

2017 年度修士論文

木灰と高炉スラグの併用による  
コンクリートの強度発現

**Strength of Concrete with Wood Ash  
and Blast Furnace Slag**

主指導教員 大内 雅博

副指導教員 田島 昌樹

副審査員 高木 方隆

高知工科大学大学院工学研究科基盤工学専攻

社会システム工学コース 1205092

片山諒辰

2018 年 3 月

# 木灰と高炉スラグの併用によるコンクリートの強度発現

片山 諒辰

## 要旨

近年、循環型社会の構築が求められている。従来からコンクリートは他産業からの有効活用貢献しており、コンクリート自体のリサイクルも進んでいる。しかし、コンクリートを再利用した再生骨材は路盤材として利用される程度であり、道路建設需要に大きく左右されているのが現状である。高知工科大学にて、使用後に自然（土）に還る地還型コンクリートが提唱された。セメントを使用せず、消石灰と水のみで硬化する木灰コンクリートである。木灰は木質バイオマス発電からの副産物であり、肥料としても活用可能なものである。消石灰は土壌中和剤となる材料であり、いずれの材料も農業用として使用されているものである。

しかし、木灰コンクリートの材齢 7 日におけるこれまでの達成圧縮強度は  $2 \text{ N/mm}^2$  程度であった。構造用としては十分な強度とはいえない状況である。

本研究では、木灰コンクリートの強度増進を図ることを目標に、発生過程による三種の木灰（主灰、リドリング灰、飛灰）のうち飛灰のみを用い、さらに肥料としての使用されている高炉スラグ微粉末、消石灰および水から成るペーストの強度を主体とし、飛灰を骨材とみなす木灰コンクリートを開発し、配合と強度との関係を明らかにした。

ペーストの一部の飛灰への置換率を上げることによりスランプ値が低下し型枠内への充填しやすさが低下した。それを補うために水結合材比を高くする必要が生じ、強度が低下した。一方、飛灰によりペースト中の自由水が拘束されることにより強度が向上する効果が認められた。

本研究の範囲内では、高炉スラグ微粉末に 5%消石灰を置換したペースト相の材齢 7 日圧縮強度が約  $19 \text{ N/mm}^2$  であったが、そのうち飛灰容積置率 50%では、材齢 7 日圧縮強度が  $9 \text{ N/mm}^2$  程度となった。

# **Strength of Concrete with Wood Ash and Blast Furnace Slag**

Akinobu Katayama

## **ABSTRACT**

The authors developed a wood ash concrete, in which calcium hydroxide is employed as an admixture without using cement for hardening at Kochi University of Technology in 2015. The wood ash is by-product from wood biomass thermal power generation. The constituent material of the wood ash concrete can turn fertilizer or neutralizer. The compressive strength at the age of 7 days was at most 2 N/mm<sup>2</sup>. It was not sufficient as structural concrete.

The purpose of this study is to promote the strength of the wood ash concrete by employing blast-furnace slag and calcium hydroxide as the binder of the paste. Only the fly ash of the wood ash was employed as the aggregate

With higher replacement ratio of the paste with fly ash, the strength was lower due to higher water to binder ratio on condition that the slump value of the fresh wood ash concrete was kept. On the other hand, the wood fly ash absorbed free water.

As a result, the compressive strength of the wood ash concrete at the age of 7 days was approximately 9 N/mm<sup>2</sup> with the replacement ratio of the paste with the wood fly ash of 50%.

# 目次

第1章	序論	1
1.1.	本研究の背景	1
1.2.	本研究の目的	2
1.3.	使用する木灰について	2
1.4.	本論文の構成	6
	【参考文献】	7
第2章	既往研究	8
2.1.	セメントを使用しないコンクリート	8
2.2.	高炉スラグの硬化	8
2.3.	コンクリートの強度と空隙との関係	8
2.4.	コンクリートの締固め性評価	8
	【参考文献】	9
第3章	木灰コンクリートの強度増進	10
3.1.	はじめに	10
3.2.	実験概要	10
3.3.	消石灰と水と木灰3種別での強度発現	12
3.4.	高炉スラグの添加による木灰コンクリートの強度増進	15
3.5.	まとめ	16
	【参考文献】	16
第4章	材料と配合による木灰コンクリートの強度	17
4.1.	はじめに	17
4.2.	実験概要	17
4.3.	飛灰配合方法の検討	19
4.4.	高炉スラグに対する消石灰は配合量の決定	22
4.5.	飛灰容積比と水結合材比が強度に及ぼす影響	24
4.6.	まとめ	28
	【参考文献】	28
第5章	結論	29
(1)	木灰コンクリートの強度増進	29
(2)	材料・配合と木灰コンクリートの強度の関係	29
	今後の課題	29
	参考文献	30
	謝辞	31

## 図目次

図 1-1	3種類の木灰とセメント各種成分比較	1
図 1-2	木灰の発生過程	2
図 1-3	主灰	3
図 1-4	主灰の混入物	3
図 1-5	飛灰	4
図 1-6	リドリング灰（搬入日別）	5
図 1-7	飛灰の粒度分布	5
図 3-1	パン型モルタルミキサ	11
図 3-2	練り混ぜ手順	11
図 3-3	円柱供試体	11
図 3-4	消石灰置換率と材齢7日圧縮強度の関係	13
図 3-5	消石灰水比(CH/W)と材齢7日圧縮強度との関係	14
図 3-6	木灰コンクリートと用途別コンクリートの強度比較	15
図 3-7	強度比較	16
図 4-1	パン型モルタルミキサ	18
図 4-2	練り混ぜ手順	18
図 4-3	円柱供試体	18
図 4-4	飛灰の粒度分布	20
図 4-5	水比と圧縮強度の関係	20
図 4-6	含水率調整による強度安定化	21
図 4-7	含水率調整によるスランプの安定化	21
図 4-8	消石灰高炉スラグ微粉末(CH/BFS)と材齢7日圧縮強度との関係	23
図 4-9	CH/BFSと充填率との関係	23
図 4-10	消石灰高炉スラグ比とスランプとの関係	24
図 4-11	B/Wと圧縮強度の関係	26
図 4-12	B/Wと充填率の関係	26
図 4-13	充填率と圧縮強度の関係	27
図 4-14	スランプと充填率の関係	27
図 4-15	スランプと圧縮強度の関係	28

## 表目次

表 3-1	使用材料.....	10
表 3-2	配合のパターン.....	13
表 3-3	配合のパターン.....	16
表 4-1	使用材料.....	17
表 4-2	飛灰の吸水率を考慮した試験ケース.....	19
表 4-3	飛灰の吸水率を考慮した試験ケース.....	21
表 4-4	適切な消石灰高炉スラグ微粉末比を決定するための試験ケース.....	22

# 第1章 序論

## 1.1. 本研究の背景

コンクリートは主要な建設材料である。水、セメント、骨材といった天然に近い材料を利用しており、価格が安価で供給しやすく、他の建設材料に比べて広く使用されているからである。

コンクリートは他産業からの産業副産物の利用によって循環型社会の構築に貢献している。近年、コンクリートの再利用が進んでおり、コンクリートのリサイクル率は約 98%となっている<sup>1)</sup>。大半は道路用路盤材として使用されている。

しかし、道路建設需要の低迷とともに路盤材の需要も漸減すると予測されている。また、コンクリートを単純に破砕しただけの再生骨材は吸水率が高くなるなどの課題が残っている<sup>2)</sup>。解体コンクリートを全量リサイクルする技術も研究されているが、用途が制限されているのが現状である<sup>3)</sup>。廃棄後のコンクリートは骨材としての利用しかされていないのが現状であり、物質循環の最終地点となっている。使用後のコンクリートを物質循環に乗せる技術を開発する必要がある。

2015 年に操業を開始した高知県宿毛市の木質バイオマス発電所は、間伐材を燃料とし、燃焼灰である木灰が副産物として発生している。木灰には肥料成分が含まれているため、肥料としての活用が期待される一方、新たな用途が模索されてきた。

木灰が肥料として活用可能となる一方、その成分がセメントやフライアッシュと類似している点(図-1.1)に着目し、全く新しいコンクリート材料が高知工科大学にて考案された。

セメントを使用せずとも硬化し、そしてコンクリートとしての役割を終えた後は肥料として土に還る材料である。いわば「地還元型コンクリート」である。ただし、混和材として消石灰を用いた場合の材齢 7 日の圧縮供養度はせいぜい 2 N/mm<sup>2</sup>であった。構造用コンクリートとしては不十分な強度である。

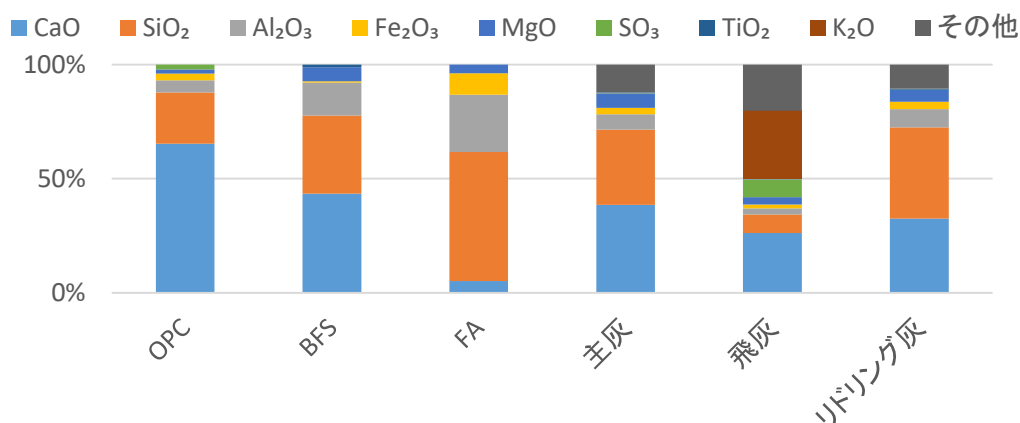


図 1-1 3 種類の木灰とセメント各種成分比較<sup>4)</sup>

(OPC : 普通ホルトランドセメント BFS : 高炉スラグ微粉末 FA : フライアッシュ)

