

構造用接着剤を用いた高減衰ゴムダンパーの開発

縮小部材試験結果

柳坂 祥希*¹・谷 翼*¹

Keywords : damper, viscoelastic damper, high damping rubber, structural adhesives, small-scale member test, stress concentration

制振ダンパー, 粘弾性ダンパー, 高減衰ゴム, 構造用接着剤, 縮小部材試験, 応力集中

1. はじめに

制振要素として利用される粘弾性ダンパーは温度依存性が高く、性能のばらつきが大きいため風応答に対して使用されるのが一般的である。近年ではカーボンやシリカを添加した高減衰ゴムを利用することで、温度依存性を抑えつつ減衰力を高めた粘弾性ダンパー（以下高減衰ゴムダンパー）が開発され、地震用としても取り入れやすくなっている。しかし、高減衰ゴムを利用した粘弾性ダンパーは製造工程の都合上ダンパーの適用形態に限られていることが課題といえる。

一方で近年、自動車産業等で利用される構造用接着剤を建築に適用する研究が行われている²⁾。本研究では高減衰ゴムダンパーの適用形態の拡充を目的としてダンパーの形成に構造用接着剤の利用を検討した。本報では縮小部材試験によるゴムダンパー及び接着剤の性能確認の結果について報告する。

2. 高減衰ゴムダンパー

高減衰ゴムの製造過程において、まずゴムとフランジそれぞれの金型を用意し、炉に入れて高温・高圧下で加硫する工程が必要である。加硫と同時に接着する加硫接着によりゴム層数 N に対し $N+1$ 枚の鋼板と一体のユニットとして製造される（図 1）。

高減衰ゴムダンパーのダンパー力はゴムの貼付総面積に比例するが、ユニットの最大寸法は炉のサイズに依存する。そのため、大容量とする場合は高力ボルト摩擦接合により複数ユニットを連結させ大断面を形成する手法が取られるが、ブレースのように軸方向に長

い部材では実現が難しい。高力ボルトによる接合に代替して構造用接着剤の利用することにより、高減衰ゴムユニットのブレースへの適用も可能となり、適用形態の自由度が向上すると考えられる。



図 1 高減衰ゴムダンパーユニット

Fig. 1 Unit of high damping rubber

3. 縮小ダンパー接着載荷試験

3.1 試験概要

接着接合した縮小ダンパーの性能確認のため、繰り返し載荷試験、疲労試験及びせん断破壊試験を行った。使用する構造用接着剤の選定条件としては鋼材同士の接着が可能であることであるが、それに加え施工性・靱性・速硬性に富むことを考慮してアクリル系接着剤 2 種を採用した。接着剤は一方が高強度、もう一方が可撓性という特徴があるが、どちらも高減衰ゴムの破断耐力（約 $2.0\text{N}/\text{mm}^2$ ）に対して十分なせん断耐力を持つ。メーカーより提供される接着剤の物理的特性を表 1 に示す。

通常流通している高減衰ゴムダンパーの約 1/100 の面積を持つ縮小試験体を作成し、試験を実施した。また、比較対象として両側をボルトで接合した試験体を作成し、同様の試験を行った。

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

表 1 接着剤の物理的特性

Table 1 Physical properties of adhesives

	接着剤 H	接着剤 D
接着剤の種類	アクリル	アクリル
特徴	可撓性	高強度
弾性率 (N/mm ²)	733	2,414
伸び率 (%)	93	2
せん断強さ (N/mm ²)	15.7	25.3
剥離強さ (N/mm)	5.0	4.6

表 2 試験体寸法

Table 2 Size of test body

高減衰ゴム	□-40mm×40mm×t8mm
鋼板フランジ	PL-44mm×44mm×t7.5mm
試験機取付用鋼板	PL-100mm×90mm×t6mm

表 3 試験ケース

Table 3 Test Case

試験ケース No	ユニット	表面状態	接合条件
1・2	type A	-	両側ボルト接合
3・4	type B	黒皮あり	接着剤 H
5・6	type B	黒皮あり	接着剤 D
7・8	type B	ショットブラスト	接着剤 H
9・10	type B	ショットブラスト	接着剤 D

