

緩衝ゴムの厚さを変化させたシート剥離で終局に至る AFRP シート曲げ補強 RC 梁の漸増繰返し衝撃荷重載荷実験

Consecutive impact loading test of cushion rubber set RC beams strengthened in flexure with bonded AFRP sheet reaching ultimate state with sheet debonding in case of varying rubber thickness

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
(株) 構研エンジニアリング
三井住友建設(株)

○正 員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawai)
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正 員 鈴木 健太郎 (Kentaro Suzuki)
フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

1. はじめに

近年、斜面の経年劣化や異常気象などに伴う落石規模の大型化が問題視されており、設計時の落石荷重を上回る外力が構造物に作用する事例が多数確認されている。このような状況を鑑み、著者らは構造物の耐衝撃性向上法の一つとして軽量で、かつ耐食性・施工性に優れた連続繊維 (FRP) 材に着目し、FRP シート下面接着曲げ補強を施した RC 梁に関する耐衝撃挙動について検討を行ってきた。

その結果、FRP シート補強により RC 梁の耐衝撃性が向上することや、シート目付量の大小によってシートの破壊形式が異なることが明らかとなっている¹⁾。また、これら一連の検討において、RC 梁に重錘を複数回衝突させる繰返し衝撃荷重載荷実験も合わせて実施している。このような場合には、シート破断や剥離に至らず荷重点部近傍の圧縮破壊が卓越し、終局に至る場合も確認されている。すなわち、荷重点部の圧縮破壊を抑制する形で実験を実施した場合には、さらに耐衝撃性が向上するものと考えられる。

以上より、著者らは、荷重点部に厚さ 50 mm の緩衝ゴムを設置したシート補強 RC 梁を対象に衝撃荷重載荷実験を実施している²⁾。その結果、1) 緩衝ゴムを設置することで最大衝撃力を 1/6 程度まで抑制可能であるもののゴム設置の有無により力積には大きな差異が生じないことや、2) 破壊傾向が抑制されることによってシート補強 RC 梁の耐衝撃性がより向上すること、などを明らかにしている。しかしながら、これらはシート目付量や荷重方法、あるいは緩衝ゴムの厚さなどが限定的であり、緩衝ゴムを設置した場合における AFRP シート曲げ補強 RC 梁に関する耐衝撃性能の検討は未だ十分に行われていないのが現状である。

このような観点から、本研究では荷重点部の局所的な損傷を抑制するために緩衝ゴムを設置した場合における AFRP シート曲げ補強 RC 梁に関する基礎データの収集を目的として、荷重点部に設置する緩衝ゴムの厚さを変化させた重錘落下衝撃荷重載荷実験を実施した。本研究では、特に単一荷重時にシート剥離で終局に至る場合に着目して検討を行うこととした。なお、荷重毎に重錘落下高さを徐々に大きくしていく漸増繰返し荷重によって実験を行った。また、比較のために緩衝ゴムを設置していない場合についても同様に検討を行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 には、試験体の形状寸法、配筋および補強状況を

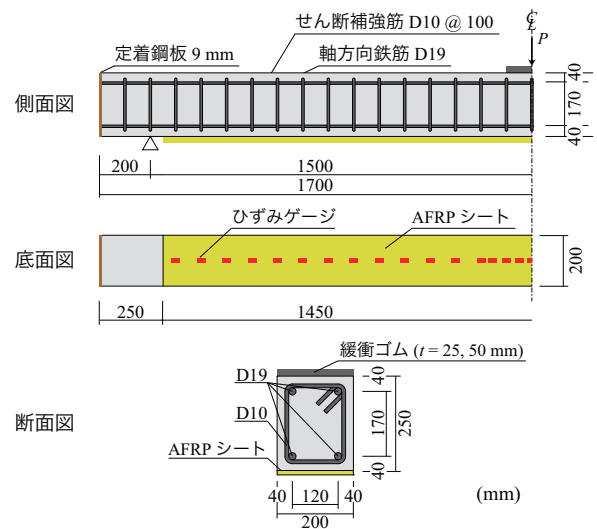


図-1 試験体概要

表-1 AFRP シートの力学的物性値 (公称値)

目付量 (g/m ²)	保証 耐力 (kN/m)	設計厚 (mm)	引張 強度 f_{au} (GPa)	弾性 係数 E_a (GPa)	破断 ひずみ ϵ_{au} (%)
830	1,176	0.572	2.06	118	1.75

