0.9207
67	67.70	69.97	67.89	2.27	0.19	2.08	0.9870	0.9232
68	67.89	69.90	67.97	2.02	0.08	1.94	1.0005	0.9243
69	67.97	70.08	68.08	2.11	0.11	2.00	1.0135	0.9259
70	68.08	70.10	68.14	2.02	0.06	1.96	1.0273	0.9267
(71)	(68.08)	(70.25)	(69.03)	(2.11)	(0.89)	(1.22)	(1.0285)	(0.9388)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
∞	$\frac{S_a^{n-i}}{S_a^n} \rightarrow 1$	$\frac{S_c^{n-i}}{S_c^n} \rightarrow 1$	$\frac{S_n^{n-i}}{S_n^n} \rightarrow 1$	$E_{nc} \rightarrow \text{cnst}$	$E_{nu} \rightarrow 0$	$E_{nr} \approx E_{nc}$	$\frac{n}{S_n^i} \rightarrow \infty$	$\frac{S_n^i}{S_n^\infty} \rightarrow 1$

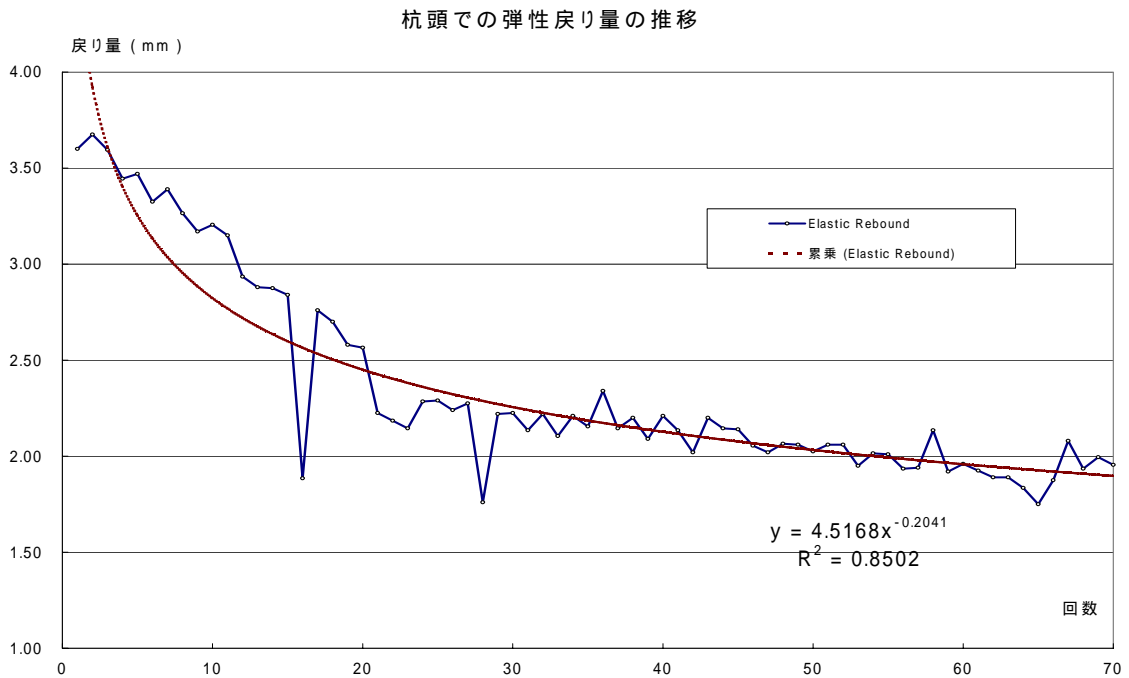
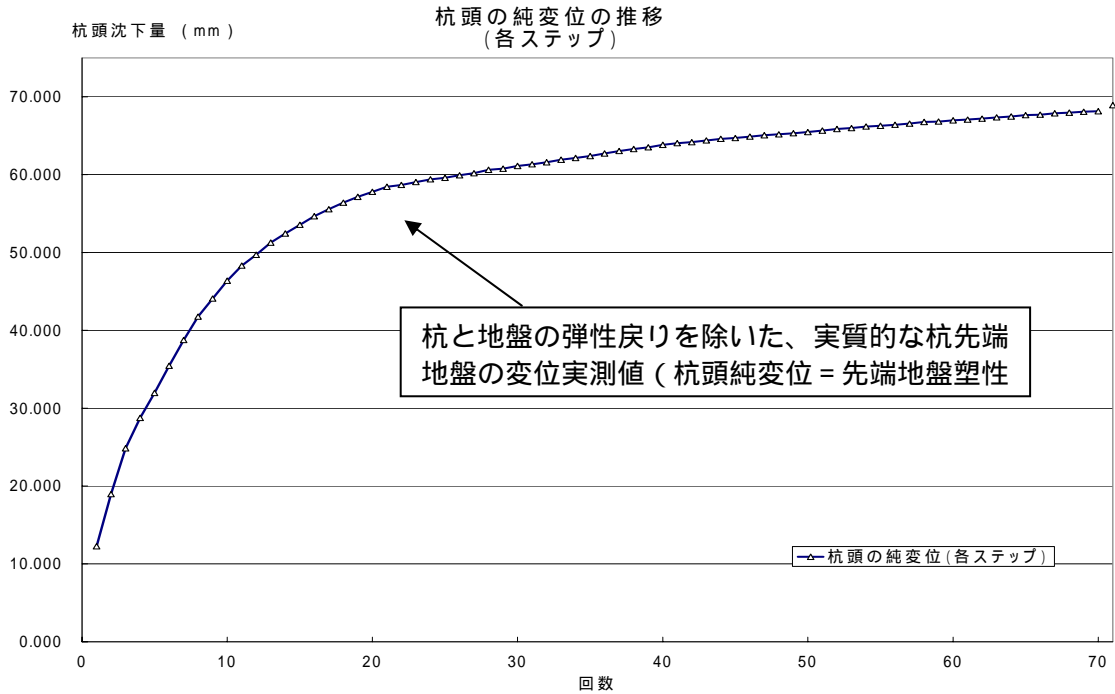
荷重ステップ毎の変位の変化は下図のように示される。変位が増大し、除荷時に弾性戻りをするパターンとなる。杭先端地盤が、繰り返し荷重で塑性変形しながら変形量を減少させ、弾性化に至る。



プロセス拡大



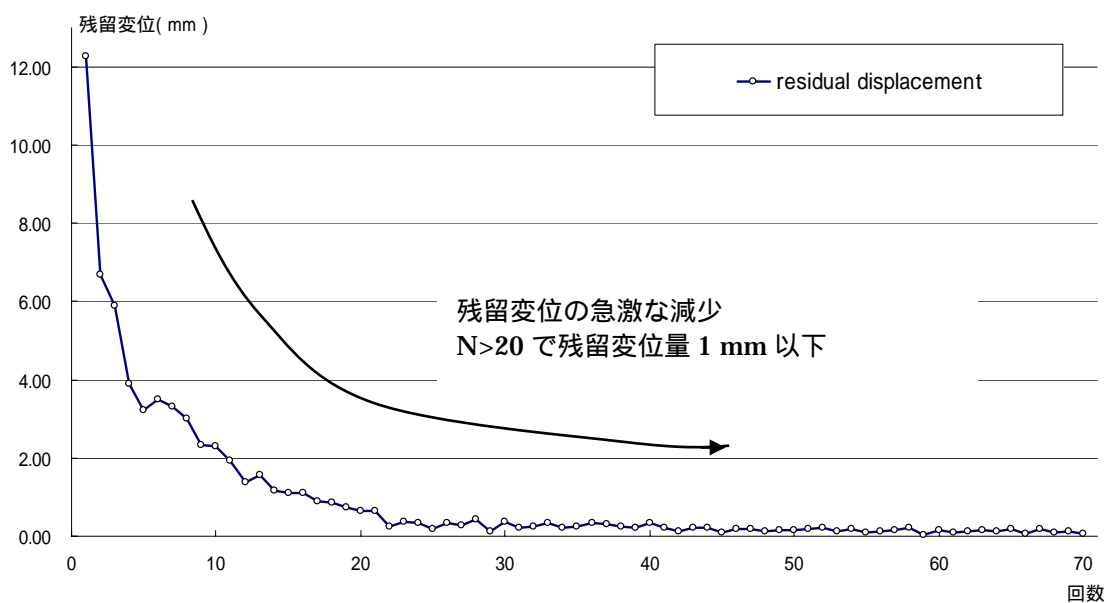
杭の実質沈下（杭先端の地盤塑性変形）と（杭 + 先端地盤）弾性戻りの関係は以下のグラフに示される。



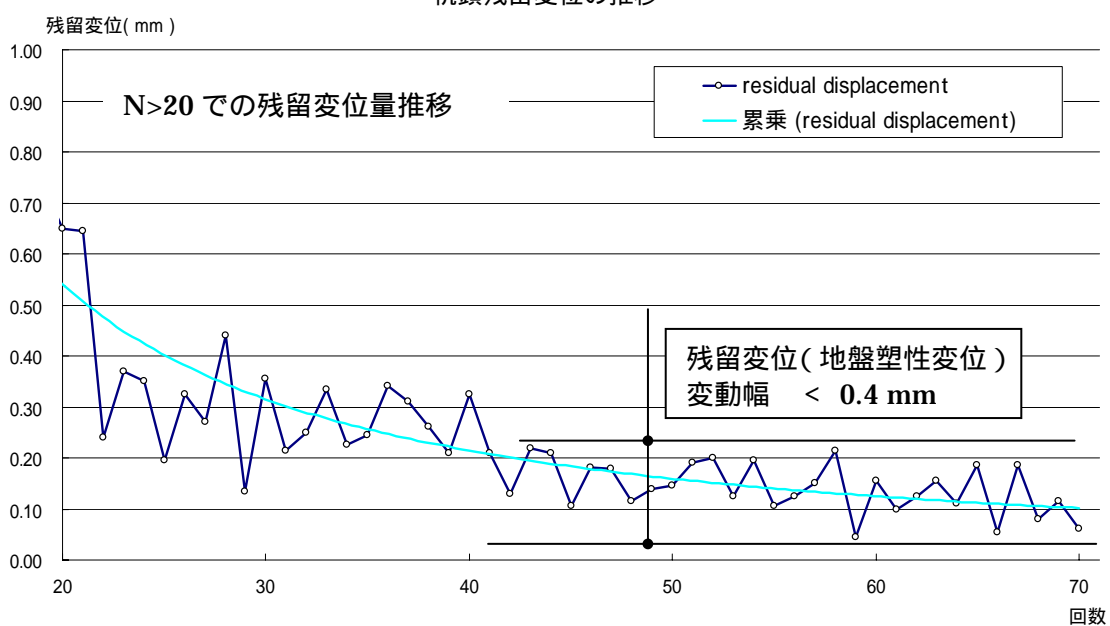
弾性戻り量が一定値に収束する。即ち、杭と地盤が一体となって繰り返し荷重に弾性抵抗していることを示している。

杭と地盤が一体になることによって、外荷重に対し合成された材料として抵抗する。擬似的な弾性体として、同一荷重に対し対応した弾性変位を示し、先端地盤が弾塑性状態から弾性状態に移行する。この状態になった時、杭の塑性変位はゼロになる。下図は、杭頭に残留する変位の推移（杭先端地盤の塑性変位）である。

杭頭残留変位の推移



杭頭残留変位の推移



繰り返し荷重によって地盤変形（塑性変位）が収束していく事がグラフより確認できる。この収束先がどこにあるのかを推定する。

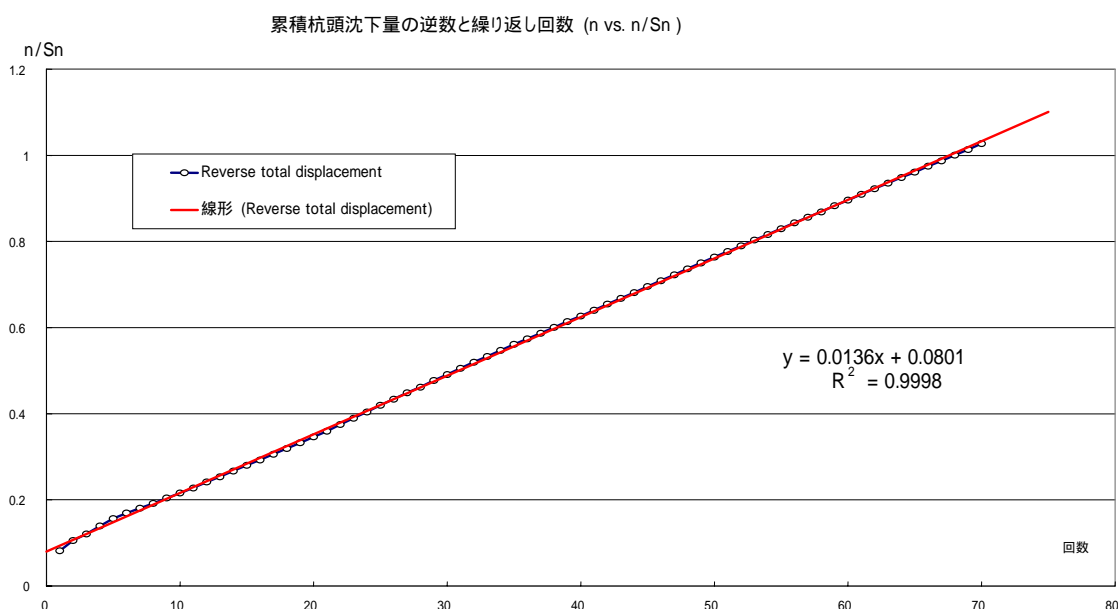
杭頭純変位（地盤の塑性変形量）のグラフから沈下量は、回数の増加に伴って増加量を減少している。沈下増分が、回数に比例して減少している。即ち、累積沈下量の逆数は、回数に比例していると言える。

この関係を直線関係にあると見立てて、両者の関係を以下の式で推定する。

$$\frac{n}{S_n} \propto n$$

$$\therefore \frac{n}{S_n} = a + bn \quad \text{or} \quad S_n = \frac{n}{a + bn}$$

$(\frac{n}{S_n})$ vs $(n: \text{繰り返し回数})$ のプロットに対して、直線回帰式で推定できる。



累積沈下の逆数（杭頭純沈下の累積の逆数）は、回数にほぼ完全に比例していることが分かる。回帰式から決定される無限遠点での沈下収束値は、以下で推定できる。

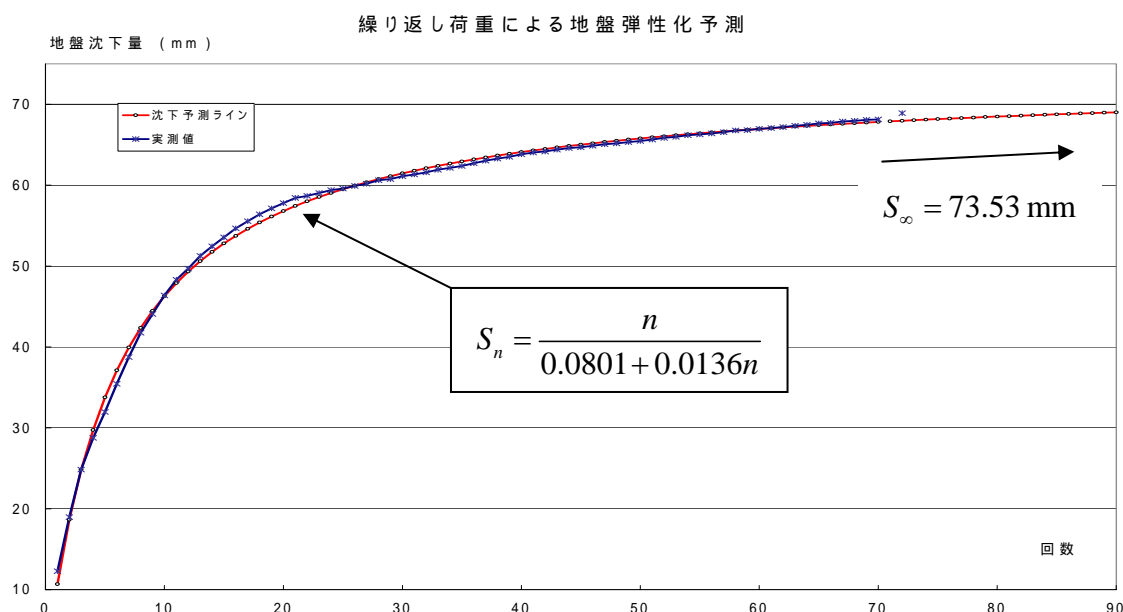
$$\frac{n}{S_n} = a + bn = 0.0801 + 0.0136n$$

$$\therefore S_n = \frac{n}{0.0801 + 0.0136n}$$

$$n \rightarrow \infty \text{ の時 } S_n \rightarrow S_\infty \text{ とすると } S_\infty = \frac{1}{0.0136} = 73.53 \text{ mm}$$