## 1.2. 本研究の目的

本研究の目的は、セメントを用いず木灰と土壌環境に有益な混和材料と水のみを用いたコンクリート(木灰コンクリート)の強度増進とそれに伴う強度のメカニズムの解明である。目標とする圧縮強度は 18 N/mm<sup>2</sup>である。

コンクリートとしての役割を終えた後は肥料として土に還る材料のみを用いることが前提条件であるため混和材料には、ケイカル肥料としても利用可能な高炉スラグ微粉末<sup>6)</sup>、土壌の酸性の中和剤としても用いられる消石灰を用いた。

## 1.3. 使用する木灰について

本研究で使用する木灰は、宿毛バイオマス発電所から産出されるものを使用した。木灰は発生過程により 3 種類に分類される (図-1.2)。木灰 3 種の写真をそれぞれ示す (図-1.3, 1.5, 1.6)。主灰は多孔質で軽石のような粒や天然の石、また針金が混入していることが確認されている (図-1.4)。燃焼時に舞い上がり、集塵機で回収されるものが飛灰、舞い上がり集塵機まで到達せずに落下したものがリドリング灰、そして、燃え殻が主灰である。発生直後の飛灰は粉体である。しかし、宿毛バイオマス発電所では作業の安全性、効率化のため集塵機で回収後、加湿による飛散防止処理を行っているため、飛灰は大小さまざまな大きさに造粒する。造粒した飛灰の 5 mm 以下の粒度分布を示す (図-1.7)。粒度の測定は JIS A1102 骨材のふるい分け試験方法に準じて行った。飛灰は 3 種の中で最も産出時の性状が安定しているが、飛灰には塩化物が含まれるため、鉄筋コンクリートとしての活用は望めない。リドリング灰は最も性状が不安定である。宿毛バイオマス発電所からの搬入日別に粉末に近い状態や、天然の砂利が含まれている場合もある。

木灰の性状にばらつきが生じる要因としては、燃焼前から燃料(木材)に砂利が付着していることや、燃料(木材)の種類によって燃焼時の温度が異なることが考えられている。

木灰はアルカリ性であるため、高炉スラグの反応に寄与することも考えられる。

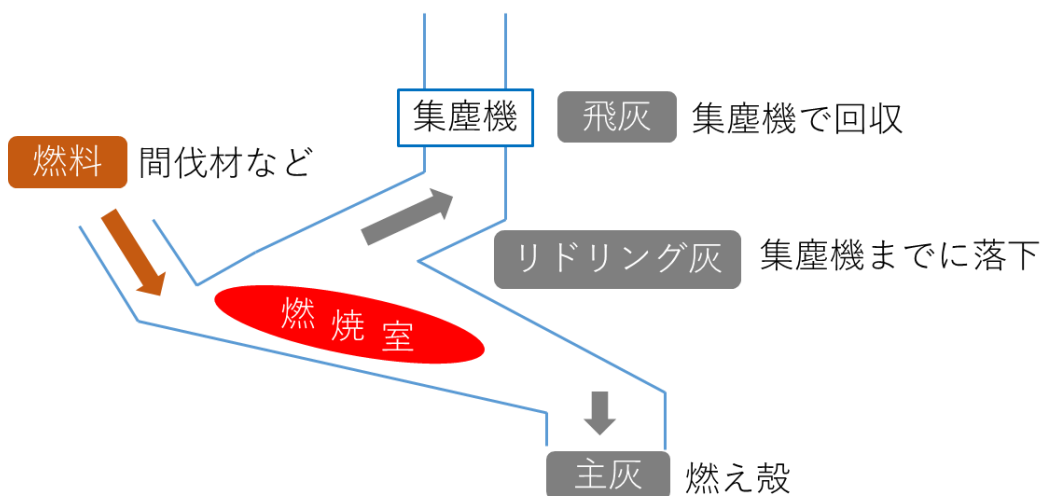


図 1-2 木灰の発生過程



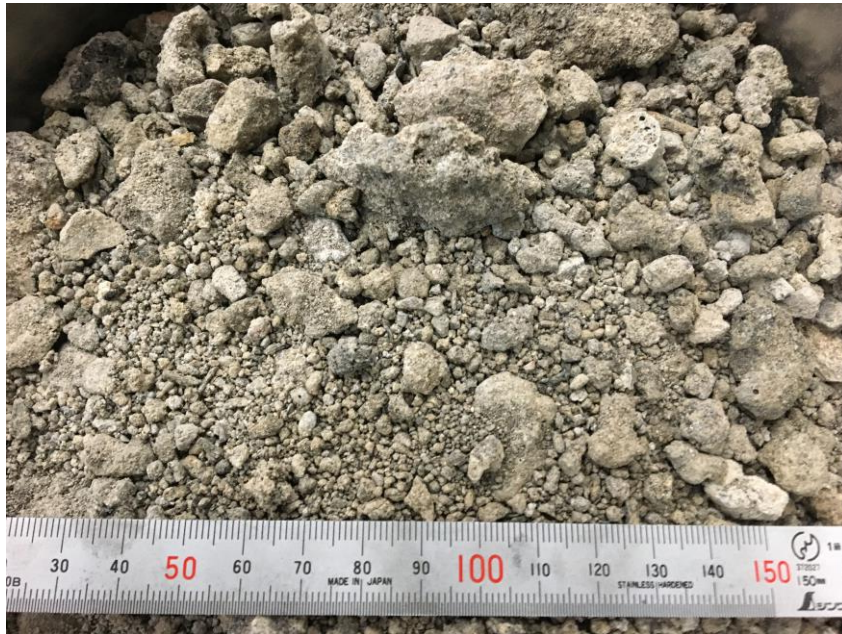


図 1-3 主灰



図 1-4 主灰の混入物



図 1-5 飛灰

(上 5mm 以下 中 造粒した飛灰 下 飛灰 5mm 以上)





図 1-6 リドリング灰 (搬入日別)

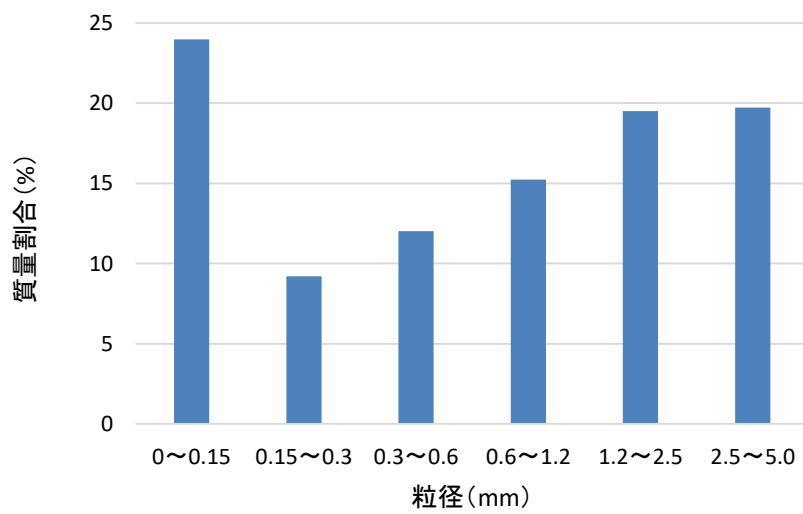


図 1-7 飛灰の粒度分布

#### 1.4. 本論文の構成

第1章では、木灰コンクリートの概要、研究背景、本研究で使用する木灰についてまとめ、本研究の目的と論文の構成について述べた。

第2章では、本研究に関連する既往の研究について取りまとめた。

第3章では、消石灰を用いた木灰3種別の強度発現性と、高炉スラグと消石灰を用いた木灰コンクリートの強度増進について検証した。

第4章では、高炉スラグと消石灰の反応による強度をベースとした飛灰のみの木灰コンクリートについて飛灰配合割合と結合材水比による強度発現について検証した。

第5章では、本研究の結論と今後の課題を述べた。

### 第3章 木灰コンクリートの強度増進

検討項目	使用する材料
木灰の強度発現性	各木灰+消石灰+水
高炉スラグによる強度発現	飛灰+消石灰+高炉スラグ+水

### 第4章 木灰コンクリートの強度定式化

検討項目	使用する材料
飛灰の配合方法	飛灰+消石灰+高炉スラグ+水
消石灰高炉スラグ比	消石灰+高炉スラグ+水
水結合材比と強度	飛灰+消石灰+高炉スラグ+水

#### 【参考文献】

1) 国土交通省報道・広報

[http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo20\\_hh\\_000012.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/sogo20_hh_000012.html). (閲覧 2017 年 12 月-10 日)

2) 松村 宇:コンクリートのリサイクル技術, コンサルタンツ北海道, 第 106 号, pp. 13-19, 2005 年

3) 森本克秀:コンクリート塊を全量リサイクルするリ・バースコンクリートの現状について, 建設の施工企画, pp. 46-50, 2009 年

4) 日本フライアッシュ協会:フライアッシュの化学・物理的性質, <http://www.japan-flyash.com/fchemiphsyi.html>, (閲覧 2017 年 12 月 10 日)