示している。本実験に用いた試験体の形状寸法 (梁幅 × 梁高 × スパン長) は、200 × 250 × 3,000 mm である。軸方向鉄筋は上下端に D19 を各 2 本配置し、梁軸方向端面に設置した厚さ 9 mm の定着鋼板に溶接固定している。せん断補強筋には D10 を用い、100 mm 間隔で配筋している。また、梁底面には支点 50 mm 手前まで AFRP シート (目付 830 g/m²) を接着している。なお、シートの接着は、梁底面の補強範囲にプラスト処理を施してエポキシ系プライマーを塗布し、指触乾燥状態であることを確認の後、エポキシ系含浸接着樹脂を用いて行っている。養生期間は 1 週間程度である。表-1 には本実験で用いた AFRP シートの力学的特性を一覧にして示している。

図より、荷重点部には硬度 65 の天然ゴム緩衝材を設置することとし、その形状寸法 (幅 × 長さ) は、梁幅および重錘円柱部直径を考慮して 200 × 200 mm とした。また、厚さ t に関しては $t = 25, 50$ mm の 2 種類を用いた。なお、比較のため緩衝ゴムを設置しない場合についても検討を行った。

表-2 試験体一覧

試験体 No.	実験 ケース名	設定 重錘落下 H (m)	設定重錘 衝突速度 V (m/s)	実測重錘 衝突速度 V' (m/s)	実測入力 エネルギー E (kJ)	コンクリート 圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋 降伏強度 f_y (MPa)	せん断筋 降伏強度 f_{sy} (MPa)	終局状況
1	AN-H1	1	4.43	4.45	2.97	33.7	371	402	—
	AN-H2	2	6.26	6.11	5.61				—
	AN-H2.5	2.5	7.00	6.99	7.33				シート剥離
2	AR25-H1	1	4.43	4.43	2.95	36.6	400	377	—
	AR25-H2	2	6.26	6.23	5.82				—
	AR25-H2.5	2.5	7.00	7.05	7.45				シート剥離
3	AR50-H1	1	4.43	4.52	3.06	32.4	379	364	—
	AR50-H2	2	6.26	6.24	5.85				—
	AR50-H2.5	2.5	7.00	7.16	7.69				シート剥離

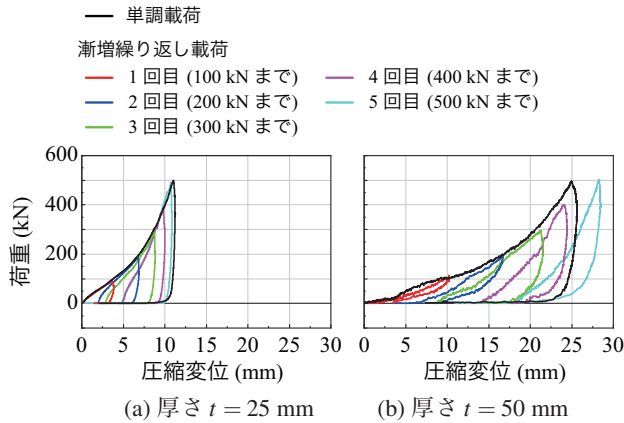


図-2 緩衝ゴムの荷重-変位関係

図-2には、緩衝ゴム単体の静的圧縮試験より得られた荷重-変位関係を示している。試験は、載荷用鋼版を介して一度に500 kNまで載荷する単調載荷と、100 kNずつ荷重を増加させながら500 kNまで載荷と除荷を繰り返す漸増繰返し載荷の2ケースを実施した。

図-2 (a) に示す厚さ $t = 25$ mm の緩衝ゴムの結果に着目すると、単調載荷において500 kNの荷重到達時に11 mm程度圧縮変形しており、載荷前のゴムの寸法から公称応力および公称ひずみを換算すると12.5 MPaの応力発生時に45%程度のひずみが生じているものと評価される。また、繰返し載荷時においても、単調載荷時とほぼ同様な応答を示すことが確認できる。

図-2 (b) に示す厚さ $t = 50$ mm の場合には、単調載荷において500 kNの荷重到達時に25 mm程度、すなわち50%程度圧縮ひずみが生じていることが分かる。繰返し載荷時には、厚さ $t = 25$ mm の場合と同様に単調載荷時とほぼ応答が等しいものの、厚さ $t = 50$ mm の方が載荷毎の除荷勾配が緩やかである。

表-2には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体は、緩衝ゴム設置の有無や厚さを変化させた全3体である。表中の実験ケース名のうち、第一項目に関して、ANは緩衝ゴム無し（直接載荷）を、ARは緩衝ゴム有りを表しており、付随する数値はゴムの厚さ（mm）を示している。また、第二項目のHに付随する数値は衝撃載荷時の設定重錘落下高さ（m）を表している。