限りなく繰り返し荷重を加えると $S_\infty = 73.53\text{mm}$ に収束する。このとき先端地盤の塑性変位はゼロとなり、杭頭残留変位がゼロとなり杭と地盤が合成した弾性戻り値が常に一定値となる。

回帰直線は、累積沈下に戻す事によって回帰曲線で表される。この曲線は、繰返し回数と杭の純沈下量（杭先端地盤の塑性変形）の理論的推定値を与えることから、実際の測定値との比は弾性化に至るまでの、弾性達成に対する比を与えることになる。



実測値と回帰式との比が、弾性達成の比を表す事になる。弾性達成率を χ とすると

$$\chi = \frac{S_n}{S_\infty}$$

$\chi = 1$ 弾性（達成率 100%）

$\chi = 0$ 塑性（達成率 0%）

と表現できる。

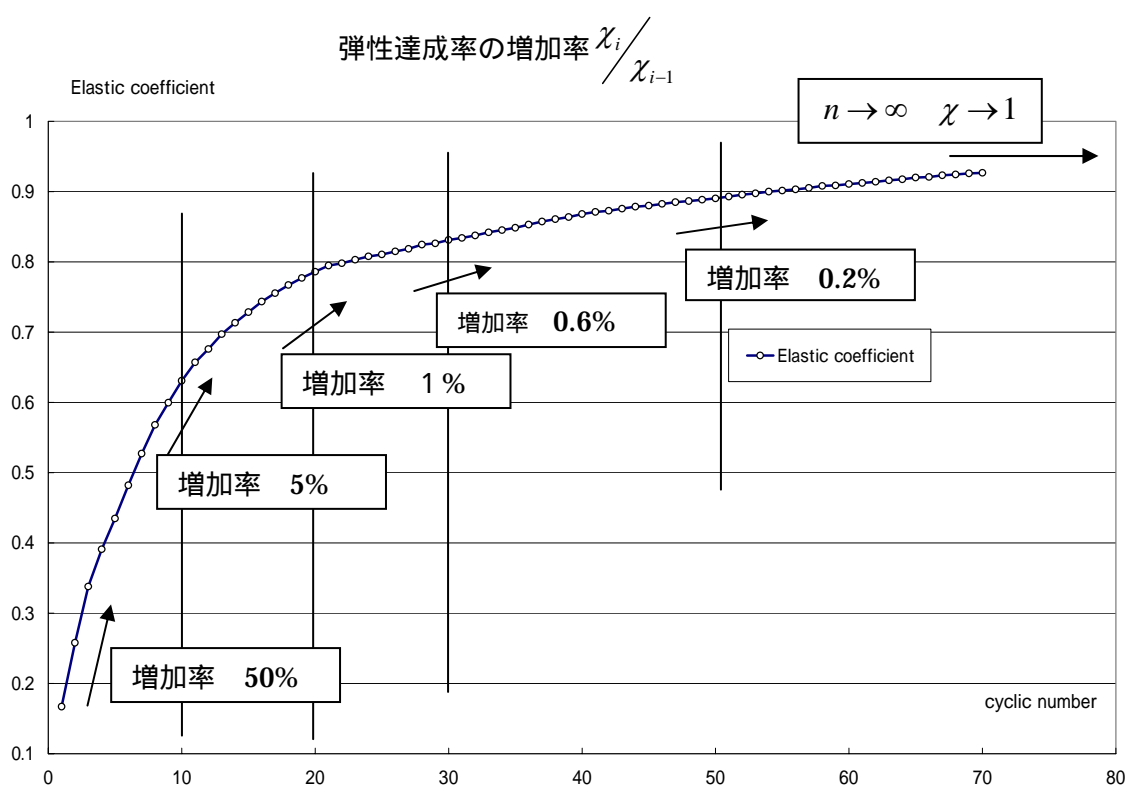
N	χ	12	0.676	24	0.808	36	0.853	48	0.886	60	0.911
1	0.167	13	0.697	25	0.810	37	0.857	49	0.888	61	0.912
2	0.258	14	0.713	26	0.815	38	0.861	50	0.890	62	0.914
3	0.338	15	0.728	27	0.819	39	0.864	51	0.893	63	0.916
4	0.391	16	0.743	28	0.824	40	0.868	52	0.896	64	0.917
5	0.435	17	0.755	29	0.826	41	0.871	53	0.897	65	0.920
6	0.482	18	0.767	30	0.831	42	0.873	54	0.900	66	0.921
7	0.527	19	0.777	31	0.834	43	0.876	55	0.901	67	0.923
8	0.568	20	0.786	32	0.837	44	0.879	56	0.903	68	0.924
9	0.599	21	0.795	33	0.842	45	0.880	57	0.905	69	0.926
10	0.631	22	0.798	34	0.845	46	0.882	58	0.908	70	0.927
11	0.657	23	0.803	35	0.848	47	0.885	59	0.909		

最初の数回は、ほとんど塑性状態にあり、N=20 を越えたあたりで達成率が漸増状態になる。N=30 (N : 繰返し回数) を越えると増加はごくわずかになる。

i 番目の増加率を $\Delta_i = (\chi_i - \chi_{i-1}) / \chi_{i-1}$ (%) で定義すると

N	2	5	10	20	30	40	50	60	70
Δ_i (%)	55	11	5.2	1.1	0.6	0.5	0.2	0.2	0.1
χ_i (%)	26	44	63	79	83	87	89	91	93

N=30 以降は、微増である。

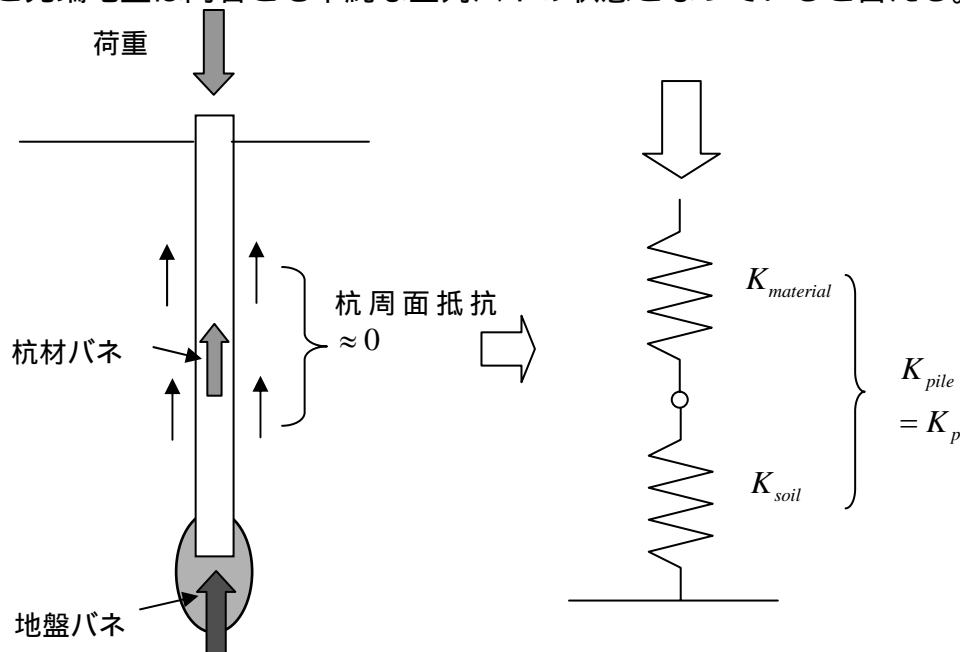


N=30 近傍で実質増加率 0 と見なしても問題がない。

『繰り返し荷重による鉛直バネ』

地盤が弾性化していなければ杭は弾性挙動をしない。先端地盤が、弾塑性状態であれば、杭材の弾性挙動は地盤の塑性変形分だけ控除して考えなければならない。しかし、地盤が弾性状態（準弾性状態）であれば杭材と地盤は一体となって弾性挙動をすることになる。

圧入杭は、杭造作時に杭周面の摩擦抵抗力を最小化することが出来るため杭材と先端地盤は両者とも単純な直列バネの状態となっていると言える。



杭材のバネ定数を $K_{material} (= K_m)$ 、先端地盤のバネ定数を $K_{soil} (= K_s)$ とする。圧入杭のバネ定数を $K_{pile} (= K_p)$ とすると、 $P_y = K_p \cdot S$ が成立する。

この式 $P_y = K_p \cdot S$ は圧入杭の鉛直バネと第1限界荷重（抵抗力）までの「荷重 - 変位」の関係（変位の勾配）を示している。

直列バネであるため合成されたバネ常数は以下のように簡単に表すことが出来る。

杭の「荷重 - 沈下」曲線の直線部分を弾性バネが支配する領域（杭の弾性領域）とすると、杭の第1限界抵抗力までがこの領域となる。この抵抗力を P_Y とし、その時の杭の変位を S 、杭のバネ常数を K_p とすれば $P_Y = K_p \cdot S$ となる。

故に

$$P_Y = K_p \cdot S = K_p \cdot (S_m + S_s)$$

$$\text{where } P_Y = K_m \cdot S_m, \quad P_Y = K_s \cdot S_s$$

$$S = S_m + S_s = P_Y \left(\frac{1}{K_m} + \frac{1}{K_s} \right) = P_Y \left(\frac{K_m + K_s}{K_m K_s} \right)$$

$$P_Y = \frac{K_m K_s}{K_m + K_s} S = K_{vY} \cdot S$$

$$\text{杭材と地盤が合成されたバネ常数を } K_{vY} (\approx K_p) = \frac{K_m K_s}{K_m + K_s} \text{ とする}$$

杭材は、周面に摩擦抵抗がない限り一定の弾性バネとして働く。即ち、杭材バネは常に一定値を示すが、杭のバネは先端地盤の弾性の程度によって変化する。杭材の弾性バネ常数は、以下で与えられる。

杭の長さ: $L^* = 7\text{ m}$ (但し、土中に造作した杭長は $L = 6\text{ m}$ である)

杭の断面積: $A = 99.73\text{ cm}^2$

杭材の弾性係数: $E_m = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$

$$K_m = \frac{A}{L} \cdot E_m$$

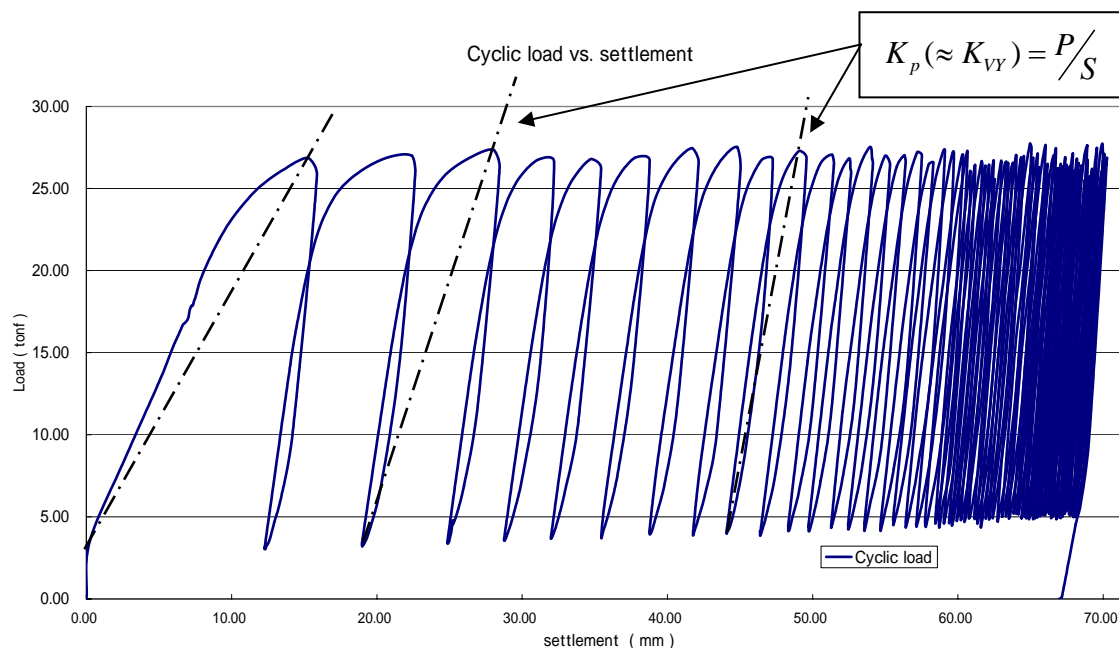
$$\therefore K_m \approx 3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm} = 3.0 \times 10^6 \text{ N/cm}$$

杭材のバネ常数は、杭周面の摩擦が最小に維持されている限り不変である。このバネ常数を用いて地盤のバネ常数および杭の鉛直バネ常数を求める。

但し、合成されたバネ K_p は、杭としての弾性抵抗バネ常数 K_{vY} と近似的に等しいと考える。

(K_{vY} は、第1限界抵抗力 P_Y に対する外力側から見た杭の弾性抵抗バネ常数であり、 K_p は杭材と地盤が両者とも弾性バネとなって直列につながれた時の合成バネ常数である。しかし、繰り返し荷重や圧入最終荷重が P_Y と完全にリンクしているため、両者に差がないものとして扱う。)

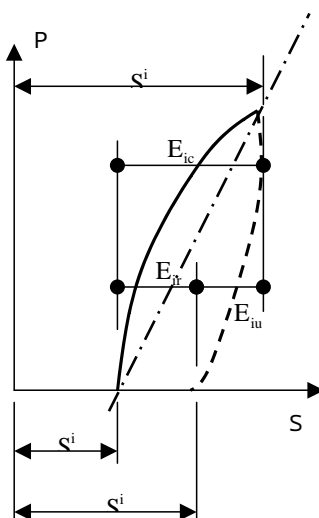
繰り返し荷重をかけて地盤を弾性化させた時の杭のバネ常数の変化は、以下の図で定義される。



地盤が弾塑性状態である時は、杭のバネは塑性変形分だけ緩い勾配となる。更に地盤に弾性戻りがないために、このバネ常数は杭としてのバネを表現できていない。杭のバネは、地盤の弾性バネに依存しているため繰り返しによって地盤が弾性化する必要がある。

プロセスを繰り返すと地盤が弾性化して行き、荷重と変位のヒステリシスループは閉合ループとなる。このとき初めて杭と地盤が一体となり、杭材と地盤が合成された杭のバネとなる。

$K_p = P_i (\approx 26tf) / E_{ic}$ として
 K_p 値の変化をまとめる。



$$\begin{cases} E_{ic} = S_c^i - S_a^i \\ E_{ir} = S_n^i - S_a^i \\ E_{iu} = S_c^i - S_n^i \end{cases}$$