5) 鉄鋼スラグ協会:鉄鋼スラグについてー鉄鋼スラグの化学的特性, <http://www.slg.jp/slag/character.html>, (閲覧 2017 年 12 月 10 日)

6) 鉄鋼スラグ協会:鉄鋼スラグについてー鉄鋼スラグ製品のご紹介/肥料, [http:// www.slg.jp/slag/product/hiryo.html](http://www.slg.jp/slag/product/hiryo.html) , (閲覧 2017 年 12 月 10 日)

## 第2章 既往研究

### 2.1. セメントを使用しないコンクリート

セメントを使用しないコンクリートとして古くからはローマン・コンクリート、三和土（たたき）があり、近年ではジオポリマーコンクリート、高炉スラグを主な硬化剤とした環境配慮コンクリートが挙げられる。

古代のローマン・コンクリートはポゾラン反応を利用して製造されている。再現された古代ローマン・コンクリートの結合材には、消石灰とフライアッシュ、凝灰岩粉末が用いられていた<sup>1)</sup>。三和土は日本家屋の土間に比較的多く使用されてきた。苦汁、消石灰、水、土、砂で構成され、苦汁は硬化のための添加であるが、その化学反応は明らかではない<sup>2)</sup>。

ジオポリマーコンクリートはフライアッシュを水ガラス（ケイ酸アルカリ溶液）で固めたコンクリートである。アルミニウム(Al)やケイ素(Si)が水ガラス中に溶解し、それが重合して岩石が出来るように固まる点で、いわゆる天然の鉱物と似ているといえる<sup>3)</sup>。

環境配慮コンクリートは高炉スラグを結合材に用いる。高炉スラグは潜在水硬性を有するが持効性は無いため、特殊な刺激剤を添加する<sup>4)</sup>。

近年のセメント不使用コンクリートの目的は、主にセメントの製造時に大量に排出されるCO<sub>2</sub>の抑制である。

### 2.2. 高炉スラグの硬化

高炉スラグ微粉末はアルカリの刺激によって水和し硬化することはよく知られている。消石灰は高炉スラグ微粉末に対して反応を促進させる役割を果たしているという報告がある<sup>5)</sup>。高炉スラグの硬化に用いられるアルカリ刺激剤の種類によって硬化性状に差異が生じるが、イオン濃度 Ca<sup>2+</sup>+Mg<sup>2+</sup>と圧縮強度の明確な相関は認められていない。高炉スラグに対する消石灰の割合で強度に差異があることが報告されている<sup>6)</sup>。

### 2.3. コンクリートの強度と空隙との関係

一般的に、均質な固体では強度と空隙の間には反比例の関係があり、以下のように表すことができる。

$$S = S_0 e^{-k p}$$

ここで、Sは空隙がpの時の材料の強度であり、S<sub>0</sub>は空隙率が0の時の固有の強度であり、kは定数である。<sup>7)</sup>

### 2.4. コンクリートの締固め性評価

まだ固まらないコンクリートの施工性試験として、スランプ試験(JIS A 1101)が用いられる。スランプ値が0 cmとなる硬練りのコンクリートの場合には、充填率が用いられる。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会コンクリート委員会：“古代ローマコンクリートの再現検討“．古代ローマコンクリート ソンマ・ヴェスヴィアーナ遺跡から発掘されたコンクリートの調査と分析． p. 106, 2009 年
- 2) 矢野耕也, 矢野俊也：三和土の配合に関する研究．品質工学, Vol.19, No.2, p.61, 2011 年
- 3) 上原元樹・佐藤隆恒．特集 材料技術．ジオポリマー法でコンクリートの環境負荷を低減する, RRR, pp,10-13, 2011 年
- 4) 大脇英司：ポルトランドセメントを使用しない環境配慮コンクリート, 2014 年
- 5) 中内善貴, 伊与田岳史, 後藤誠史, 浅賀喜代史：アルカリ刺激剤及び炭酸カルシウムが高炉スラグ微粉末の水和反応に及ぼす影響, 第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会第 V 部門, 2013 年
- 6) 武田 均, 岡本礼子, 宮原茂禎, 丸屋 剛：高炉スラグ微粉末の硬化性状に及ぼす各種アルカリ刺激剤の効果, 土木学会第 66 回土木学会学術講演会, V-502, pp.1003-1004, 2011 年
- 7) P.Kumar Mehta, Paulo J.M.Monteiro: “強度”, コンクリート工学－微細構造と材料特性, p.44, 技報堂出版, 2000 年

## 第3章 木灰コンクリートの強度増進

### 3.1. はじめに

本章では、木灰種類の組み合わせと消石灰の混和による圧縮強度への影響と、消石灰、高炉スラグと飛灰を組み合わせたものの圧縮強度を測定した。第1章で述べたように、木灰の成分はセメントや高炉スラグ、フライアッシュと類似している。セメントは水硬性、高炉スラグはアルカリによる刺激によって水と練り混ぜると硬化する潜在水硬性を、フライアッシュは主成分のシリカやアルミナが水酸化カルシウムと水和物を生成させるポゾラン反応性を有する。そこで、消石灰を混和材として用いて強度発現を調べた。なお、消石灰は土壌中和剤として土壌に散布可能な材料である。

### 3.2. 実験概要

使用材料を示す(表-3.1)。消石灰は工業用消石灰を高炉スラグ微粉末はブレン値 6,000  $\text{cm}^2/\text{g}$  のものを用いた。木灰は宿毛バイオマス発電所で産出される木灰を用いた。なお、木灰は 5 mm のふるいを通過した物を用いた。

表 3-1 使用材料

種類		品質	
木灰	主灰	密度 1.91( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	発生比率:70%
	リドリング灰	密度 2.18( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	発生比率:15%
	飛灰	密度 1.81( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	発生比率:15%
消石灰	工業用	密度 2.21( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	
高炉スラグ微粉末	高炉水砕スラグ	密度 2.91( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ブレン値 6000	
水	上水道		

材料の練混ぜにはパン型のモルタルミキサ(図-3.1)を用い、練混ぜ速度は低速(自動速度:毎分 140 $\pm$ 5 回転, 公転速度:毎分 62 $\pm$ 5 回転)。木灰と消石灰で 30 秒空練りしたのち、水を投入して 120 秒練混ぜた(図-3.2)。1 バッチ当たり 1.4ℓ リットル練り混ぜた。

強度試験用供試体の型枠には直径 50mm, 高さ 100mm のプラスチック製モールドを用いた(図-3.3)。供試体の締固めは 3 層に分け、1 層ごとに 10~20 回先端が半球状の突き棒で突き固め、木槌で 10 回叩き振動を与え空隙を除去した。

供試体は材齢 3 日で型枠を脱型し、20°C一定の恒温室での気中養生を行った。





図 3-1 パン型モルタルミキサ

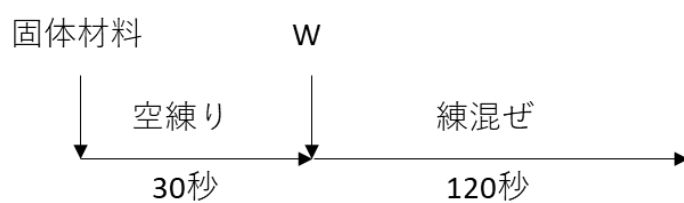


図 3-2 練り混ぜ手順



図 3-3 円柱供試体

### 3.3. 消石灰と水と木灰 3 種別での強度発現

消石灰を混和することによる木灰各種の強度比較を行った。3 種の木灰の混合比率によって 5 つの混合パターンを設定した。配合のパターンを示す(表-3.2)。木灰 3 種を発電所での発生比率により混合したもの (混合パターン 1), 各木灰のみを用いたもの (主灰のみ: パターン 2; リドリング灰のみ: パターン 3, 飛灰のみ: パターン 4), そして, 比較のため飛灰を入れずに消石灰のみとしたもの (パターン 5) である。パターン 1 においては, 木灰に対する消石灰の置換率を 2%, 5%, 10%, 20% または 40% に設定した。パターン 2~5 においては木灰に対する消石灰の置換率を 20% または 40% に設定した。木灰と消石灰に対する水比は, モルタルスランプ値が 0~1cm 程度となるように調整した。減水剤は用いなかった。パターン 5 は木灰を配合していないため消石灰に対する水比となる。このパターンも同様に, モルタルスランプ値が 0~1cm 程度となるように調整した。

材齢 7 日における, 消石灰置換率と圧縮強度の結果を示す (図-3.4)。飛灰を用いたもの (パターン 1 と 4) 以外では, 圧縮強度は消石灰+水のみのも (パターン 5) よりも明らかに下回った。3 種の木灰の中では飛灰のみ強度発現に寄与しているが, 強度発現の主役は消石灰+水であると想定した。

そこで, これらの配合について, 消石灰水比 (CH/W: 水に対する消石灰の質量比) と強度との関係に再整理した (図-3.5)。木灰として飛灰のみを用いたもの (パターン 4) のみ, 同じ消石灰水比において, 強度が消石灰+水のもの (パターン 5) を上回った。また, 木灰中飛灰が 15% 含まれているパターン 1 においては, パターン 5 よりも高い消石灰水比において同程度の強度が得られた。

