

2019（令和元）年度 修士学位論文

単純重ね合わせ接着継手における応力集中
低減化効果を目的とした接着剤特性の検討

Study on adhesive properties for the purpose of reducing
stress concentration in single lap adhesive joints

2020 年 3 月 9 日

高知工科大学大学院 工学研究科基盤工学専攻
知能機械システム工学コース

1225026 澤田 健太

指導教員 楠川 量啓

目次

第 1 章 緒言	1
第 2 章 接着継手特性に及ぼす接着剤特性の実験的検討	3
2-1 接着剤の機械的特性の測定	3
2-1-1 試験片の作製	3
2-1-2 引張試験	4
2-2 エネルギー解法率の測定	7
2-2-1 試験片の作製	7
2-2-2 エネルギー解法率の計算	8
2-3 単純重ね合わせ継手の特性	17
2-3-1 試験片の作製	17
2-3-2 引張試験	18
2-3-3 考察	19
2-4 画像相関法による接着層の応力分布	22
2-4-1 画像相関法の原理	22
2-4-2 応力分布測定	23
2-4-3 考察	30
第 3 章 接着継手特性に及ぼす接着剤特性の解析的検討	31
3-1 有限要素解析のモデル作成	31
3-2 モデルに荷重を負荷した時の解析	33
3-2-1 解析モデル	33
3-2-2 解析結果	34
3-3 CZM 解析	39
3-3-1 解析モデル	39
3-3-2 解析結果	40
3-4 考察	44
第 4 章 結言	45
第 5 章 謝辞	46
参考文献	
付録	

第1章 緒言

近年、接着剤を用いた接着継手は軽量化を要する自動車や航空機を始めとして、一般的な産業用機械の分野においても広く使用されつつある⁽¹⁾。溶接継手やボルトによる継手のような他の継手に比べ、軽量化が可能であることに加え、異なる材料同士を接合することが可能であるという特長を有している。しかし、接着継手は図1に示すように接着端部において応力集中が生じるため、そこを起点として破壊が生じやすくなり、継手の強度信頼性を低下させるという問題がある⁽²⁾。これに対して接着層における応力集中を低減させるような各種継手が工夫されてきた。

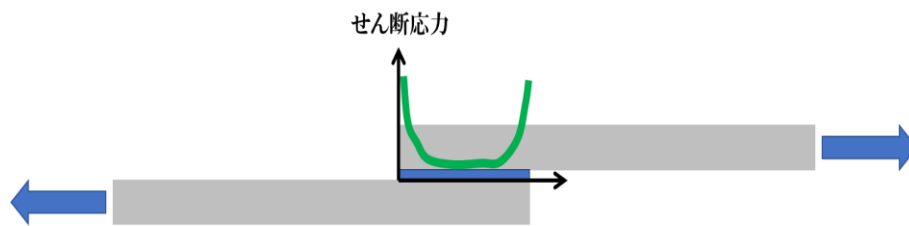


図1 単純重ね合わせ継手の接着層に生じる応力分布

応力集中を緩和する方法として、図2のように接着層の両端に形状的傾斜を付けるフィレットがある。Akpinar ら⁽³⁾はフィレットを付けた接着継手が付いていない場合よりも応力集中を軽減させたことを示した。しかし、フィレットを付けると形状的に複雑になると同時に複雑な加工を必要とするという問題が生じる。



図2 フィレットを付けた接着継手のイメージ

そこで、複雑な加工を要しないことから注目されている継手が図3のような傾斜機能接着継手(Functionally Graded Adhesive Joint, 以下ではFGAJ)である。FGAJは接着層の機械的特性を徐々に変化させた接着継手であり、解析的には接着層に渡って一様な応力分布を与えることが知られている⁽⁴⁻⁶⁾。Carbas ら⁽⁷⁾は硬化する際の温度を変化させることにより、接着剤の特性が変化することを利用して作製したFGAJの強度が単一温度の場合で硬化された接着継手よりも高くなることを示した。しかし、実際にFGAJを作製した論文はほとんどなく、作製方法や性能の測定が研究領域となってきた⁽⁸⁾。

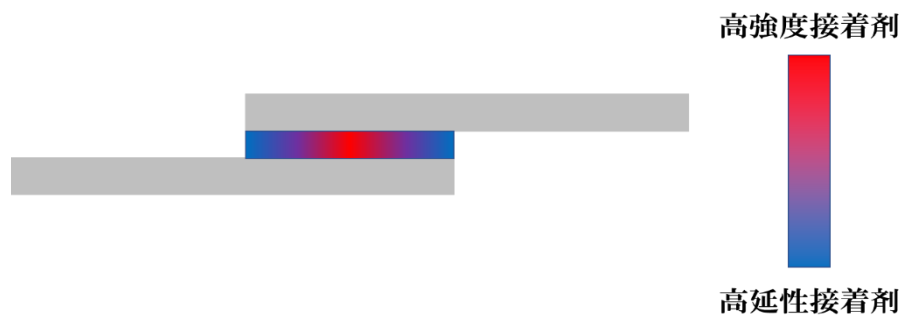


図3 FGAJ のイメージ

FGAJ を実現するために、硬化後における接着剤の性質を不均一にさせる試みが行われている。硬化後における接着剤の特性を変化させるために、2 液型の接着剤が使用されていることが多い。Kawasaki ら⁽⁹⁾は2種類の2液型アクリル系接着剤を使用し、各接着剤の混合割合を変化させることで、接着剤の特性を変化させた。この研究では、本剤と硬化剤を接触させることにより、接着するハネムーン接着を用いた。しかし、この方法を使用した場合、十分な攪拌を必要とする代表的な構造用接着剤である2液型エポキシ系接着剤を使用すると、硬化不良を起こすという問題がある。そこで、Khoee と Hassani⁽¹⁰⁾や Razavi ら⁽¹¹⁾は接着剤に高分子を混合することにより、高分子の種類や混合する質量によって高分子を混合した接着剤で作製された単純重ね合わせ継手の強度が変化することを示した。この方法を利用することにより、2液型エポキシ系接着剤を用いた場合でも FGAJ を作製出来ると考えられる。

また、構造設計や解析に使用する正確な数値モデルを作成するために、継手に生じる表面ひずみや面外変形を調査することも重要である。今まで、単純重ね合わせ継手を評価するためにひずみゲージやモアレ干渉法といった方法が用いられてきた。しかし、計測可能な自由度が少ないという問題がある⁽¹²⁾。そこで、Kumar と Bhat⁽¹³⁾はエポキシ系接着剤、Moreira と Nunes⁽¹⁴⁾は高延性接着剤においてデジタル画像相関法(DIC)を用いた非接触法により接着層ならびに被着体領域におけるひずみ分布を計測した。

DIC は測定対象物表面にランダムな模様を作製したものにに基づき、変形前後の測定対象物表面をカメラなどで撮影したデジタル画像を数値解析することで、測定範囲全域にわたる変位の大きさや方向を求める方法である⁽¹⁵⁾。測定方法として、対象物の画像を撮影するのみという簡易な方法であることが特徴と言える。しかし、FGAJ の接着層における応力状態を調査したものがほとんどない。

本研究では、異なる機械的性質を持つ接着剤を用いて様々な種類の単純重ね合わせ継手を作製した。そして、引張り荷重を加えることにより接着層における応力分布を DIC により計測を行った。また、有限要素解析モデルを作成した後、解析を行った。最後に、実験値と解析して得られた値を比較することによって接着剤の機械的性質と応力集中度合いを関連付けた。

第2章 接着継手特性に及ぼす接着剤特性の実験的検討

2-1 接着剤の機械的性質

2-1-1 試験片

接着剤が硬化した時の機械的性質が接着継手の特性にどのように影響を及ぼすのかを調査した。接着剤が硬化した時の弾性的性質（ヤング率やポアソン比）や解析で必要となる降伏強度と破断引張強度，破断時のひずみなど強度特性を以下のように調査した。

本研究では，接着剤として表1で示したAraldite® 2015(以下では2015)を用いた。主剤と硬化剤の比は重量比である。さらに，硬化後における接着剤の特性を変化させるために2015に中空高分子であるマイクロバルーン(Micro Balloon, 以下ではMB) MFL-HD60CA(松本油脂製薬株式会社)を表2で示す重量比で混合した。MBは中空であるため，軽量であるという特長を持つ。さらに，泡状のマイクロ構造を持つため，高圧縮強度や形状安定性，低い吸湿性を有する⁽¹⁶⁾。

接着剤およびMBの重量は0.0001g単位で測定し，混合は攪拌機 MICROSTAR 7.5 control (IKA)を用いて、次のように行った。

- ・主剤にMBを加えて，600rpmで5分間混合
- ・主剤+MBに硬化剤を加えて300rpmで5分間混合
- ・以上のように混合したものを10分間真空脱泡

なお，MB無しの場合は本剤と硬化剤の混合と真空脱泡を同じ条件で行った。上記のように接着剤を混合した後，以下の図4に示す寸法に切り抜いた厚さ2mmのテフロンシートに流し込んだ。

表1 使用した接着剤

	主剤	硬化剤	本剤：硬化剤
2015	A	B	1：1

表2 MBの重量比

試験片名称	MBの重量比(%)
MB 0w%	0
MB 0.25w%	0.25
MB 0.5w%	0.5

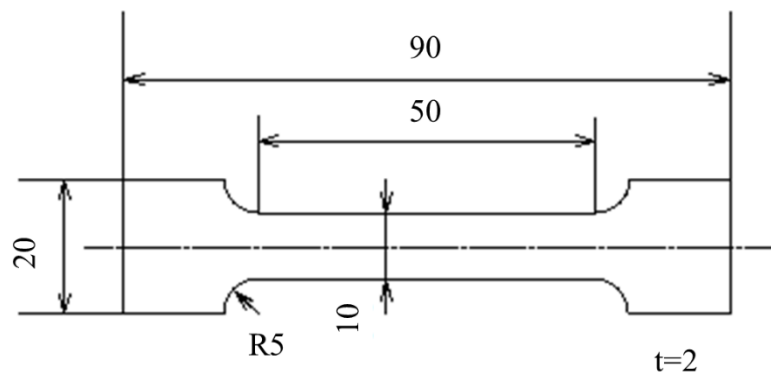


図4 試験片の寸法

流し込んだ後、70℃の環境下で1時間後硬化を行った。炉内の温度が室温に戻るまで炉冷した。それぞれの接着剤において6本ずつ試験片を作製した。

2-1-2 引張試験

引張強度を調べるために、2-1-1で作製した試験片を精密万能試験機（AG100kNG，島津製作所）により、変位速度 0.5 mm/min で破断するまで引張試験を行った。それぞれの接着剤において3本ずつの試験片で行った結果を荷重変位線図として、図5に示す。図6は図5により得られた応力ひずみ線図を示している。ひずみは試験片の伸びを試験開始時にノギスにより測定した試験機のチャック間距離で除したものである。この結果より、MBの重量比が増加するにつれて引張破断強度 σ_f は 15.9MPa から 11.3MPa に低下することが分かった。一方、引張破断ひずみ ε_f は MB の重量比が増加するにつれて 0.0385 から 0.0603 に増加していることが分かった。この時に得られた MB の重量比における σ_f と ε_f の一覧を表3に示す。これらの結果より MB の重量比が増加すると、接着剤が高延性化していることが考えられる。また、3章の解析に必要な各接着剤の降伏強度は図6の結果を用いて、それぞれ 9.85MPa, 8.51MPa, 6.15MPa とした。

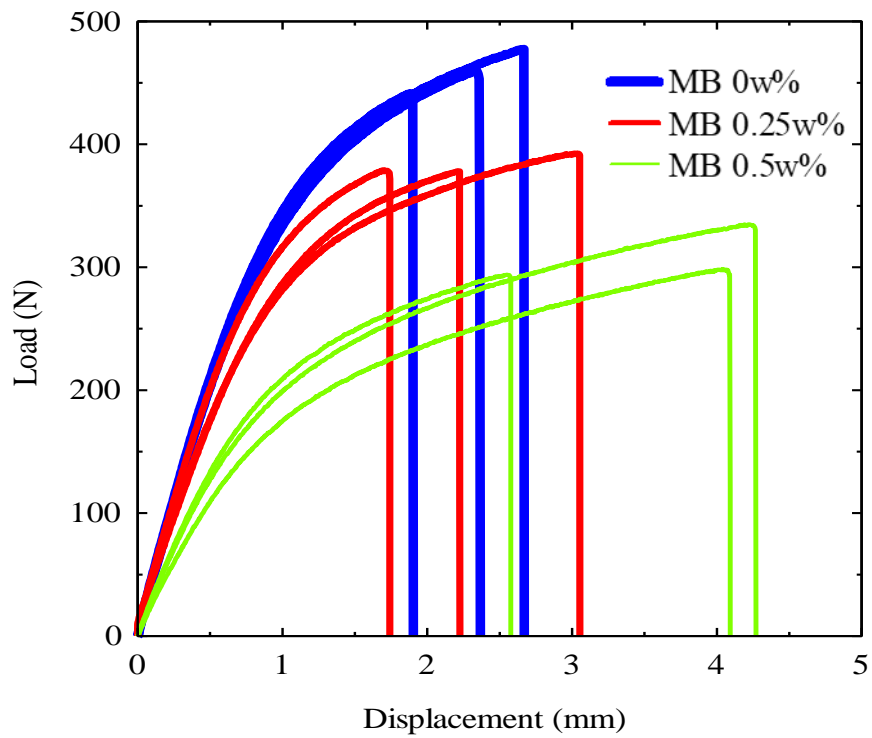


図5 使用した接着剤の荷重変位線図

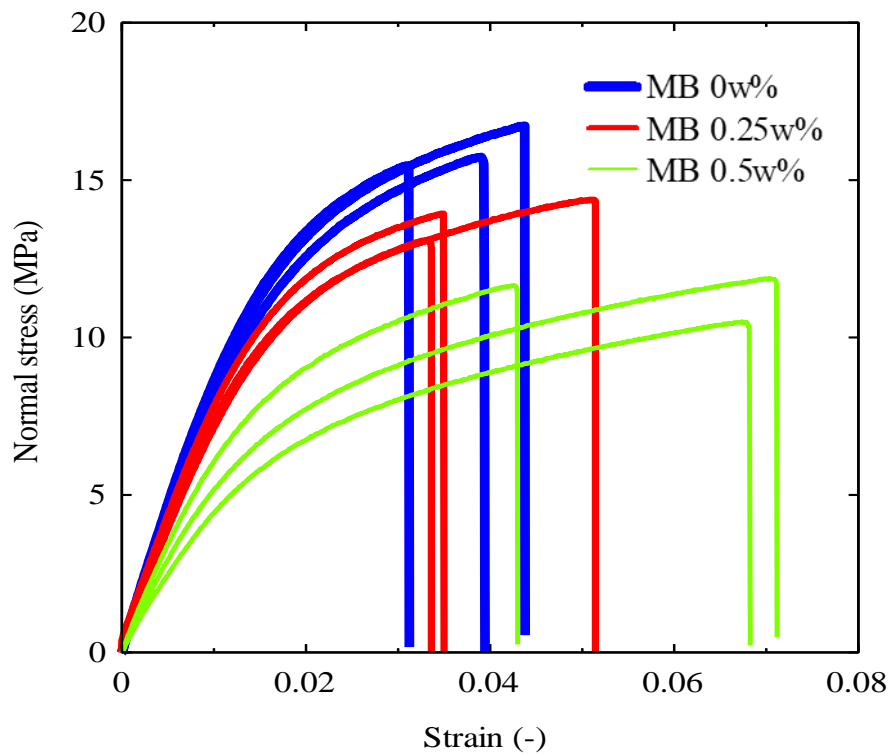


図6 使用した接着剤の応力ひずみ線図

表 3 各接着剤における破断強度と破断ひずみ

試験片番号	MB 0w%		MB 0.25w%		MB 0.5w%	
	σ_f (MPa)	ε_f	σ_f (MPa)	ε_f	σ_f (MPa)	ε_f
1	15.52	0.03931	14.38	0.05144	11.88	0.07041
2	15.37	0.03165	13.08	0.03362	10.50	0.06739
3	16.73	0.04444	13.94	0.03498	11.66	0.04299
平均	15.9	0.0385	13.8	0.0400	11.3	0.0603
偏差	0.61	0.00526	0.538	0.00810	0.604	0.0122

ヤング率とポアソン比を得るために、別の引張試験を行った。図 5 を参考に負荷する荷重が弾性域内にあるように最大荷重で 100N と決定した。作製した試験片の中心部両面に図 7 のようにゲージ長 5mm のひずみゲージを長手方向とそれに垂直な方向に張り、試験機にセットした。そして、0.5mm/min の変位速度で荷重が 100N になるまで引張試験を行い、縦ひずみと横ひずみを測定した。それぞれの接着剤において試験片 3 本ずつ行った。表 4 には、各接着剤において測定したヤング率ならびにポアソン比をまとめて示した。この結果より、MB の重量比が増加するにつれて、ヤング率は 1.71GPa から 1.46GPa に減少することが分かった。この時、表 4 に示されている赤い数字のように各接着剤における他の 2 本分のヤング率と比べて 100MPa 以上小さいまたは大きいものは使用しなかった。ポアソン比は MB の重量比による傾向が見られなかった。

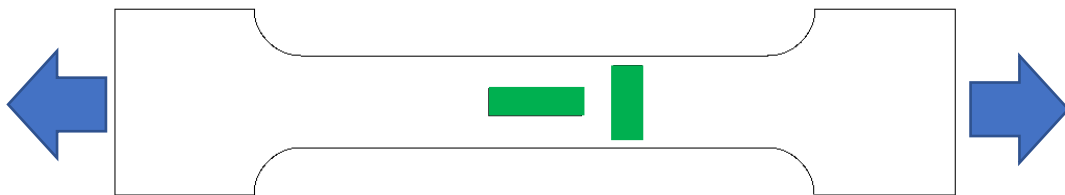


図 7 荷重方向とひずみゲージの関係

表 4 各接着剤におけるヤング率とポアソン比

試験片番号	MB 0w%		MB 0.25w%		MB 0.5w%	
	E (MPa)	ν	E (MPa)	ν	E (MPa)	ν
1	1555	0.346	1718	0.374	1479	0.357
2	1736	0.323	1590	0.363	1639	0.349
3	1688	0.376	1593	0.395	1446	0.339
平均	1712	0.35	1592	0.38	1463	0.35
偏差	24	0.022	2	0.013	17	0.0064

2-2 エネルギー解法率の測定

2-2-1 試験片の作製

3章で Cohesive zone model(CZM)を用いた解析を行うために、接着剤の図 8(a)のような引張形式であるモード I 及び図 8(b)のようなせん断形式であるモード II のエネルギー解法率を計測した。CZM については 3 章にて示す。試験片のために使用した接着剤を混合する方法は 2-1-1 で行った方法と同一のものを使用した。図 9 はモード I のエネルギー解法率を計測するための Double Cantilever Beam (DCB) 試験片、図 10 はモード II を計測するための End loaded split (ELS) 試験片の寸法を示している。DCB 試験片の予き裂は約 55mm、ELS 試験片の予き裂は約 30mm になるようにした。どちらの試験片も被着体はアルミニウム合金 A2017 を使用した。