但し、

$$\begin{cases} S_c^i: i \text{ 回目の杭頭総変位量} \\ S_a^i: i \text{ 回目の杭頭変位初期値} \\ S_n^i: i \text{ 回目の杭頭総変位量} \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_{ic}: i \text{ 回目の杭頭相対変位量} \\ E_{ir}: i \text{ 回目の残留変位量} \\ E_{iu}: i \text{ 回目の回復変位量} \end{cases}$$

繰り返しによる K_p 値の変化

N	P_i (tf)	$S = E_{ic}$ (mm)	$K_p = \frac{P_i}{E_{ic}}$ (kgf/cm)	$K_s = \frac{K_m K_p}{K_m + K_p}$
1	26.86	15.9	1.7×10^5	1.1×10^5
2	27.00	10.4	2.6×10^5	1.4×10^5
3	27.36	9.5	2.9×10^5	1.5×10^5
4	26.73	7.3	3.6×10^5	1.6×10^5
5	26.80	6.7	4.0×10^5	1.7×10^5
6	26.86	6.8	3.9×10^5	1.7×10^5
7	27.46	6.7	4.1×10^5	1.7×10^5
8	27.53	6.3	4.4×10^5	1.8×10^5
9	26.76	5.5	4.9×10^5	1.9×10^5
10	27.30	5.5	5.0×10^5	1.9×10^5
11	27.06	5.1	5.3×10^5	1.9×10^5
12	26.83	4.3	6.2×10^5	2.0×10^5
13	27.53	4.4	6.2×10^5	2.0×10^5
14	26.96	4.1	6.6×10^5	2.1×10^5
15	27.03	4.0	6.8×10^5	2.1×10^5
16	27.23	3.0	9.1×10^5	2.3×10^5
17	27.53	3.7	7.5×10^5	2.1×10^5
18	26.56	3.6	7.5×10^5	2.1×10^5
19	27.23	3.3	8.2×10^5	2.2×10^5
20	27.03	3.2	8.4×10^5	2.3×10^5
21	26.83	2.9	9.3×10^5	2.3×10^5
22	27.06	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
23	26.07	2.5	1.0×10^6	2.3×10^5
24	26.17	2.6	9.9×10^5	2.3×10^5
25	26.13	2.5	1.1×10^6	2.3×10^5
26	26.20	2.6	1.0×10^6	2.3×10^5
27	26.17	2.5	1.0×10^6	2.3×10^5
28	25.47	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
29	26.70	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
30	26.17	2.6	1.0×10^6	2.3×10^5
31	26.63	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
32	26.40	2.5	1.1×10^6	2.3×10^5
33	26.53	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
34	26.80	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
35	26.73	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
36	26.73	2.7	1.0×10^6	2.3×10^5
37	27.73	2.5	1.1×10^6	2.4×10^5
38	26.17	2.5	1.1×10^6	2.3×10^5
39	26.86	2.3	1.2×10^6	2.4×10^5
40	27.03	2.5	1.1×10^6	2.3×10^5
41	26.30	2.3	1.1×10^6	2.4×10^5

42	27.50	2.1	1.3×10^6	2.4×10^5
43	26.43	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
44	25.67	2.4	1.1×10^6	2.4×10^5
45	26.96	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
46	27.16	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
47	26.17	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
48	26.10	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
49	26.40	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
50	26.23	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
51	26.63	2.3	1.2×10^6	2.4×10^5
52	26.43	2.3	1.2×10^6	2.4×10^5
53	26.33	2.1	1.3×10^6	2.4×10^5
54	27.00	2.2	1.2×10^6	2.4×10^5
55	26.07	2.1	1.2×10^6	2.4×10^5
56	26.43	2.1	1.3×10^6	2.4×10^5
57	26.13	2.1	1.3×10^6	2.4×10^5
58	26.23	2.3	1.1×10^6	2.4×10^5
59	27.56	2.0	1.4×10^6	2.5×10^5
60	25.30	2.1	1.2×10^6	2.4×10^5
61	26.70	2.0	1.3×10^6	2.4×10^5
62	25.77	2.0	1.3×10^6	2.4×10^5
63	26.13	2.0	1.3×10^6	2.4×10^5
64	25.63	1.9	1.3×10^6	2.4×10^5
65	27.46	1.9	1.4×10^6	2.4×10^5
66	25.97	1.9	1.3×10^6	2.4×10^5
67	27.73	2.3	1.2×10^6	2.4×10^5
68	26.07	2.0	1.3×10^6	2.4×10^5
69	26.76	2.1	1.3×10^6	2.4×10^5
70	26.07	2.0	1.3×10^6	2.4×10^5

繰り返し荷重平均 : 268 kN

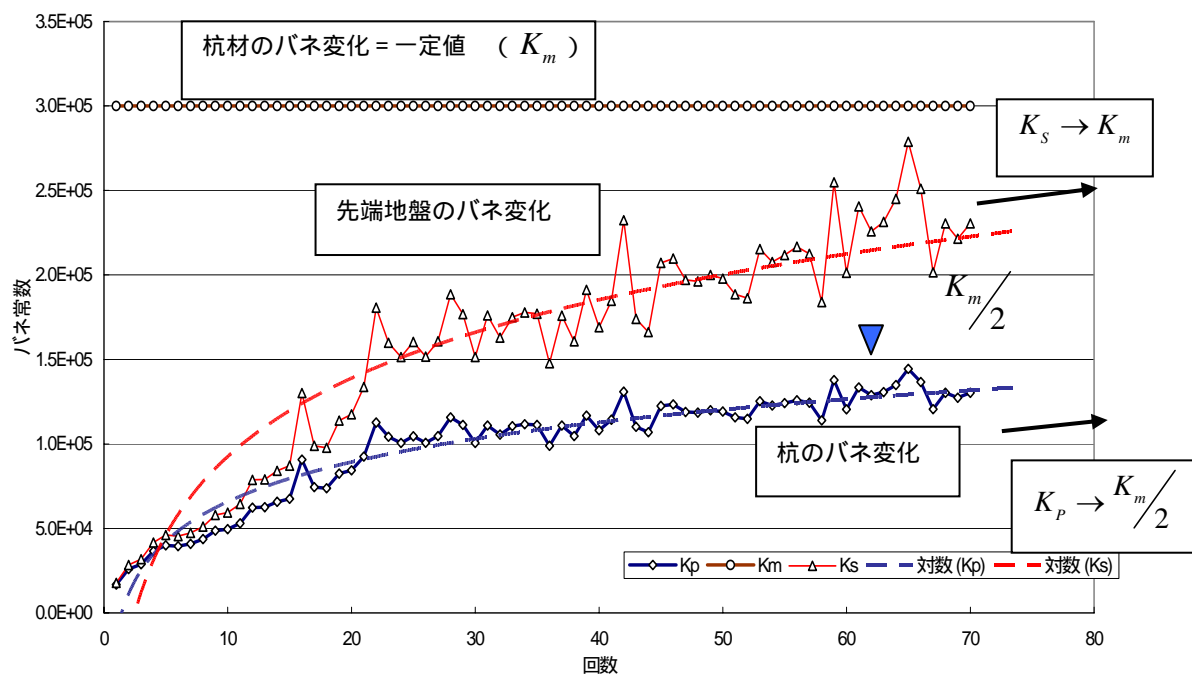
最終 K_p : 1.3×10^6 kgf/cm

最終 K_s : 2.4×10^5 kgf/cm

最終弾性戻り量 : 2.0 mm

バネ常数が変化する様子は、下図に示される。

バネ常数の変化



繰り返し荷重によって杭先端地盤は杭材のバネ値に漸近していき、合成された杭のバネ(直列配列された杭材バネと地盤バネ)は、杭材のバネ値の 1/2 に漸近していくことが分かる。

『油圧発生メカニズムと圧入効率係数』

一般的に機械から発生する力は圧入力と100%一致はしない。杭の載荷試験の様に杭頭に直接油圧力を負荷する訳でないため、圧入機を用いて加力すると力のロスが生じる。このロスの大きさを正確に把握しなければ、圧入機から発生する発生力と杭に働く圧入力に関連づけられない事になる。

この力のロスを圧入効率と考えると、これを数値化したものは圧入効率係数と呼んでも良い。この係数を η とする。この係数は、実験で確認できる。この係数の算出と、圧入力と発生力の関係を考察する。

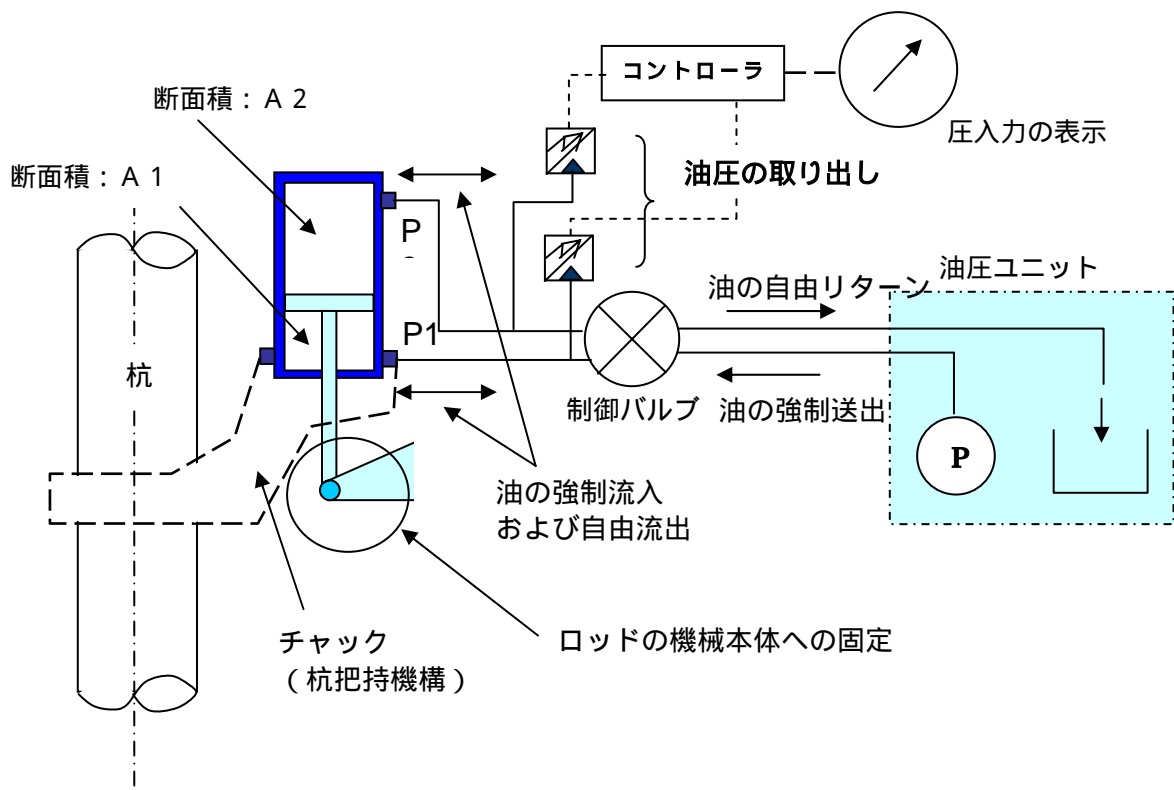
この係数は、圧入機の構造に多くを起因しているため機種によって、もしくは機体差によって若干異なる事が予想できる。が、ここでの議論は係数そのものの妥当性の検証ではなく、係数を介する事で圧入力と発生力が一対一に対応出来ると言うことの検証を目的としている。

圧入は、油圧の変化を力に換算しているため、歪みの変化を力に換算する方法に比べて（見かけ上）瞬時の変動が大きい。更に、油圧供給をポンプで行うため、動的な油圧変動を短期間で行うとサージ圧が生じる事になる。静的に油圧を負荷すると載荷試験と同様に安定した発生力が得られるが、動的な瞬時変動時は若干力のバラツキが生じる事になる。

最初にこの問題を取り上げ、これが見かけ上の現象である事を検討し、後に発生力と圧入力の間関係を論ずる。

「圧入力発生のメカニズム」

圧入力は、杭の載荷試験のように杭頭に直接与えられるのではなく、杭を把持（もしくは抱き抱え）する機構（以降チャックとする）が上下する事によって与えられる。このチャックに固定された二連のシリンダーが上下する事によって、圧入油圧力が杭に与えられる。



上図は、力の発生部分のみを簡略化したものである。シリンダーのロッドは圧入機本体に固定されており、チャックはシリンダー本体ケースに固定されている。このためロッド側に与えられた油圧（ $P1$ ）はケースを押し下げる力となり、ヘッド側の油圧（ $P2$ ）はケースを押し上げる力となる。このシリンダー本体ケースに連動してチャックが上下し、チャックに把持された杭も上下する。

油圧は、油圧機械ユニットから供給され圧入機本体の制御バルブによって $P1, P2$ に振り分けられる。この時、一方の油圧は制御バルブでオープンに解放されて油は油圧ユニット側に自由流出する。（ $P1$ を加圧した時は $P2$ はオープンとなって油の自由流出が起こる。）解放側に油流抵抗、機械系統、油圧ホース等の抵抗損失が生じ、瞬時には応力解放されないが、基本的には片側が加圧された時は、他方は応力解放状態となっている。

力の表現は、シリンダー各部屋（ロッド側、ヘッド側）の油圧値を取り出し、これらの差圧を取る事によってなされる。この時残留圧が瞬時にゼロとなれば発生力は $P_1 A_1$ だけであるが、ロッド、ヘッド側も油圧が一定圧で残留しているため、油圧による発生力は二つの力の差として表現される。