いずれの試験体に関しても重錘落下高 H を $H = 1, 2, 2.5$ mと徐々に大きくしていく漸増繰返し載荷を実施してお

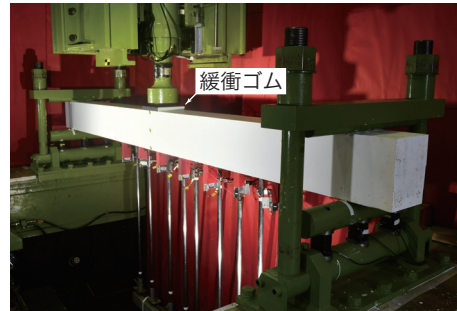


写真-1 衝撃荷重載荷実験装置

り、いずれも3回目落下においてシート剥離で終局に至っている。なお、表には、本実験に用いた各試験体のコンクリートの圧縮強度 f'_c 、主鉄筋およびせん断補強筋の降伏強度 f_y , f_{sy} も併せて示している。

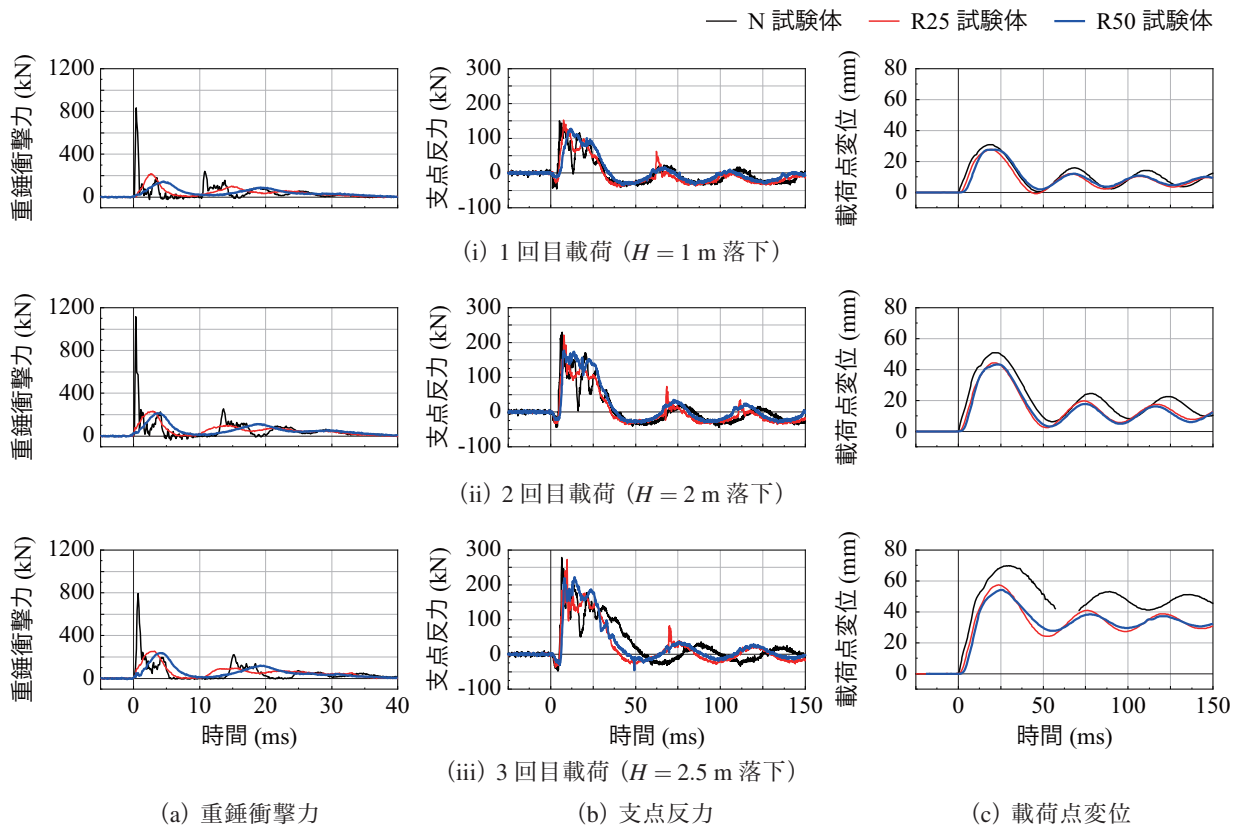
2.2 実験方法および測定項目

写真-1には、衝撃載荷時における実験装置と試験体の設置状況を示している。漸増繰返し衝撃荷重載荷実験は、質量300 kg、先端部は直径150 mm、高さ2 mmの球形状を有する鋼製重錘を載荷毎に落下高さを徐々に大きくし、梁のスパン中央部に3回自由落下させることにより行っている。前述のように、1, 2, 3回目載荷時の設定重錘落下高さ H はそれぞれ、 $H = 1, 2, 2.5$ mと設定した。なお、試験体の両支点部は、回転を許容し、矩形鋼製梁によって浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造となっている。