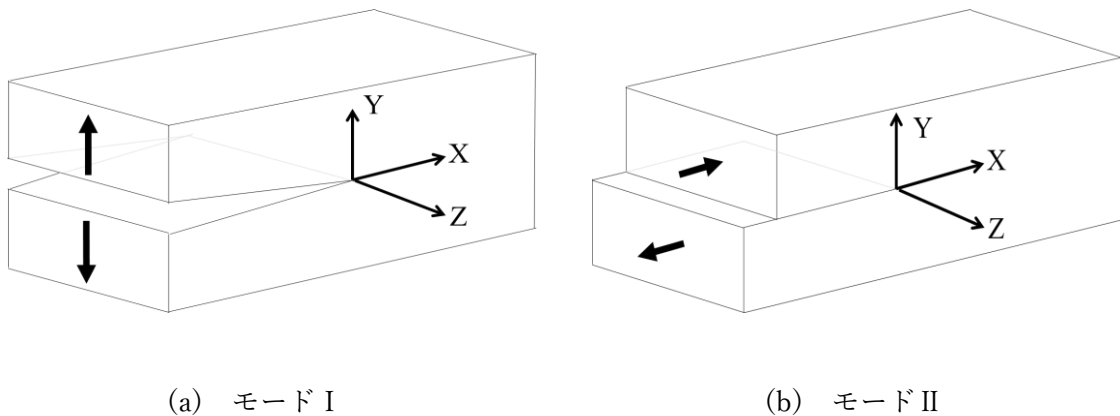


図 8 モードごとの変形形式

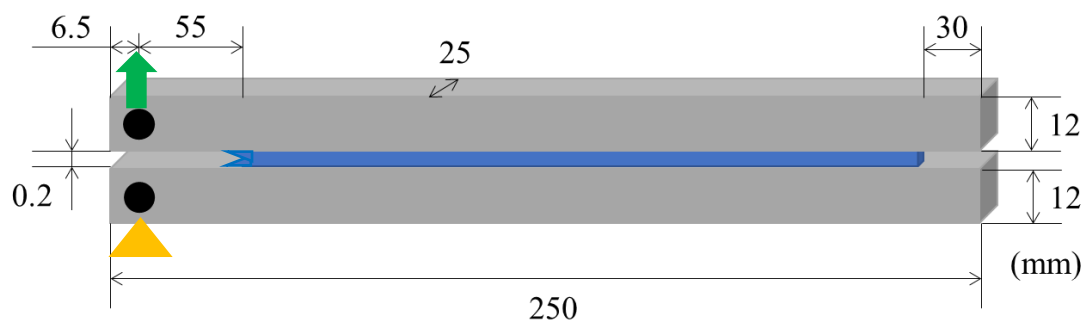


図9 DCB 試験片の寸法ならびに拘束条件

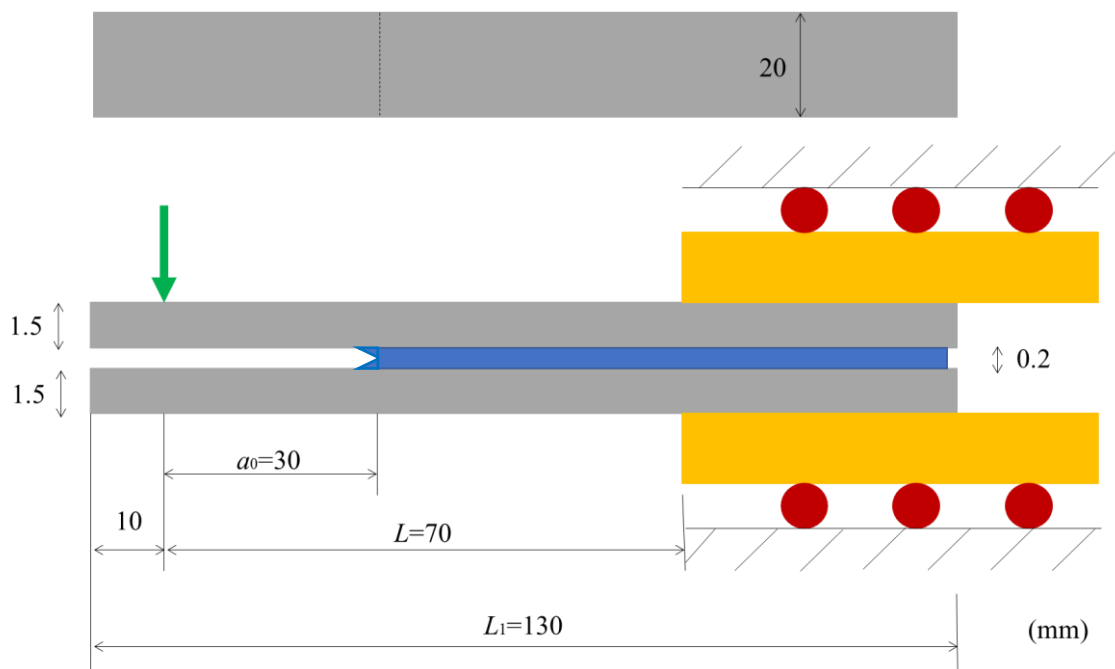


図10 ELS 試験片の寸法ならびに拘束条件

2-2-2 エネルギー解法率の計算

最初に、2-2-1 で示した試験片に荷重を加えることにより、荷重と変位およびき裂長さ a の関係を調査した。各接着剤につき、3本のDCB試験片を変位速度 0.1mm/min で図9に示す矢印方向に引張試験した時の荷重とクロスヘッド変位の関係を図11に示す。荷重とクロスヘッド変位の関係はき裂長さ a が接着長さ(約 213.5mm)に達するまで行った。図11よりそれぞれの接着剤において、荷重が一度最大になると破断するまで徐々に低下する傾向が見られた。また、各接着剤における荷重が最大になる時の変位はそれぞれ 0.849mm 、 1.02mm 、 1.34mm であり、破断変位はそれぞれ 4.00mm 、

4.47mm, 5.58mm と MB の重量比が増加するにつれて, 増加する傾向が見られた. しかし, 平均最大荷重は 0w%の時に 458N, 0.25w%の時に 617N, 0.5w%の時に 568N と MB が 0.25w%において最大になることが分かった.

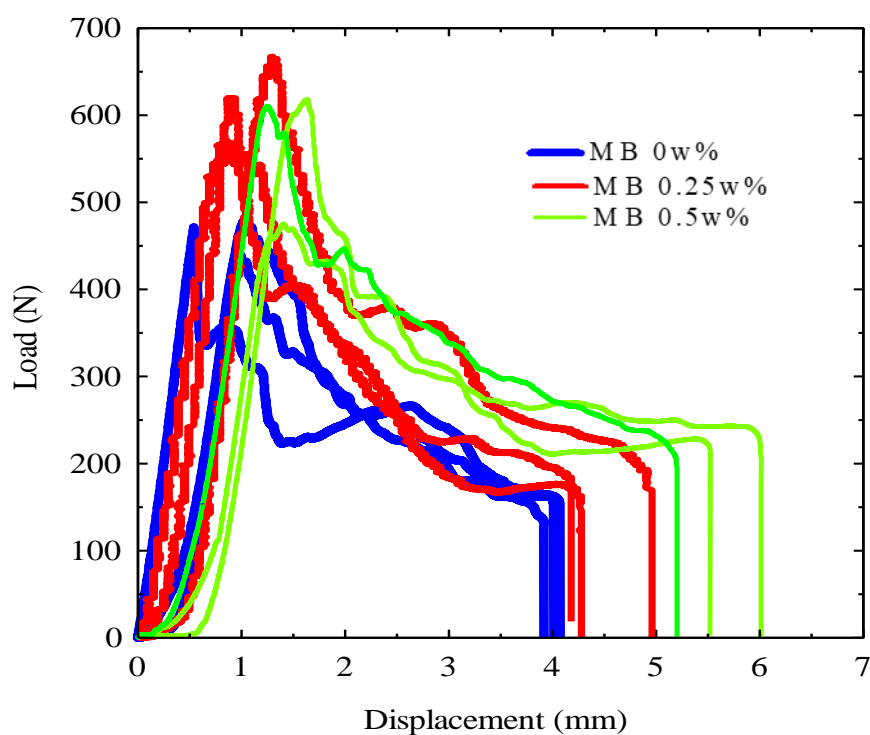


図 11 DCB 試験片の荷重変位線図

2-2-1 で作製した各接着剤につき, 3 本の ELS 試験片に対して, 変位を手動で与えることにより, 図 10 で示す矢印方向に荷重を加えた時の荷重とクロスヘッド変位の関係を図 12 に示す. この時, 荷重と変位の関係はき裂長さ $a \cong 70\text{mm}$ になるまで取得した. この結果より, MB の重量比が増加するにつれて, 荷重の最大値とその時の変位が増加する傾向が見られた. さらに, き裂長さ $a \cong 70\text{mm}$ になる時の変位も増加する傾向が見られた. また, 得られた平均初期コンプライアンスは MB 0w%が 0.0910, MB 0.25w%が 0.0663, MB 0.5w%が 0.0871 と MB 0.25w%の時に最小になることが分かった.

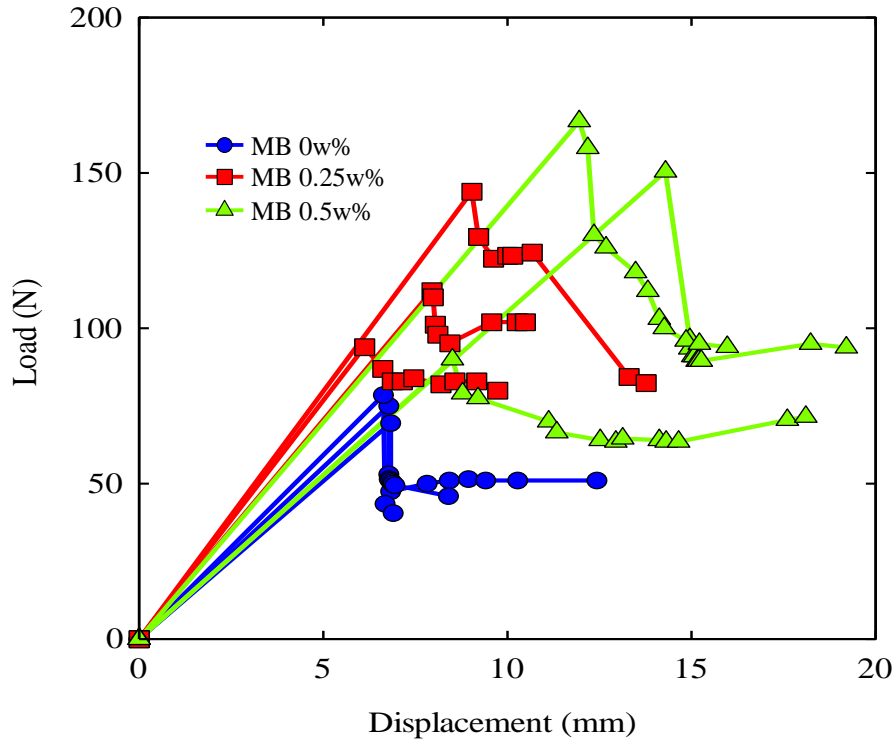


図 12 ELS 試験による荷重と変位の関係

試験片に荷重を加えた時の結果を利用し、モード I の臨界エネルギー解法率 G_{Ic} とモード II の臨界エネルギー解法率 G_{IIc} を求めた。モード I の臨界エネルギー解法率 G_{Ic} を得る従来の方法は多くの場合、コンプライアンス測定またははり理論に基づいている。本研究では、Compliance Calibration Method(CCM)と Corrected Beam Theory(CBT)を用いた⁽¹⁷⁾。CCM は Irwin-Kies の式である式より G_I を得ることが出来る。

$$G_I = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (1)$$

P は荷重、 B は試験片の幅、コンプライアンス C は $C = \delta/P$ を示している。 C をき裂長さ a における 3 次の多項式 ($C = C_1 a^3 + C_2 a^2 + C_3 a + C_4$) で近似すると

$$G_I = \frac{P^2}{2B} (3C_1 a^2 + 2C_2 a + C_3) \quad (2)$$

と導出される。

CBT は式 3 を用いることにより、 G_I を求めることが出来る。

$$G_I = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)} \quad (3)$$

ここで、 $|\Delta|$ はき裂先端におけるき裂長さ補正を示している。梁理論を使用することにより、補正したき裂長さとコンプライアンスの関係は

$$C = \frac{8(a + |\Delta|)^3}{E_L B h^3} \quad (4)$$

により示される。さらに式 4 を展開すると

$$a + |\Delta| = \frac{h(CBE_L)^{\frac{1}{3}}}{2} \quad (5)$$

となる。ここで、 E_L は被着体の長手方向におけるヤング率を示している⁽¹⁷⁾。

それぞれの試験片における G_{Ic} は図 13 で示すような R 曲線が停滞した領域における平均値とした。停滞領域が無い場合は、全区間の平均値とした。

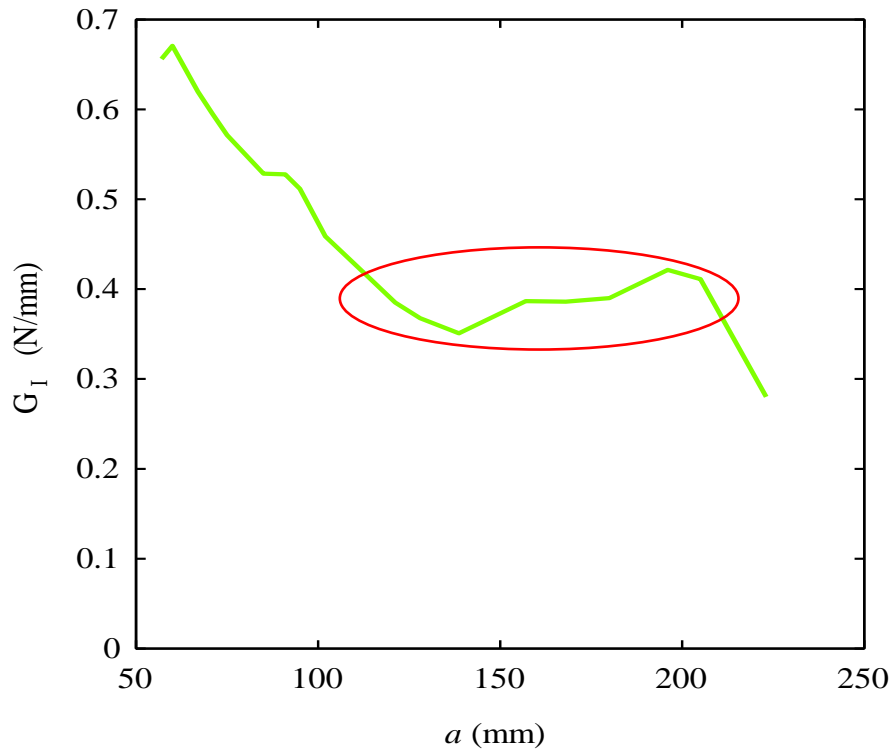
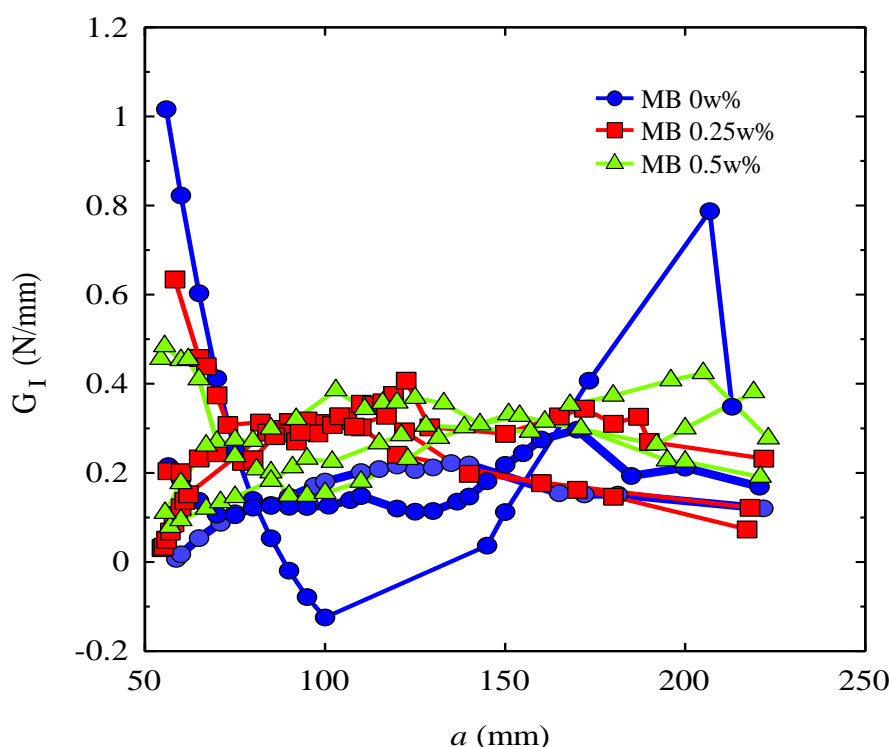


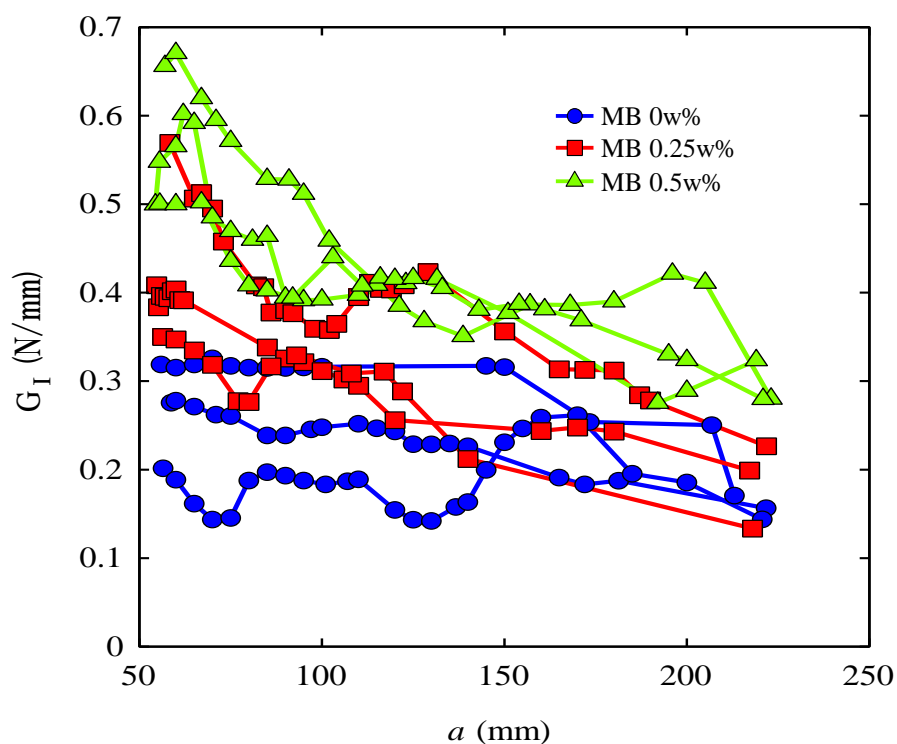
図 13 モード I のエネルギー解放率の R 曲線例

図 14 には、各接着剤におけるモード I のエネルギー解法率の R 曲線を示している。この結果より、MB の重量比が増加するにつれて、 G_I の値は増加する傾向が見られた。図 14(a) の結果において、MB 0w% 試験片の内 1 本が乱れた R 曲線を示していた。これは、接着層におけるき裂長さの測定が適切ではなかった可能性がある。図 14(b) より、CBT の場合、 a が 50mm 付近の時に G_I は最大になる傾向が見られた。この傾向は図 14(a) で示されている a が増加するにつれて、 G_I が増加するという傾向と異なることが分かった。

また、図 14 より得られた各接着剤の試験片における G_{Ic} の結果と平均値、偏差を表に示している。この表 5 より、MB の重量比が増加するにつれて、 G_{Ic} の平均値が増加していることが分かった。さらに、CBT の結果は CCM の結果よりも平均 10.6% 大きいことが分かった。3 章の CZM では、CBT の結果を使用した。なぜなら、解析的に CBT による計算方法で求めたエネルギー解法率を入力した時、出力として得られるエネルギー解法率との誤差がより小さいことが示されているからである⁽¹⁷⁾。



(a) CCM による R 曲線



(b) CBT による R 曲線

図 14 各接着剤におけるモード I のエネルギー解法率の R 曲線

表 5 各接着剤における G_{Ic} 一覧

試験片番号	MB 0w%		MB 0.25w%		MB 0.5w%	
	CCM	CBT	CCM	CBT	CCM	CBT
1	0.3134	0.3172	0.3106	0.3964	0.4517	0.4644
2	0.2123	0.2550	0.3244	0.3913	0.4016	0.3897
3	0.1631	0.1860	0.3001	0.3145	0.3565	0.4046
平均	0.230	0.253	0.312	0.367	0.403	0.420
偏差	0.0626	0.0536	0.00993	0.0375	0.0389	0.0323

次に、 G_{IIc} の算出を行った。本研究では、モード I の場合と同じ CCM と CBT、そして Compliance Based Beam Method (CBBM) を用いた。CCM についてはモード I と全く同じ方法を用いたが、CBT は以下のような異なる計算式を用いた。本研究の試験方法である ELS の場合、

$$G_{II} = \frac{9P^2 \left(a + \left| \Delta_{II} \right| \right)^2}{4B^2 h^3 E_L} \quad (6)$$