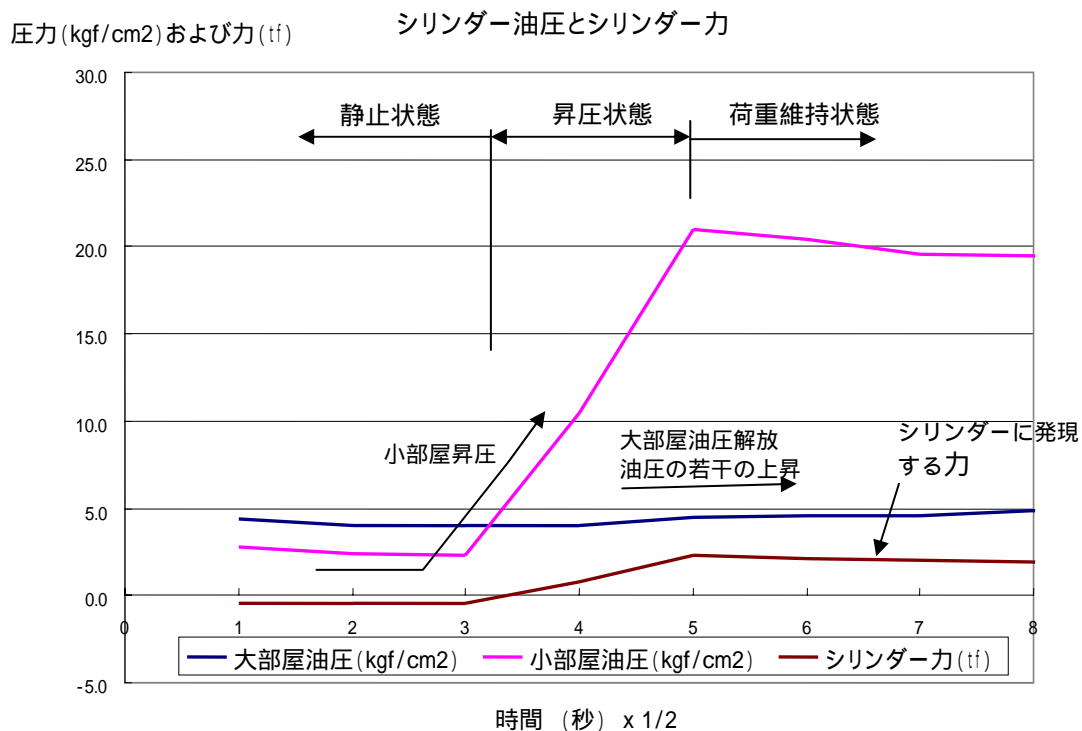
$$F = n \cdot (P_1 A_1 - P_2 A_2)$$

$$n = 2 \text{ (シリンダー数 2 本)}$$

$F > 0$ ならば圧入力、 $F < 0$ ならば引き抜き力を表す。

A) 圧入力発生時

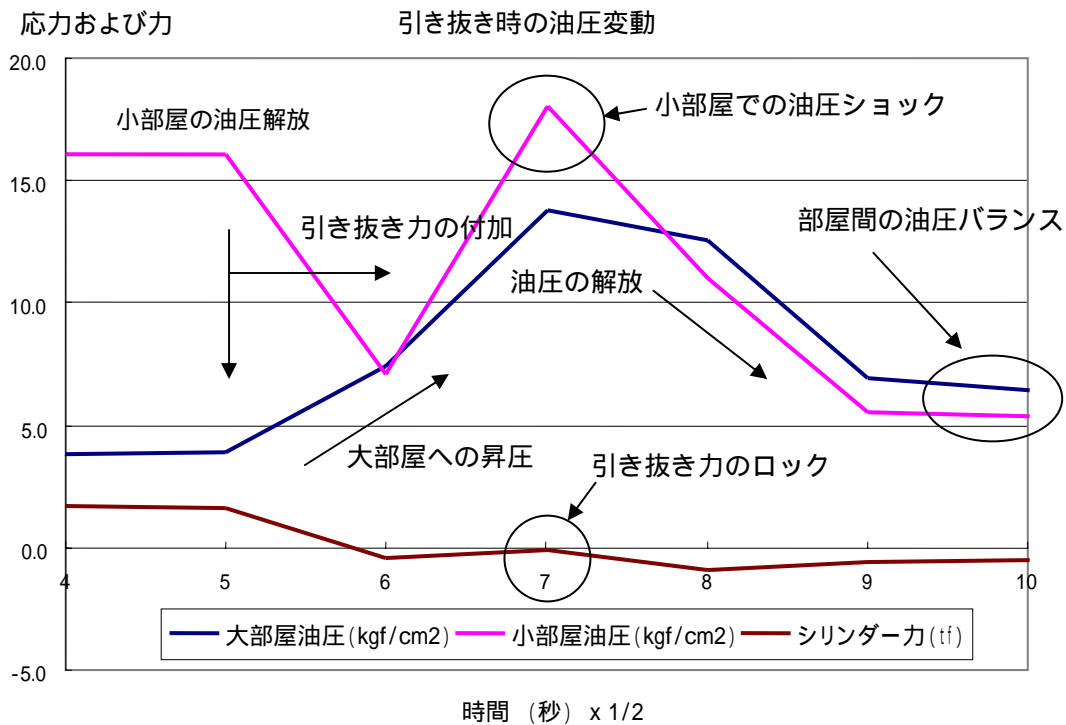
加圧する時は、 P_1 （ロッド側）に油圧が供給されるが、 p_2 側（ヘッド側）の油圧が解放されても若干連動して油圧の上昇が見られる。 P_1 に供給される油圧のスピードにも関連するが、加圧初期は解放側に若干のリアクションが生じる事になる。この状態は、加圧が継続すると定常状態となる。



上図での小部屋油圧は、 P_1 油圧（ロッド側油圧）を示し、大部屋油圧は P_2 油圧（ヘッド側油圧）を示している。

B) 引き抜き力発生時

引き抜きは、圧入動作後の切り替え動作である。このため、一般的には加圧定常状態から短時間で油圧が切り替えられ、一気に P2 油圧（ヘッド側油圧）が付加される。このため油圧のサージが多く見られ、更に解放側の油圧にショックが生ずる事がある。この一時的現象を過ぎると油圧は安定する。



圧入、引き抜きとも油圧の加圧状態で実現されるが、この油圧供給は、油圧の経路を変える事で（力の発現方向を変える事で）コントロールしている。このため（同一の供給油圧を経路替えで実現しているため）、切り替え直後はサージやショックが生ずる事になる。

これらの状態は、極めて過渡的な状態であり、油の供給が定常状態になれば、即ち、圧入・引き抜きの同一動作が連続すれば、油圧は安定する。瞬時の油圧変動に対しては、瞬時のリアクションが生じ、これが見かけ上の油圧サージ等の現象となる。実際に杭に与えられる外力サージではなく、油圧を力で表現した時に現れる過渡的な現象である。

力の表現は、この様に両者の油圧力を用いて算出しているため、瞬間的にはサージ、ショックの影響に敏感に反応して過大、過小の力表現になり得る事になる。しかしながら、圧入杭を造作する荷重値は、油圧安定状態での荷重である事から初期、終期に見られる過剰な荷重変動（サージ、ショック等）は、見かけ上の初期変動として無視する事が出来る。

「圧入効率係数」

圧入機から発生した圧入力は100%杭頭荷重にはならない。これは油圧シリンダーが杭軸に直列しておらず、横側から並列して加圧する構造になっているためである。即ち、力の発生点と力の作用点在同一でない事により回転力が発生し、この回転を止めるために機体側の剛性や機体の固定が必要になる。機体は杭にクランピングされ、この時に水平分力が発生し、圧入力鉛直成分と水平成分に分解される。このため、圧入力鉛直成分が100%鉛直力にならずに若干の加力ロスが生ずることになる。

杭に実際に働く鉛直力（載荷重）はこの鉛直分力であり、更にチャック（杭把持装置）の剛性、シリンダーが上下動するリーダーマストの摩擦損等が合算されて抵抗となる。これらの抵抗や固有の損失等があるため圧入力（杭に対する載荷重、杭頭荷重）は、シリンダー発生力とは一致しない。

このロスは機械固有のロスと考えられる。即ち、突発的に発生するロスではなく、定常的、再現的に発生するロスであると言える。このロスを把握する事により、圧入力と発生力の関係が関連づけられる。このロスは、圧入力と発生力の関係に圧入効率係数 ξ を用いて表す事で表現出来る。

$$P_{press} = \xi F_{cylinder}$$

P_{press} : 圧入荷重

$F_{cylinder}$: シリンダー発生力

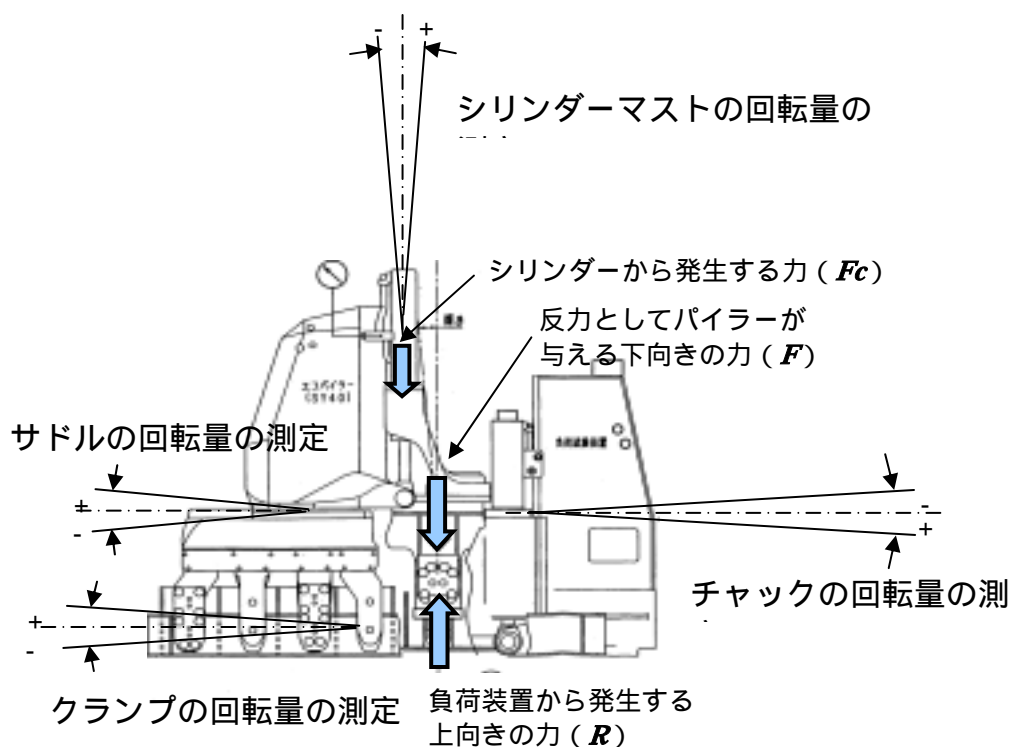
ξ : 効率係数 ($\xi = 0.9$ 機械によって異なる)

この効率係数は、機械固有の係数と考えられるが、実験等で確認した係数は $\xi = 0.9$ であった。

（他の機種では、若干異なると予想される）

「効率係数算出実験」

この係数を確認するために、発生力と実効力の関係を調査した。杭の変わりに油圧ジャッキを用い、杭からの力（ジャッキ側の力）を圧入機側で抵抗するという方法で確認を行っている。静止状態の油圧がジャッキ圧（実効圧）とどの様に関連するのか、更に機体本体の回転がどの様に影響するのか等を調査している。

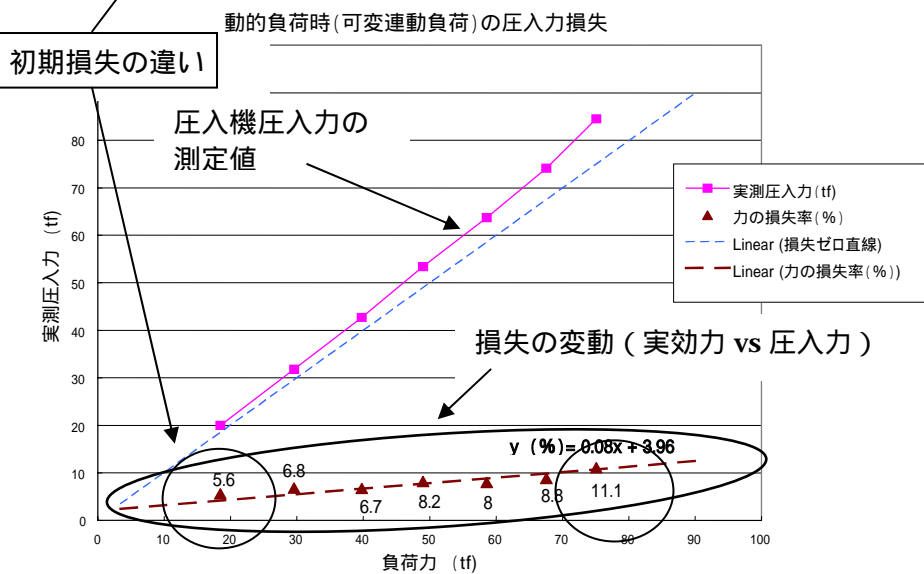
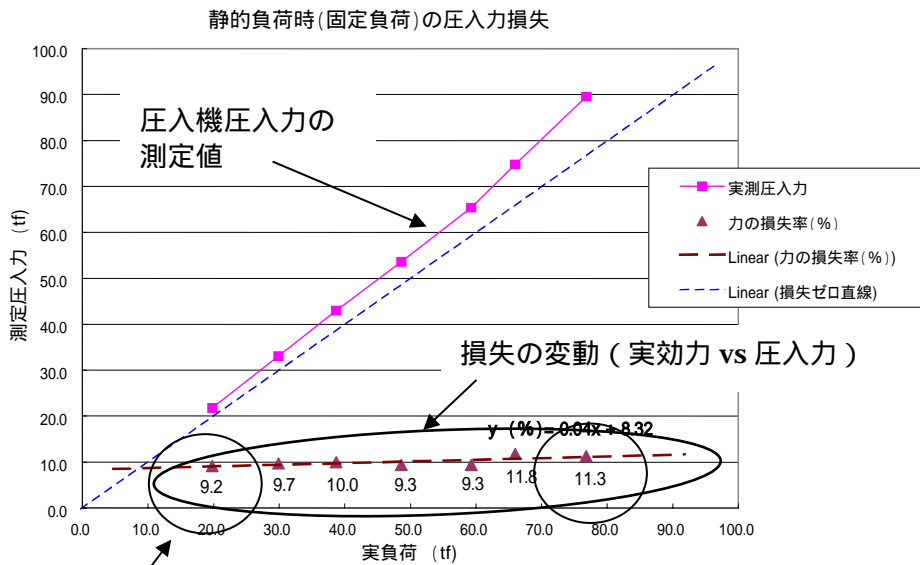


便宜上負荷装置から発生する力を R 、パイラーの反力を F 、シリンダーで発生する力を F_c とする。この検証は、 $R=F$ の時の F と F_c の関係を調査したものである。

シリンダー発生力と実圧入力の実測結果

公称 (tf)	静的負荷時 (固定負荷力)				動的負荷時 (測定圧までの可変負荷)			
	圧入力 (tf)	負荷力 (tf)	力の損失		圧入力 (tf)	負荷力 (tf)	力の損失	
			実測差	比率(%)			実測差	比率(%)
20	21.8	19.8	2.0	9.2	20.0	18.5	1.5	5.6
30	33.1	29.9	3.2	9.7	31.8	29.6	2.2	6.8
40	43.0	38.7	4.3	10.0	42.7	39.8	2.9	6.7
50	53.9	48.6	5.3	9.8	53.4	49.0	4.4	8.2
60	65.4	59.3	6.1	9.4	63.7	58.6	5.1	8.0
70	74.8	66.0	8.8	11.8	74.1	67.6	6.5	8.8
80	86.5	76.8	9.7	11.3	84.5	75.1	9.4	11.1

これらの関係をグラフで表現すると

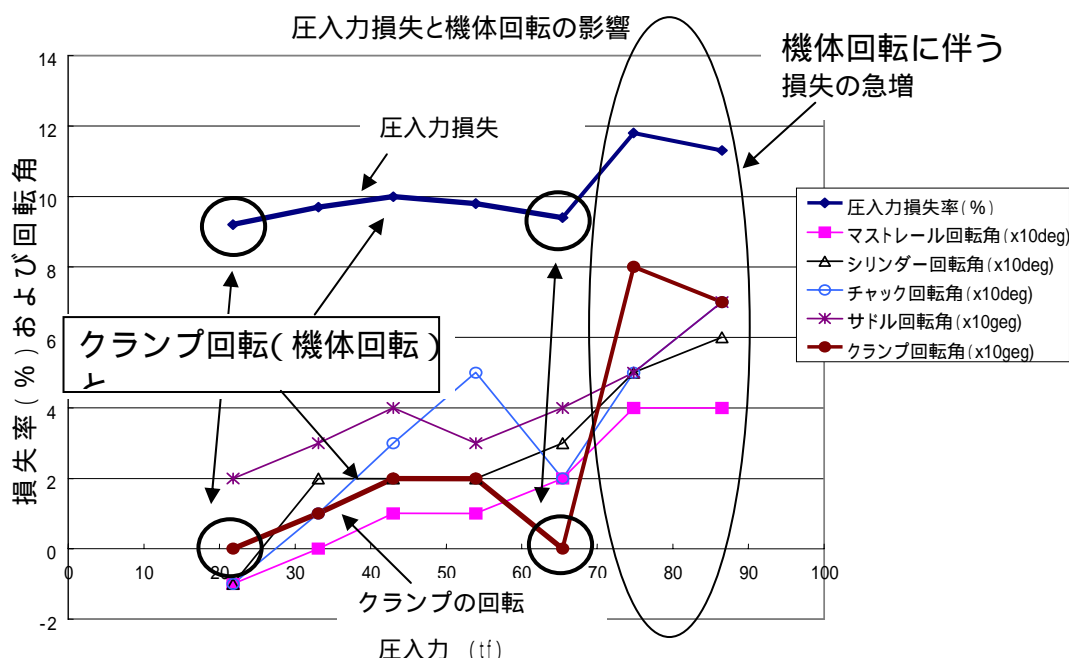


両者とも損失はリニアに増加している。変動負荷の時は、立ち上がりの損失は小さいものの負荷力の増加とともに損失は固定負荷に漸近していく。

初期の損失は、力の発生点と荷重点のズレから発生するものであり、この差によって発生力に分力が生ずる。この分力がシリンダーレールとの間で摩擦力を発生させる事になる。負荷の小さい初期においては、摩擦の影響が大きく出てくる。このため静止摩擦と動摩擦の違いが顕著に現れるが、高負荷になるにつれて摩擦ロスよりも荷重点ズレの分力の影響の方が顕著になり、その差はほとんど吸収されてしまう。