3.2 試験詳細

本試験では、試験機は 20kN 疲労試験機を使用し、縮小ダンパーユニット (図 2) と試験機取付用鋼板 (以下取付 PL) を接合した試験体 (写真 1) を用いた。取付 PL への接合を接着接合とし、逆側は鋼板フランジに設けたタップによりボルトにて試験機に設置した。偏心を防ぐため一度の試験で 2 つの試験体を使用する 2 面せん断載荷とした。図 3 にユニットと試験機の設置状況を示す。

今回使用する構造用接着剤は 2 種とも接着力が高く、鋼板を覆う酸化被膜 (以下黒皮) の付着力を上回り、黒皮の剥離による破断の可能性も考えられた。そのため取付 PL の表面状態を、黒皮ありの状態とショットブラスト処理により黒皮を除去した状態の 2 種について試験した。性能確認の比較対象として両面をボルト接合としたケースも試験した。またゴム性能のばらつきを考慮して同条件で 2 回ずつ試験したため、試験ケースは (2×2+1) ×2 の全 10 ケースであった。表 2 に試験体寸法、表 3 に試験ケースを示す。

試験フローを図 4、試験パラメータを表 4 に示す。今回は同条件の試験体を 2 つずつ用意しているが、繰り返し載荷試験を行ったのち、疲労試験または破断試験に分岐させる計画とした。高減衰ゴムは予加振することにより、製造直後の特有の初期剛性を除去する。厚みに対するせん断ひずみ γ (%) で載荷振幅を規定し、 $\gamma=50\%$ 、 100% 、 200% について 4 回ずつ繰り返し載荷試験を行い、ダンパーの履歴ループを取り出して性能確認を行った。ダンパーのエネルギー吸収による温度上昇の影響を除去するため、各試験間には 10 分間のインターバルを設けた。その後一方は疲労試験として $\gamma=100\%$ で 100 回の繰り返し載荷を行い、もう一方はせん断破断試験を $\gamma=600\%$ で行った。なお、破断試験における載荷速度は $v=1.0\text{mm/s}$ とした。

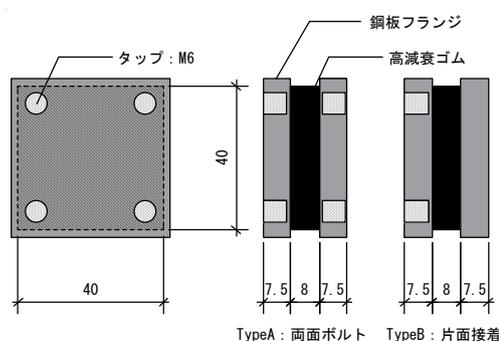


図 2 縮小ダンパーユニット

Fig. 2 Small-scale damper unit

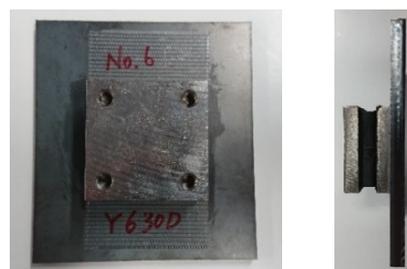


写真 1 試験体

Photo 1 Test Body

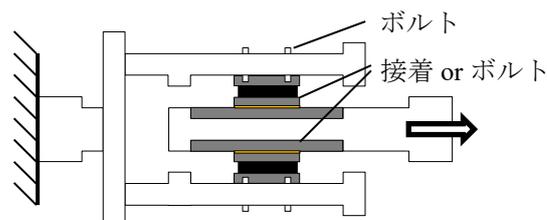


図 3 ユニットの試験機設置状況

Fig. 3 Unit tester installation status

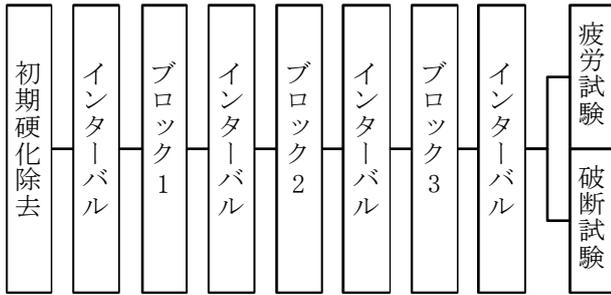


図 4 試験フロー

Fig. 4 Test flow

表 4 試験パラメータ

Table 4 Test Parameters

	ブロック1	ブロック2	ブロック3	疲労試験	破断試験
振幅	4 mm	8 mm	16 mm	8 mm	48 mm
ひずみ	50%	100%	200%	100%	600%
振動数	2.0 Hz	2.0 Hz	2.0 Hz	2.0 Hz	-
反復	4 cyc	4 cyc	4 cyc	100 cyc	-