を用いることで G_{II} が求められる。ここで、 $\Delta_{II} = 0.49 \Delta_I$ であり、

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E_L}{11G_L} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

である。 G_L は被着体の長さ方向における横弾性係数である。また Γ は

$$\Gamma = 1.18 \frac{E_L}{G_L} \quad (8)$$

で求められる。

最後に、CBBM は

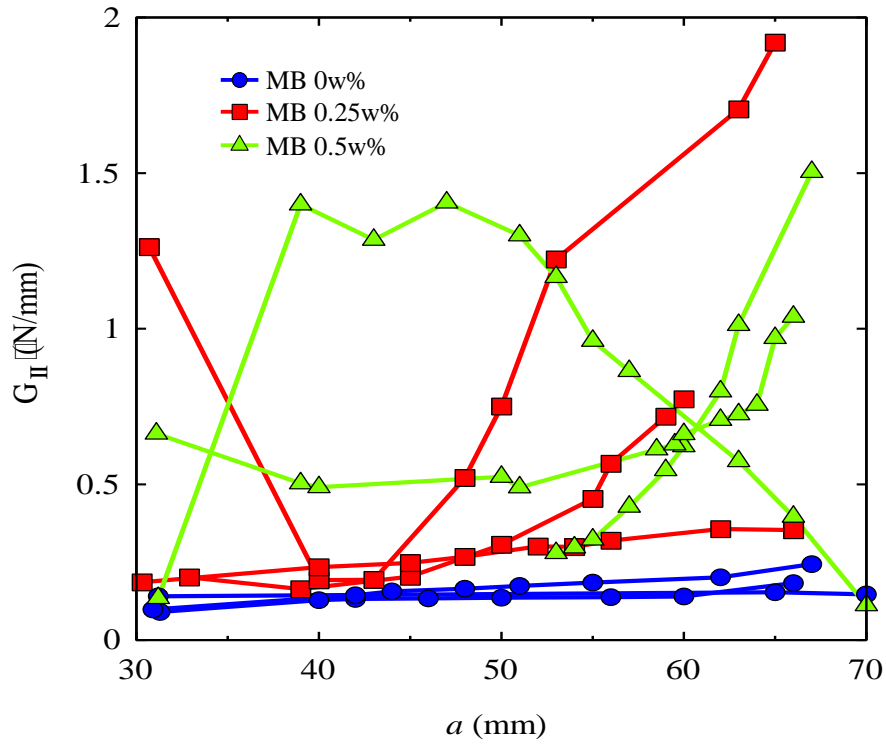
$$G_{II} = \frac{9P^2 a_e^2}{4B^2 h^3 E_L} \quad (9)$$

を用いることで G_{II} が求められる。ここで、 a_e は

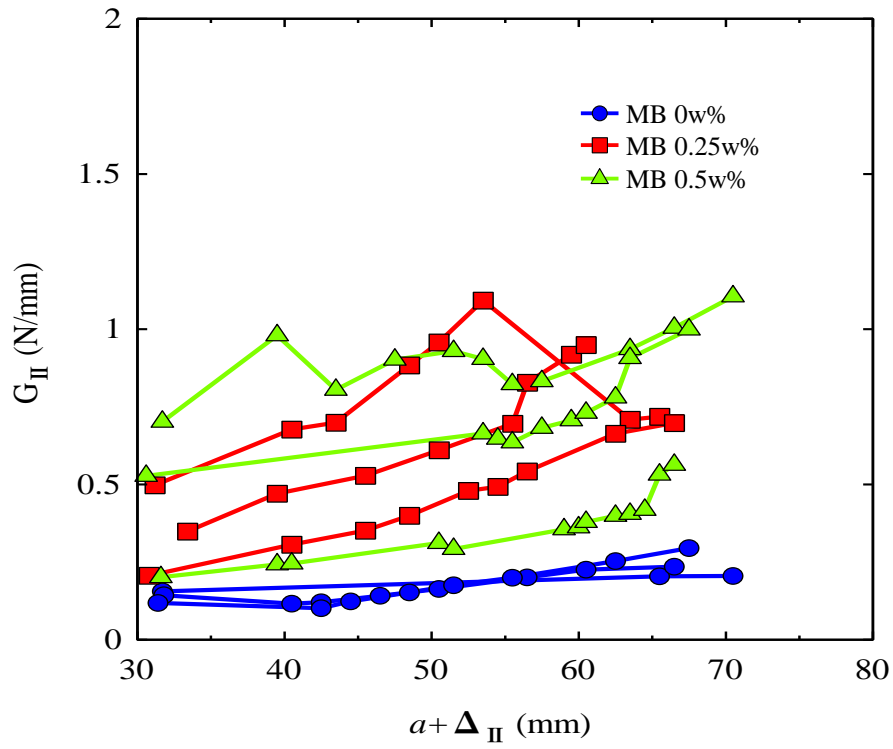
$$a_e = \left[(C - C_0) \frac{2Bh^2 E_L}{3} + a_0^3 \right]^{1/3} \quad (10)$$

で求めることができる⁽¹⁸⁾。ここで、 C_0 は初期コンプライアンスであり、最大荷重時のコンプライアンスを用いた。

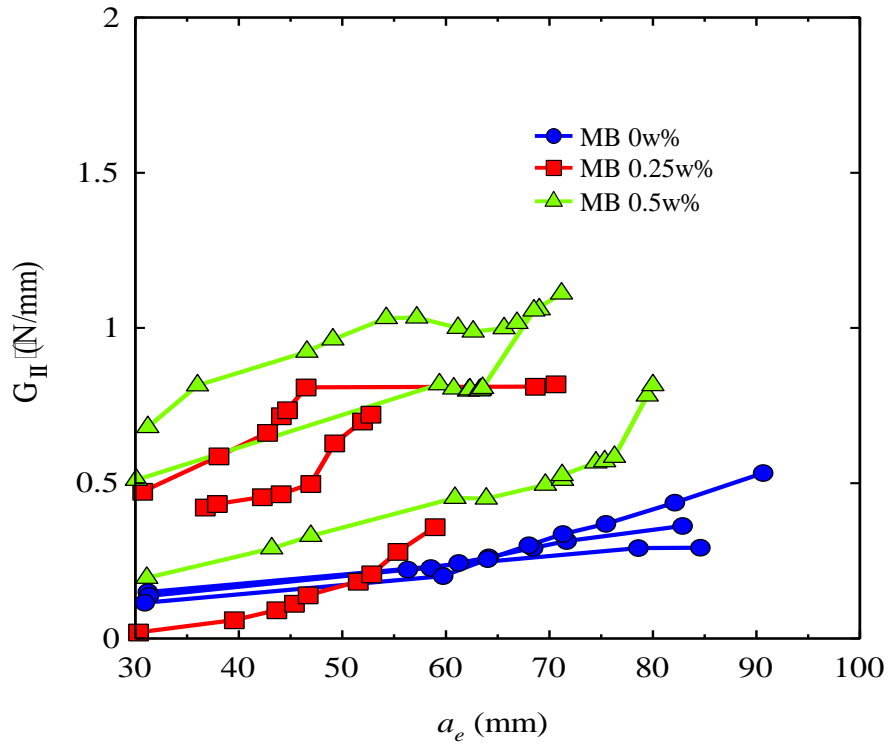
図 15 は各接着剤におけるモード II のエネルギー解法率の R 曲線を示している。この結果より、全ての接着剤と G_{II} の計算方法において、 a (補正したものも含めて) が増加するにつれて G_{II} の値も増加する傾向が見られた。さらに、MB の重量比が増加するにつれて、各計算方法により求めた G_{II} の値も大きくなる傾向が見られた。



(a) CCM による R 曲線



(b) CBT による R 曲線



(c) CBBM による R 曲線

図 15 各接着剤におけるモード II のエネルギー解法率の R 曲線

次に、図 15 の結果を用いて、 G_{IIc} の算出を行った。 G_{IIc} は R 曲線の停滞領域または G_{II} が最大になる $a \cong 70\text{mm}$ である領域における G_{II} の平均とした。 G_{II} の分布が大きく乱れている場合は、全領域の平均値を G_{IIc} とした。これらの方法で求めた G_{IIc} の一覧を表 6 に示す。表 6 より、MB の重量比が増加するにつれて、 G_{IIc} の平均値が増加していることが分かった。また、各 MB の重量比間において、 G_{II} の計算方法による G_{IIc} の傾向は見られなかった。そこで、3 章の CZM 解析で使用する G_{IIc} の値は各計算方法で求めた G_{IIc} の平均値とした。求められた各 MB の重量比における G_{IIc} の平均値はそれぞれ 0.295, 0.710, 1.06 であった。

表 6 各接着剤における G_{IIc} 一覧

試験片番号	MB 0w%			MB 0.25w%			MB 0.5w%		
	CCM	CBT	CBBM	CCM	CBT	CBBM	CCM	CBT	CBBM
1	0.1469	0.2053	0.2927	0.7458	0.9338	0.7105	1.504	0.9992	1.111
2	0.2656	0.2356	0.3623	0.9711	0.8199	0.8130	1.311	1.106	1.060
3	0.3181	0.2954	0.5329	0.3551	0.6812	0.3589	1.039	0.5635	0.8158
平均	0.244	0.245	0.396	0.691	0.812	0.627	1.28	0.890	0.996
偏差	0.0716	0.0374	0.101	0.254	0.103	0.194	0.191	0.235	0.129

2-3 単純重ね合わせ継手の特性

2-3-1 試験片の作製

一般に、接着継手における剥離の強度は、使用する材料の組み合わせや荷重を負荷する方法、硬化温度などの接着条件により大きく変わる。よって、実験による評価を行う時、時間的や経済的に容易かつ実用的な剥離破壊基準を評価する方法が必要である⁽¹⁹⁾。そこで、本研究では、簡易な形状であるが、接着層に引張りや曲げなどの影響により複雑な応力分布を示す単純重ね合わせ継手（Single Lap Joints, 以下では SLJ とする）を使用した。試験片の寸法は図 16 と図 17 に示す。試験片は次のように作製した。

被着体のアルミニウム合金 A2017 は接着面を#500 のエメリー紙で長手方向に研磨し、アセトンを用いて脱脂を行った後、接着面にエポキシー（813, 三井化学株式会社）を塗布した。塗布した接着剤は 2-1-1 の方法で混合し、硬化させた。試験片は各接着剤を使用したものに加えて、図 18 のような接着層が傾斜化したものを 3 本ずつ作製した。傾斜化した接着層を持つ試験片は接着層を等分割したものとした。すなわち傾斜数が 3 の場合、傾斜部分の接着層長さは $1/3$ である。傾斜数 3 は手作業で接着層中心に MB 0w% を塗り、接着層端部に MB 0.5w% を塗ることにより、接着層を塗り分けた。

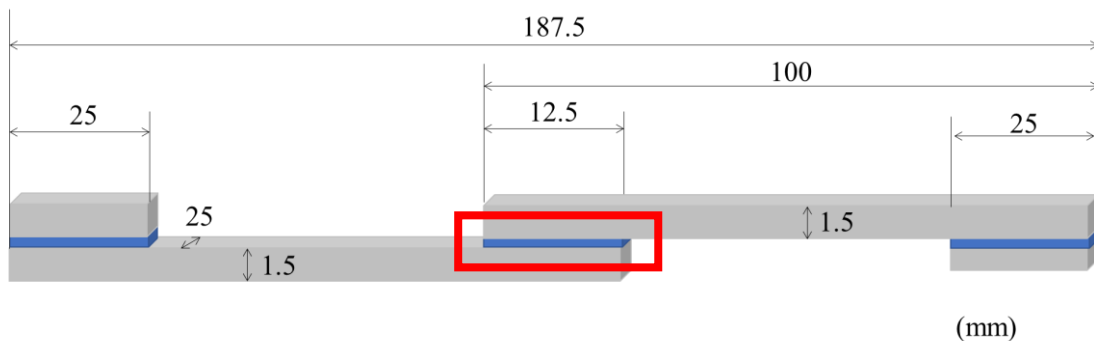


図 16 試験片の寸法

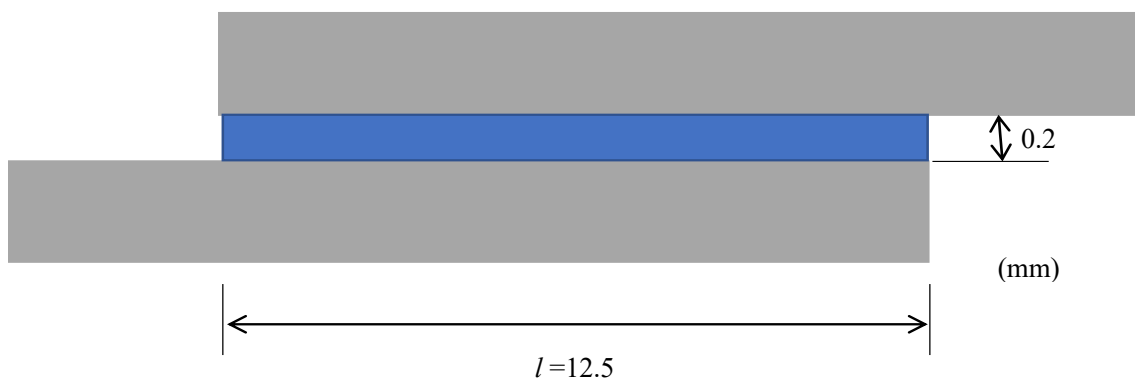


図 17 接着層の拡大図

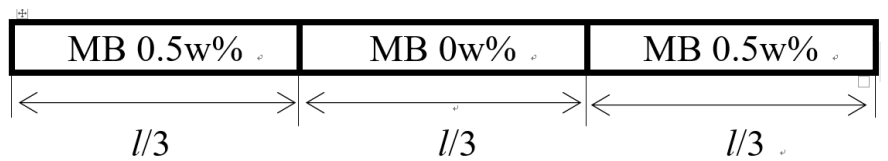


図 18 傾斜数 3 の接着層

2-3-2 引張試験

2-1-2 で使用した精密万能試験機を用いて、2-3-1 で作製した SLJ 試験片を 3 本ずつ変位速度 0.5mm/min で引張試験を行った。図 19 は SLJ 試験片を引張試験した時の荷重変位線図を示している。この時、変位は試験機のクロスヘッド変位とした。この結果より、破断荷重と破断変位ともに、MB の重量比が増加するにつれて、大きくなる傾向が見られた。この中で、MB 0.25w%の結果においてはせん断応力と変位ともに試験片間のバラつきが大きくなった。また、傾斜数 3 の試験片の内、1 本は MB 0w%と MB 0.5w%の結果の中間あたりを示した。残り 2 本は MB 0w%と MB 0.5w%の結果よりもせん断応力と変位ともに低い値を示した。しかし、傾斜数 3 の結果は MB 0w%や MB 0.5w%の結果と比べて、同じ変位における引張荷重が大きくなる傾向が見られた。

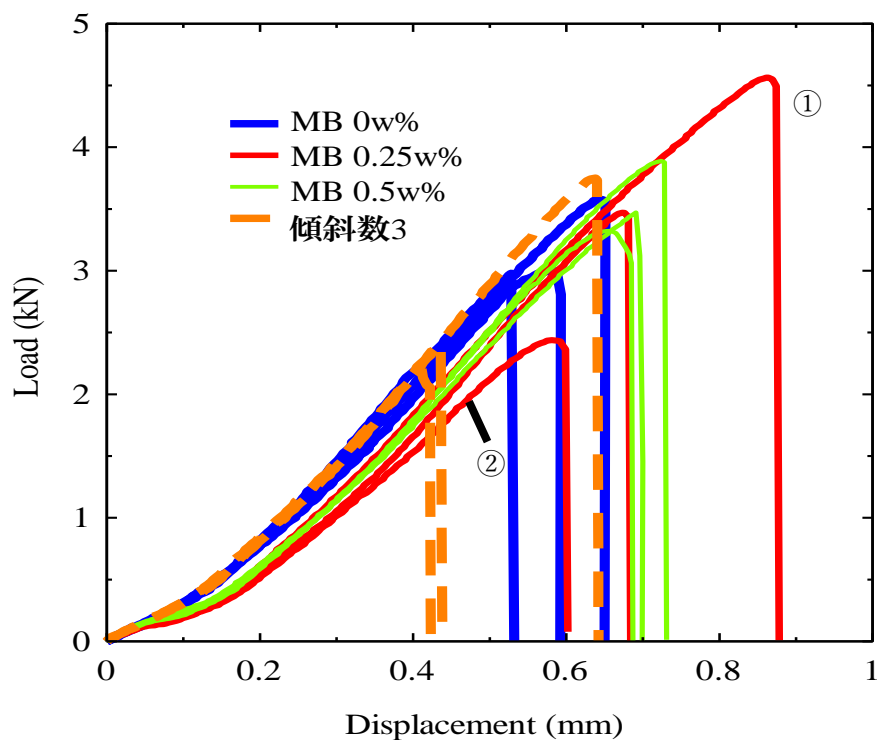


図 19 SLJ 試験片のせん断応力と変位

2-3-3 考察

2-3-2 に示したように、同じ接着剤を使用した試験片間で結果にバラツキが見られた。この理由として考えられることは、図 20 のように接着剤間で破壊する凝集破壊をしている領域の違いである。図 20(a)は破断荷重および破断変位が最大であった MB0.25w%試験片の断面であり、図 20(b)は破断荷重および破断変位が最小であった MB0.25w%試験片の断面である。凝集破壊領域は図 20(a)の方が広く、破断荷重および破断変位も大きいことから凝集破壊領域と破壊荷重および破断変位に関係性があると考えた。そこで、2-3-2 の結果を凝集破壊領域と結び付けて考えた。



図 20 SLJ 試験片の接着破面例

凝集破壊領域は次のように求めた。まず、図 21 のように SLJ 試験片の破断面を二値化した。次に、全面積 S_{total} と界面剥離領域 S_{inter} を求めた。この時、界面剥離領域は両面に存在するため、凝集破壊領域 S_{coh} は

$$S_{coh} = S_{total} - 2S_{inter} \quad (11)$$

で求められる。

図 22 は 2-3-2 で得られた破断荷重を接着面積で割り、求めた破断応力と S_{coh}/S_{total} の関係を示している。この結果より、推定せん断強度は MB 0w%が 16.3MPa、MB 0.25w%が 15.5MPa、MB 0.5w%が 13.7MPa と MB の重量比が増加するにつれて、減少していることが分かった。図 23 は破断変位と S_{coh}/S_{total} の関係を示している。この結果より、推定破断変位は MB 0w%が 1.15mm、MB 0.25w%が 0.876mm、MB 0.5w%が 0.743mm と MB の重量比が増加するにつれて、低下していることが分かった。これらの結果より、MB の重量比が増加するにつれて、SLJ のせん断強度ならびに破断変位は低下することが考えられる。さらに、傾斜数 3 の結果は推定せん断強度が 16.2MPa、推定破断変位が 0.878mm であるように、MB 0w%や MB 0.5w%の間の値を示すことが考えられる。第 3 章の CZM 解析に必要な各接着剤におけるせん断強度は上記で推定したせん断強度を使用した。