このことから, 木灰の中では飛灰のみが強度発現に寄与している可能性を得たといえる。要因は, 少なくとも, 飛灰による自由水の拘束によるものである可能性が高い。また, 飛灰を用いた配合による発現強度は実験日ごとに差異が生じ, 試験場の課題が明らかになった。そして, 水と消石灰のみの添加では, 木灰コンクリートの圧縮強度は材齢 7 日間でせいぜい 2 N/mm<sup>2</sup> 程度であり, 実用には十分でない懸念が明らかとなった(図-3.6)。

表 3-2 配合のパターン

パターンNo.	木灰質量割合(%)			消石灰置換率 質量比(%)	木灰と消石灰 に対する水比 質量比(%)
	主灰	リドリング灰	飛灰		
1	70	15	15	2	28
				5	27
				10	27
				20	28
				40	30
2	100	—	—	20	20
				40	21
3	—	100	—	20	25
				40	25
4	—	—	100	20	56
				40	56
5	—	—	—	100	56

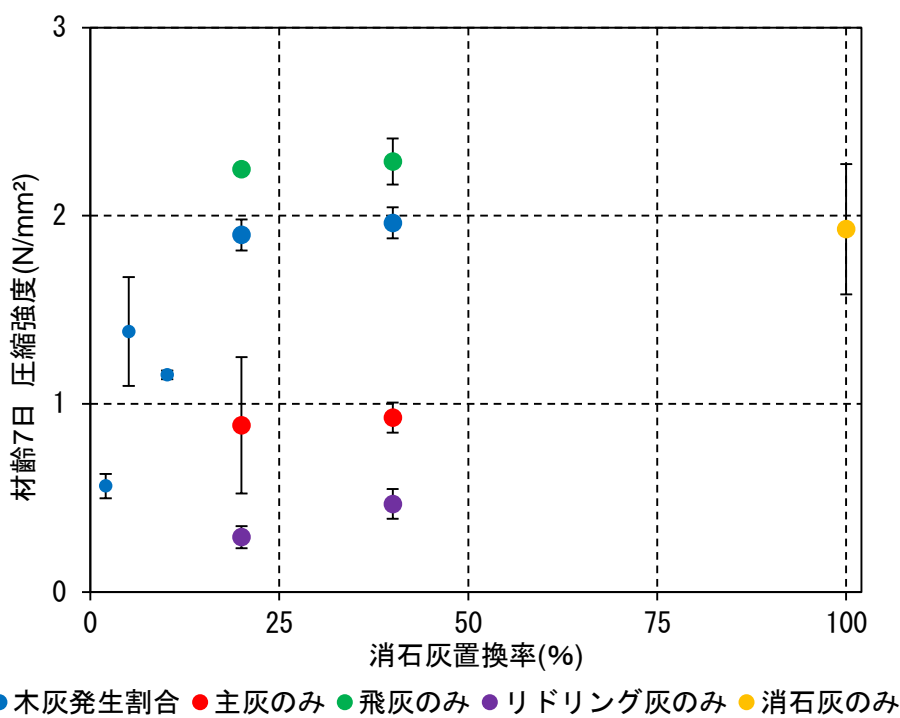
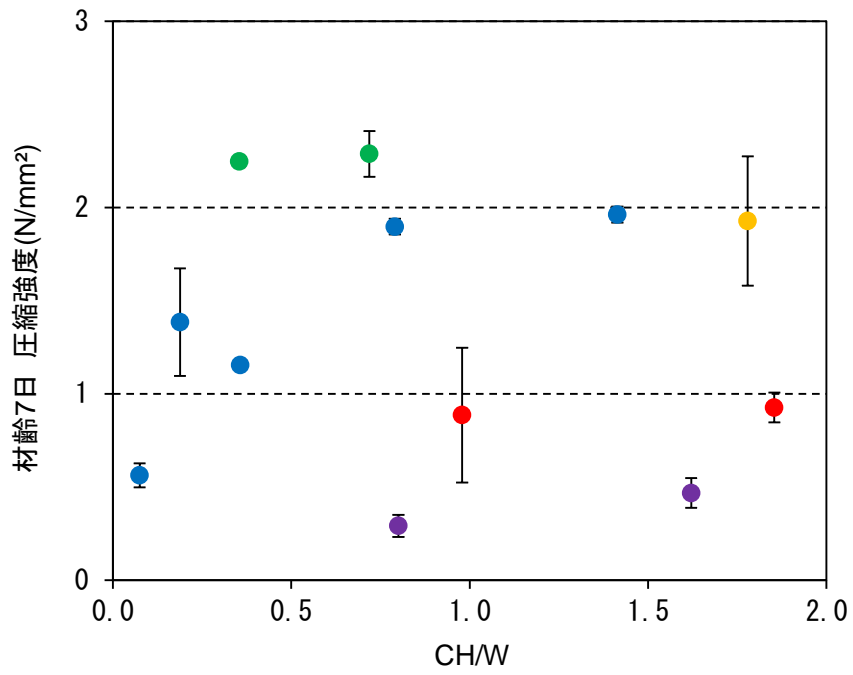


図 3-4 消石灰置換率と材齢 7 日圧縮強度の関係



●木灰発生割合 ●主灰のみ ●飛灰のみ ●リドリング灰のみ ●消石灰のみ

図 3-5 消石灰水比(CH/W)と材齢7日圧縮強度との関係

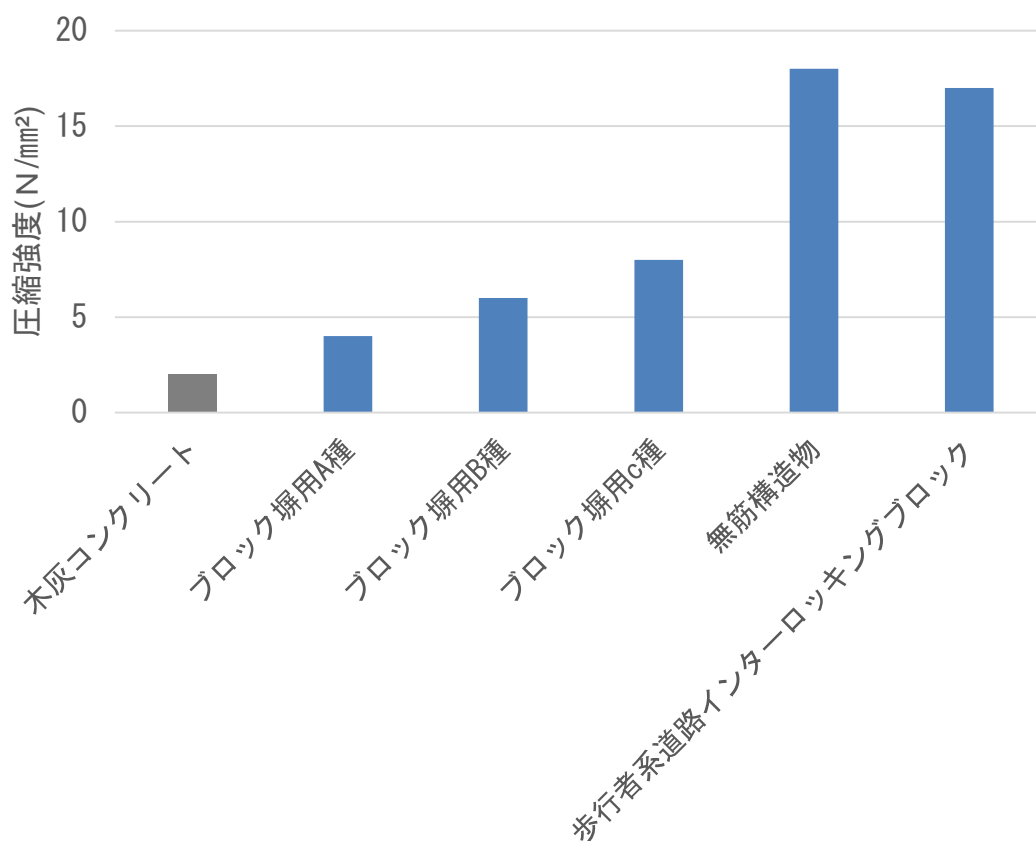


図 3-6 木灰コンクリートと用途別コンクリートの強度比較

### 3.4. 高炉スラグの添加による木灰コンクリートの強度増進

高炉スラグ微粉末と消石灰と飛灰の組み合わせでの強度発現を検討した (図-3.7)。配合のパターンを示す(表-3.3)。パターン 6 にて消石灰と高炉スラグを同質量配合し強度発現することを確認した。パターン 7 では消石灰と高炉スラグと飛灰を同質量配合し、飛灰が高炉スラグと消石灰のみの強度に与える影響を調査した。パターン 8 では飛灰と高炉スラグのみ同質量配合し、強度発現を調べた。パターン 2 は消石灰と飛灰のみでの値を比較のため設定したものである。なお、単位水量は各パターンにおいて同程度のスランプが得られるように調節した。

高炉スラグを配合することで圧縮強度は上昇し、パターン 7 では飛灰を配合しないパターン 6 の圧縮強度を上回る値となった。飛灰のアルカリが高炉スラグの硬化に寄与したことが推測できるが、飛灰と高炉スラグのみの配合でのパターン 8 では強度発現は確認できなかった。

表 3-3 配合のパターン

パターンNo.	配合質量割合(%)			固体材料に対する水比質量比(%)
	飛灰	消石灰	高炉スラグ	
2	80	20	-	56
6	-	50	50	49
7	33	33	33	44
8	50	-	50	47