3.3 繰り返し载荷試験結果

高減衰ゴムの性質上、初期剛性除去後も試験開始 1 サイクル目には大きい履歴ループが生じ、2 サイクル目以降は安定したループを描く特徴がある¹⁾。したがって、せん断ひずみ $\gamma=50\%$ 、 100% 、 200% の繰り返し载荷試験について 3 サイクル目の履歴ループを取り出してダンパーの性能確認を行った。

各試験ケースの 3 サイクル目のひずみ-応力度関係を図 5 に示す。縦軸の平均せん断応力度 τ (N/mm²)及び横軸のせん断ひずみ γ (%)は、せん断力 P (N)、ゴム貼付面積 S (mm²)、せん断変形 u (mm)、ゴム厚 d (mm)を用いて式(1)で算定した。

$$\tau = \frac{P}{S}, \quad \gamma = \frac{u}{d} \quad (1)$$

図 5 より接着剤種別、黒皮の有無に関わらず両側ボルト接合のケースと接着接合のケースはほぼ同じ履歴ループを描き、接着接合であっても十分な性能を発揮することを確認した。ただし、ケース NO.5 (黒皮×高強度) のケースで片側のみ接着面で破断した。接着面の状態から多数の空隙が認められ、接着施工不良と考えられたため、良好な接着をした場合に、ダンパーの使用範囲内の荷重では、接着接合で耐えうると考えられた。

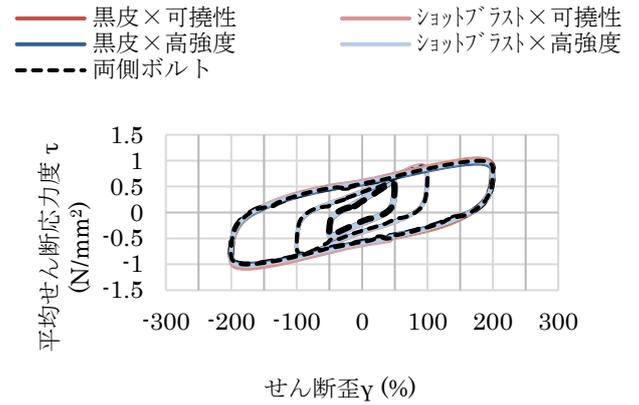


図 5 ひずみ-応力度関係

Fig. 5 Strain-stress relationship

3.4 疲労試験結果

疲労試験について、各試験ケースにおける 1 サイクル毎の最大値の推移を図 6 に示す。

3 サイクル目に対する N サイクル目の最大せん断応力度の比を表 5 に示す。高減衰ゴムのエネルギー吸収に伴う温度上昇により、せん断応力度は 10 サイクル目で約 80%、100 サイクル目で約 50%に低下した。接着面での破断はなく、接合条件による明確な差はなかった。

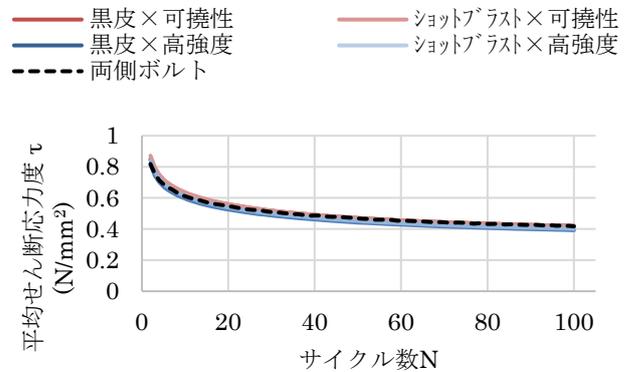


図 6 1 サイクル毎の最大値の推移

Fig. 6 Evolution of the maximum value per cycle

表 5 3 サイクル目に対する n サイクル目の比

Table 5 Ratio of n-cycle value to 3rd cycle

	両側ボルト	黒皮	黒皮	ショットブラスト	ショットブラスト
		可撓性	高強度	可撓性	高強度
10cyc	81%	80%	80%	80%	80%
20cyc	72%	71%	71%	70%	70%
50cyc	62%	60%	59%	59%	59%
100cyc	55%	53%	53%	53%	52%