(a) SLJ 試験片の断面



(b)二値化画像

図 21 SLJ 試験片の二値化例

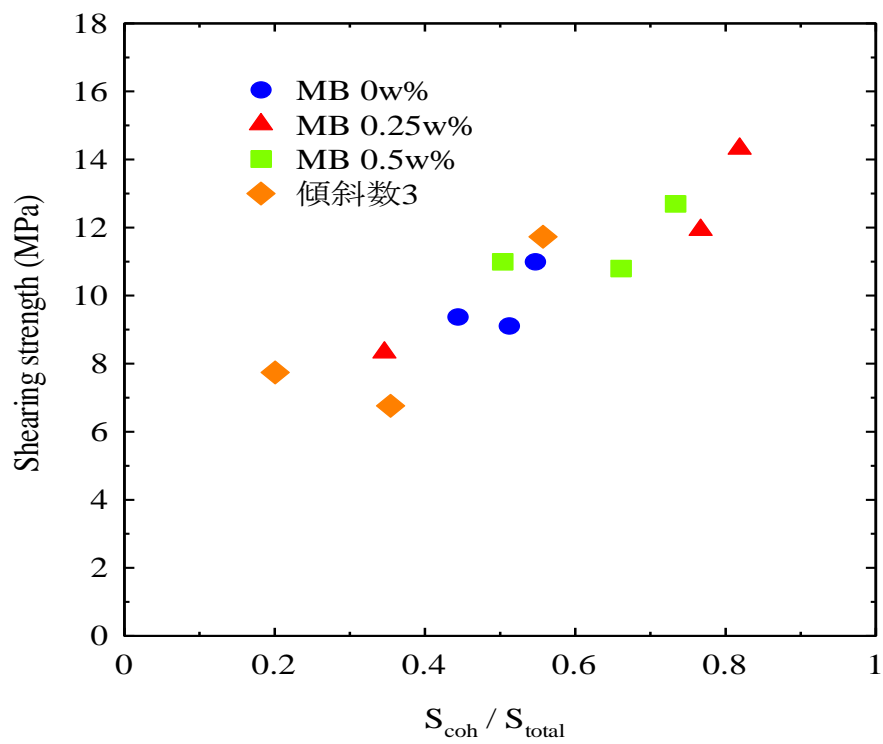


図 22 凝集破壊割合とせん断強度の関係ならびに近似式

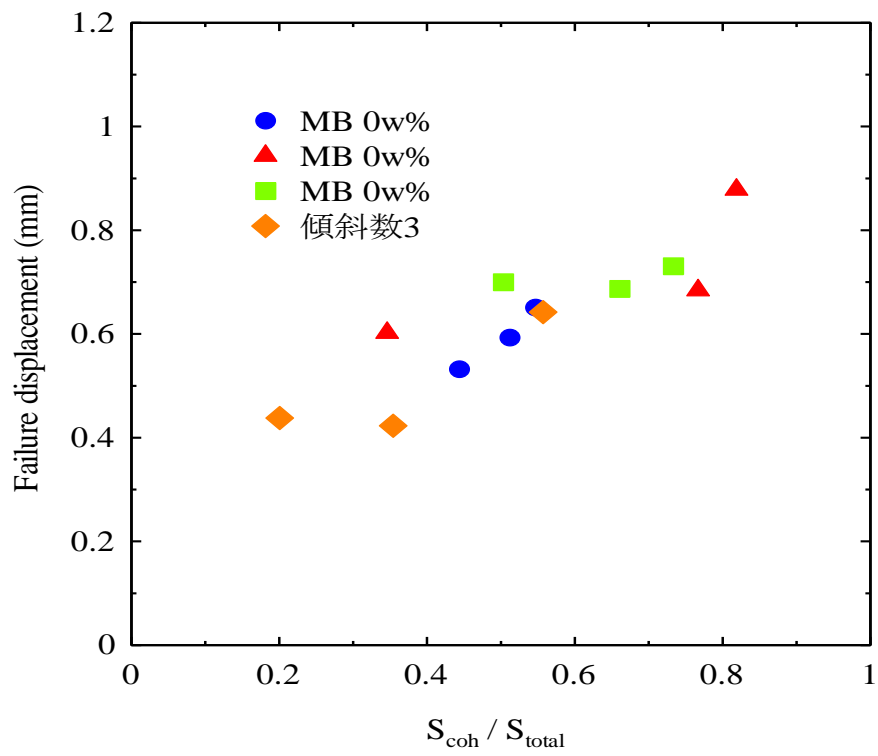
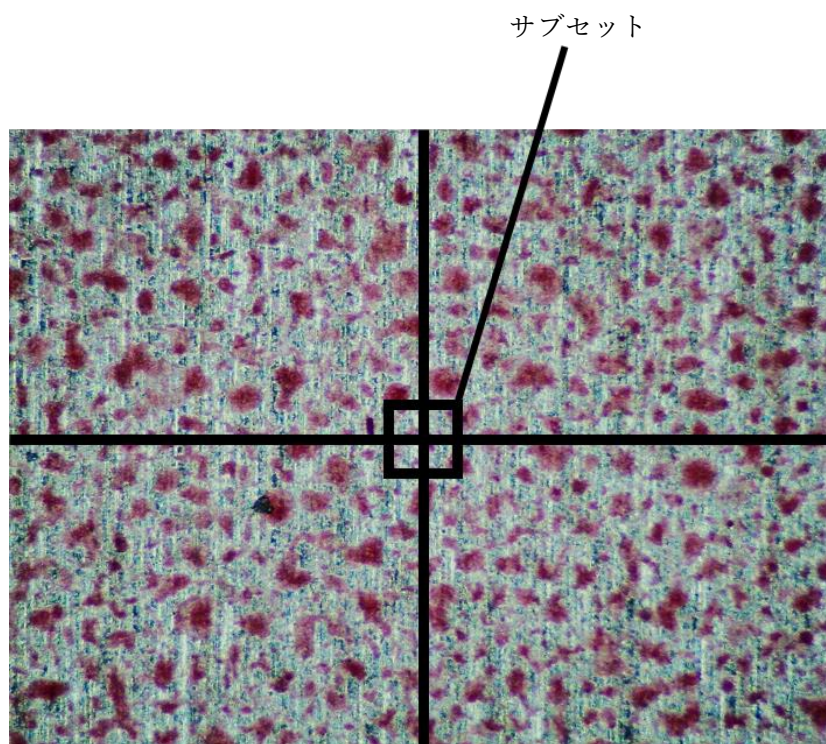


図 23 凝集破壊割合と破断変位の関係

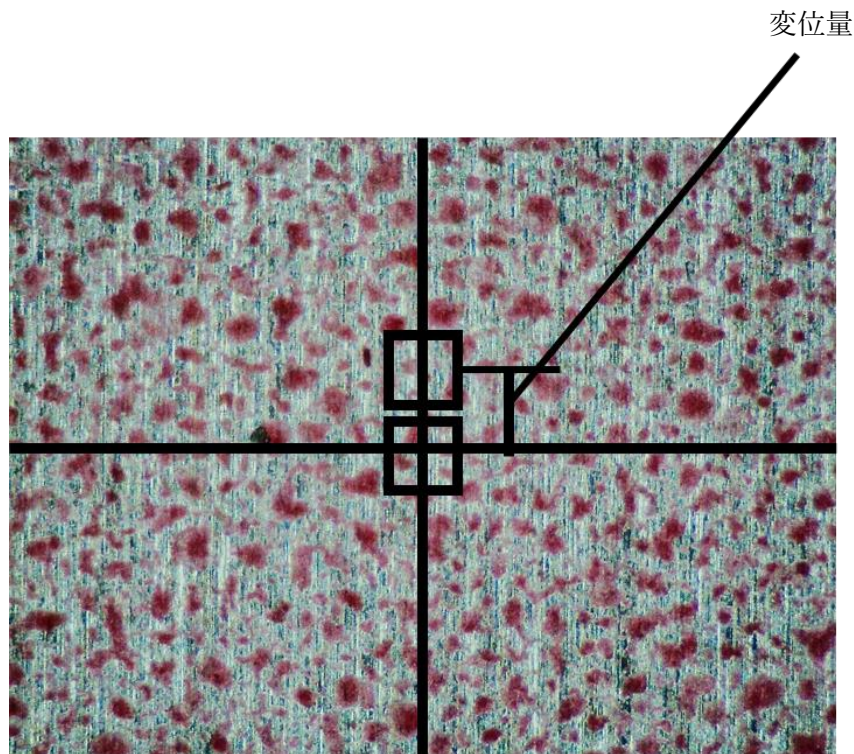
2-4 画像相関法による接着層の応力分布

2-4-1 画像相関法の原理⁽¹⁵⁾

画像相関法は変形前後の測定対象物表面を撮影したデジタル画像を数値解析することで、計測範囲の変位を求めることを可能にする方法である。その原理は変形前の画像において、1画素で表す任意の点を中心に図24(a)で示すような任意の領域であるサブセットを指定する。計測する対象物に変位を与えると、変形後の画像においてサブセットの位置が図24(b)のように変化する。変形後のサブセットは変形前のサブセットにおける輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを変形後の画像から数値解析により検索され、決定される。このように決定されたサブセットの中心点位置によって、変位方向と変位位置を算出する。この処理を全ての微小領域で繰り返すことにより、計測範囲の全領域における変位量を得ることが可能である。



(a)変形前



(b)変形後

図 24 変形前と変形後のデジタル画像

2-4-2 応力分布測定

2-4-1 で作製した試験片を用いて、画像相関法により接着層上の応力分布を計測した。画像相関法を行う際に、試験片の SLJ に図 25 のように黒く塗りつぶし、スプレーガン W-71 を用いて白塗料を塗布した。次に、図 26 のように SLJ に照明を当てながら $\times 0.7$ で荷重を加えていない状態 (0kN) と 0.5kN から 1.5kN の 0.5kN 間隔で荷重を加えた時の画像を得た。カメラは DS-2500 (株式会社佐藤商事) を使用した。0kN の画像を得た理由は 2-4-1 で示した変形前の画像として使用するためである。そして、得た画像をグレースケール化してから、解析ソフト Ncorr を用いて、図 27 のように MB 0.25w% の接着層における応力分布を得た。このようにして得た応力分布は Excel を用いて図 28 のように確認することも出来、データの両端を $X/l = \pm 0.5$ とした。図 25 の Excel シートに示されている結果は図 27 の左端におけるせん断ひずみ分布の結果である。この時、任意の X/l で得られるせん断ひずみ γ は赤線で囲まれているような縦列における平均値の絶対値を使用した。さらに、任意の X/l で得られるせん断応力 τ は 2-1 の結果より得られた各接着剤の二直線近似した応力ひずみ線図と

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (12)$$

によって，弾性域では

$$\tau = \begin{cases} 633.3\gamma & (\text{MB } 0\text{w}\%) \\ 576.1\gamma & (\text{MB } 0.25\text{w}\%) \\ 540.7\gamma & (\text{MB } 0.5\text{w}\%) \end{cases} \quad (13)$$

と求めた．また，塑性域（MB 0w%は $\gamma \geq 5.754 \times 10^{-3}$ ，MB 0.25w%は $\gamma \geq 5.352 \times 10^{-3}$ ，MB 0.5w%は $\gamma \geq 4.212 \times 10^{-3}$ ）では

$$\tau = \begin{cases} 3.64 + 68.54(\gamma - 5.754 \times 10^{-3}) & (\text{MB } 0\text{w}\%) \\ 3.083 + 55.32(\gamma - 5.352 \times 10^{-3}) & (\text{MB } 0.25\text{w}\%) \\ 2.27 + 34.16(\gamma - 4.212 \times 10^{-3}) & (\text{MB } 0.5\text{w}\%) \end{cases} \quad (14)$$

と求めた．さらに，応力集中係数 α は

$$\alpha = \frac{\tau}{\tau_0} \quad (15)$$

であり，負荷したせん断応力 τ_0 は

$$\tau_0 = \frac{F}{S} \quad (16)$$

である．ここで， S は接着面積である．せん断応力 τ と τ_0 の単位は MPa である．

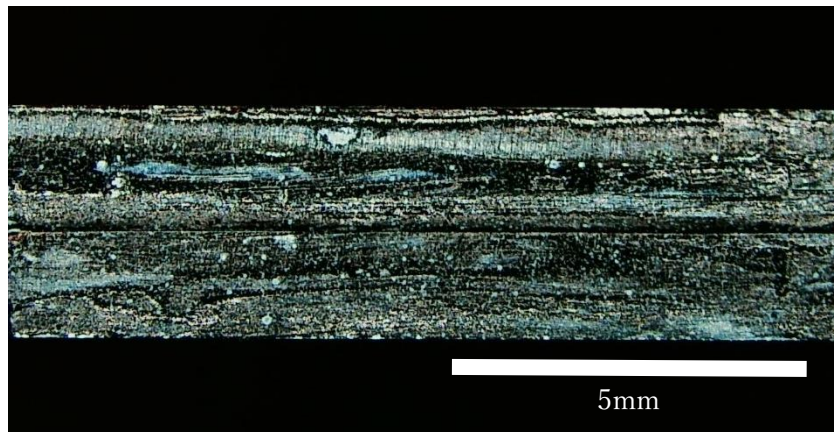


図 25 白塗料を塗布した SLJ の例

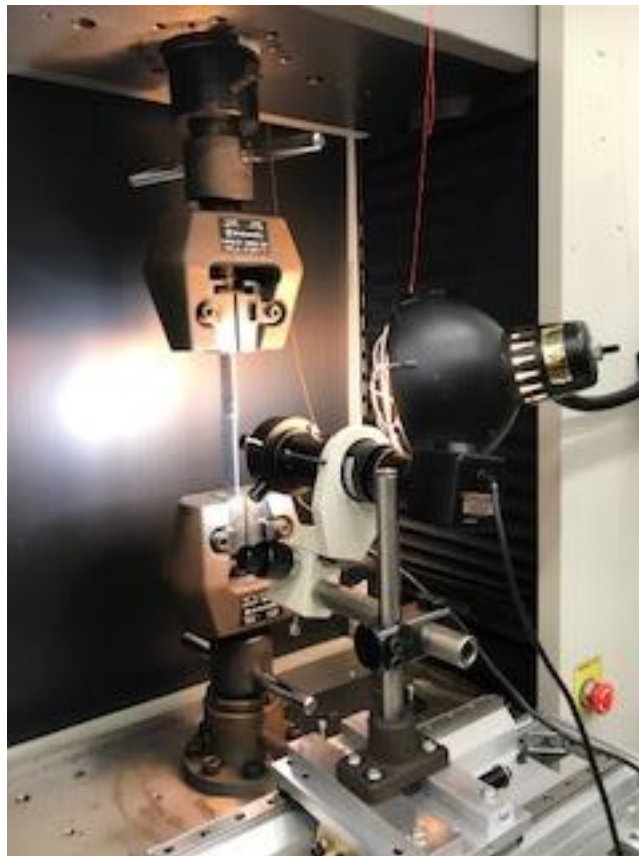


図 26 画像取得時の光景

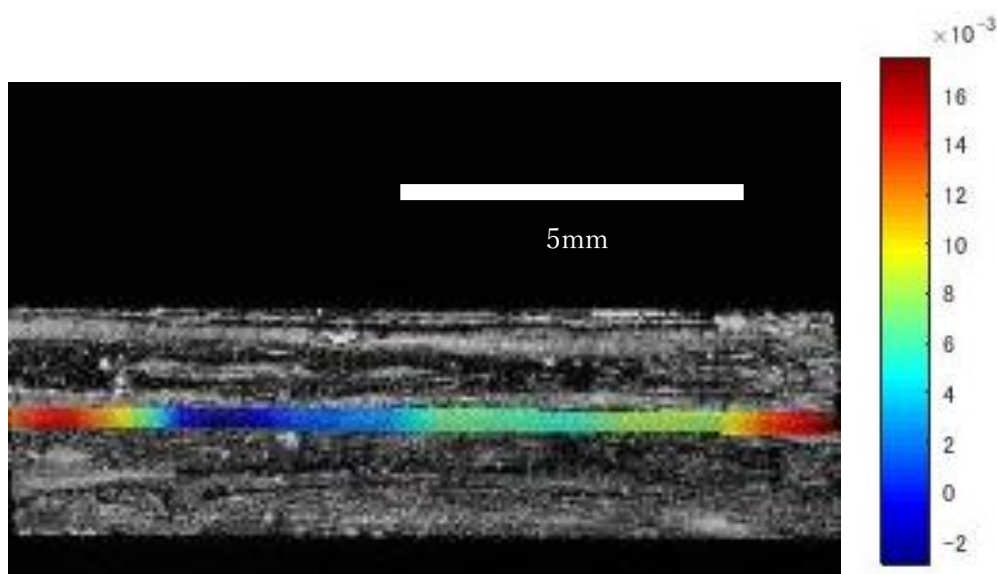


図 27 SLJ の接着層におけるせん断ひずみ分布の例

	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
		-0.5	-0.49539	-0.49078	-0.48618	-0.48157	-0.47696	-0.47235	-0.46774	-0.46313	-0.45853	-0.45392	-0.44931	-0.4447	-0.44009
γ		0.012559	0.012899	0.013187	0.013496	0.013808	0.013986	0.014323	0.014623	0.01486	0.015004	0.015196	0.015309	0.015419	0.015429
τ (MPa)		3.482005	3.500763	3.516691	3.533802	3.551086	3.560939	3.579545	3.596126	3.609279	3.617202	3.627864	3.634083	3.640198	3.64076
α		0.725418	0.729326	0.732644	0.736209	0.73981	0.741862	0.745739	0.749193	0.751933	0.753584	0.755805	0.757101	0.758374	0.758492
		0.012589	0.012934	0.013276	0.013654	0.013791	0.014097	0.014378	0.014649	0.014864	0.015025	0.015239	0.015346	0.015446	0.015386
		0.012509	0.012891	0.013157	0.013466	0.013796	0.013942	0.014271	0.01457	0.014829	0.014959	0.015171	0.015292	0.015396	0.015422
		0.012516	0.012837	0.013113	0.013404	0.013755	0.013898	0.014239	0.014558	0.014833	0.014956	0.01517	0.01528	0.015402	0.015447
		0.012537	0.012867	0.013134	0.013421	0.013787	0.013931	0.014288	0.014612	0.014873	0.014987	0.015186	0.015297	0.015426	0.01545
		0.012645	0.012965	0.013253	0.013534	0.013913	0.014064	0.014439	0.014724	0.014903	0.01509	0.015216	0.015329	0.015426	0.015443

図 28 接着層左端におけるせん断ひずみ分布を示す Excel シート例

図 29 は負荷荷重 F が 0.5kN である時、各接着剤で作製した SLJ の接着層における α の分布を示している。この結果より、接着層の端部($0.4 \leq |X/l| \leq 0.5$)における α の最大値は表 7 のように MB の重量比が増加するにつれて、低減していることが分かった。しかし、接着層全体において α の振れ幅が大きく、接着層の特性による傾向は分からなかった。

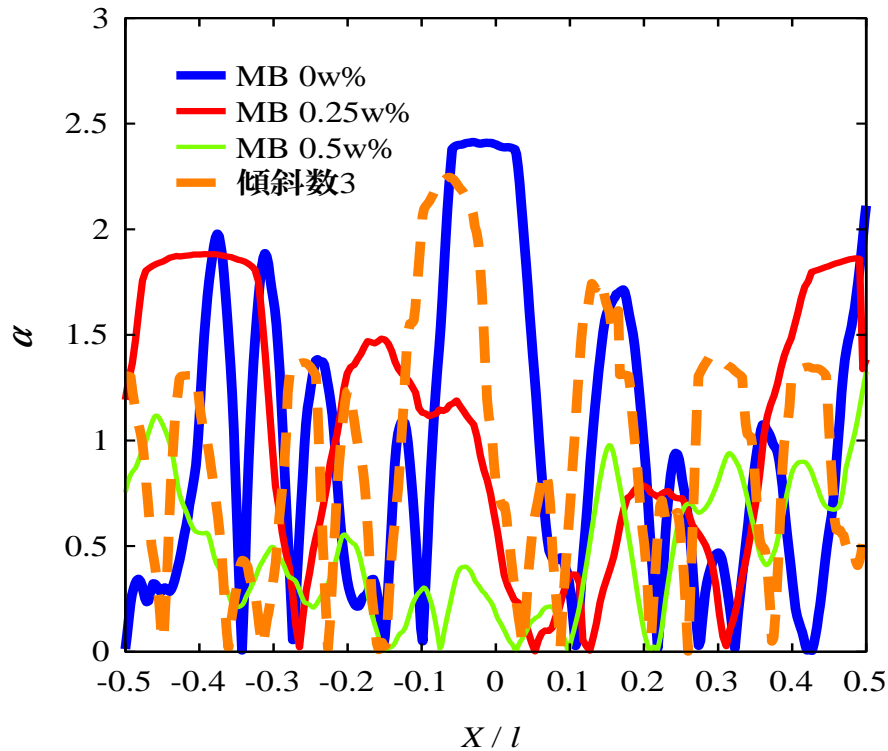
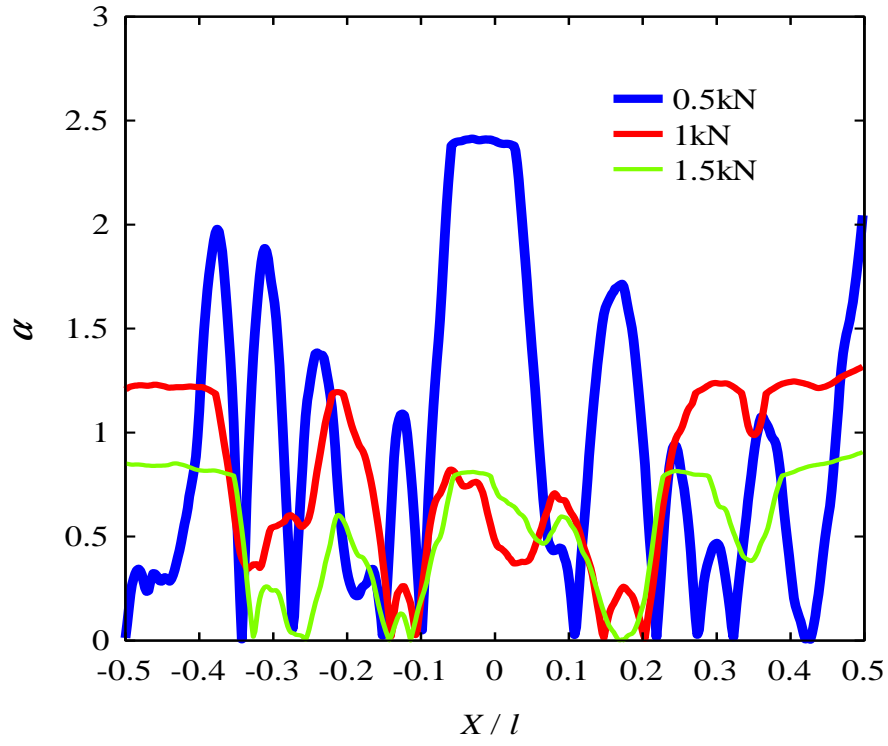