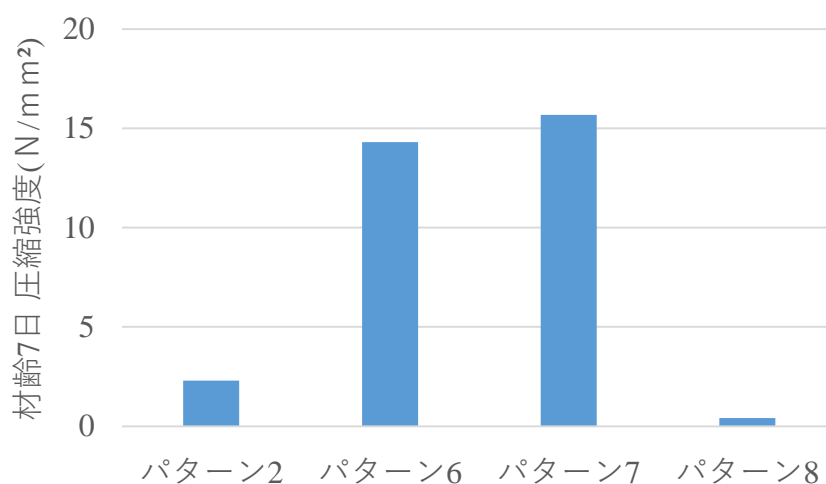


図 3-7 強度比較

### 3.5. まとめ

消石灰を用いた木灰種類別での圧縮強度の検討した。飛灰が強度発現に最も有効であることが分かった。しかし、材齢7日で2N/mm<sup>2</sup>しか得られておらず、実用には不十分であった。一方、高炉スラグを混和材として加えた配合では材齢7日では最高で16 N/mm<sup>2</sup>得ることが出来、高炉スラグを用いることで実用に十分な強度が得られたといえる。

一方、飛灰の吸水状態により、練り上がりの状態や圧縮強度に差が生じることが定性的ではあるが明らかとなり、課題となった。さらに、高炉スラグの硬化に必要なアルカリ量と飛灰の配合方法の検討も必要であることが分かった。

#### 【参考文献】

- 1) 片山諒辰：木灰と消石灰を用いたコンクリートの強度発現，高知工科大学卒業論文，2015年3月

## 第4章 材料と配合による木灰コンクリートの強度

### 4.1. はじめに

第4章は、飛灰、消石灰、高炉スラグと水を配合したコンクリートの圧縮強度を調べた。飛灰を結合材として扱うか否かを、結合材水比に着目して検討した。高炉スラグの硬化に適したアルカリ量を検討し、水結合材比、および飛灰の配合量による充填度合いと圧縮強度への影響を調べた。

なお、飛灰の配合に際しては、飛灰産出時の加湿を考慮した配合方法を構築した。

### 4.2. 実験概要

使用材料を表-4.1 に示す。消石灰は工業用消石灰を、高炉スラグ微粉末はブレン値 4,000 g/cm<sup>2</sup> のものを、木灰は宿毛バイオマス発電所で産出される木灰を用いた。なお木灰は飛灰のみを用い、5mm のふるいを通過した物を用いた。

表 4-1 使用材料

種類		品質
木灰	飛灰	密度 1.81(g/cm <sup>3</sup> ) 吸水率 32.3%
消石灰	工業用	密度 2.21(g/cm <sup>3</sup> )
高炉スラグ微粉末	高炉水砕スラグ	密度 2.91(g/cm <sup>3</sup> ) ブレン値 4000
水	上水道	

材料の練混ぜにはパン型のモルタルミキサ (図-4.1) を用い、練混ぜ速度は低速 (自動速度: 毎分 140±5 回転, 公転速度: 毎分 62±5 回転), 練混ぜ量は 1.4ℓ (空気を除いて) とした。木灰と消石灰での空練りを 30 秒した後、水を投入し 120 秒練混ぜる手順とした (図-4.2)。1 バッチ当たり 1.4ℓ リットル練り混ぜた。

供試体用の型枠には直径 50mm, 高さ 100mm のプラスチック製モールドを用いた (図-4.3)。供試体の締固めは 3 層に分け、1 層ごとに 10~20 回先端が半球状の突き棒で突き固め、木槌で 10 回叩き振動を与え空隙を除去した。供試体は材齢 3 日で型枠を脱型し、温度 20℃一定の恒温室での気中養生を行った。

圧縮強度試験用供試体の締固め度合いを、充填率を指標として定量化した。締固め作業直後の供試体質量から質量法で空気量を算出し、100 から空気量(%)を充填率(%)とて求めた。



図 4-1 パン型モルタルミキサ

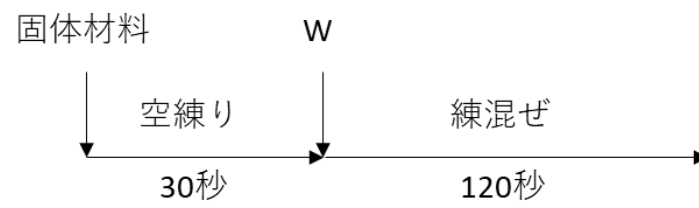


図 4-2 練り混ぜ手順



図 4-3 円柱供試体



### 4.3. 飛灰配合方法の検討

図-4.4 に飛灰と消石灰，高炉スラグでの水比と圧縮強度の関係を示す。配合のパターンを示す(表-4.2)。プロット○は消石灰と高炉スラグのみを結合材と仮定した場合の結合材水比を，プロット●は先ほどの結合材と飛灰を粉体としてまとめた粉体水比とした。

その結果，結合材水比と圧縮強度には相関があった。飛灰は産出時に安全のため加湿されており水硬性は期待できない<sup>1)</sup>ことから，細骨材として取り扱うこととした。

第1章で述べたように飛灰の吸水率は30%を超えることが分かっている。産出時の加湿による造粒が要因であると推測した。図-4.5 に飛灰の粒度分布を示す。0.15mm以下の粒径のものが全体の約25%となるが，概ね鉄筋コンクリート標準示方書の細骨材の粒度分布と一致した。ふるい分けはJIS A1102「骨材のふるい分け試験方法」に準じて行った。飛灰の吸水率を考慮し，十分に吸水させた飛灰を使用した配合を表-4.3 に，それを用いた試験結果を示す(図-4.6, 図-4.7)。その結果，飛灰を十分に吸水させ，また細骨材として取り扱うことで，結合材水比と圧縮強度の関係を単純化図示することが出来た。

表 4-2 飛灰の吸水率を考慮した試験ケース

水比		高炉スラグ消石灰比 CH/BFS(%)	飛灰体積割合 a/m (%)
結合材水比B/W	粉体水比P/W		
1.5	2.28	100	20.7
1	2.58		37.8
0.5	2.73		51.6
0.5	2.6		50.6
0.4	1.77		42.5
0.5	2.73		49.8
0.5	2.38		48.8
0.5	2.38		48.8
0.4	2.22		47.3