機械の傾斜（回転）と力の分力ロス（損失）を以下の表にまとめる。

公称 (tf)	静的負荷時（固定負荷力）の圧入力損失と機体回転角（deg）								
	圧入力 (tf)	負荷力 (tf)	力の損失		マストレー ル（左右平 均）	シリンダ ー（左右 平均）	チャッ ク	サドル	クラ ンプ
			実測差	比率 (%)					
2 0	21.8	19.8	2.0	9.2	0.1	0.1	0.1	-0.2	0.0
3 0	33.1	29.9	3.2	9.7	0.0	-0.2	-0.1	-0.3	-0.1
4 0	43.0	38.7	4.3	10.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.2
5 0	53.9	48.6	5.3	9.8	-0.1	-0.2	-0.5	-0.3	-0.2
6 0	65.4	59.3	6.1	9.4	-0.2	-0.3	-0.2	-0.4	0.0
7 0	74.8	66.0	8.8	11.8	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.8
8 0	86.5	76.8	9.7	11.3	-0.4	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7

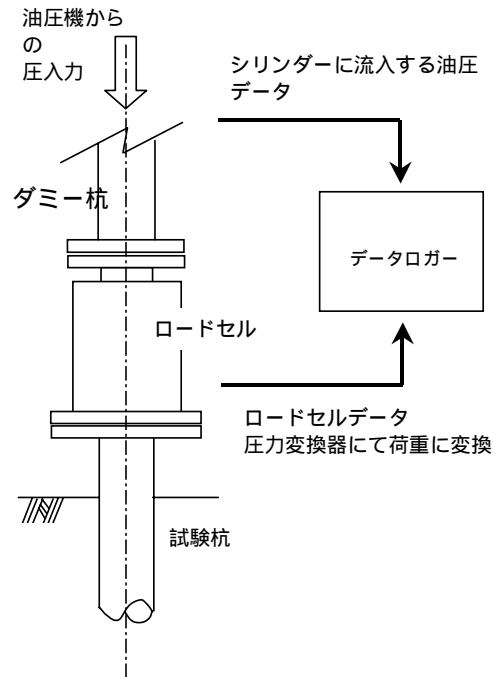
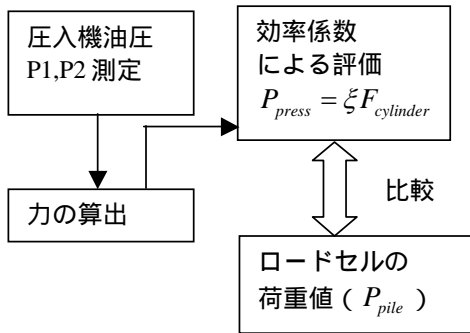


各部位の回転の中でクランプの回転が最も機体回転を支配している。他の部位は各々に回転余裕を持っているために、機体とは必ずしも連動しない。損失は機体の回転に連動して変動しており、この機体回転をクランプが支配している。このことから、圧入力の損失はクランプ回転に依存・連動しており、この関係から効率係数が決定できる。

クランプの回転を制御できれば、圧入力損失は機械の固有値となる。即ち、機械がイニシャルで持っている圧入力の損失はクランプ回転ゼロの時に与えられる。これを圧入力効率係数と定義すると $\eta = 0.9$ となる。

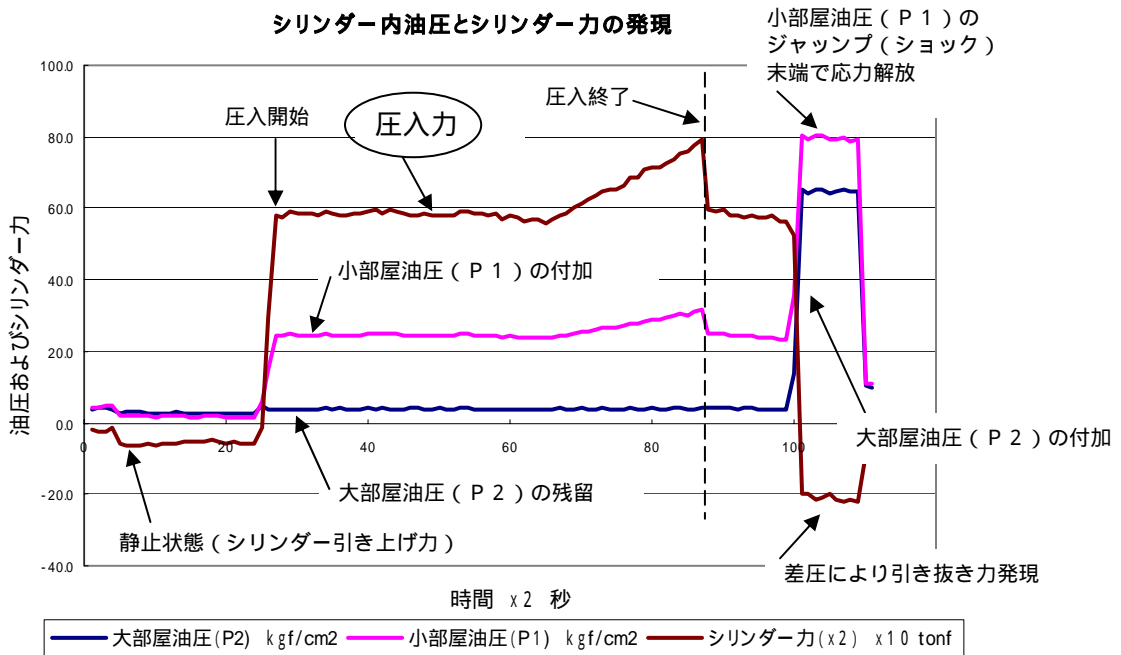
「圧入力と発生力の比較」

左図の構成で、圧入機側の油圧測定値からの圧入力算出、およびロードセルからのダミー杭の载荷重確認（この荷重が、杭頭荷重に等しい）を行った。



A) 油圧とシリンダー発生力の関係

圧入力発生の様子は、以下の図のように表される。

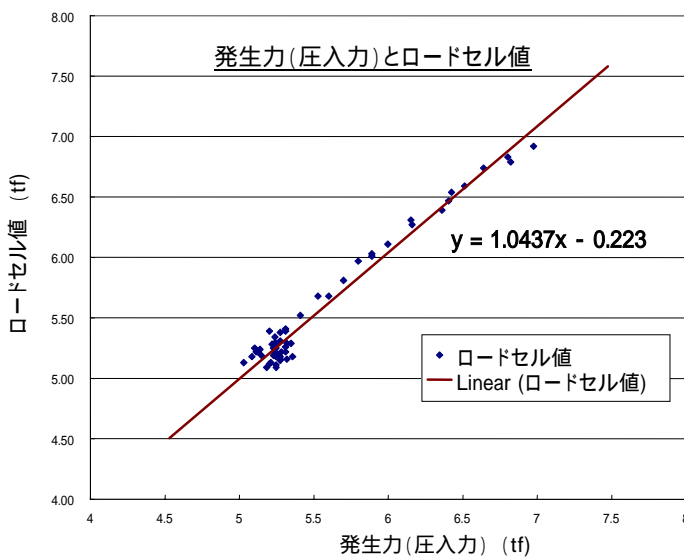
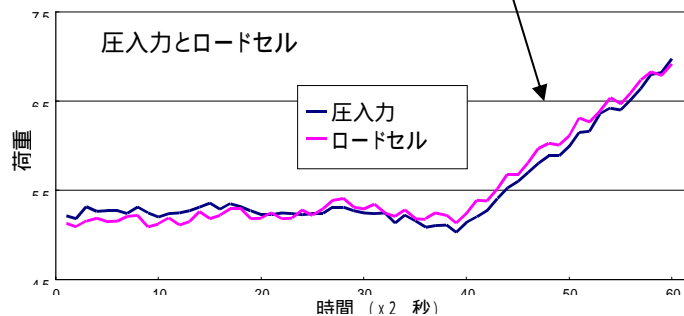
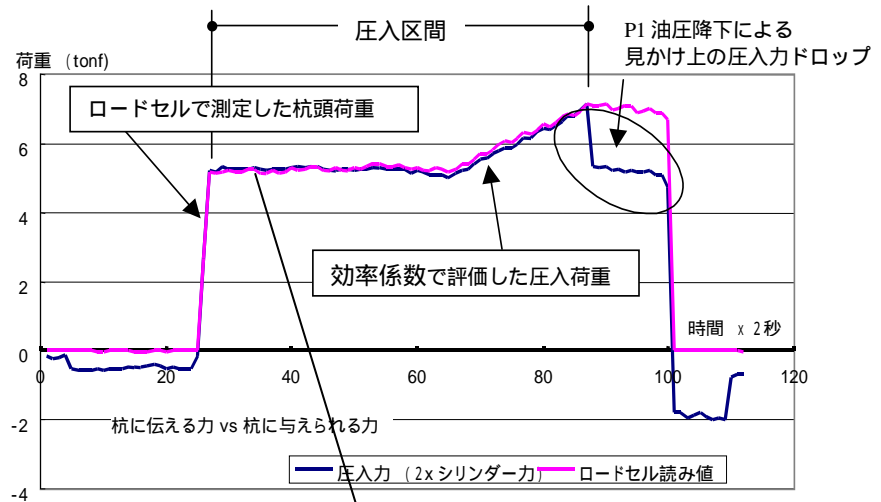


B) 発生力（圧入力）と杭頭荷重の関係

効率係数 ξ （このケースでは $\xi = 0.9$ を適用）で圧入力を評価し、ロードセルで測定した杭頭荷重を比較したものが下図である。

発生力と圧入力
（ロードセルで測定した杭頭荷重値）
はほぼ一致した。

この関係を取り
出し、比較する。



この二つの出力値を散布図で比較したものである。

両者の相関係数は、

Correl. = 0.984

となっており、統計学的にはほぼデータ対応していると言える。

適当な圧入効率係数(ξ)で圧入発生力を評価すると、圧入荷重を杭頭直下の荷重とす

ることが出来る事を示している。

『圧入発生力と杭頭荷重』

圧入力は、動作切り替え時に油圧変動を起こし、イリーガルな表示を行う可能性があるが、この現象は極めて過渡的な現象であると言える。杭に与えられる圧入力を評価する時、この瞬間的な変動は全く問題とはならない。この過渡荷重は実際に杭に作用する訳ではなく、油圧で力を表現した時に見かけ上発生する力に過ぎない。

圧入機から発生する力は、先に検討したように100%は杭に伝わらない。機械の構造上の問題と諸々の損失が原因であるが、このロスは予測が可能である。即ち、このロスは、機械が持つ圧入力の効率と言い換える事が可能であり、更に、機種、機体に依存した係数であると言える。

この係数を用いると常に圧入力と杭に働く荷重を対応させる事が可能になり、杭の抵抗力を圧入力に一対一に対応させる事が出来る。本論での議論はすべて圧入力（圧入荷重）を杭への荷重と捉えており、この荷重と杭からの抵抗値を対応させて考えてきた。これは発生力と抵抗力の荷重差を考慮しない議論であったが、圧入力に対して圧入効率係数（ ξ ）を介する事により、圧入力と杭頭荷重、即ち、圧入力と杭の抵抗力を一対一に対応させる事が出来る。杭で生じている諸々の現象、即ち、先端の弾性化、杭の最大抵抗力、杭先端への荷重伝達、摩擦の減少および増加等は、機械に固有の圧入効率係数を介する事により、圧入機の油圧変化を力に変換するだけで読みとる事が可能となる。

杭の挙動は、リアクションとして圧入荷重に反映される。このリアクション、もしくは圧入荷重は、杭先端部分の実際のリアクションを反映したものとなっている。このため、一般的な工法で造られた杭に対しては、実証実験的に杭を調べる事や載荷試験等で確認する事は極めて重要な事ではあるが、これらの予測が圧入杭では、圧入機の油圧変動だけで読みとる事が可能であると言う事を示している。

圧入効率係数は機械に固有の係数であると言える。この係数は機械毎に決定されるべきであり、更に、圧入機の姿勢制御の問題を加味する必要がある。これは機械側の問題ではなく、施工時の問題となる。このため現実的な係数は $\xi = \alpha \xi$ ($\alpha = 0.8 \sim 1.0$: 施工係数)として若干低減させる必要があると思われる。

油圧換算の圧入力と杭頭荷重の関係は、

$$P_{press} = \xi F_{cylinder}$$

P_{press} : 圧入荷重 $F_{cylinder}$: シリンダー発生力

ξ : 圧入効率係数 ($\xi = \alpha \xi$: $\xi = 0.8 \sim 0.9, \alpha = 0.8 \sim 1.0$)

として表せる。

APPENDIX D

『杭の鉛直載荷試験』

圧入杭の鉛直載荷試験を圧入即日、2週間放置の後実施し「荷重 - 沈下」特性を調査した。

試験 No	杭種類	圧入方法	圧入日	試験日	試験方法	試験場所	備考
単 - 1	300	単純押込 ^{*1}	7.23.03	7.23.03	連続載荷方式 ^{*3}	高知市 高須	即日試験
打抜 - 1	L=6000mm 鋼管杭 先端閉塞	引き抜きを 伴う圧入 ^{*2}	7.24.03	7.24.03			即日試験
打抜 - 2			8.07.03				2週間 放置
打抜 - 3			8.07.03				
打抜 - 4			8.07.03				

^{*1}: 一方向圧入力のみで杭の単純押し込み

^{*2}: ストロークの中で押し込みと引き抜きを行う。これをワンセットで繰り返す。
(圧入完了後繰り返し荷重により先端地盤の弾性化を行う)