3.5 せん断破壊試験結果

せん断破壊試験について、ゴム破断時の様子を写真 2 に示す。接着面での破断は認められず、写真右側のゴムユニットでゴム部の破断が確認できた。

破断試験時のひずみ-応力度関係を図 7 に、各ケースの最大せん断応力度及び最大耐力時のひずみを表 6 に示す。なお、ケース NO.5 (黒皮×高強度) のケースについては繰り返し载荷試験で接着施工不良が原因と思われる接着面での破断が生じたため試験を行っていない。γ=200%を超えたあたりからハードニングが生じ、γ=500%付近で最大耐力を迎えた後、破断による耐力低下が生じていた。ゴム破断時の平均せん断応力度はいずれも 2.0N/mm² 程度であった。試験を行った範囲では、接着剤の種類、黒皮の有無に関わらずゴム部分が接着部分に先行して破断しており、接着耐力がゴム耐力を上回ることが本試験により確認された。

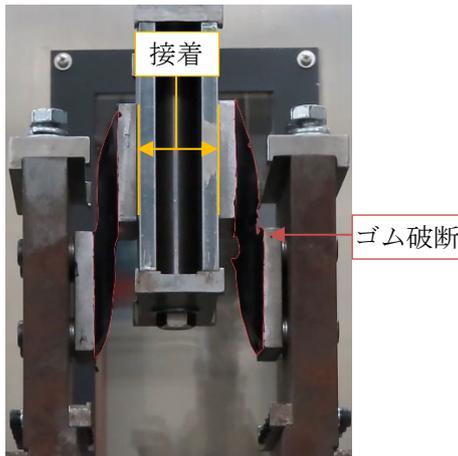


写真 2 高減衰ゴム破断状況

Photo 2 High-Damping-Rubber breaking situation

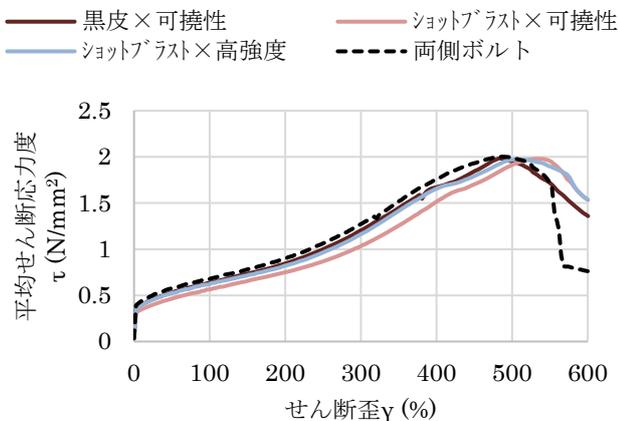


図 7 破断試験結果

Fig. 7 Break test results

表 6 最大応力度と最大耐力時ひずみ

Table 6 Maximum stress and strain at that time

	両側ボルト	黒皮	ショットブラスト	ショットブラスト
		可撓性	可撓性	高強度
最大耐力時ひずみ	489%	485%	536%	509%
最大応力度(N/mm ²)	2.00	1.98	1.98	1.97

4. 鋼材接着破断試験

4.1 試験概要

3章に示すように、高減衰ゴム縮小ユニットダンパーを使用した接着接合に関する試験では、接着耐力がゴム耐力を上回る結果となった。しかし、先行研究³⁾では接着剤は接着長に応じて接着耐力が低下する傾向が確認されている。そこで、接着長をパラメータとした2面せん断一軸引張破断試験を行い、接着剤種別ごとに接着耐力の変化を確認する。

4.2 試験詳細

4.2.1 試験機及び試験体

試験機には 2,000kN 万能試験機を使用し、接着材は3章に記したアクリル系材料2種(高強度タイプ:D、可撓性タイプ:H)を使用した。接着面形状に関しては接着幅を 50mm とし、接着長を 100mm から 50mm 刻みで 250mm までの4ケースとした。