図 29 $F=0.5\text{kN}$ における接着層の α 分布

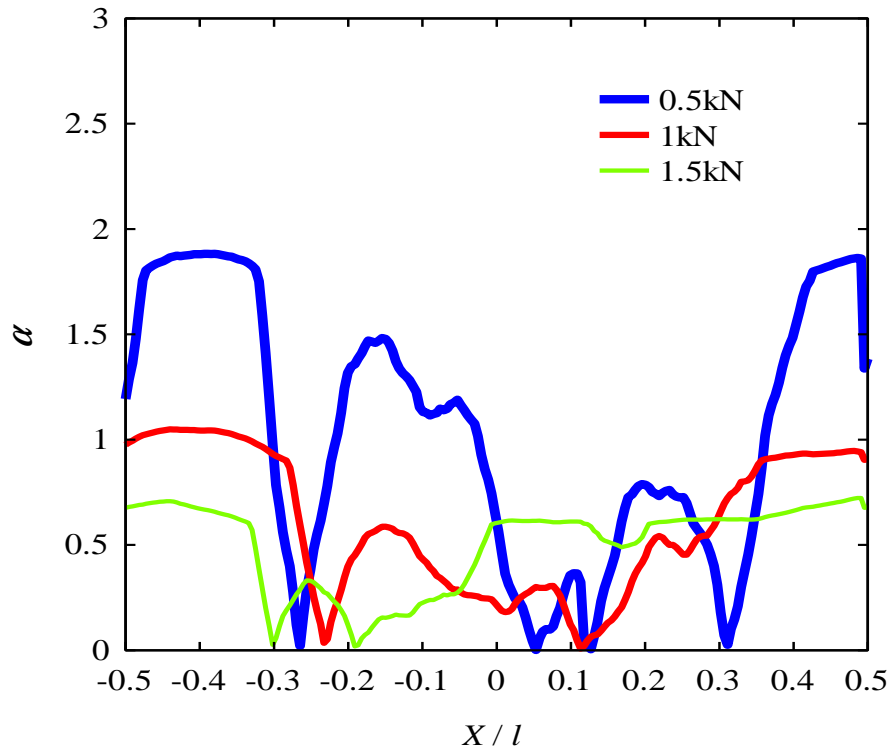
表 7 計測された接着層端部における最大応力集中係数

接着剤	最大応力集中係数
MB 0w%	2.11
MB 0.25w%	1.88
MB 0.5w%	1.33
傾斜数 3	1.40

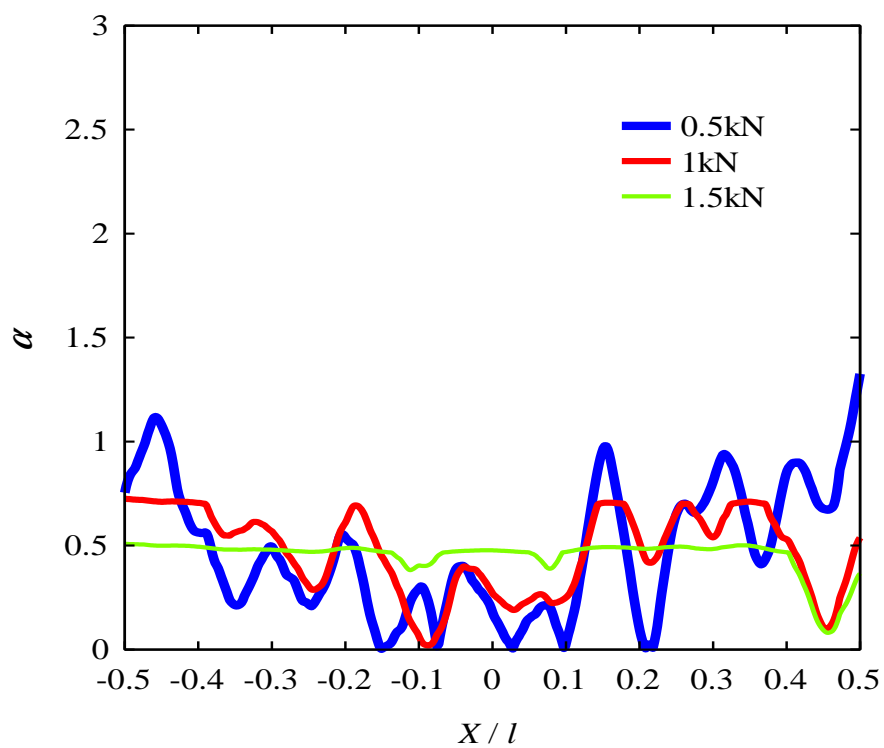
図 30 は負荷荷重 F を 0.5kN から 1.5kN に変化させた時、各接着剤および傾斜数 3 で作製した SLJ の接着層における α の分布を示している。これらの結果より、どの接着層においても接着層端部における α の最大値は負荷荷重が増加するにつれて、低減している傾向が見られた。図 30(b)と図 30(c)より、負荷荷重が増加するにつれて、接着層中心部 ($X/l=0$) における α が増加している傾向が見られた。しかし、その他の接着層では図 29 の結果と同様に α の振れ幅が大きく、接着層端部以外の領域における負荷荷重による影響が分からなかった。



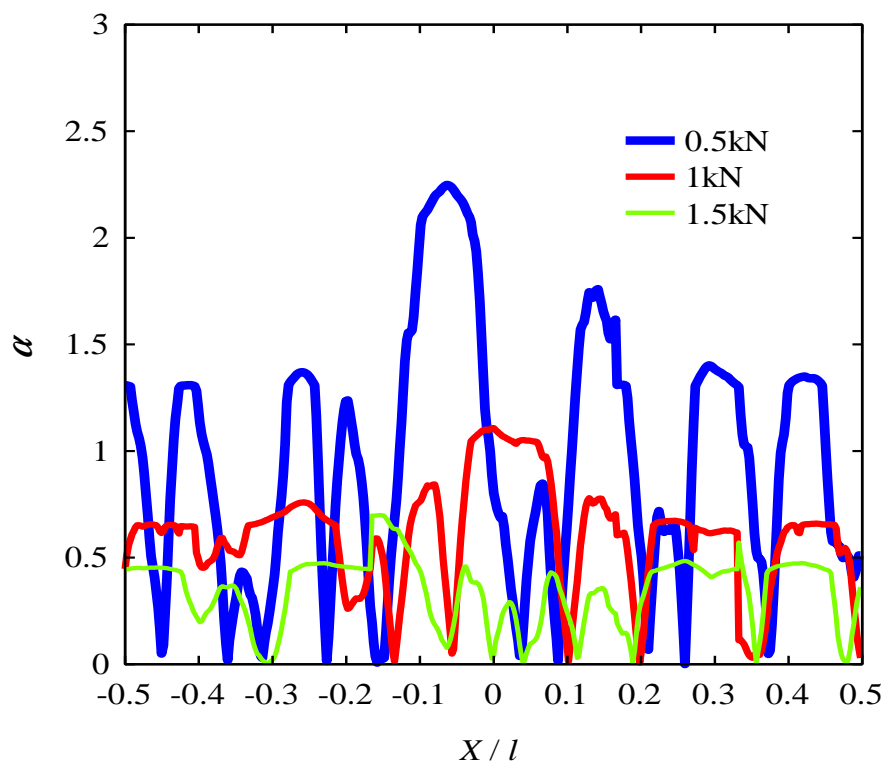
(a) MB 0w%



(b) MB 0.25w%



(c) MB 0.5w%



(d) 傾斜数 3

図 30 接着層における α の分布

2-4-3 考察

図 30 の結果より、 α の振れ幅が小さい場合と大きい場合、負荷荷重による α 分布の傾向を示す場合が存在した。これは α の計測領域に塗布した白塗料の面積に関係あると考えた。なぜなら、DIC は画像の輝度分布を目印とするため、接着層に輝度分布を作り出す白塗料のきめの細かさや量が重要であると考えたからである。そこで、接着層付近に白塗料が塗布されていると考えられる面積を求めた。

求める方法は次のように行った。まず、接着層付近の画像を図 31 のように 256 階調を有するグレースケール画像にして、画像の輝度分布を得た。次に、画像全体の面積と白塗料が塗布されていると考えられる面積を求めた。この時、白塗料が塗布されていると考えられるピクセルとして、輝度値が最大値である 255 の 1/3 にあたる 84 以上となるピクセルを考えた。最後に、求めた白塗料の面積を画像全体の面積で割って、白塗料の平均面積割合を求めた。

以上のように求めた白塗料の平均面積割合と各接着層の関係を表 8 に示す。表 8 の結果と図 30 の結果より、白塗料の平均面積割合が増加すると α の振れ幅において減少する傾向が見られた。

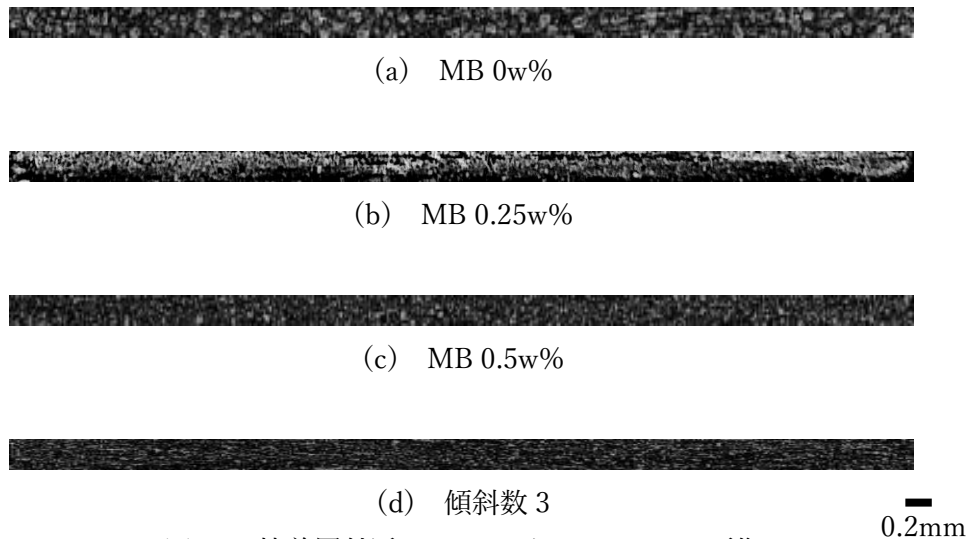


図 31 接着層付近におけるグレースケール画像

表 8 各接着層と白塗料の面積の関係

	白塗料の平均面積割合(%)
MB 0w%	26.7
MB 0.25w%	33.5
MB 0.5w%	33.3
傾斜数 3	28.5

第3章 接着継手特性に及ぼす接着剤特性の解析的検討

3-1 有限要素法解析のモデル作成

本研究ではANSYSを用いた2次元の有限要素解析を行うために、図32のような寸法の2次元4節点構造ソリッドモデルを作成した。この時、モデルのメッシュは図33や図34に示すものを使用した。メッシュサイズは被着体部分が0.5mm、接着層部分が0.05mmとした。解析に使用したプログラムを付録に添付した。

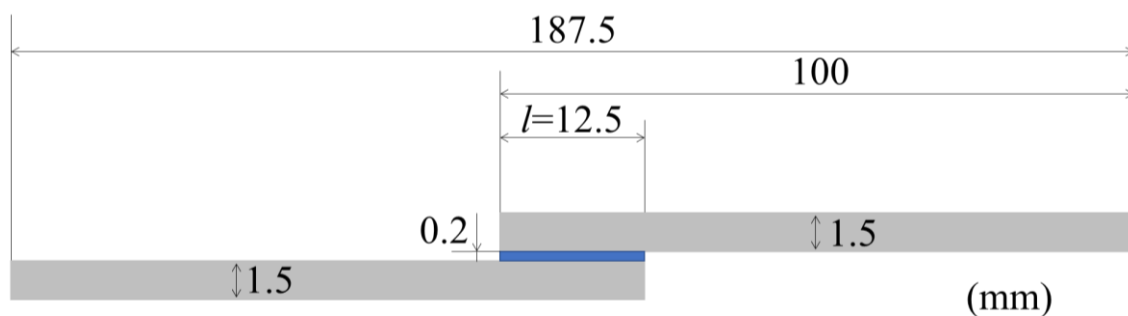


図32 解析モデルの寸法

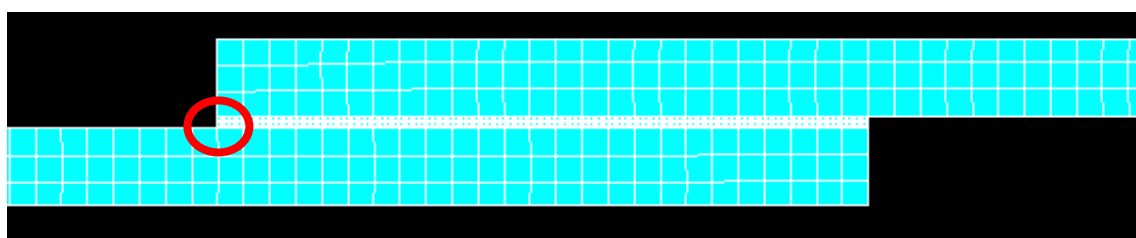


図33 解析モデルのメッシュ

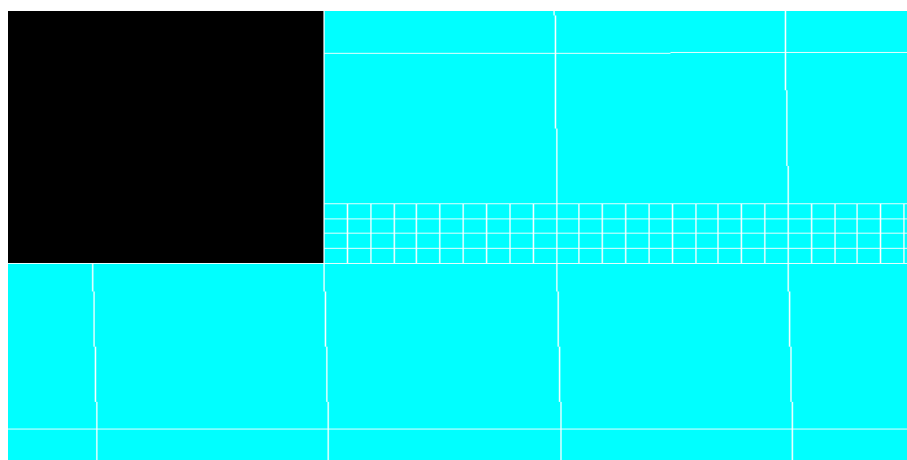
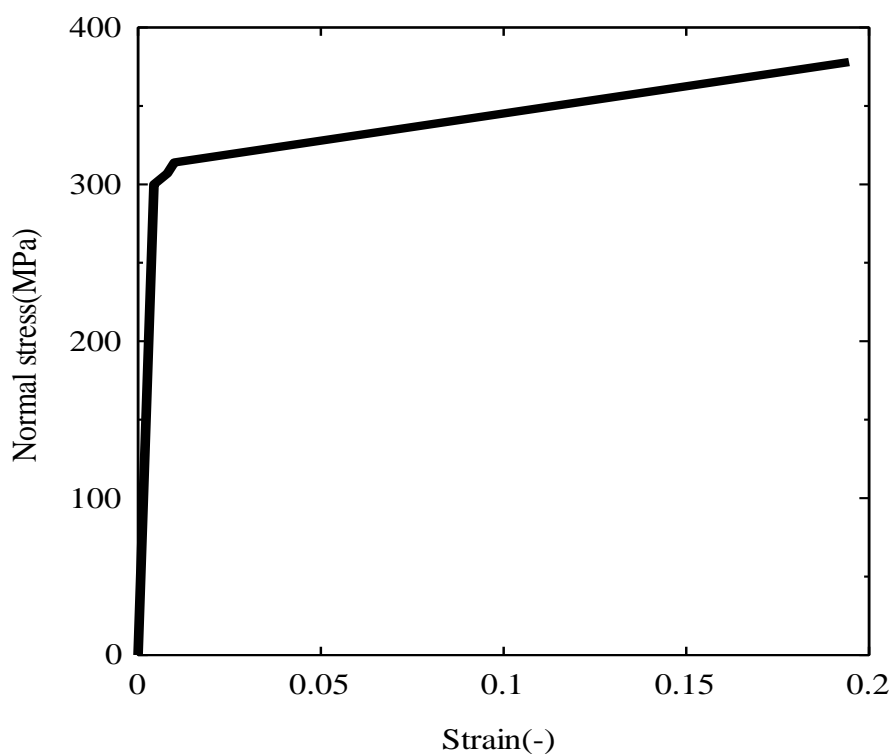


図34 メッシュの拡大図

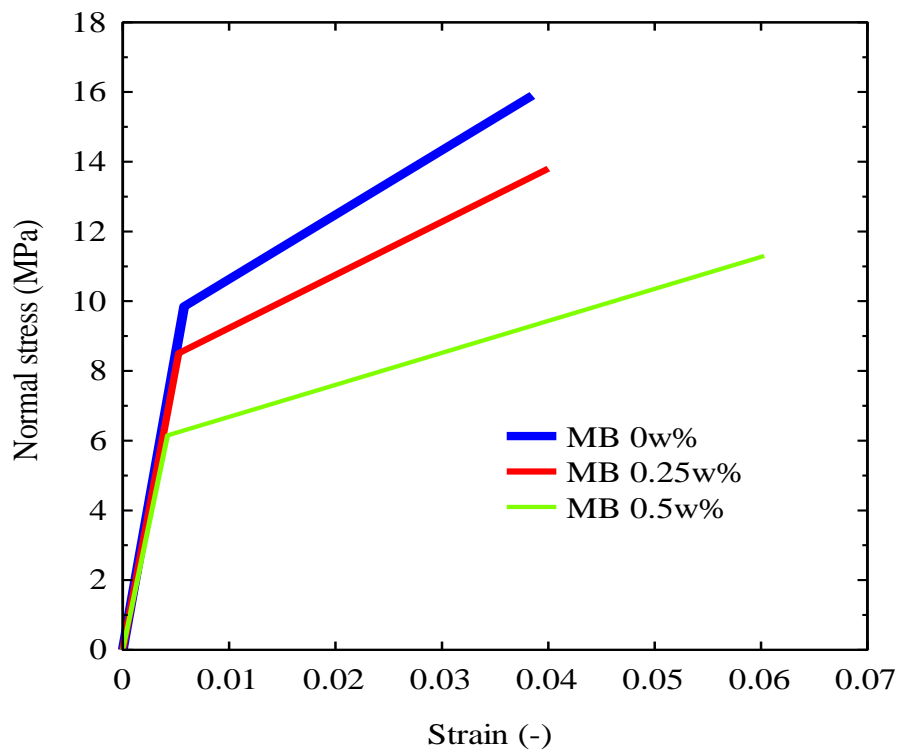
被着体にはアルミニウム合金 A2017 を使用し，接着層には 2 章で使用した接着剤を用いた．解析モデルは接着剤が単一の場合と傾斜化した場合の接着層を持つモデルを作成した．接着剤及び被着体の A2017 の材料特性は以下の表 9 で示された値を使用した．さらに，本解析では非線形解析も行うために A2017 及び使用する接着剤の応力ひずみ線図を図 35 に示すように仮定した．A2017 の応力ひずみ線図は以前に得られたものである．接着剤の応力ひずみ線図は 2-1-2 の結果により 2 直線近似したものである．