^{*3}: 荷重保持を行わず、連続増加、連続減少を行う。多サイクル、一定速度で載荷



杭圧入状況

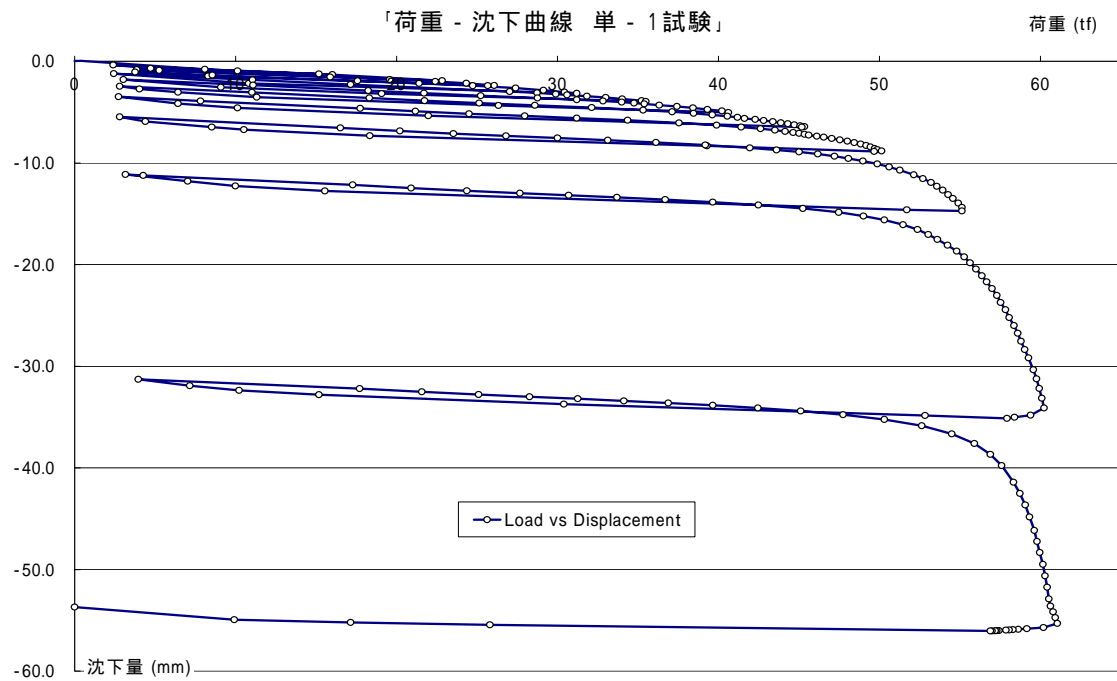
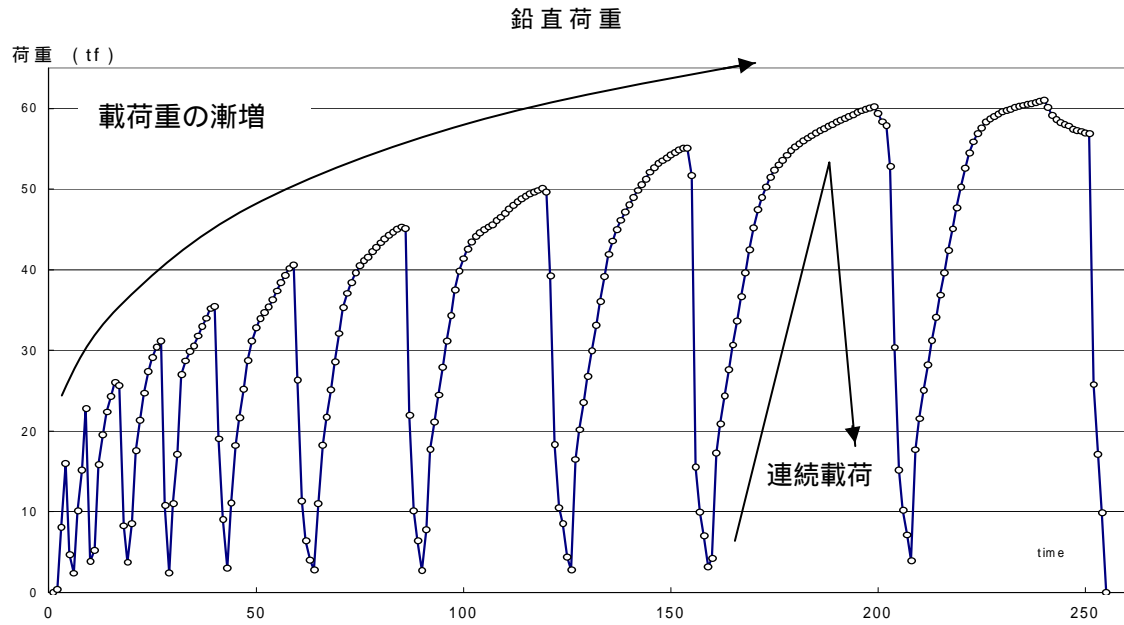


杭の鉛直載荷試験

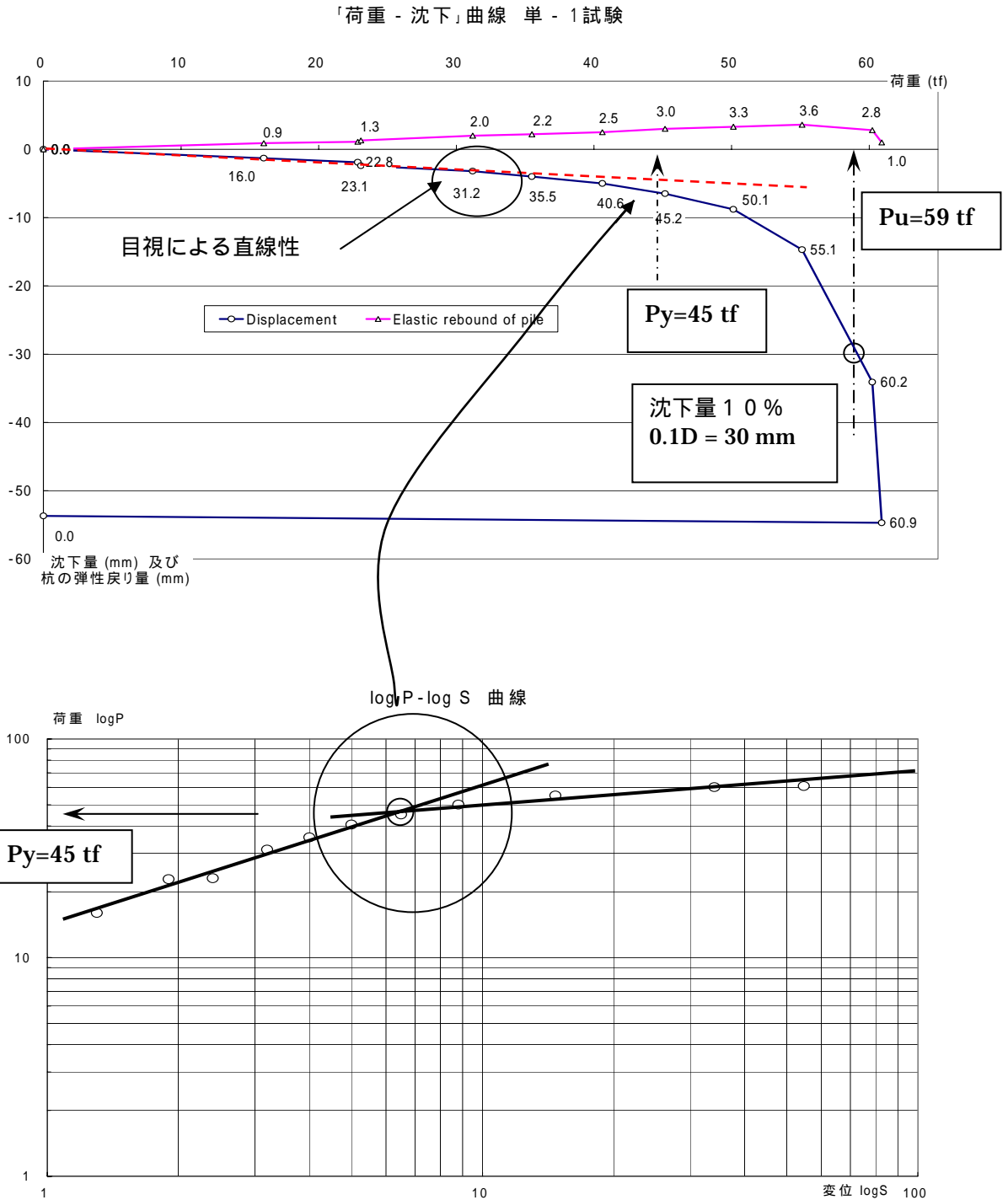
圧入機の油圧を用い載荷し、鉛直外力、杭の変位はデータロガーを経由してデータ収集した。

『単 - 1』試験

多ステップ、連続載荷の載荷状況と載荷試験結果は下図の通り。

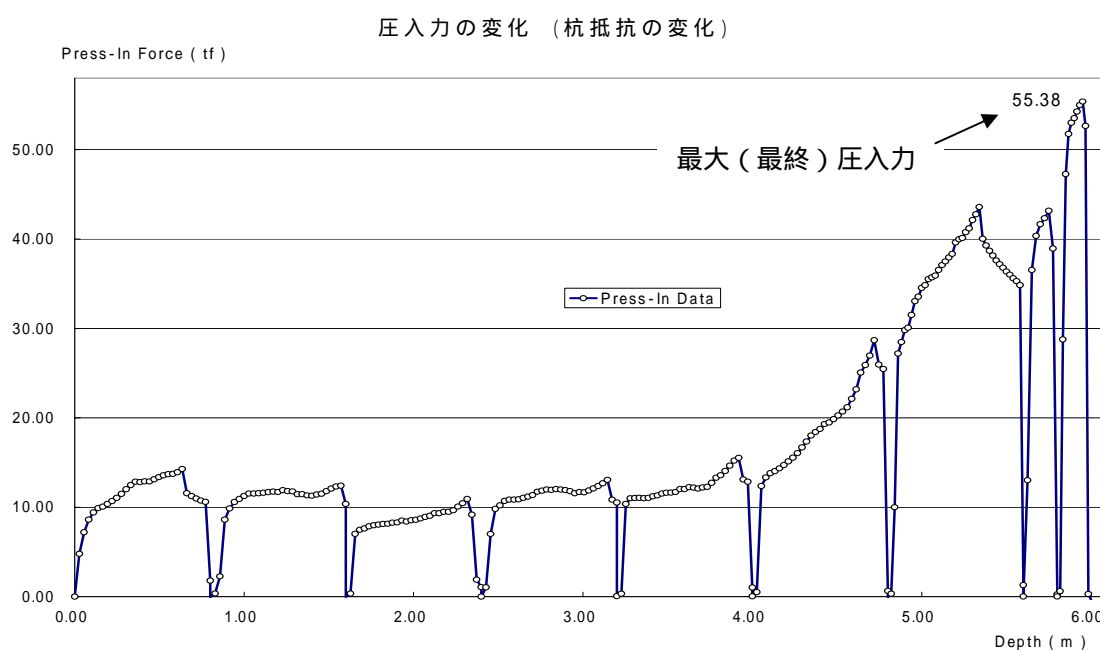


載荷各ステップの最大値のみを抽出して、プロットし直すと



第1限界抵抗力は、logP-logSの折点で与えられる。非常に曖昧な点であるが「荷重 - 沈下」曲線の直線部分に対応している。

単純押し込み圧入の圧入荷重及び圧入履歴は、以下の通り。

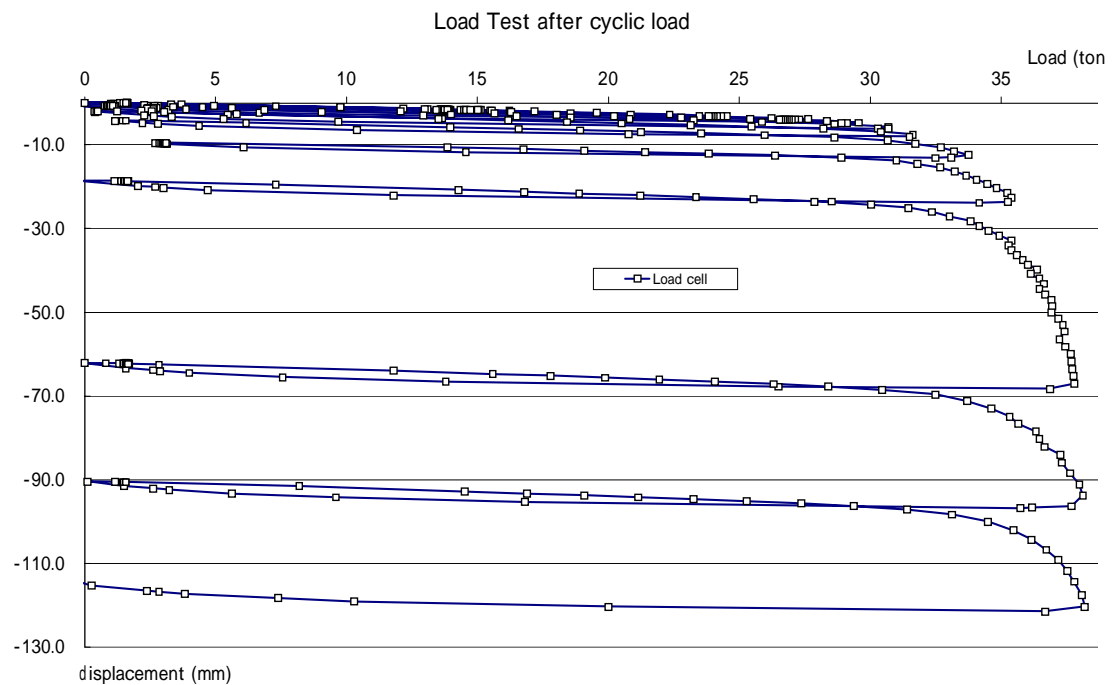
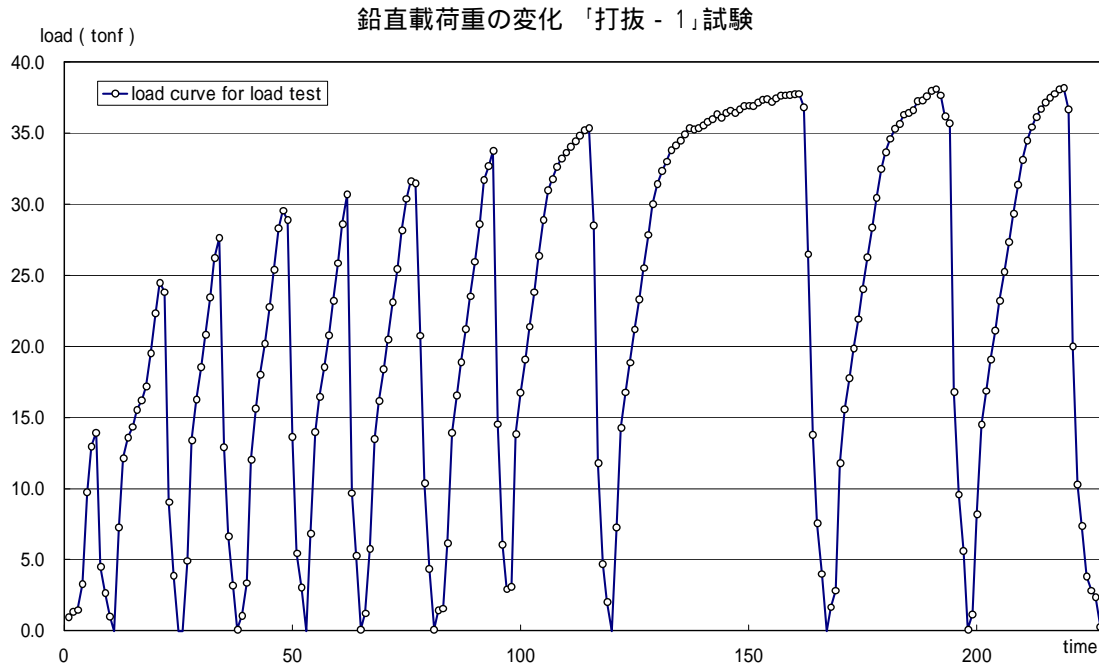