接着性能のばらつきの確認のため同じ試験体を3体ずつ用意し、計 24 体について2面せん断一軸引張破断試験を行った。試験体名称とパラメータを表 7 に示す。

表 7 試験体名称とパラメータ

Table 7 Test body names and parameters

試験体名称		接着幅	接着長	接着面積
可撓性	高強度	mm	mm	mm ²
H-2-i ~ iii	D-2-i ~ iii	50	100	10,000
H-3-i ~ iii	D-3-i ~ iii	50	150	15,000
H-4-i ~ iii	D-4-i ~ iii	50	200	20,000
H-5-i ~ iii	D-5-i ~ iii	50	250	25,000

4.2.2 計測機器

本試験ではデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation Method, 以下 DIC) を利用した計測システムを採用した。本システムは計測対象の表面に塗布したモノクロの点描 (図 8) をカメラで読み取り、ランダムパターン輝度分布の相関を用いて対象とする面の変形・ひずみを計測するシステムである。



図 8 試験体表面
Fig. 8 Test body surface

4.3 破断試験結果

各試験体の最大耐力を接着面積で除した最大平均せん断応力度 τ_{ave} と接着長 L について図 9 に示す。可撓性タイプでは最大平均せん断応力度は一定であるが、高強度タイプでは接着長が長くなるにつれ低下していた。また、図 10 に示す破断時のひずみコンター図を確認すると、高強度タイプでは端部にひずみが集中しているのに対し、可撓性タイプではひずみが全体に比較的均一に分布していた。

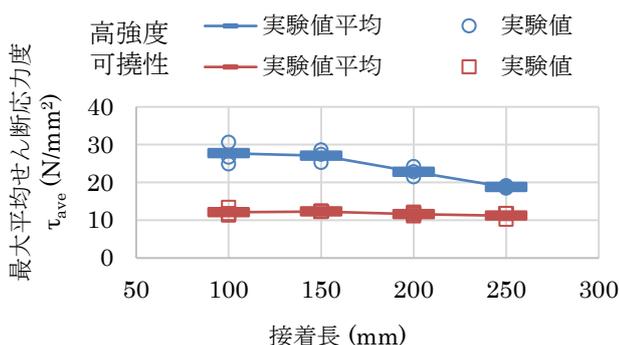
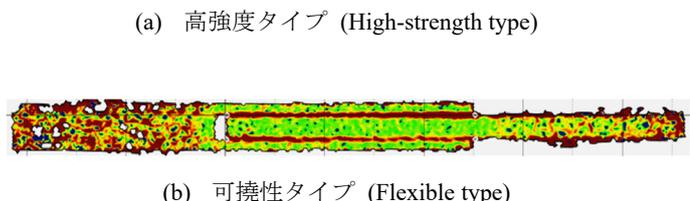
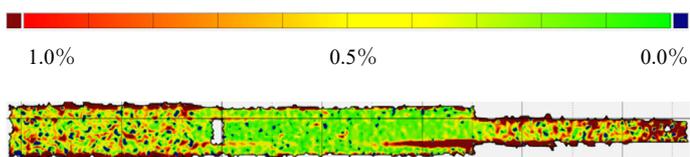


図 9 各ケースの最大平均せん断応力度
Fig. 9 Maximum average shear stress for each case



(a) 高強度タイプ (High-strength type)
(b) 可撓性タイプ (Flexible type)
図 10 破断時のひずみコンター図
Fig. 10 Strain contour diagram

側・片面端部に集中した。そこで汎用構造解析ソフト midas iGen を用いて板要素により FEM 解析モデルを作成し、破断時の状態について考察する。

一軸引張試験であることから、幅方向はモデル化せず 2D の線形モデルとし、破断時の変形状態の再現を行うこととした。幅 50mm の試験体を 1mm 角の板要素モデルで作成するため、鋼材・接着剤ともに弾性係数を 50 倍することとした。外側鋼材の左端部を固定、内側鋼材の右端部に実験時の各試験体の破断引張力を設定した。

全面が健全に接着された状態を考え、破断時の荷重を入力すると、図 11 のように端部で反る変形が生じた。二面接着としたことで全体的な曲げモーメントは相殺したが、上面と下面のそれぞれの曲げモーメントは生じたためと考えられる。特に図の右側端部の上下板は自由端のため剥離方向の力が生じやすく、また実際は製造・施工の誤差により軸ずれが生じ、応力集中は上下の片面に偏って表れたと考えられる。