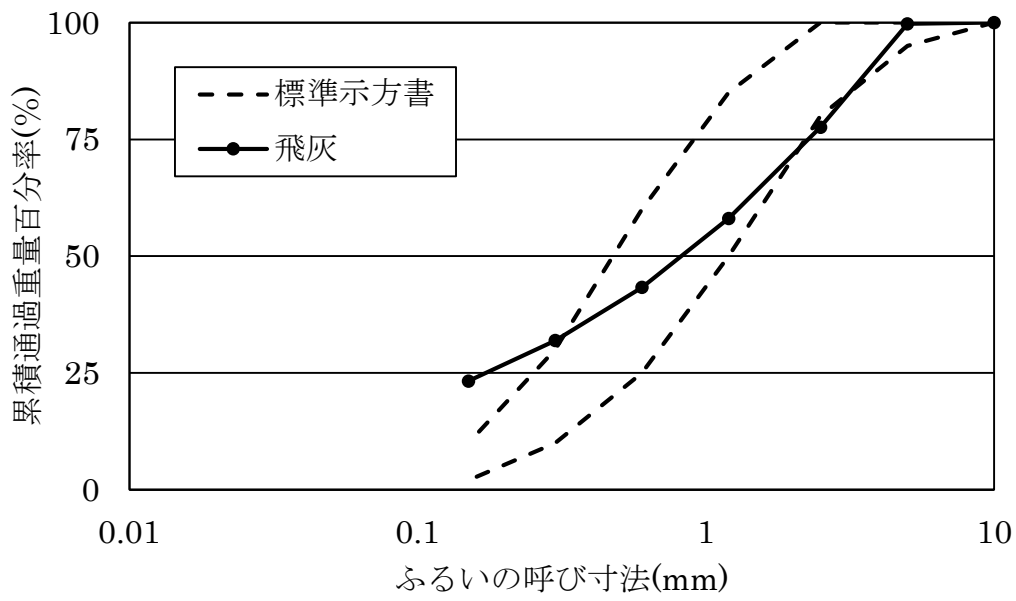


図 4-4 飛灰の粒度分布

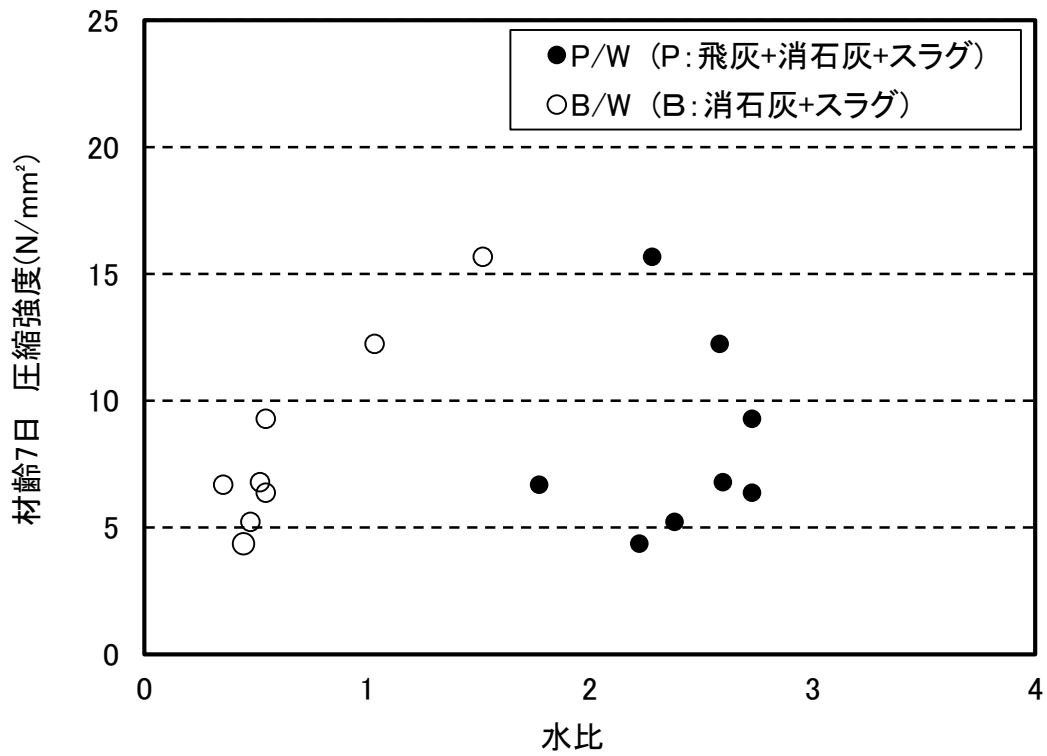


図 4-5 水比と圧縮強度の関係

表 4-3 飛灰の吸水率を考慮した試験ケース

水比	高炉スラグ消石 灰比CH/BFS(%)	飛灰体積割合a/m (%)
結合材水比B/W		
1.0	5	30
1.3		
1.7		
2.2		

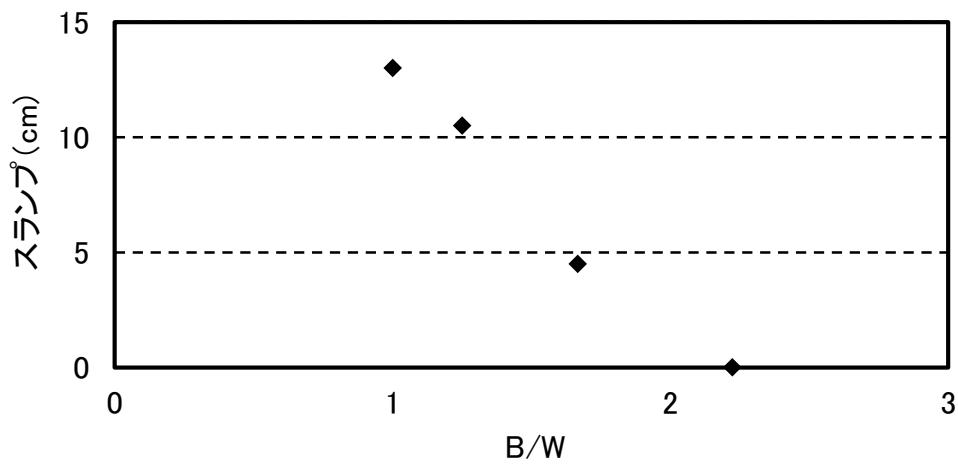


図 4-6 含水率調整による強度安定化

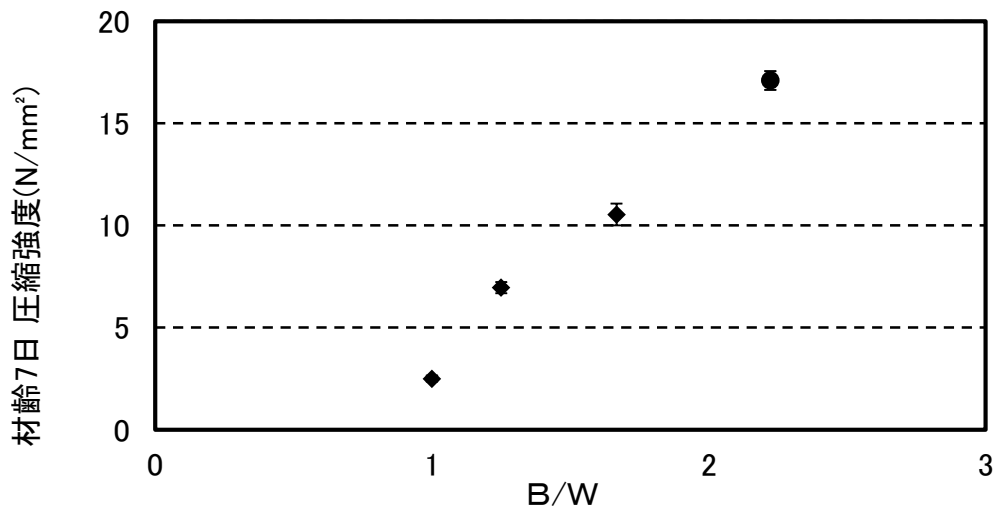


図 4-7 含水率調整によるスランプの安定化

#### 4.4. 高炉スラグに対する消石灰は配合量の決定

高炉スラグはアルカリの刺激による潜在水硬性を有する。高炉スラグは消石灰のアルカリ刺激により強度発現することと、高炉スラグに対する消石灰の割合で強度に差異があることが報告されている<sup>2) 3) 4)</sup>。一方、高炉スラグはケイカル肥料としても利用可能である。そこで、本研究における木灰コンクリートの強度発現の主体を高炉スラグ+消石灰+水とし、その混合比を検討した。

表-4.4 に実験パターンの一覧を示す。高炉スラグの硬化に必要な消石灰量 (CH/BFS: 消石灰高炉スラグ比=高炉スラグ微粉末に対する消石灰の質量比)を調べた (図-4.8)。高炉スラグと消石灰を結合材とした結合剤水比(B/W)はスランプ値の評価をしやすいように少しスランプする水結合材比とした。練り混ぜ手順は先に示したのと同じである (図-4.2)。試験の結果、消石灰高炉スラグ比が 5%より高くなっても圧縮強度は高くならなかった。消石灰はリサイクル材料ではないことから、その使用は少ない方が望ましいと判断し、以降、強度が最高となる 5%を消石灰高炉スラグ比とした。

なお、消石灰高炉スラグ比は、供試体への充填率には影響を及ぼさなかったことを確認した。図-4.9 に CH/BFS と充填率との関係を、図-4.10 に CH/BFS とスランプとの関係を示す。CH/BFS が 0.5%から 10%まで、充填率やスランプ値に変化は見られなかったからである。このことから、消石灰+高炉スラグ微粉末+水からなるペースト相における CH/BFS 値は強度にのみ影響を与えたといえる。