これらの関係をまとめる。

項 目	実測値・算出値	備 考
圧入力 (圧入最終荷重) : P_{press_MAX}	55.4 tf	
載荷最大値 : P_{load_MAX}	60.9 tf	S=54.7 mm
杭の第 2 限界抵抗力 : P_u	59.0 tf	S=30 mm (D/10 として)
杭の第 1 限界抵抗力 : P_Y	45.0 tf	LogP-logS 法による折点値
杭の沈下直線性から目視による : P_Y^*	31.0 tf	「荷重 - 沈下」曲線における目視直線の最大値
P_u / P_{press_MAX}	1.07	圧入力と極限值との比較
P_Y / P_{press_MAX}	0.81	
P_Y / P_Y^*	1.45	LogP-logS 法が目視直線よりも大きな値を与える
P_u / P_Y	1.31	$P_u : P_Y \approx 5 : 4$ 両者が非常に接近している

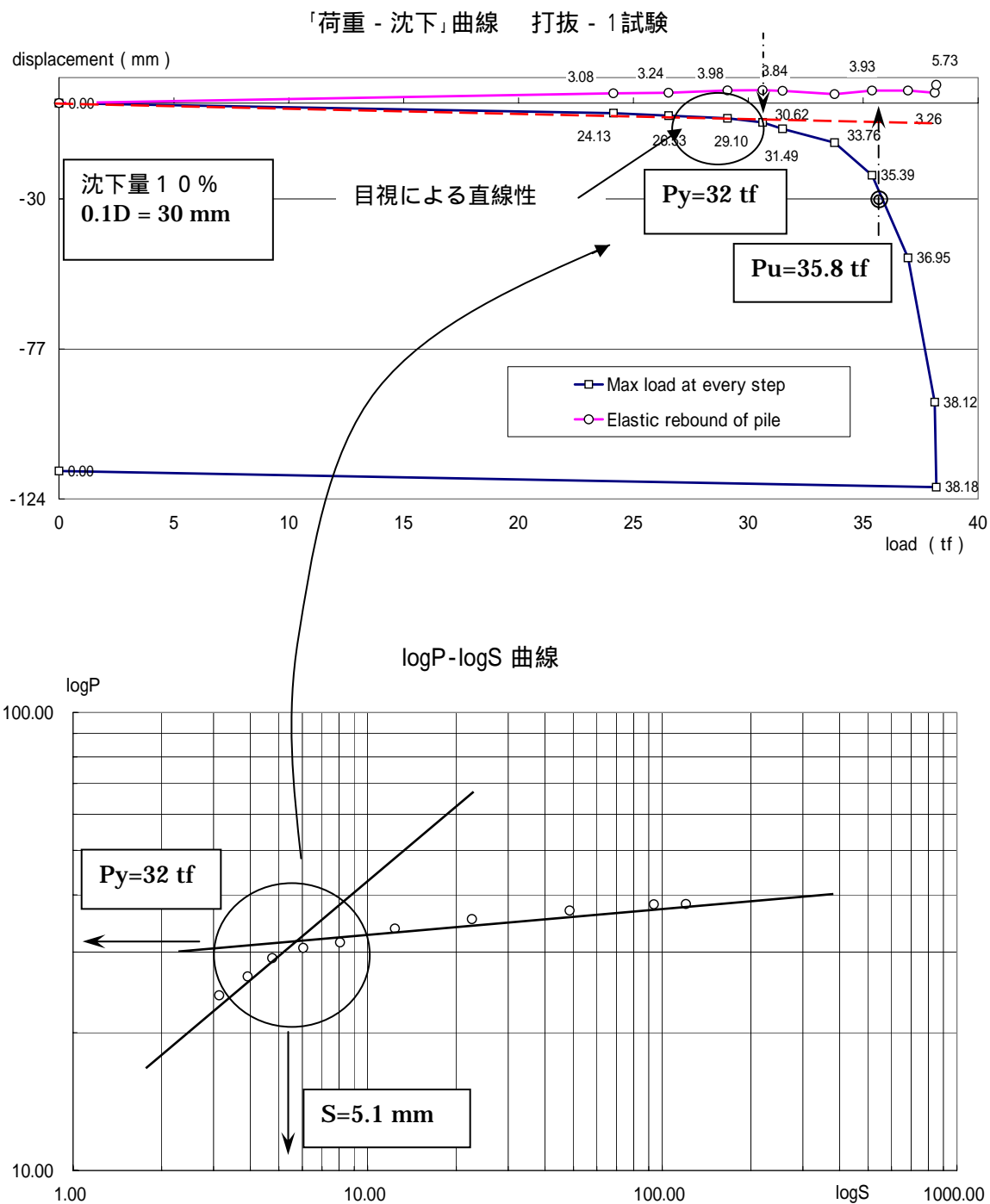
『打抜 - 1』試験

多ステップ、連続荷重の荷重状況と荷重試験結果は下図の通り。

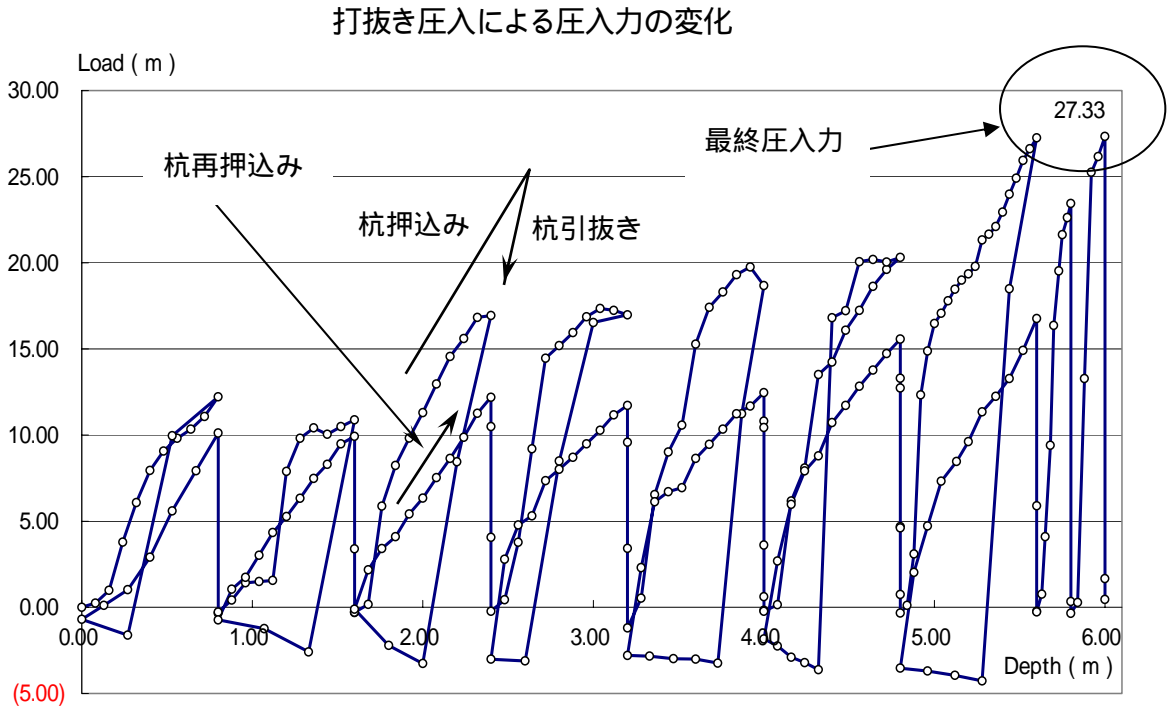


載荷各ステップの最大値のみを抽出して、プロットし直すと

logP-logS 法で求められる P_y と「荷重 - 沈下」曲線の直線部の最大点が非常に近似している。即ち、非常に明確に直線的な変位が観測されている。



「引き抜きを伴う圧入」によって得られる圧入荷重及び圧入履歴は、以下の通り。



上記の圧入杭に対して、圧入終了後に約 $P=27$ tf の繰返し荷重を $N=70$ 回行っている。圧入荷重、繰返し荷重、載荷試験結果等は以下の通り。

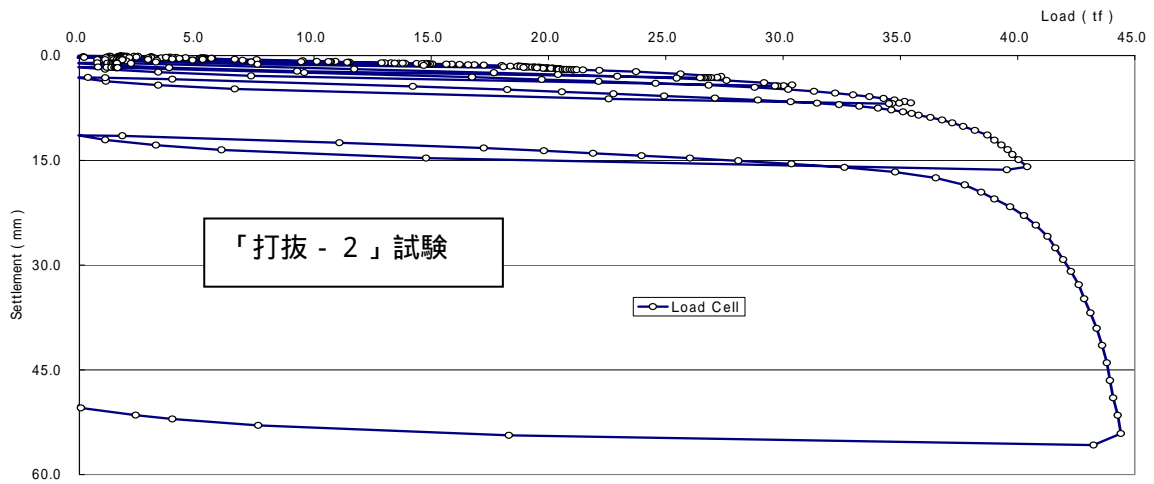
「打抜 - 1」 載荷試験データ

項 目	実測値・算出値	備 考
圧入力（圧入最終荷重）： P_{press_MAX}	27.33 tf	繰り返し荷重 $P_{repetitive} = 26$ tf
載荷最大値： P_{load_MAX}	38.18 tf	S=120.3 mm
杭の第 2 限界抵抗力： P_u	35.8 tf	S=30 mm (D/10 として)
杭の第 1 限界抵抗力： P_Y	32.0 tf (S=5.1mm)	LogP-logS 法による折点値
杭の沈下直線性から目視による： P_Y^*	29.0 tf (S=4.75mm)	「荷重 - 沈下」曲線における目視直線の最大値
$P_u / P_{repetitive}$	1.38	繰返し荷重と極限值との比較 ($P_u / P_{press_MAX} = 1.31$)
$P_Y / P_{repetitive}$	1.12	($P_Y / P_{press_MAX} = 1.13$)
P_Y / P_Y^*	1.07	LogP-logS 法が目視直線よりも大きな値を与える
P_u / P_Y	1.15	$P_u : P_Y \approx 10 : 9$ 両者が非常に接近している