以後代表して接着長が長く最大平均応力度の低下が顕著な D-5 のケースについて検討した。接着剤が片面端部より破断することを考慮し、図 12 に示すように接着面の一部（片面の 40%）をモデル化しないことで破断の再現を行った。接着部分の変形成分の取り方を図 13 に示す。接着端部からの距離とせん断変形及び剥離変形の関係についての実験と解析の比較を図 14 に示す。実験でのばらつきを除き解析にてよく再現されており、高強度タイプでは端部から応力集中によって破断が生じたものと考えられる。

□ : 鋼材を表す板要素 □ : 接着を表す板要素

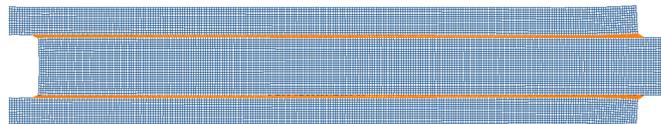


図 11 荷重時の変形

Fig. 11 Deformation at the time of loading

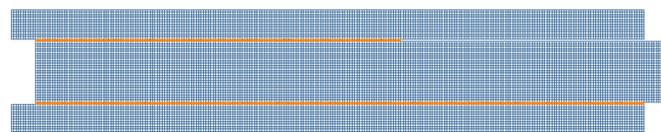


図 12 高強度タイプの破断時モデル
Fig. 12 High-strength type break-time model

4.4 端部ひずみ集中に関する考察

実験では特に高強度タイプのケースで、ひずみが片

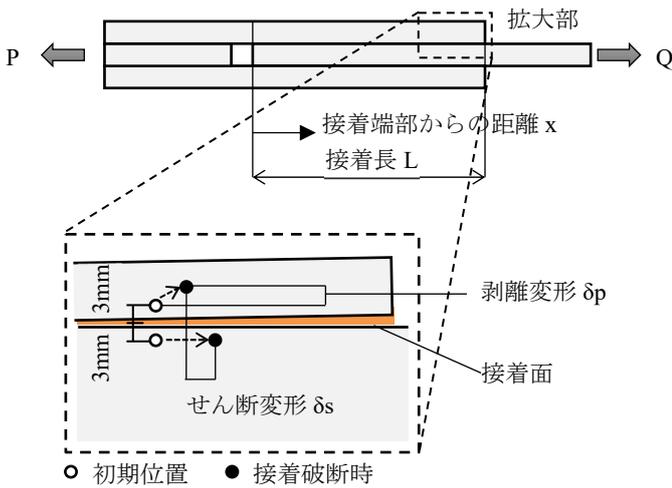
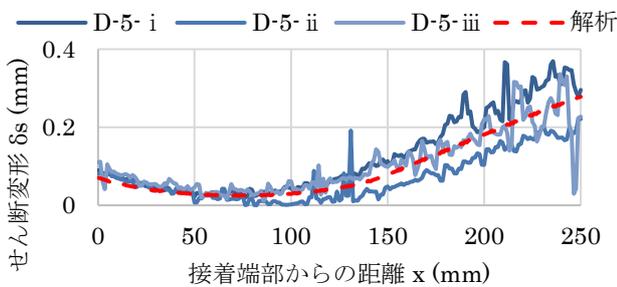
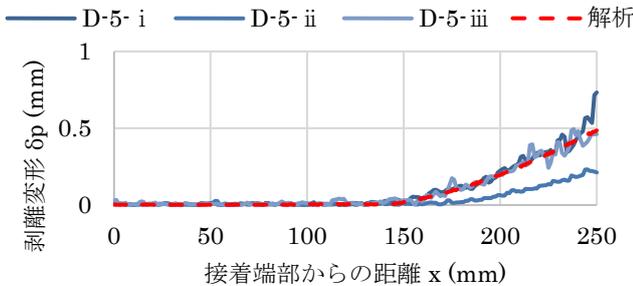


図 13 接着部分の変形

Fig. 13 Deformation of the adhesive part



(a) 接着剤のせん断変形 (Shear deformation of adhesive)



(b) 接着剤の剥離変形 (Peeling deformation of adhesives)