表 9 解析に使用した材料特性

	A2017	MB 0w%	MB 0.25w%	MB 0.5w%
ヤング率(GPa)	68.9	1.71	1.59	1.46
ポアソン比	0.33	0.35	0.38	0.35
引張降伏強度(MPa)	300	9.84	8.51	6.15
引張破断強度(MPa)	378	15.9	13.8	11.3
引張破断ひずみ(%)	19.5	3.85	4.00	6.03



(a)A2017



(b)各接着剤

図 35 応力ひずみ線図

また、接着層を傾斜化することにより、接着層に生じる応力分布を示すために傾斜化した解析モデルは図 36 に示すように接着層の特性が変化していると仮定し、作成した。

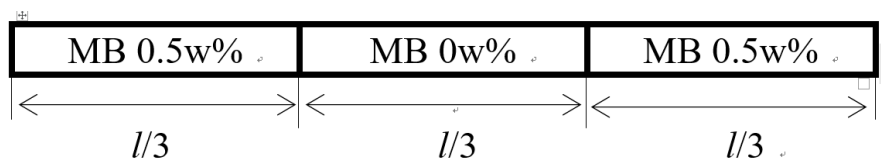


図 36 傾斜数 3 の接着層

3-2 モデルに荷重を負荷した時の解析結果

3-2-1 解析モデル

モデルの負荷荷重 F と拘束条件は図 37 に示すようなものを使用した。この時、つかみ部として SLJ 両端からそれぞれ 25mm の辺（緑線）を Y 方向に固定した。また、解析結果を示すグラフの横軸に使用されている X と l は図 38 に示す関係である。この解析では被着体の A2017 と接着層で剥離が起きないモデルを仮定した。



図 37 モデルの拘束条件

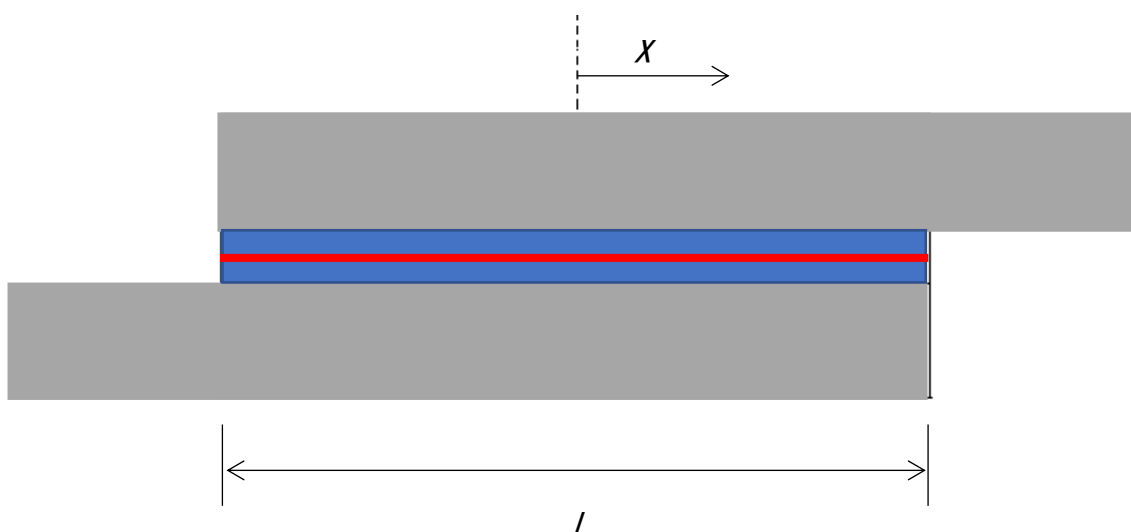


図 38 接着層上の X と l の関係

3-2-2 解析結果

接着剤が図 35 に示すような応力ひずみ線図を持つと仮定した非線形解析を行った。図 39 は $F=0.5\text{kN}$ である時、接着層に接着剤が一種類である場合の応力集中係数の分布を示している。応力集中係数 α は

$$\alpha = S_{xy} / (F / (12.5 \times 25)) \quad (17)$$

で求められる。ここで、 S_{xy} はモデルの節点におけるせん断応力である。また、せん断応力の計測位置は図 38 に示すように接着厚さの中心とした。表 10 は図 39 で示されている応力集中分布の内、最大値である $\alpha_{\text{FEM,Max}}$ と DIC の結果である $\alpha_{\text{DIC,Max}}$ をまとめたものである。図 39 と表 10 より、MB の混合割合が増加するにつれて、接着層端部における α の最大値は減少していることが分かった。この結果は 2-4 で行った画像相関による結果と一致する傾向が見られた。この時の ANSYS による解析結果と DIC による結果の平均誤差は 29.5%であった。誤差は

$$\text{誤差 (\%)} = \frac{\alpha_{\text{FEM,Max}} - \alpha_{\text{DIC,Max}}}{\alpha_{\text{FEM,Max}}} \times 100 \quad (18)$$

で求めた。

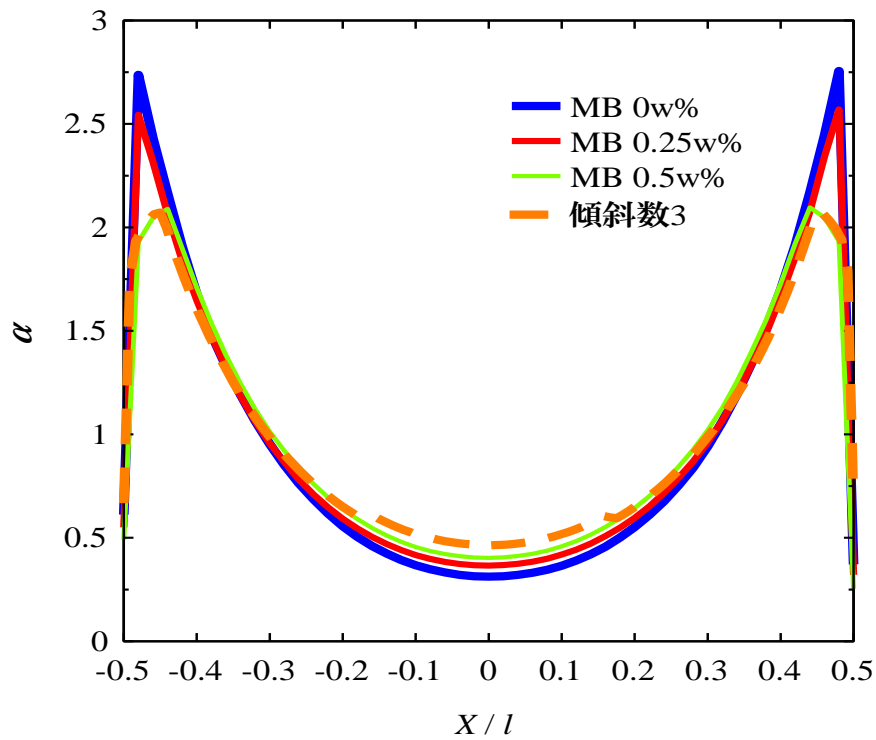
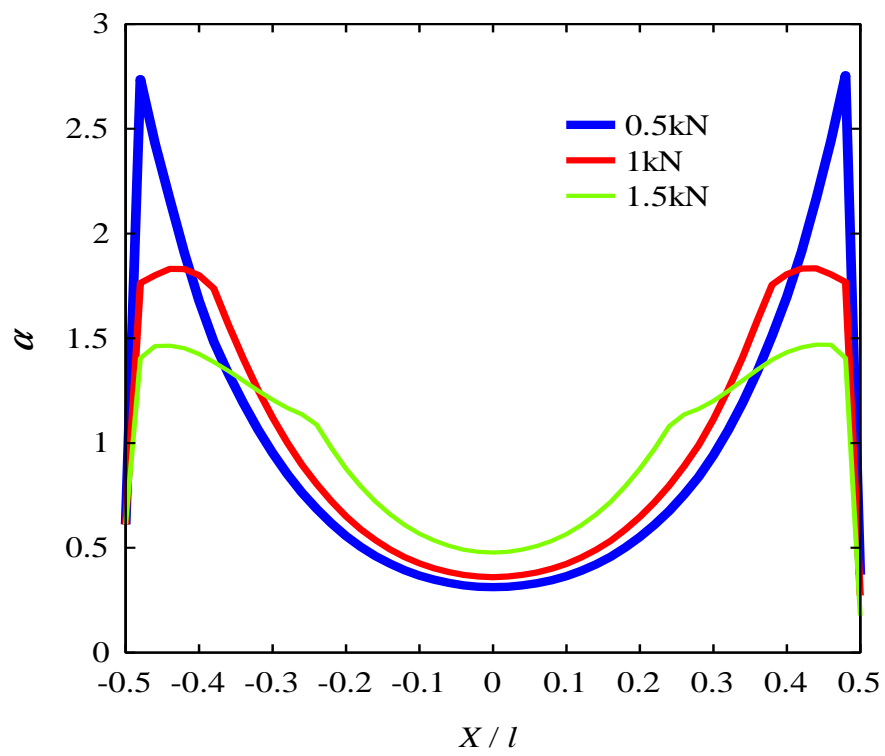


図 39 接着層における応力集中係数分布

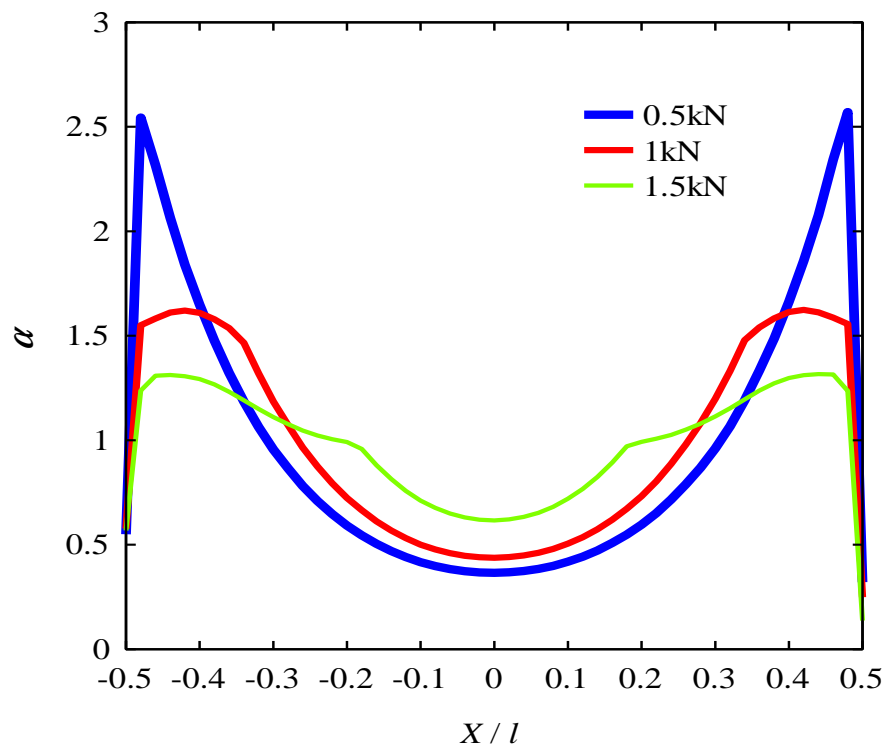
表 10 使用接着剤における最大応力集中係数

接着剤	$\alpha_{\text{FEM,Max}}$	$\alpha_{\text{DIC,Max}}$	誤差 (%)
MB 0w%	2.74	2.11	23.0
MB 0.25w%	2.54	1.88	26.0
MB 0.5w%	2.09	1.33	36.4
傾斜数 3	2.07	1.40	32.4

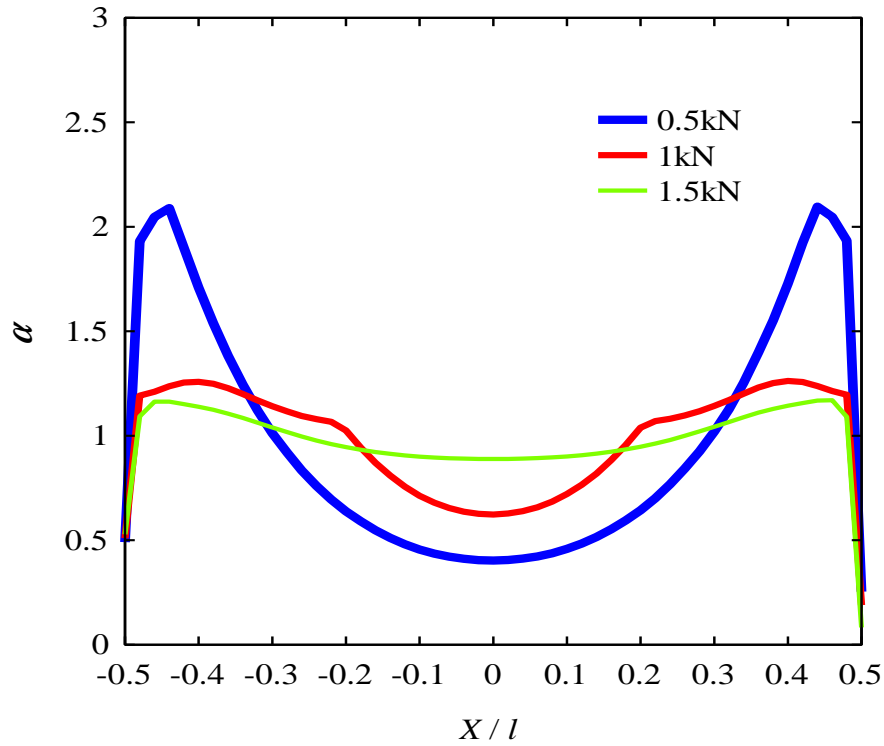
図 40 は荷重 F が 0.5kN から 1.5kN とした時、接着剤が 1 種類であるモデルの接着層における応力集中係数分布を示している。この結果より、使用したどの接着剤においても負荷荷重が増加すると、接着層の端部に生じる応力集中係数 α は低下することが分かった一方、接着層の中心部では、 α は増加することが分かった。また、MB の重量比が増加するにつれて、上記の傾向がより顕著となることが分かった。



(a)MB 0w%の場合



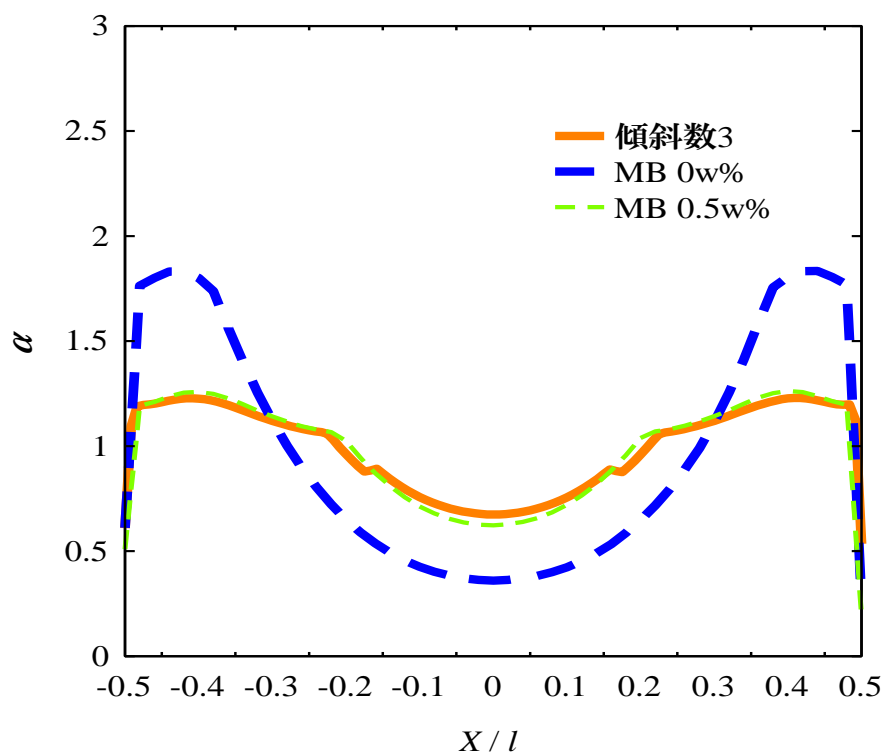
(b)MB 0.25w%の場合



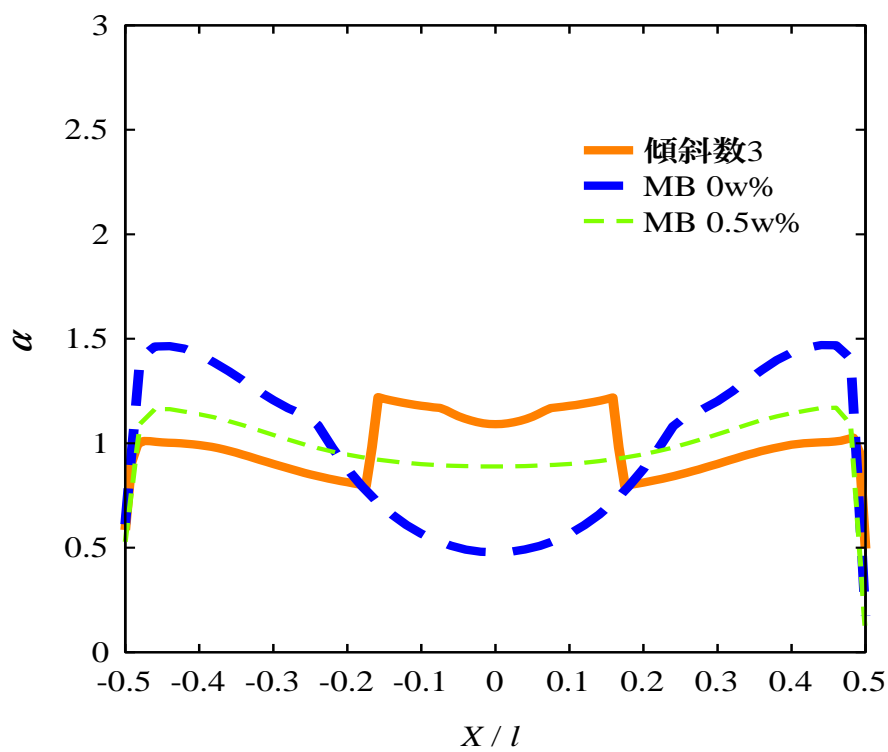
(c)MB 0.5w%の場合

図 40 単一モデルの接着層における応力集中係数分布

図 41 は負荷する荷重 F を (a)1kN と (b)1.5kN とした時、傾斜数 3 のモデルと比較のために MB 0w%や MB 0.5w%の接着層上における応力集中係数の分布を示している。図 41 より、傾斜数 3 のモデルは負荷荷重が 1kN までの時、MB 0.5w%の結果とほとんど同じ結果を示した。しかし、負荷荷重が 1.5kN である時、傾斜数 3 のモデルは端部での α が 1.03 と MB 0.5w%の 1.17 よりも低下していることが分かった。また、傾斜数 3 のモデルは接着剤が変化する境界線($X/l \cong \pm 0.167$)において、負荷荷重が 1kN まではほとんど変化なかった。しかし、負荷荷重が 1.5kN の時、 $X/l \cong \pm 0.167$ において α が 0.794 から 1.22 まで上昇し、接着層中心部 ($X/l=0$) において α が 1.09 に減少していることが分かった。