表 4-4 適切な消石灰高炉スラグ微粉末比を決定するための試験ケース

消石灰高炉スラグ比 CH/BFS (%)	結合材水比 B/W
10.0	3.33
5.0	
1.0	
0.5	

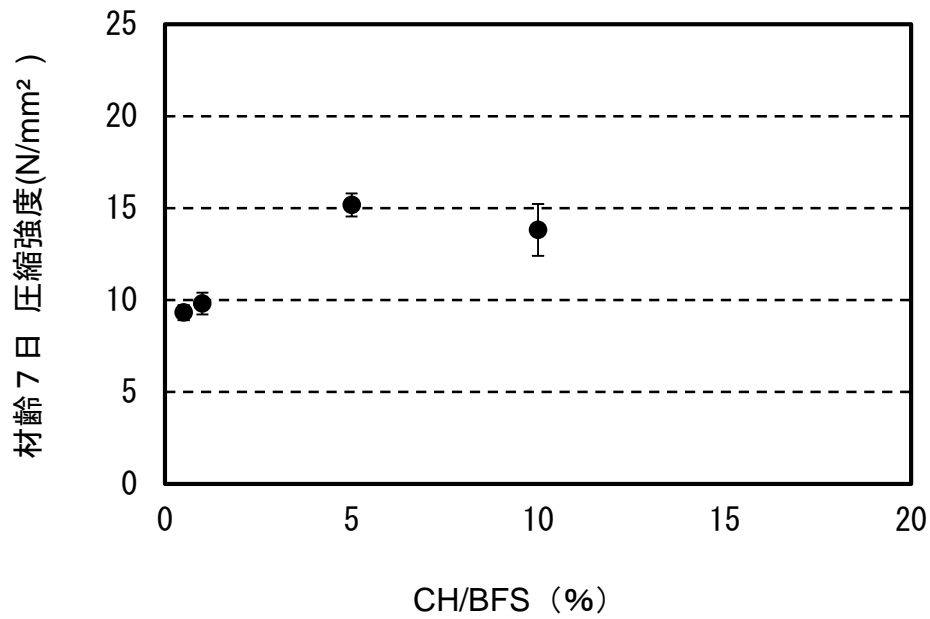


図 4-8 消石灰高炉スラグ微粉末 (CH/BFS) と材齢 7 日圧縮強度との関係

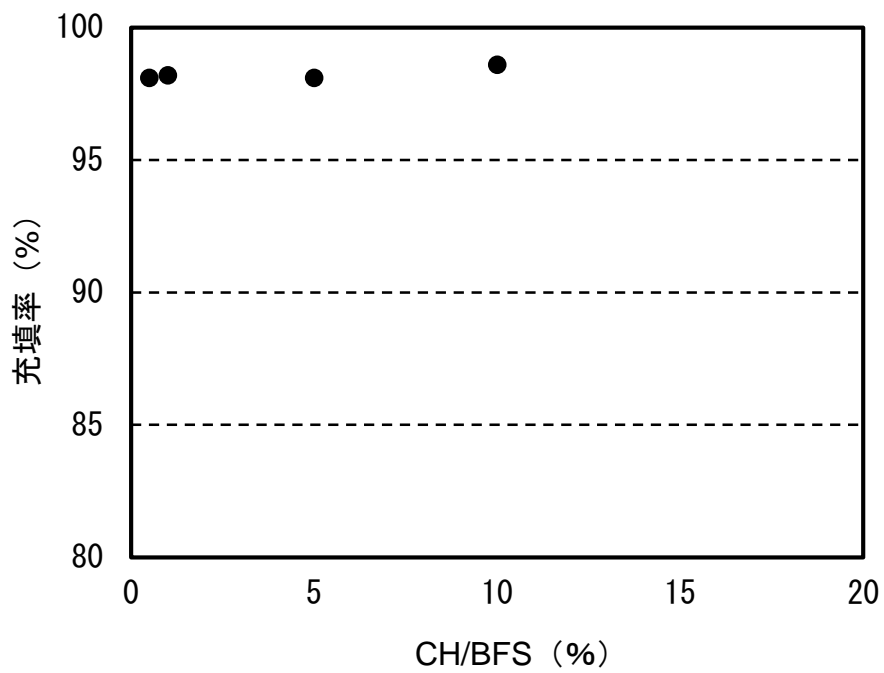


図 4-9 CH/BFS と充填率との関係

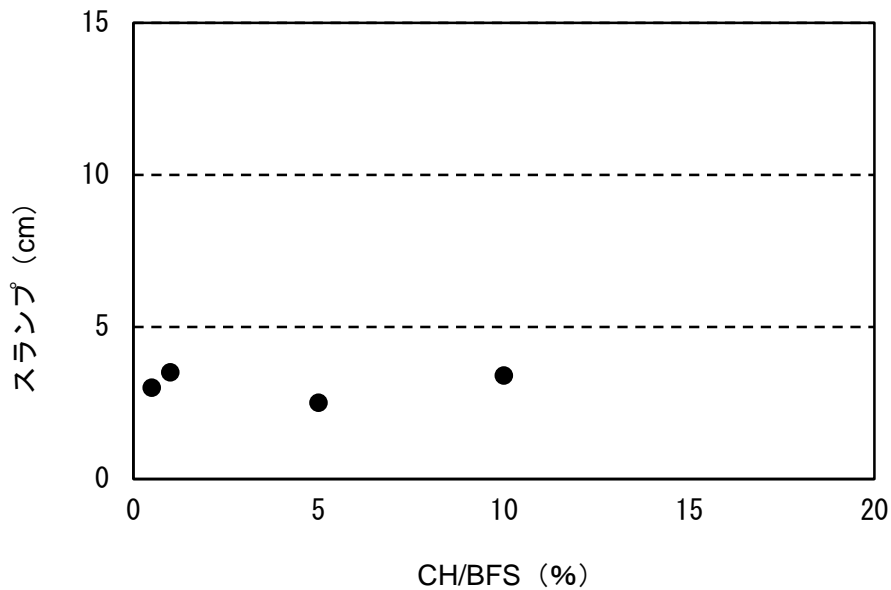


図 4-10 消石灰高炉スラグ比とスランプとの関係

#### 4.5. 飛灰容積比と水結合材比が強度に及ぼす影響

高炉スラグ微粉末+消石灰+水から成るペーストをベースとし、これの一部を飛灰に置換する配合により作成した供試体により、飛灰の量が圧縮強度に及ぼす影響を調べた。コンクリート（全体）中の飛灰容積比を  $a/m$  とし、 $a/m$  0%、30%、50%または 60%において、結合材水比（高炉スラグ微粉末と消石灰の質量合計に対する水の質量比） $B/W$  と材齢 7 日の圧縮強度への影響を調べた（図-4.11）。

各  $a/m$  において、 $B/W$  と圧縮強度との間に共通の相関関係が見られた。すなわち、 $B/W$  の値を大きくすると強度が高くなるが、ある値を境に強度は急激に低下に転じる。各  $a/m$  において、強度を最高にする  $B/W$  が存在することが分かった。また、 $a/m$  の値が大きいくほど、圧縮強度がピークとなる  $B/W$  は低い値となり、ピークの圧縮強度も低くなった。

$B/W$  の値を徐々に大きくしていくと強度にピークが存在し強度が低下する要因として、 $a/m$  の値の増加に伴いコンシステンシーが高まり、型枠内への充填不良が生じたことによることを仮定した。 $B/W$  と充填率の関係を示す（図-4.12）。 $a/m$  の値が大きくなるに従って、充填率を維持するために  $B/W$  の値が小さくなっていくことが分かる。そして、各  $a/m$  において、 $B/W$  が高くなると充填率が低下する傾向が見られた。 $B/W$  が高すぎることにより強度が明らかにピークを下回った充填率は、 $a/m$  によらず、おおむね 90%以下であった（図-4.13）。

スランプと充填率との関係、および、スランプと強度との関係を示す（図-4.14）（図-4.15）。今回の供試体作成締固め方法では、スランプがゼロでなければ、圧縮強度を損なわない充填

率を維持できることが分かった。

同じ B/W の場合，圧縮強度は a/m の高い方が高くなった（図-4.11）。飛灰置換率が高くなるに伴い，飛灰が自由水を拘束することにより，実質の B/W が高くなり，強度増進に寄与したものと考察した。

表-4.5 配合表

高炉スラグ消石灰比 CH/BFS (%)	飛灰体積割合 a/m (%)	結合材水比 B/W
5	0	5.00
		4.44
		4.00
		3.64
		3.33
		3.33
		2.00
		1.33
		0.80
	30	2.86
		2.50
		2.50
		2.22
		2.22
		2.00
		1.82
		1.67
	50	1.43
		1.33
		1.25
		1.11
		1.00
		0.83
	60	0.67
		0.56
		0.48
		0.33