図 14 実験と解析の比較

Fig. 14 Comparison of experiments and analysis

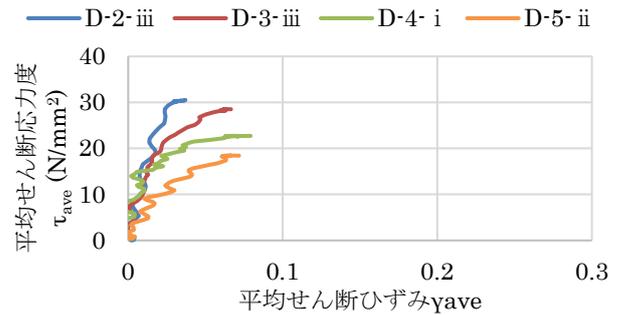
4.5 接着剤の非線形特性

可撓性タイプのケースでは全体的に同程度のひずみ分布が確認された。可撓性タイプの接着剤の非線形特性が要因と考えられたため、実験結果からより詳細に分析した。

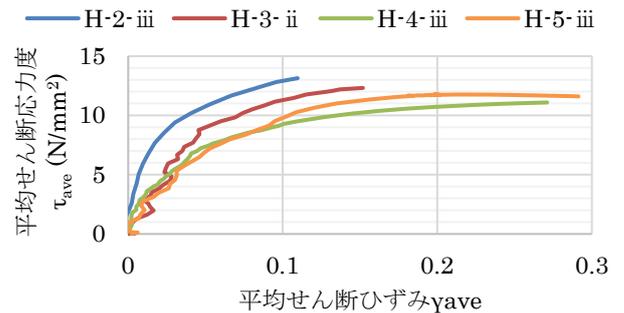
接着部の非線形特性を検討するため以下の手順でひずみ-応力度関係を算出した。まず DIC 計測システムにより観測された実験結果より接着剤せん断変形を接着

厚で除することでせん断ひずみを算定した。なお、本試験では接着厚を 1 mm で想定した。さらにスムージングのためせん断ひずみに対し 3 項の移動平均処理を行い、平均せん断ひずみ γ_{ave} を算出した。引張力を接着面積で除して平均せん断応力度 τ_{ave} を算定した。以上の手順で得られた各試験体の平均せん断ひずみと平均せん断応力度の関係を図 15 に示す。なお、本実験では計測ケースごとにサンプリングが異なったため、平均的な性状を示す代表ケースについて示す。図 15 (a), (b) を比較すると可撓性タイプの接着剤は強い非線形性を有し、概ね 8N/mm^2 程度で降伏し、 12N/mm^2 程度で破断することが確認された。また接着長が長いものほどひずみの最大値が大きくなる傾向が見られた。接着長が長い(接着面積が大きい)ほど端部降伏から破断まで余力がありひずみが大きくなったと考えられる。

以上より可撓性タイプの接着剤は強い非線形性を持つため、高強度タイプに比較して変形が大きく安定的な最大耐力を示すと考えられる。



(a) 高強度タイプ (High-strength type)



(b) 可撓性タイプ (Flexible type)

図 15 平均せん断ひずみと平均せん断応力度の関係

Fig. 15 Relationship between average shear strain and average shear stress

次に、接着剤の非線形特性をモデル化し、バネモデルにて静的増分解析を行った。接着剤の非線形特性はトリリニア型とし、実験結果より降伏応力度を 8.0N/mm^2 、最大応力度を 12.0N/mm^2 とした。なお、最

大応力度時のひずみ及び破断時のひずみはパラメトリックに変化させ、実験結果と整合するものを選定した。

バネモデルは鋼材をビーム要素、接着剤をバネ要素とし、軸方向に2mm間隔で分割して作成した。なおバネ要素は幅50mm分を1つのバネで表現したためせん断剛性を式(2)によって求めた。なお、接着剤の弾性係数はメーカーが示す $E=733\text{N/mm}^2$ を用い、アクリル系接着剤であることからポアソン比は $\nu=0.35$ を仮定した。バネモデルを図16に、接着剤の非線形特性を図17に、荷重-変形関係の実験と解析の比較を図18に示す。接着長が長くなるにつれ、耐力・ひずみが大きくなる性状がよく再現されていることがわかる。可撓性タイプは非線形特性に富むことが確認されたが、動的に使用する目的では線形の範囲内で使用するのが望ましいと考えられる。

$$k = \frac{E}{2(1+\nu)} \times 2 \times 50 \quad (2)$$

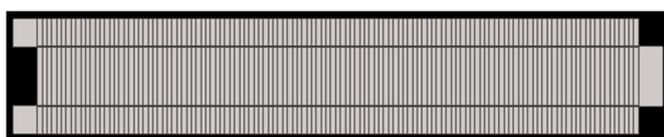


図16 バネモデル (H-5)
Fig. 16 Spring model (H-5)