(a)1kN の場合



(b)1.5kN の場合

図 41 傾斜化モデルの接着層における応力集中係数分布

3-3 CZM 解析

3-3-1 解析モデル

CZM は要素の層間剥離や接着継手の靱性を特徴づけるための有限要素解析と併用して使用されている⁽²⁰⁾。本研究では被着体と接着層における剥離挙動を調べるために CZM を使用した。3-1 のモデルは図 42 に示す赤線の部分が固定されていたが、CZM モデルは分離されている。これは被着体と接着層の剥離挙動も考慮に入れるためである。しかし、このままでは滑るだけであるため、被着体には 2 次元ターゲット要素を定義し、接着層は 2 次元接触要素を定義することで、被着体と接着層間の接触と滑りをモデル化した。この接触面の剥離基準として、CBDE と TBDDATA コマンドを用いて接着剤のモード I ならびにモード II の臨界エネルギー解法率を与えた。表 11 に示されている材料特性は 3-2 で行った解析に使用したものと同一である。モード I の臨界エネルギー解法率 G_{Ic} とモード II の臨界エネルギー解法率 G_{IIc} は 2 章の実験で得られた値を使用した。モデルの寸法と拘束条件は 3-2 で使用したものと同一とし、変位速度は図 43 で示すものとした。詳細なコマンドや考え方については付録に添付したプログラムに記した。

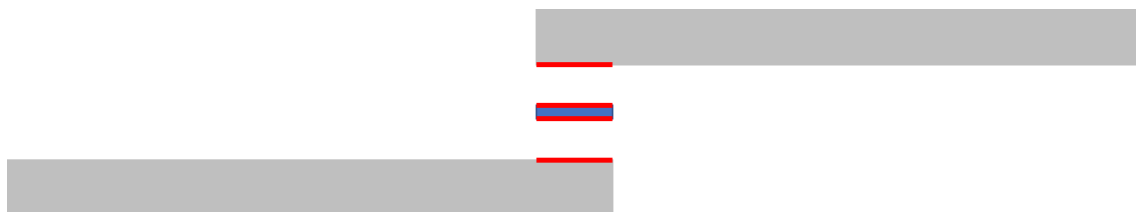


図 42 CZM モデルの概要

表 11 被着体および接着剤の材料特性

	A2017	MB 0w%	MB 0.25w%	MB 0.5w%
ヤング率(GPa)	68.9	1.71	1.59	1.46
ポアソン比	0.33	0.35	0.38	0.35
引張降伏強度(MPa)	300	9.84	8.51	7.43
引張破断強度(MPa)	378	15.9	13.8	11.3
引張破断ひずみ(%)	19.5	3.84	4.00	6.03
せん断強度(MPa)		16.3	15.5	13.7
G_{Ic} (N/mm)		0.25	0.37	0.42
G_{IIc} (N/mm)		0.295	0.710	1.06



図 43 拘束条件及び変位速度

3-3-2 解析結果

図 46 は CZM 解析を行った時の荷重変位線図を示している。横軸の変位は図 44 で示す変位制御を行った緑の線上の赤い点における X 方向変位であり、縦軸の荷重は X 方向の変位を求めた赤い点における X 方向の応力にモデルの断面積($1.5\text{mm} \times 25\text{mm}$)をかけることにより求めた。解析は 0.2s 間隔でデータを取得し、図 45 のように接着層と被着体が剥離するまで行った。

図 46 より、破断荷重は MB の重量比が増加するにつれて、2.70kN から 3.36kN, 3.41kN と増加することが分かった。さらに、破断変位も同様に、0.408mm から 0.497mm, 0.506mm と増加することが分かった。また、接着層が傾斜数 3 であるモデルの場合、破断荷重や破断変位はそれぞれ 4.24kN, 0.599mm であり、MB 0w%や MB 0.5w%の結果よりも大きくなることが分かった。さらに、他の接着剤に比べて、グラフの傾きが大きくなっていることが分かった。



図 44 CZM 解析における荷重と変位の取得位置

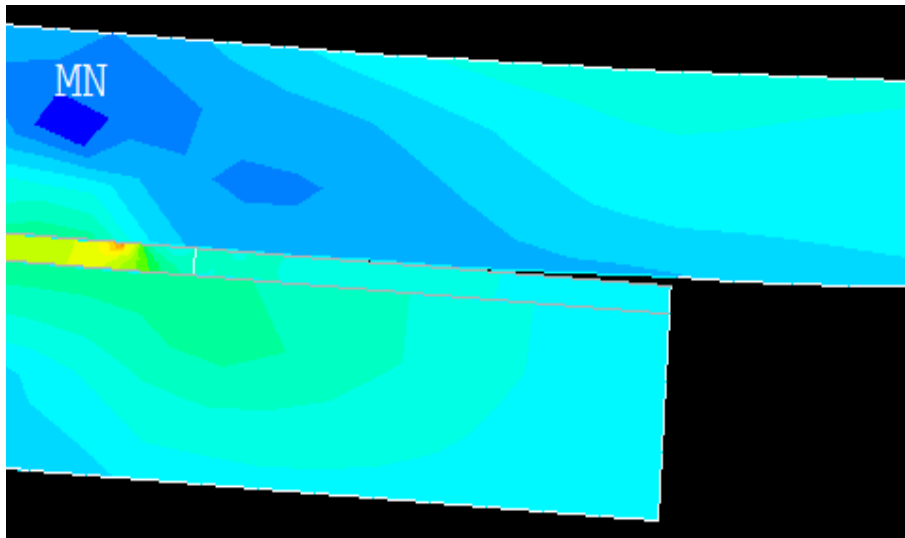


図 45 解析終了時におけるモデルの変形例

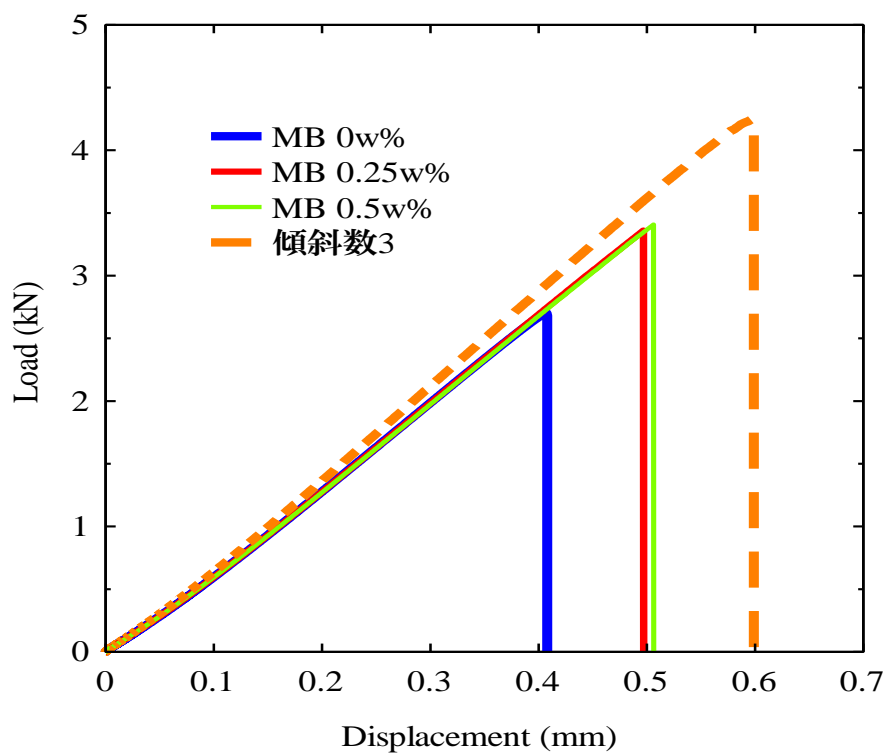
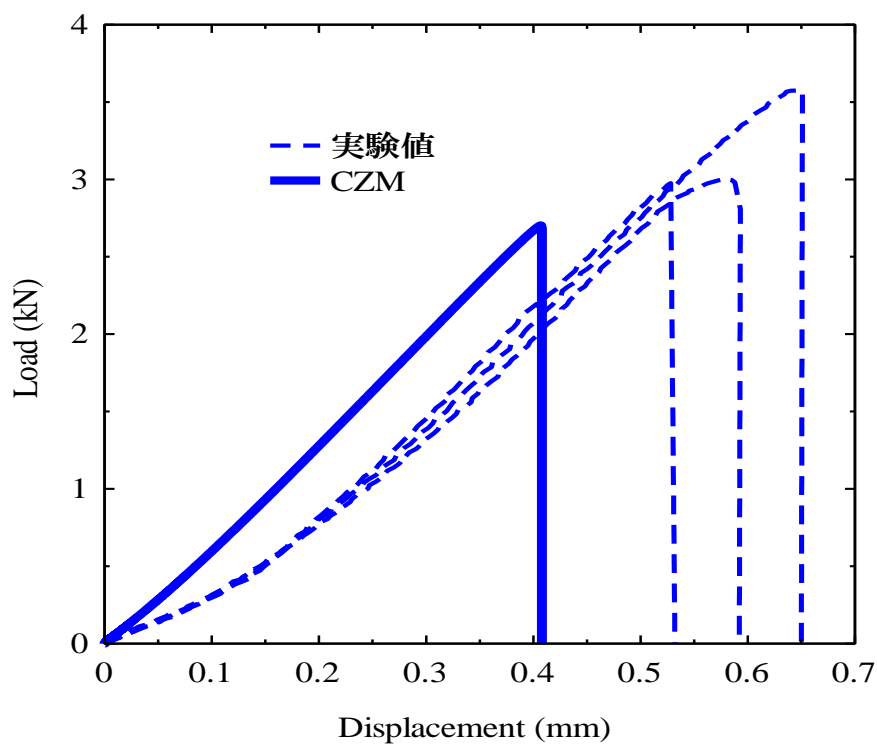
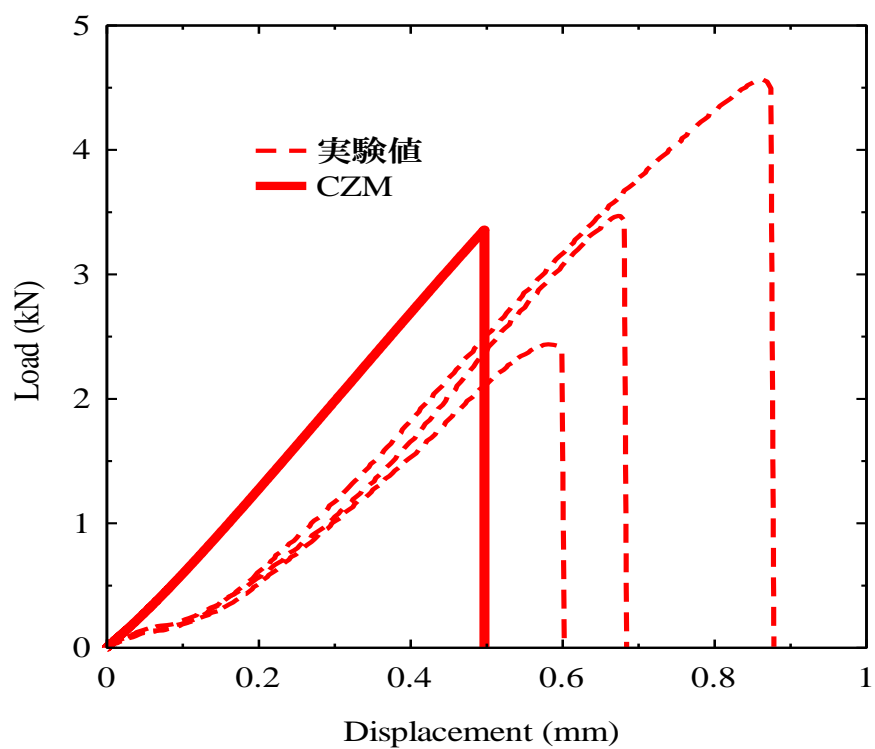


図 46 CZM により求められた荷重変位線図

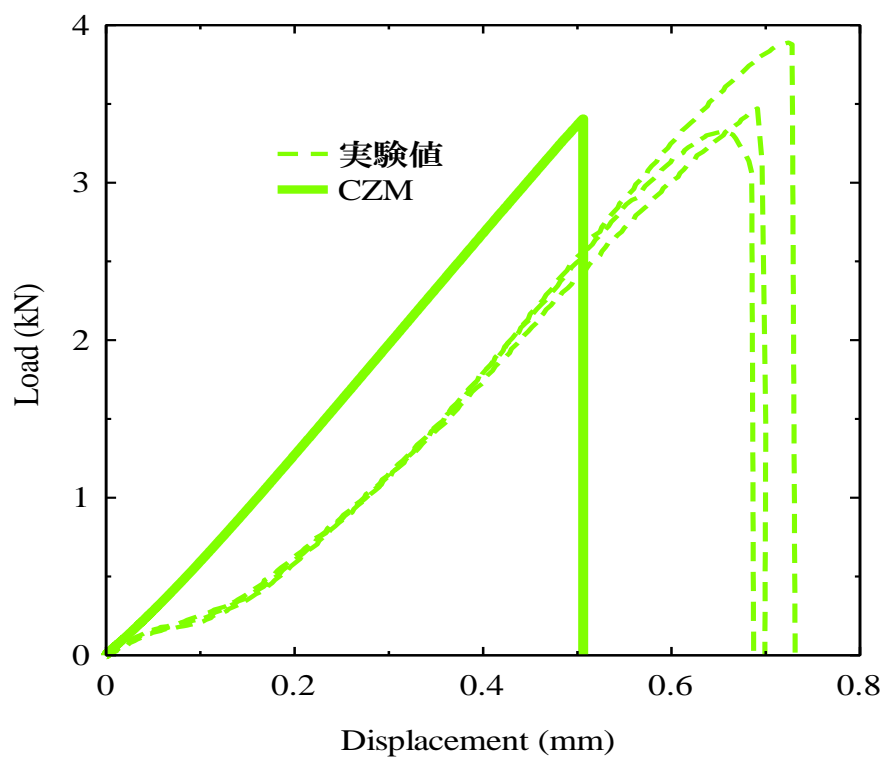
次に、2-3-2で行ったSLJ試験片の結果とCZMの結果を比較した。図47は各接着層における荷重変位線図の実験結果とCZMによる結果を示している。図47(a)より、MB 0w%の場合、実験によって得られた平均破断荷重が3.18kNに対して、CZMによる破断荷重は2.70kNと約17.8%の違いが見られた。図47(b)より、MB 0.25w%の場合実験によって得られた平均破断荷重が約3.49kNに対して、CZMによる破断荷重は3.36kNと3.87%の違いが見られた。図47(c)より、MB 0.5w%の場合、実験によって得られた平均破断荷重が3.56kNに対して、CZMによる破断荷重は3.41kNと4.40%の違いが見られた。さらに、破断変位はCZMの結果と比べて、実験値の方がそれぞれ約0.1mm大きいことが分かった。しかし、図47(d)から傾斜数3の場合、実験値が2.79kNに対して、CZMによる破断荷重は4.24kNと実験値の方が34.2%小さいことが分かった。また、破断変位は実験値が0.501mmに対して、CZMの結果が0.599mmと実験値の方が小さいことが分かった。



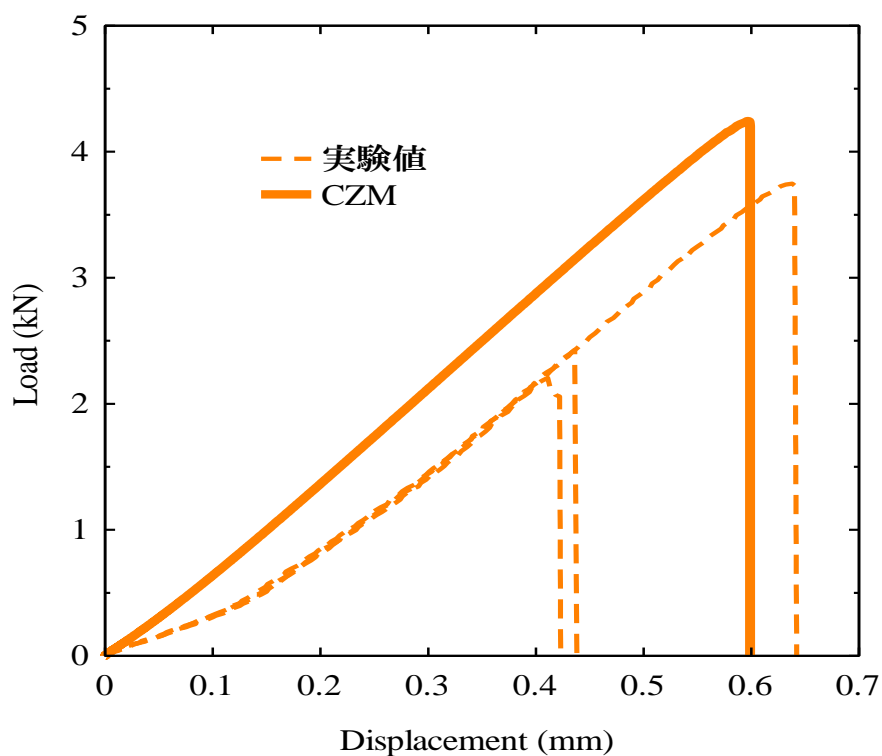
(a) MB 0w%



(b) MB 0.25w%



(c) MB 0.5w%



(d) 傾斜数 3 の場合

図 47 各接着層における荷重変位線図

3-4 考察

実験値と CZM 解析において、破断変位に違いが見られた原因は試験機のチャックと試験片のスペーサー間で発生した滑りであると考えられる。CZM 解析では荷重位置のずれは存在しない。しかし、実験ではチャックがスペーサーを挟んでいるだけあるため、滑りが発生している可能性がある。その滑りは実験値として示したグラフの傾きが変化しているチャック間変位が 0.2mm 以下の時に発生していると考えられる。

図 47(d)より、CZM 解析の結果は実験値で得られた破断荷重や破断変位よりも大きな値を示す傾向が見られた。これは CZM 解析が接着層を 3 等分しているのに対して、試験片の方は手作業により接着層を分けたためにきちんと 3 等分になっていないことが理由として考えられる。このことから、塗り分けが出来れば、CZM 解析で得られた破断荷重に近づくと考えられる。

第4章 結言

2液型エポキシ系接着剤に異なる重量比で中空高分子であるMBを混合した接着剤を用いたバルク試験片を作製し、引張試験を行った。さらに、混合した接着剤を用いたSLJに対して、引張試験や画像相関法を行った。また、混合した接着剤を用いたSLJを想定した2次元モデルを作成し、負荷荷重一定である時の有限要素解析やCZM解析を行った。これらの実験および解析により、以下の結言が得られた。

- (1) MBの重量比が増加するにつれて、引張破断強度は減少し、破断変位は増加することが分かった。
- (2) MBの重量比が増加するにつれて、モードIとモードIIの臨界エネルギー解法率は増加することが分かった。
- (3) 実験により得られた各接着剤を用いたSLJのせん断強度はMBの重量比が増加するにつれて、増加する傾向が見られた。しかし、接着面の凝集破壊領域を考慮すると、SLJのせん断強度は低下することが考えられる。
- (4) DICと有限要素解析により得られた接着層における応力集中係数は、MBの重量比が増加するにつれて、低下することが分かった。
- (5) CZM解析により、MBの重量比が増加すると破断荷重が増加することが分かった。さらに、接着層を傾斜化すると1種類の接着剤を使用した場合より、破断荷重が増加することが分かった。

第 5 章 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導を頂いた担当指導教員の楠川量啓教授および高坂達郎准教授に深く感謝致します．また，ともに研究を進めた新屋文隆様や安達秀飛様ならびに日々の議論を通して多くの知識や示唆を頂いた材料強度学研究室の方々に感謝致します．