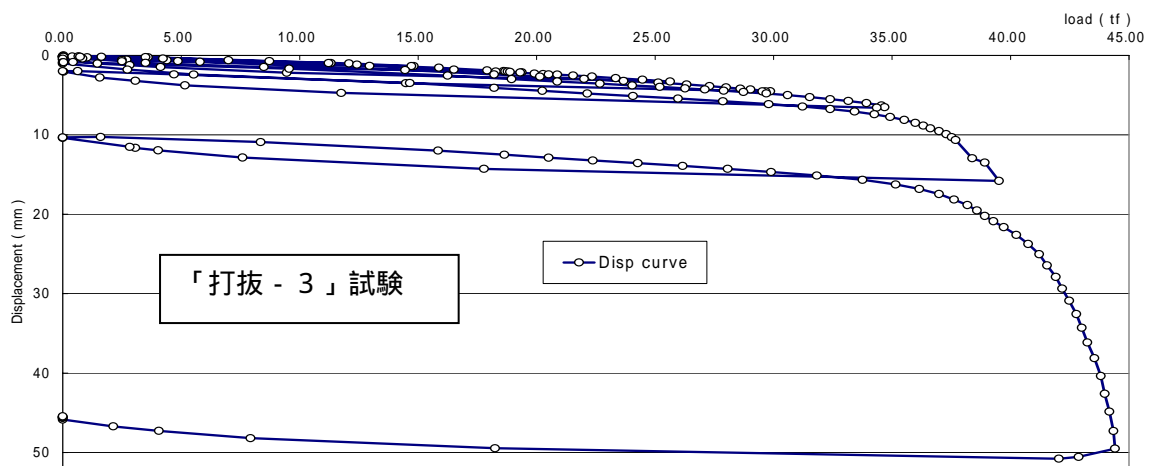
『打抜 - 2』 『打抜 - 3』 『打抜 - 4』 試験

多ステップ、連続載荷方式による載荷試験結果は下図の通り。

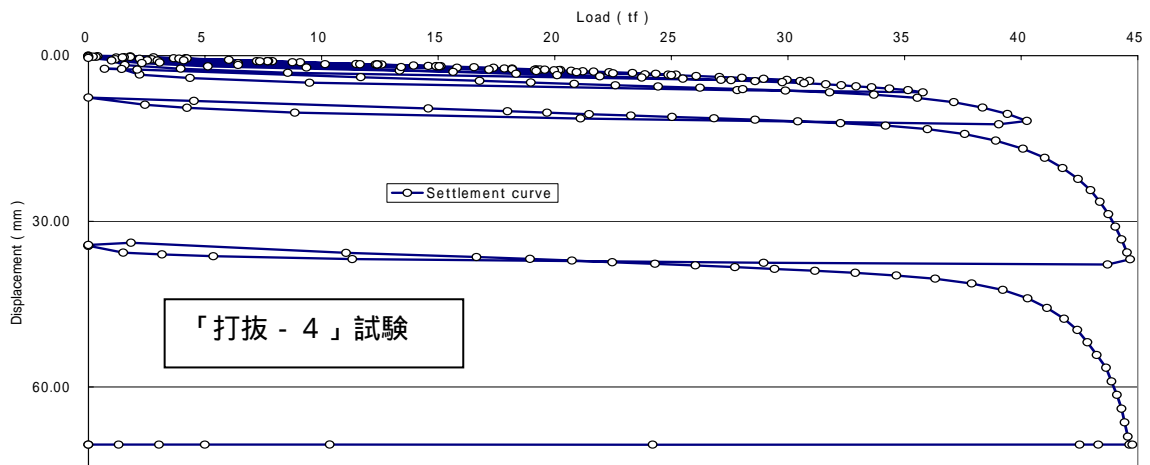
Load Test (2 weeks curing) 1st test



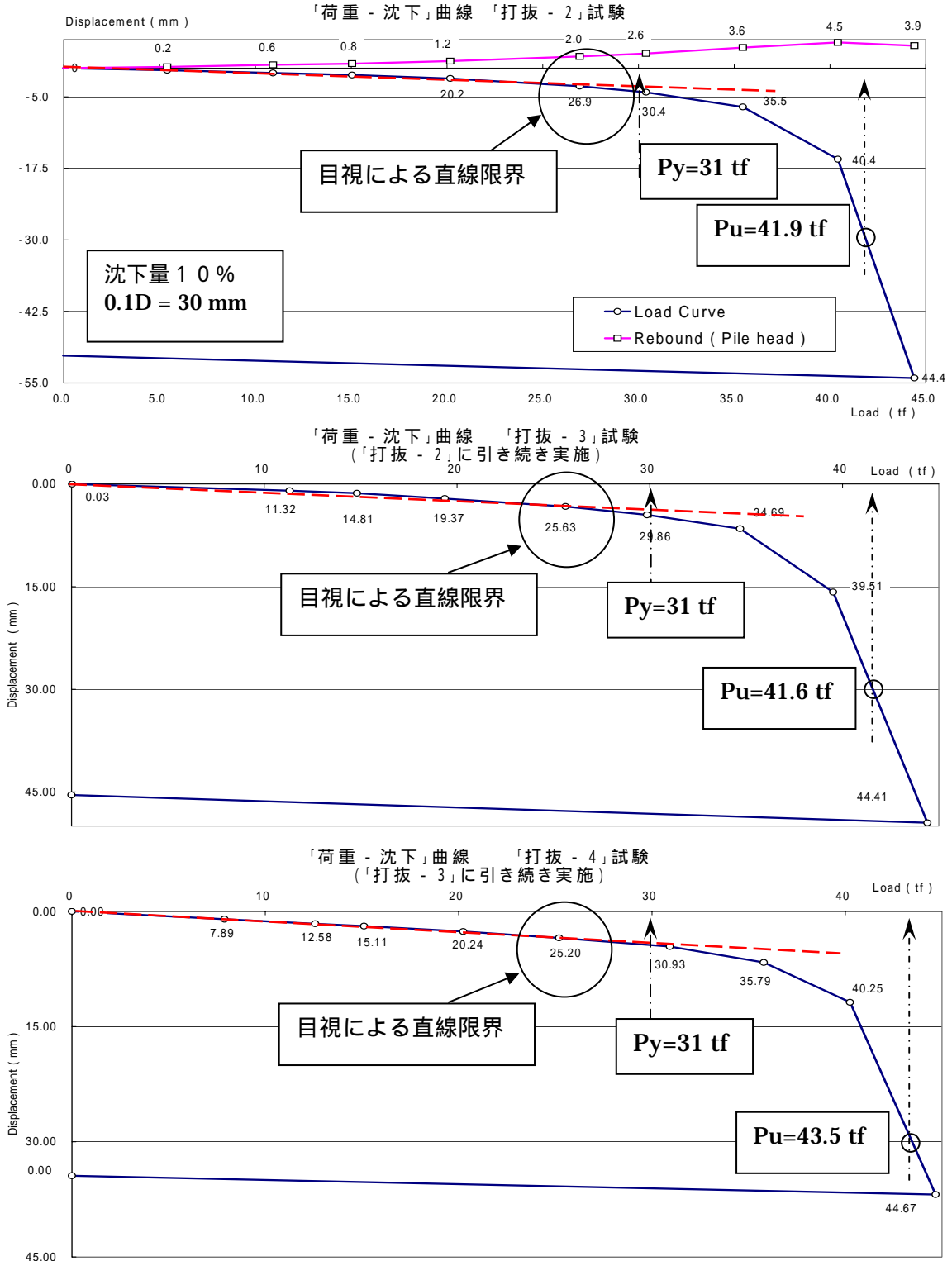
Displacement curve at each load step



No3 Load Test (Displacement at each load step)

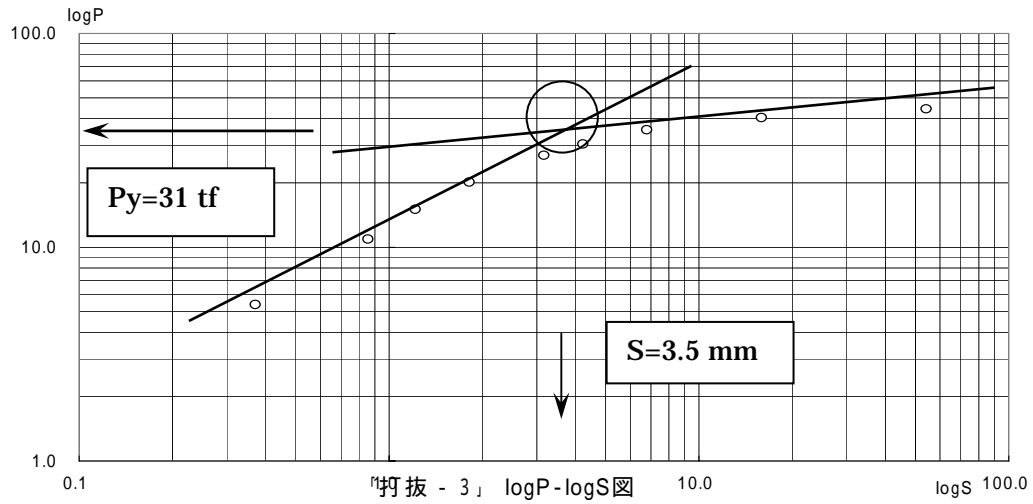


「打抜 - 1」が終了した段階で杭頭荷重を除荷し、2週間杭を放置した。
 (7.24.0~8.07.03まで荷重フリーの状態での杭を放置) 載荷方法は、「単 - 1」
 「打抜 - 1」と同様に連続載荷方式で行ない、3試験は連続して行った。以下
 各試験の各ステップの最大値のみをプロットし、杭の第1、第2限界抵抗力そ
 の他を求める。

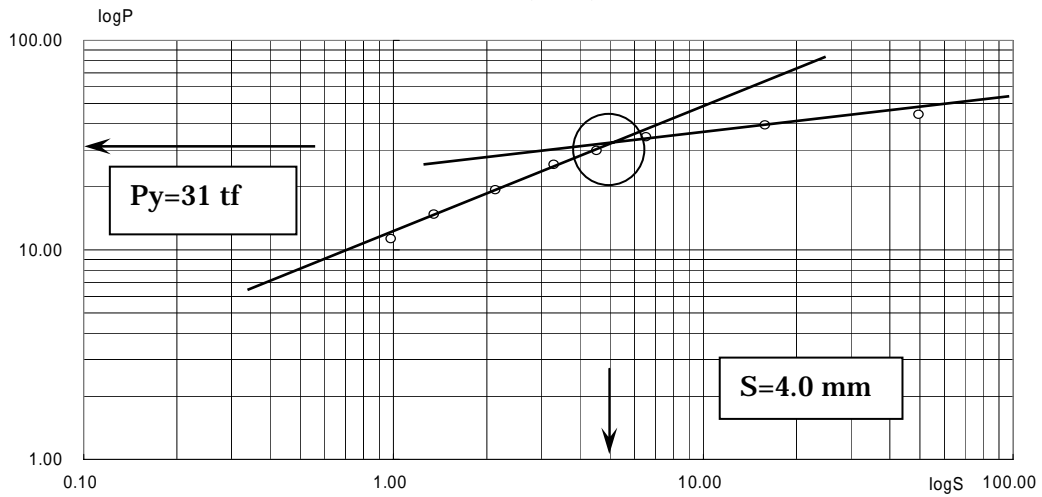


LogP-logS 法による杭の第1限界抵抗力の算出。

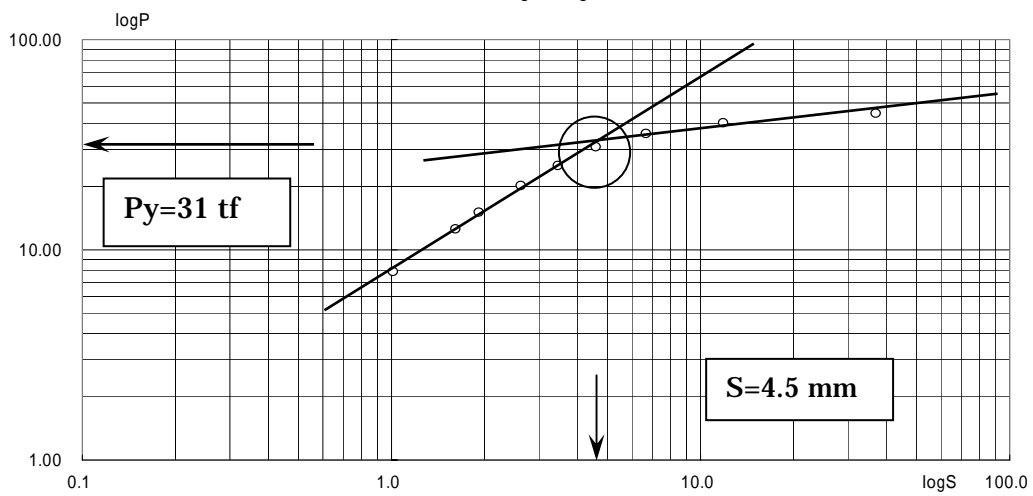
「打抜 - 2」 logP-logS図



「打抜 - 3」 logP-logS図



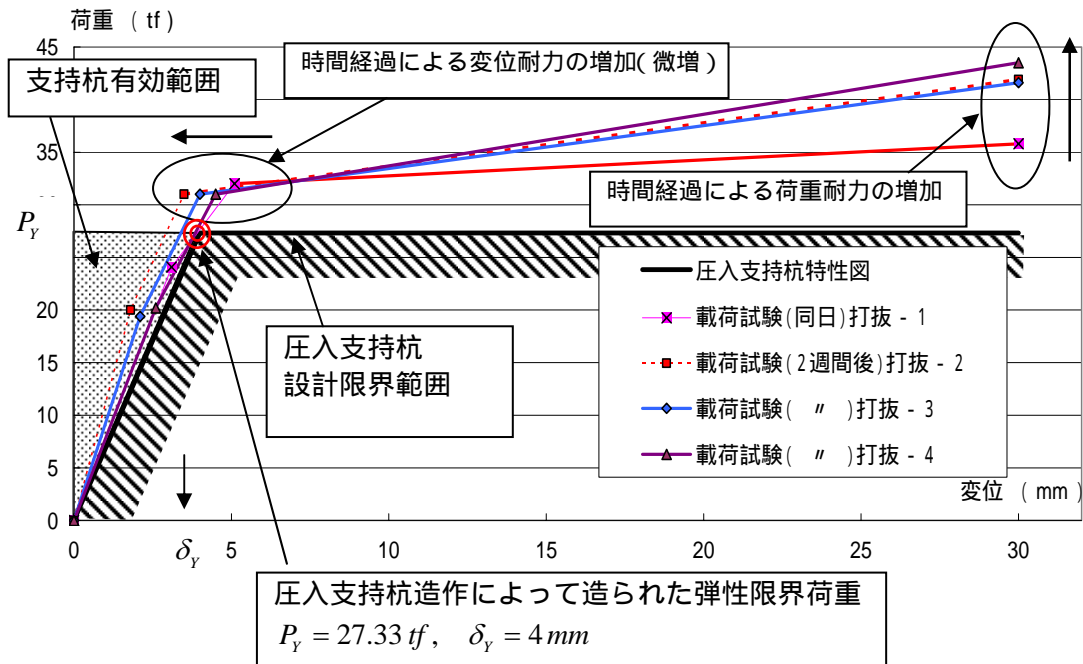
「打抜 - 4」 logP-logS図



「打抜 - 1」～「打抜 - 4」をまとめる。

項 目	実測値・算出値			
	打抜 - 1	打抜 - 2	打抜 - 3	打抜 - 4
圧入最終荷重: P_{press_MAX}	$P_{press_MAX} = 27.33 \text{ tf}$ 繰り返し荷重 $P_{repetitive} = 26.7 \text{ tf}$			
載荷最大値: P_{load_MAX}	38.18 tf (S=120.3mm)	44.4 tf (S=54.1mm)	44.4 tf (S=49.5mm)	44.7 tf (S=36.9mm)
杭の第 2 限界抵抗力: P_u	35.8 tf (S=30mm)	41.9 tf (S=30mm)	41.6 tf (S=30mm)	43.5 tf (S=30mm)
杭の第 1 限界抵抗力: P_Y	31 tf (S=5.1mm)	31 tf (S=3.5mm)	31 tf (S=4.0mm)	31 tf (S=4.5mm)
目視による直線限界: P_Y^*	29 tf (S=4.75mm)	27 tf (S=3.2mm)	26 tf (S=3.3mm)	26 tf (S=3.5mm)
$P_u/P_{repetitive}$	1.38	1.61	1.60	1.67
$P_Y/P_{repetitive}$	1.19	1.19	1.19	1.19
P_Y/P_Y^*	1.07	1.15	1.19	1.19
P_u/P_Y	1.15	1.35	1.34	1.40
$P_{u-i}/P_{u-1} (i=1...4)$	1.0	1.17	1.16	1.22
$P_{Y-i}/P_{Y-1} (i=1...4)$	1.0	0.97	0.97	0.97
$P_{u-i}/P_{press_MAX} (i=1...4)$	1.31	1.54	1.52	1.59
$P_{Y-i}/P_{press_MAX} (i=1...4)$	1.14	1.10	1.10	1.10

載荷試験結果と圧入支持杭特性図



圧入によって決定される（繰り返し荷重によって決定される）圧入杭の特性図は、圧入荷重（圧入最大荷重、圧入最終荷重）を現行基準に照らして表現すれば、杭の第1限界抵抗力とする事で出来上がっている。即ち、この荷重値までは必ず「荷重 - 沈下」の直線性を確保、確定すると言うものである。

載荷試験を行うと、杭の「荷重 - 沈下」曲線は繰り返し荷重の履歴をトレースして、更に圧入荷重を越えて延びていく。これは、先端地盤が弾性化されたことにより、弾性限界が若干大きくなった事による。この限界点を越えると地盤は急激に塑性化する。

杭を放置すると、杭周面の抵抗力が回復する。この回復は杭の抵抗に大きく寄与する。杭の弾性抵抗領域（杭の第1限界抵抗力までの領域）では、先端地盤の弾性限界は変わらないが、杭周面の抵抗回復により杭の沈下性状に変化が生じる。抵抗が大きくなるため見かけ上のバネが硬化し、「荷重 - 変位」の関係はより steep になる。ただし、弾性限界は殆ど変わらない。

第2限界抵抗力は、杭の許容変位量を定めたものである故、杭周面の摩擦回復によって「荷重 - 沈下」の関係が時間とともに改善されるため、沈下量が減少していく。従い、結果として荷重値は増大していく。

参考文献

本論文作成にあたり以下の文献・図書を参考とした。

(土質工学全般)

- ・ 「土木工学ハンドブック」: 土木学会編
- ・ 「土質工学ハンドブック」: 土質工学会編
- ・ 「土の力学挙動の理論」: 村山朔郎、技法同出版
- ・ 「A Guide to Soil Mechanics」: Malcolm Bolton, Chung Hwa Book Co. Ltd.
- ・ 「What are partial factors for?」: Malcolm Bolton, Dansk Geoteknisk forening DGF-bulletin 10, vol.3, 565-583
- ・ 「Soil mechanics in engineering practice」: Karl Terzaghi, Ralph B. Peck, Gholamreza Mesri Wiley
- ・ 「Advanced soil mechanics」: Braja M. Das, Taylor & Francis
- ・ 「Press-in piling: Ground vibration and noise during pile installation」: White D.J., Finlay T.C.R., Bolton M.D. & Bearss G., Proceedings of the international Deep Foundations Congress, Orlando, FL.

(基礎工全般)

- ・ 「新・土と基礎の設計計算演習」: 地盤工学会
- ・ 「杭基礎設計便覧」: 日本道路協会
- ・ 「道路橋示方書・同解説」: 日本道路協会
- ・ 「Special Topics in FOUNDATIONS」: Geotechnical Special Publication No.16
- ・ 「Principles of Foundation Engineering」: Braja M. Das, Brooks/Cole Publishing Company
- ・ 「FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN」: Joseph E. Bowles, The McGraw-Hill Companies, Inc.
- ・ 「SHALLOW FOUNDATION: Bearing Capacity and Settlement」: Braja M. Das, CRC Press LLC
- ・ 「構造設計説明書:(仮称)港区港南1丁目プロジェクト(BCJ認定 ST0062 01)」

(杭の載荷試験)

- ・ 「杭の載荷試験方法・同解説」：地盤工学会

(その他)

- ・ 「信頼性工学」：市川昌弘、裳華房
- ・ 「機械構造物の安全性」：日本機械学会編、丸善株式会社
- ・ 「限界状態設計法のすすめ」：神田順、建築技術
- ・ 「構造物のライフタイムリスクの評価」：構造工学シリーズ2、土木学会