表8 接着剤の非線形特性

Table 8 Non-linear properties of adhesives

初期剛性	k	27.1 kN/mm
降伏応力度	F_y	8.0N/mm ²
最大応力度	F_u	12.0N/mm ²
最大耐力ひずみ	γ_u	18%
最大ひずみ	γ_{max}	24%

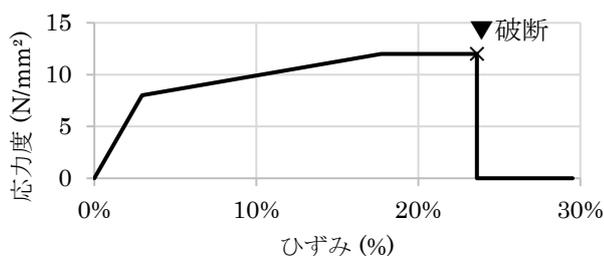


図17 接着剤の非線形特性
Fig. 17 Non-linear properties of adhesives

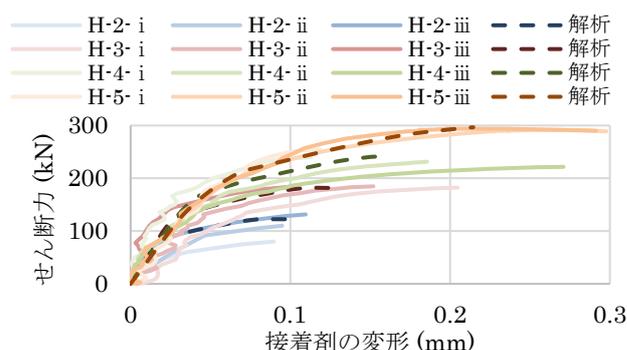


図18 実験と解析の比較

Fig. 18 Comparison of tests and analyses

5. まとめ

高減衰ゴムダンパーの適用形態を拡充させるため、構造用接着剤を利用した接合を提案し、接着剤の耐力について縮小部材レベルの試験を行った。

高減衰ゴム縮小ダンパーを用いた試験について、繰り返し荷重試験及び疲労試験では接着接合においてもボルト接合と同等の性能を発揮することを確認した。また、破断試験にて接着剤に先行してゴムが破断し、接着耐力がゴム耐力を上回ることを確認した。

接着剤の応力集中を確認するため、接着長をパラメータとした破断試験を行った。高強度タイプでは接着長が長い場合に耐力の低下が確認されたが、可撓性タイプでは安定的な耐力を示した。

高強度タイプの2DFEMモデルを作成し、一部を破断させた状態で応力解析を行ったところ、せん断変位、剥離変位ともによく整合した。接着端部にひずみが集中した結果、一部が破断に至ったと考えられる。

可撓性タイプでは高強度タイプに比較し、荷重-変形関係に強い非線形性状を示した。実験結果より接着剤の非線形特性を仮定し、バネモデルにて静的増分解析を行ったところ、接着長に応じた耐力・変形の増加をよく再現できる結果となった。

参考文献

- 1) 笠井和彦, 西澤恵二, 大木洋司, 田中克往, 田中和宏, 西本晃治, 山崎久雄: 制振用高硬度ゴムの静的・動的荷重実験と時刻歴解析法, 日本建築学会構造系論文集 Vol.76, No.662, 2011
- 2) 氏家大介, 成原弘之, 森田仁彦, 安田聡: 接着接合と高力ボルト接合を併用した継手の基本性能, 日本建築学会学術公園梗概集, pp779-780, 2019.9
- 3) 渡邊洋介, 高野春菜, 岡崎太郎, 堀井久一, 麻里哲広: 鋼材どうしの接着接合がせん断を受ける場合の強度と破壊, 日本建築学会学術公園梗概集, pp967-968, 2018.9