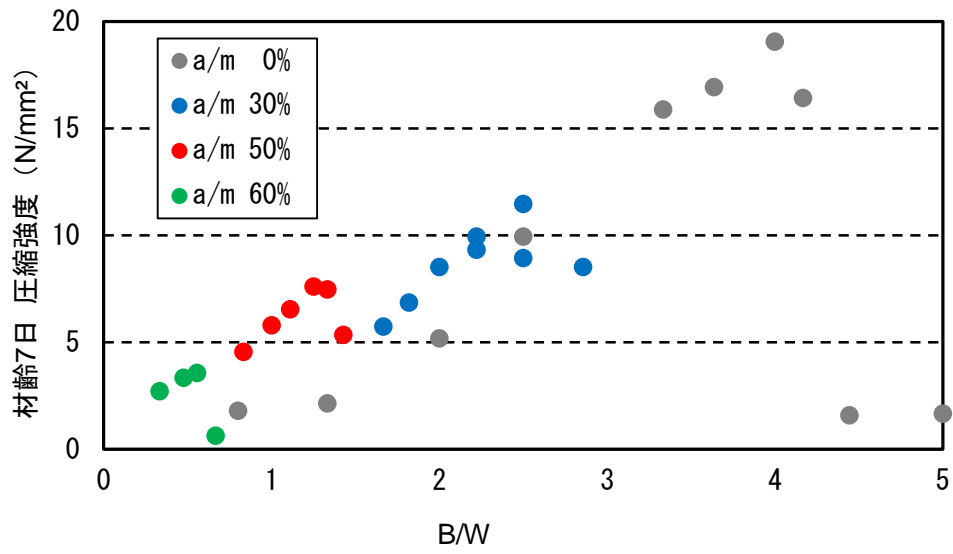


図 4-11 B/W と圧縮強度の関係

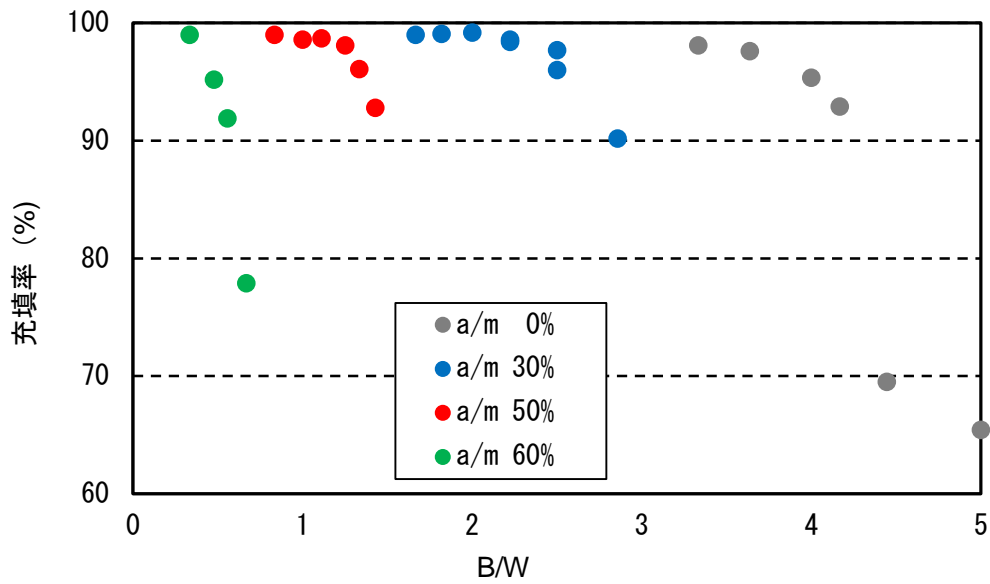


図 4-12 B/W と充填率の関係





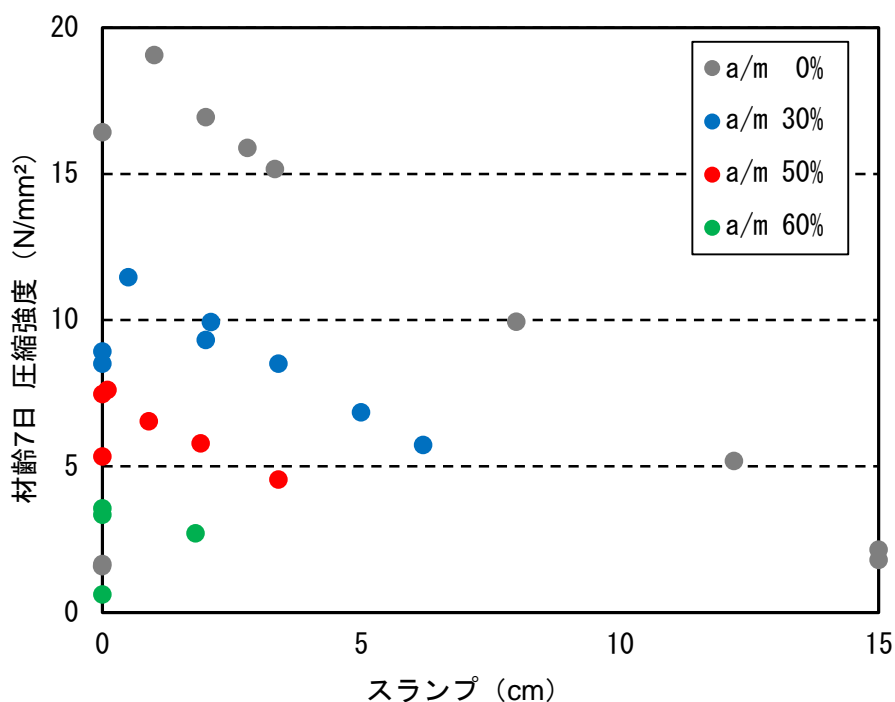


図 4-15 スランプと圧縮強度の関係

#### 4.6. まとめ

発現強度を安定させるには飛灰の含水率を測定し、その値に応じて単位水量を調整する必要があることが分かった。飛灰容積比ごとに、結合材水比と発現強度とは相関関係にあった。締固め限界となる結合剤水比を越えると締固め不良により発現強度が低下する、締固め限界となる水結合材比が存在した。スランプがゼロとなる水結合材比でなければ、締固め不良による強度低下は生じなかったといえる。

同じ結合材水比では、圧縮強度は飛灰容積比の高い方が高くなった。飛灰置換率が高くなるに伴い、飛灰が自由水を拘束することにより、実質の結合材水比が高くなり、強度増進に寄与したといえる。

#### 【参考文献】

- 1) 井保呂永一：木質燃焼灰の活用方法，特開 2017-77552 号，2017-4-27
- 2) 矢野耕也，矢野俊也：三和土の配合に関する研究．品質工学，Vol.19, No.2, p.61，2011 年
- 3) 上原元樹・佐藤隆恒．特集 材料技術．ジオポリマー法でコンクリートの環境負荷を低減する，RRR, pp,10-13，2011 年
- 4) 大脇英司：ポルトランドセメントを使用しない環境配慮コンクリート，2014 年

## 第5章 結論

本研究は、消石灰を用いて木灰の種類による強度発現性を調べ、高炉スラグを混和材に加えることで強度を増進させた。高炉スラグ、消石灰、飛灰を用いた配合での配合設計指標を設定し、強度との関係を調べた。本研究の条件下で得られた知見を以下にまとめる。

### (1)木灰コンクリートの強度増進

消石灰のみを混和材とした場合、飛灰が最も強度発現に適していた。飛灰による自由水の拘束作用によって水結合材比が下がったことを要因として考察した。飛灰と消石灰、高炉スラグを混和材として配合することで強度は最高で  $16\text{N/mm}^2$  に増加した。

### (2)材料・配合と木灰コンクリートの強度の関係

高炉スラグ、消石灰、飛灰、水から構成される木灰コンクリートの強度定量化を行った。

飛灰は結合材としてではなく細骨材として取り扱い、32.3%という高い吸水率を考慮し、十分に吸水させることが必要である。

高炉スラグの硬化は高炉スラグに対する消石灰比 5% (質量比) で十分であった。水結合材比、飛灰容積比と圧縮強度には相関があり、締固めの限界値を充填率から定量化した。飛灰容積比によって締固めの限界となる水結合材比は高い値であった。飛灰容積比が圧縮強度に与えた影響は、締固めに要する水結合材比であることが分かった。

同じ結合材水比では、 $a/m$  の高い方が圧縮強度が高くなった。飛灰置換率が高くなるに伴い、飛灰が自由水を拘束することにより、実質の  $B/W$  が高くなり、強度増進に寄与したといえる。

### 今後の課題

本研究では、木灰コンクリートの強度を高炉スラグの潜在水硬性に依存し、実用可能な強度を得ることを重視した。材齢は 7 日間と短期間で強度発現を優先したため、第 4 章では、木灰を飛灰のみの使用に絞って研究を行った。しかしながら、主灰、リドリング灰にはポゾラン反応が期待できる成分が飛灰に対し多く含有しているため、主灰、リドリング灰を用いたポゾラン反応に焦点を置いた木灰コンクリートの長期強度を検討することで、さらなる木灰の有効活用、ひいては循環型社会に寄与すると考える。

## 参考文献

- 1) 鐵鋼スラグ協会 鐵鋼スラグについて参照  
<http://www.slg.jp/slag/product/hiryo.html>  
(閲覧日：2018年1月)
- 2) 伊代田 史：高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート，特集／産業副産物期限のコンクリート用混和材の有効利用—課題と展望—／4.大量使用したコンクリートの性質，2014年5月
- 3) 中内 善貴，伊代田 史，後藤誠史，淺賀喜代志：アルカリ刺激剤及び炭酸カルシウムが高炉スラグ微粉末の水和反応に及ぼす影響，第40回土木学会関東支部技術研究発表会，第V部門，2013年3月
- 4) 武田 均，岡本 礼子，宮原 茂禎，丸屋 剛：高炉スラグ微粉末の硬化性状に及ぼす各種アルカリ刺激剤の効果，土木学会第66回年次学術講演会，2011年8月
- 5) 奥田竜二：木灰と消石灰を用いたコンクリートの圧縮強度向上，高知工科大学卒業論文，2015年3月
- 6) 鈴木麻由：木灰コンクリートの接水による崩壊促進と消石灰に代わる混和材の選定，高知工科大学卒業論文，2016年3月
- 7) 高山大輝：林道建設のための地還元自己崩壊コンクリートブロックの設計，製造と載荷，高知工科大学卒業論文，2015年3月
- 8) 土居良太：木灰コンクリートブロックの拘束効果と製造効率向上，高知工科大学卒業論文，2016年3月

## 謝辞

本研究を進めていくに当たり、多くの方々の多大なるご指導とご協力を頂きました。

本研究で使用した木灰は(株)グリーン・エネルギー研究所 宿毛バイオマス発電所より、高炉スラグ微粉末は日鉄住金高炉セメント(株)より御提供いただきました。心より御礼申し上げます。本論文の作成にあたり、大内雅博先生（高知工科大学教授）、田島昌樹先生（高知工科大学准教授）、先生（高知工科大学教授）、宮地日出夫先生および曾我部敏郎先生（高知工科大学コンクリート研究室技術指導員）には、数多くの貴重な御助言、御指導を頂きました。ここに謹んで御礼申し上げます。

田島先生には、修士論文の副指導教員として広い見地からのご意見や的確なご指摘を頂きました。田島先生の違った角度からのご意見や質問は刺激になり、より俯瞰的な視点から自分の研究を見直すことが出来ました。心より御礼申し上げます。

大内先生には、学部3年でコンクリート研究室の配属となってから研究に関することはもちろんのこと、学生生活において進路の相談や就職活動においても多くの面で大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

宮地先生には、コンクリートに関するお話から実験方法の相談等、親身になって教えて頂きました。また、実際の現場のことや会社の研究と大学の研究の違いや業界や遊びのことについても教えて頂いたことを良く覚えています。心より御礼申し上げます。

本論文の研究を行うにあたって、共に研究を行ってきたコンクリート研究室のメンバーには、心より感謝しています。

最後に、大学・大学院と6年間にわたり多方面で支えてくださった家族に対し心より感謝申し上げます。

以上のように、多くの方々の力添えのもと本研究を進めてくることができました。この場をお借りして皆様に感謝の意を表します。

2018年3月 片山諒辰