参考文献

- (1) Adams, R. D., Comyn, J., and Wake, W. C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, (Chapman & Hall, London, 1997), 2nd ed., pp. 1-11.
- (2) Jae-Hyun Park., Jin-Ho Choi., Jin-Hwe Kweon., *Composite Structures*, 92, 2226-2235, (2010)
- (3) Salih Akpinar, Muhammet Onur Doru, Adnan Ozel, Murat Demir Aydin, Hamed Ghaffarzadeh Jahanpasand, *Elsevier*, 55, 55-64 (2013)
- (4) Afkar, A. and Camari, M. N., *J. Fail. Anal. Prevent.* 14, 253-258 (2014)
- (5) Kumar, S. and Scanlan, J. P., *J. Adhes.* 86, 369-394 (2010)
- (6) Carbas, R. J. C., da Silva, L. F. M., Madureira, M. L., and Critchlow, G. W., *J. Adhes.* 90, 698-716 (2014)
- (7) R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva, G.W. Critchlow, *International Journal of Adhesives*, 48, 2014, 110-118
- (8) N.Stein, P.Weißgraeber, W.Becker, *International Journal of Solids and Structures*, 97-98, 300-311 (2016)
- (9) Kawasaki, S., Nakajima, G., Haraga, K. and Sato, C., *The Journal of Adhesion*, 92, 517-534 (2016)
- (10) Sepideh Khoei., Narges Hassani., *Materials Science and Engineering, A*, 527, 6562-6567 (2010)
- (11) S.M.J. Razavi, M.R. Ayatollahi, A. Nemati Giv, H. Khoramishad., *Int. J. Adhes. Adhes.* 80, 76-86 (2018)
- (12) A.J. Comer, K.B. Katnam, W.F. Stanley, T.M. Young, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 40, 2013, 215-223
- (13) R.L. Vijaya kumar., M.R. Bhat., *Composite Structures*, 121, 351-361 (2015)
- (14) Debora C Moreira., Luiz CS Nunes., *Applied Adhesion Science*, 2:1 (2014)
- (15) 出水享, 松田浩, 戸次翔, 森崎雅俊, 内野正和, 伊藤幸広, 森田千尋, *土木学会論文集*, A2, Vol.68, No.2, I_683-I_690, 2012
- (16) Nikhil Gupta, Ruslan Nagorny, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 102, 1254-1261 (2006)
- (17) M.F.S.F. de Moura, R.D.S.G. Campilho, J.P.M. Goncalves, *Composite Science and Technology* (2008)
- (18) M.F.S.F. de Moura, N.Dourado, J.J.L. Morais and F.A.M. Pereira, *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 34, 149-158
- (19) Tatsujiro Miyazaki, Naoaki Noda, Rong Li, Takumi Uchikoba, and Yoshikazu Sano, *エレクトロニクス実装学会誌*, 16(2), 143-151, 2013
- (20) JG Williams, H. Hadavinia, A.J. Kinloch - *Compos. Sci. Technol*, 2005

付録

第3章で行った有限要素解析に使用したプログラムを付録として以下に添付した。負荷荷重を一定とした時、接着層に生じるせん断応力分布を取得したプログラムを示す。

このプログラムは負荷荷重が 500N である時の MB 0w%を使用したモデルを示している。

/PREP7

ET,1,182

接着剤の材料特性を定義

e1=1710 ヤング率(MPa)

nu1=0.35 ポアソン比

/PREP7

MP,ex,1,e1

MP,nuxy,1,nu1

TB,PLASTIC,1,,,MISO

TBPT,DEFL,0,1E-1

降伏点におけるひずみと応力(MPa)

TBPT,DEFL,9.84/e1,9.84

破断時のひずみと応力(MPa)

TBPT,DEFL,3.85E-2,15.9

A2017 の材料特性を定義

e2=68.9e3 ヤング率(MPa)

nu2=0.33 ポアソン比

MP,ex,2,e2

MP,nuxy,2,nu2

TB,PLASTIC,2,,,MISO

TBPT,DEFL,0,5.2E-1

降伏点におけるひずみと応力(MPa)

TBPT,DEFL,4.367E-3,300

変曲点におけるひずみと応力(MPa)

TBPT,DEFL,8.01E-3,307

破断時のひずみと応力(MPa)

TBPT,DEFL,9.95E-3,314

TBPT,DEFL,19.45E-2,378

モデルの作成

tadv=0.2 接着層厚さ(mm)

tadh=1.5 被着体厚さ(mm)

lo=12.5 接着長さ(mm)

lt=100 被着体の長手方向長さ(mm)

wt=25 被着体の幅(mm)

キーポイントの取得

K,1,0,0,0

K,2,lt,0,0

KGEN,2,1,2,1,,tadh,,2

K,5,lt-lo,tadh

KGEN,2,4,5,1,,tadv,,2

K,8,2*lt-lo,tadh+tadv

KGEN,2,7,8,1,,tadh,,2

K,11,25,0

K,12,25,tadh

K,13,2*lt-lo-25,tadh+tadv

K,14,2*lt-lo-25,2*tadh+tadv

エリアの作成

A,1,11,2,4,5,12,3

A,5,4,6,7

A,7,6,13,8,10,14,9

メッシュサイズの決定

ESIZE,tadh/3

エリア 2(A,5,4,6,7)のメッシュサイズ指定
AESIZE,2,tadv/4

エリアに材料特性を定義

MAT,1
AMESH,2
MAT,2
AMESH,1,3,2

キーポイント 4 と 7 において，メッシュをさらに細かくする．これはこの部分で応力集中が生じるが起こる可能性があるためである．

KREFINE,4,7,1,2,1
EPLOT
FINISH

拘束条件および負荷荷重の定義

ft=500 負荷荷重(N)

拘束条件

/SOLU
KSEL,s,loc,x,0
KSEL,r,loc,y,0
DK,all,all
KSEL,s,loc,x,0
KSEL,r,loc,y,tadh
DK,all,all
KSEL,s,loc,x,25
KSEL,r,loc,y,0
DK,all,uy
KSEL,s,loc,x,25
KSEL,r,loc,y,tadh
DK,all,uy
KSEL,s,loc,x,2*lt-lo-25
KSEL,r,loc,y,tadh+tadv

DK,all,uy
KSEL,s,loc,x,2*lt-lo-25
KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv
DK,all,uy
KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv
DK,all,uy
KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
KSEL,r,loc,y,tadh+tadv
DK,all,uy

負荷荷重を与える位置の定義

NLGEOM,on
LNSRCH,on
KSEL,s,loc,x,2*Lt-Lo
KSEL,a,loc,x,0
LSLK,s,1

負荷応力の定義

SFL,all,pres,-ft/(tadh*wt)
KSEL,all
LSEL,all
SOLVE
FINISH
SAVE

解析終了後にモデルのせん断応力分布を示す．

/POST1
PLNSOL,S,XY,0,1.0

モデルの接着層厚さ中心におけるせん断応力を取得は次のように行った．最初に，コマンド path により，パスを 2 点で定義した．この時，データを 50 個取得できるよ

うにした。パスの1点目は $(x, y) = (87.5, 1.6)$, 2点目を $(x, y) = (100, 1.6)$ とした。パスを定義した後, コマンド pdef により, パス上のせん断応力を kai という名前で定義した。最後に, コマンド prpath により, kai を表示した。

```
path,kai,2,50,50
ppath,1,,87.5,1.6
ppath,2,,100,1.6
pdef,kai,S,XY
prpath,kai
```

傾斜数 3 のモデルに 500N を負荷させた時のプログラムを以下に示す

/PREP7	A2017 の材料特性を定義
ET,1,182	e3=68.9e3
	nu3=0.33
MB 0.5w%の接着剤の材料特性	MP,ex,3,e3
e1=1460	MP,nuxy,3,nu3
nu1=0.35	TB,PLASTIC,3,,,MISO
	TBPT,DEFL,0,5.2E-1
/PREP7	TBPT,DEFL,4.367E-3,300
MP,ex,1,e1	TBPT,DEFL,8.01E-3,307
MP,nuxy,1,nu1	TBPT,DEFL,9.95E-3,314
TB,PLASTIC,1,,,MISO	TBPT,DEFL,19.45E-2,378
TBPT,DEFL,0,1E-1	
TBPT,DEFL,6.15/e1,6.15	モデルの作成
TBPT,DEFL,6.03E-2,11.3	tadv=0.2
	tadh=1.5
MB 0w%の接着剤の材料特性	lo=12.5
e2=1710	lt=100
nu2=0.35	wt=25
	K,1,0,0,0
/PREP7	K,2,lt,0,0
MP,ex,2,e2	KGEN,2,1,2,1,,tadh,,2
MP,nuxy,2,nu2	K,5,lt-lo/3,tadh
TB,PLASTIC,2,,,MISO	KGEN,2,4,5,1,,tadv,,2
TBPT,DEFL,0,1E-1	K,8,lt-2*lo/3,tadh
TBPT,DEFL,9.84/e1,9.84	K,9,lt-lo,tadh
TBPT,DEFL,3.85E-2,15.9	KGEN,2,8,9,1,,tadv,,2
	K,12,2*lt-lo,tadh+tadv

KGEN,2,11,12,1,,tadh,,2
 K,15,25,0
 K,16,25,tadh
 K,17,2*lt-lo-25,tadh+tadv
 K,18,2*lt-lo-25,2*tadh+tadv
 A,1,15,2,4,5,8,9,16,3
 A,5,4,6,7 MB 0.5w%の層
 A,8,5,7,10 MB 0w%の層
 A,9,8,10,11 MB 0.5w%の層
 A,11,10,7,6,17,12,14,18,13
 ESIZE,tadh/3
 AESIZE,2,tadv/4
 AESIZE,3,tadv/4
 AESIZE,4,tadv/4
 MAT,1
 AMESH,2,4,2
 MAT,2
 AMESH,3
 MAT,3
 AMESH,1,5,4
 KREFINE,9,6,1,2,1
 EPLOT
 FINISH

境界条件の定義

ft=500
 /SOLU
 KSEL,s,loc,x,0
 KSEL,r,loc,y,0
 DK,all,all
 KSEL,s,loc,x,0
 KSEL,r,loc,y,tadh
 DK,all,all
 KSEL,s,loc,x,25
 KSEL,r,loc,y,0

DK,all,uy
 KSEL,s,loc,x,25
 KSEL,r,loc,y,tadh
 DK,all,uy
 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo-25
 KSEL,r,loc,y,tadh+tadv
 DK,all,uy
 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo-25
 KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv
 DK,all,uy
 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
 KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv
 DK,all,uy
 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
 KSEL,r,loc,y,tadh+tadv
 DK,all,uy
 NLGEOM,on
 LNSRCH,on
 KSEL,s,loc,x,2*Lt-Lo
 KSEL,a,loc,x,0
 LSLK,s,1
 SFL,all,pres,-ft/(tadh*wt)
 KSEL,all
 LSEL,all
 SOLVE
 FINI
 SAVE
 /POST1
 PLNSOL,S,XY,0,1.0

 path,kai,2,50,50
 ppath,1,,87.5,1.6
 ppath,2,,100,1.6
 pdef,kai,S,XY
 prpath,kai

CZM 解析で使ったプログラムを次に示す。負荷荷重を与えた場合と CZM の主な違いはエネルギー解法率の定義と変位制御の部分であるため、それらを重点的に説明する。

MB 0w%を使用した時の CZM 解析で使	KGEN,2,1,2,1,,tadh,,2
用したプログラムを示す。	K,5,lt-lo,tadh
/PREP7	KGEN,2,4,5,1,,0,,2
ET,1,182,,,2	KGEN,2,6,7,1,,tadv,,2
e1=1710	KGEN,2,8,9,1,,0,,2
nu1=0.35	K,12,2*lt-lo,tadh+tadv,0
	KGEN,2,11,12,1,,tadh,,2
/PREP7	K,15,25,0
MP,ex,1,e1	K,16,25,tadh
MP,nuxy,1,nu1	K,17,2*lt-lo-25,tadh+tadv
TB,PLASTIC,1,,,MISO	K,18,2*lt-lo-25,2*tadh+tadv
TBPT,DEFL,0,1E-1	
TBPT,DEFL,9.84/e1,9.84	エリアを分離して定義
TBPT,DEFL,3.85E-2,15.9	A,1,15,2,4,5,16,3
	A,7,6,8,9
e2=68.9e3	A,11,10,17,12,14,18,13
nu2=0.33	
MP,ex,2,e2	ESIZE,tadh/3
MP,nuxy,2,nu2	AESIZE,2,tadv/4
TB,PLASTIC,2,,,MISO	MAT,1
TBPT,DEFL,0,5.2E-1	AMESH,2
TBPT,DEFL,4.367E-3,300	MAT,2
TBPT,DEFL,8.01E-3,307	AMESH,1,3
TBPT,DEFL,9.95E-3,314	
TBPT,DEFL,19.45E-2,378	表面状態を定義
	ET,2,TARGE169
tadv=0.2	ET,3,CONTA172
tadh=1.5	
lo=12.5	KEYOPT,3,12,6
lt=100	KEYOPT,3,9,1
wt=25	KEYOPT,3,2,0
K,1,0,0,0	KEYOPT,3,3,1
K,2,lt,0,0	

接着層のエネルギー解法率および引張強度、せん断強度の定義

TB,CZM,1,1,1,CBDE

TBDATA,1,15.9,0.253,16.3,0.295,1e-8,0

R,2

RMODIF,2,3,-1e6

RMODIF,2,12,-3e6

被着体の表面状態を定義

TYPE,2

MAT,2

REAL,2

キーポイント 4 と 5 で結んだラインと 10 と 11 で結んだライン上の表面状態を

TARGE169 で定義

KSEL,s,kp,,4,5,1

KSEL,a,kp,,10,11,1

LSLK,s,1

NSLL,s,1

ESURF

キーポイント 6 と 7 で結んだラインと 8 と 9 で結んだライン上の表面状態を

CONTA172 で定義

TYPE,3

MAT,1

REAL,2

KSEL,s,kp,,6,7,1

LSLK,s,1

NSLL,s,1

ESURF

TYPE,3

MAT,1

REAL,2

KSEL,s,kp,,8,9,1

LSLK,s,1

NSLL,s,1

ESURF

NSEL,all

KSEL,all

LSEL,all

EPLOT

FINI

拘束条件の定義

/SOLU

KSEL,s,loc,x,0

KSEL,r,loc,y,0

DK,all,uy

KSEL,s,loc,x,25

KSEL,r,loc,y,0

DK,all,uy

KSEL,s,loc,x,2*lt-lo-25

KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv

DK,all,uy

KSEL,s,loc,x,2*lt-lo

KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv

DK,all,uy

DL,6,,UY,0

DL,7,,UX,0

DL,14,,UY,0

NLGEOM,on

LNSRCH,on

解析時間を 500s で定義

TIME,500

ライン 15 を変位制御

LSEL,S,LINE,,15,,,0

CM,line15,LINE

CMSEL,S,line15,LINE

LSEL,s,1

KSEL,all

LSEL,all

1s あたり 0.5/60 (mm) で変位制御を定義

D,line15,VELX,0.5/60

AUTOTS,on

データを 0.2s ずつ取得し、収束しない場合は 0.02s ごとに取得した。

DELTIM,0.2,0.02,0.2

OUTRES,all,all

OUTPR,all,all

SOLVE

FINI

SAVE

デフォルトではデータを 20 個ずつ 1 ページで表示するため、データを整理する際に大変である。そこで、コマンド LINES で 1 ページあたり 3000 個ずつ表示させた。

/POST26

LINES,3000

傾斜数 3 の CZM 解析で使ったプログラムを以下に示す。1 種類の接着剤を使用した CZM 解析との大きな違いはないため、接着層が 3 層になるところを説明する。

/PREP7

ET,1,182,,,2

MB 0.5w% の接着剤の材料特性

e1=1460

nu1=0.35

/PREP7

MP,ex,1,e1

MP,nuxy,1,nu1

TB,PLASTIC,1,,,MISO

TBPT,DEFI,0,1E-1

TBPT,DEFI,6.15/e1,6.15

TBPT,DEFI,6.03E-2,11.3

MB 0w% の接着剤の材料特性

e2=1710

nu2=0.35

/PREP7

MP,ex,2,e2

MP,nuxy,2,nu2

TB,PLASTIC,2,,,MISO

TBPT,DEFI,0,1E-1

TBPT,DEFI,9.84/e1,9.84

TBPT,DEFI,3.85E-2,15.9

A2017 の材料特性

e3=68.9e3

nu3=0.33

MP,ex,3,e3

MP,nuxy,3,nu3

TB,PLASTIC,3,,,MISO

TBPT,DEFI,0,5.2E-1

TBPT,DEFI,4.367E-3,300

TBPT,DEFI,8.01E-3,307

TBPT,DEFI,9.95E-3,314

TBPT,DEFL,19.45E-2,378

モデルの作成

tadv=0.2

tadh=1.5

lo=12.5

lt=100

wt=25

K,1,0,0,0

K,2,lt,0,0

KGEN,2,1,2,1,,tadh,,2

K,5,lt-lo/3,tadh

KGEN,2,4,5,1,,0,,2

KGEN,2,6,7,1,,tadv,,2

K,10,lt-2*lo/3,tadh

K,11,lt-lo,tadh

KGEN,2,10,11,1,,0,,2

KGEN,2,12,13,1,,tadv,,2

KGEN,2,8,9,1,,0,,8

KGEN,2,14,15,1,,0,,4

K,20,2*lt-lo,tadh+tadv

KGEN,2,19,20,1,,tadh,,2

K,23,25,0

K,24,25,tadh

K,25,2*lt-lo-25,tadh+tadv

K,26,2*lt-lo-25,2*tadh+tadv

A,1,23,2,4,5,10,11,24,3

A,7,6,8,9

A,12,7,9,14

A,13,12,14,15

A,19,18,17,16,25,20,22,26,21

ESIZE,tadh/3

AESIZE,2,tadv/4

AESIZE,3,tadv/4

AESIZE,4,tadv/4

MAT,1

AMESH,2,4,2

MAT,2

AMESH,3

MAT,3

AMESH,1,5,4

ET,2,TARGE169

ET,3,CONTA172

KEYOPT,3,12,6

MB 0.5w%の接着層におけるエネルギー解
法率および引張強度、せん断強度の定義

TB,CZM,1,1,1,CBDE

TBDATA,1,11.3,0.42,13.7,1.06,1e-8,0

MB 0w%の接着層におけるエネルギー解
法率および引張強度、せん断強度の定義

TB,CZM,2,1,1,CBDE

TBDATA,1,15.9,0.253,16.3,0.295,1e-8,0

R,2

RMODIF,2,3,-1e6

RMODIF,2,12,-3e6

被着体の表面状態を定義

TYPE,2

MAT,3

REAL,2

KSEL,s,kp,,4,5,1

KSEL,a,kp,,16,17,1

LSLK,s,1

NSLL,s,1

ESURF

TYPE,2

MAT,3
REAL,2
KSEL,s,kp,,5,10,5
KSEL,a,kp,,17,18,1
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

TYPE,2
MAT,3
REAL,2
KSEL,s,kp,,10,11,1
KSEL,a,kp,,18,19,1
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

MB 0.5w%を使用した層の表面状態
TYPE,3
MAT,1
REAL,2
KSEL,s,kp,,6,7,1
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

TYPE,3
MAT,1
REAL,2
KSEL,s,kp,,8,9,1
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

TYPE,3
MAT,1

REAL,2
KSEL,s,kp,,12,13,1
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

TYPE,3
MAT,1
REAL,2
KSEL,s,kp,,14,15,1
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

MB 0w%を使用した層の表面状態
TYPE,3
MAT,2
REAL,2
KSEL,s,kp,,7,12,5
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

TYPE,3
MAT,2
REAL,2
KSEL,s,kp,,9,14,5
LSLK,s,1
NSLL,s,1
ESURF

NSEL,all
KSEL,all
LSEL,all

EPLOT

FINISH

境界条件の定義

/SOLU

KSEL,s,loc,x,0

KSEL,r,loc,y,0

DK,all,uy

KSEL,s,loc,x,25

KSEL,r,loc,y,0

DK,all,uy

KSEL,s,loc,x,2*lt-lo-25

KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv

DK,all,uy

KSEL,s,loc,x,2*lt-lo

KSEL,r,loc,y,2*tadh+tadv

DK,all,uy

DL,8,,UY,0

DL,9,,UX,0

DL,26,,UY,0

NLGEOM,on

LNSRCH,on

解析時間を 300s

TIME,300

ライン 25 を変位制御

LSEL,S,LINE,,25,,,0

CM,line25,LINE

CMSEL,S,line25,LINE

LSEL,s,1

KSEL,all

LSEL,all

D,line25,VELX,0.5/60

AUTOTS,on

DELTIM,0.2,0.02,0.2

OUTRES,all,all

OUTPR,all,all

SOLVE

FINI

SAVE

/POST26

LINES,2000