本実験の測定項目は、重錘衝撃力、合支点反力（以後、単に支点反力）、スパン中央点変位（以後、単に変位）、およびAFRPシートの軸方向ひずみ、である。なお、重錘衝撃力と支点反力は、起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを用いて計測している。また、変位はレーザ式非接触型変位計を用いて計測した。さらに、実験時にはひび割れ分布やAFRPシートの剥離状況の他、変位計のバックアップとして2,000 fpsの高速度カメラ撮影も行っている。

3. 実験結果

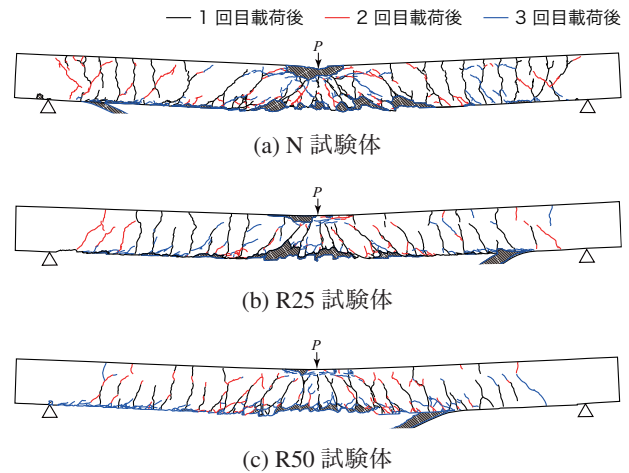
図-3には、全実験ケースに関する重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位の各種時刻歴応答波形を載荷回数毎に比較して示している。黒線が緩衝ゴム無し、赤・青線がそれぞれ厚さ $t = 25, 50$ mmの緩衝ゴムを設置した場合の結果である。なお、図中の横軸は、重錘が試験体に衝突した時刻を零としている。



図－3 各载荷時に関する各種時刻歴応答波形

まず、図－3 (a) の重錘衝撃力波形に着目すると、1 回目载荷時のゴムを設置していない場合には、重錘衝突直後、継続時間が非常に短く最大値を示す第1波が励起した後、最大 200 kN 程度の第2波が後続する波形性状を示している。一方で、ゴムを設置した場合には、厚さにかかわらず、最大値が大幅に低減し、かつ継続時間が延びた正弦半波状の波形性状を示しており、ゴムを設置しない場合とは波形性状が大きく異なる。最大衝撃力を確認すると、AN/AR25/AR50 試験体においてそれぞれ、833, 220, 144 kN となっており、緩衝ゴムを設置することによって、15~25 % 程度まで最大衝撃力を低減していることが分かる。また、2, 3 回目载荷時に着目すると、1 回目载荷と比較して落下高さが大きいことにより、AN 試験体の 3 回目载荷を除き、いずれの試験体においても最大衝撃力が大きい。しかしながら、その概形に大きな差異はないものと判断される。なお、AN 試験体の 3 回目载荷時における最大衝撃力は、1, 2 回目载荷よりも小さく示されているが、これは後述するひび割れ分布からも分かるように、直接载荷によって载荷点部が大きく損傷したことが一因と推察される。

図－3 (b) の支点反力波形に着目すると、1 回目载荷時の緩衝ゴムを設置していない場合には、重錘衝突直後に負値を示した後、継続時間が 35 ms 程度で最大約 150 kN の反力を示す高周波成分が合成された正弦半波の波形性状を示している。また、40 ms 以降には減衰自由振動状態に移行していることも分かる。緩衝ゴムを設置した場合には、厚さによらず、設置していない場合の高周波成分を取り除いたような波形性状を示していることが見て取れる。なお、载荷回数の増加に伴って、いずれの試験体も最大値が大きくなるとともに、損傷が累積されることより主波動の継続時



図－4 実験終了後におけるひび割れ分布の比較

間延びる傾向にあることが分かる。

図－3 (c) の载荷点変位波形に着目すると、1 回目载荷時には緩衝ゴム設置の有無に関わらず、20 ms 程度で最大値に到達後、減衰自由振動状態に移行している様子が確認できる。ここで、最大変位に着目すると、AN 試験体の変形量が若干大きいものの、いずれの試験体も約 30 mm の値を示しており、最大衝撃力と変形量は必ずしも対応していない。これは、衝撃力波形を用いて評価した力積が、いずれの試験体においてもほぼ等しいことにより、その変形量も同程度になったものと考えられる。なお、2, 3 回目载荷時には、後述するひび割れ分布からも分かるように、緩衝ゴムを設置せず直接载荷することで緩衝ゴムを設置した場合

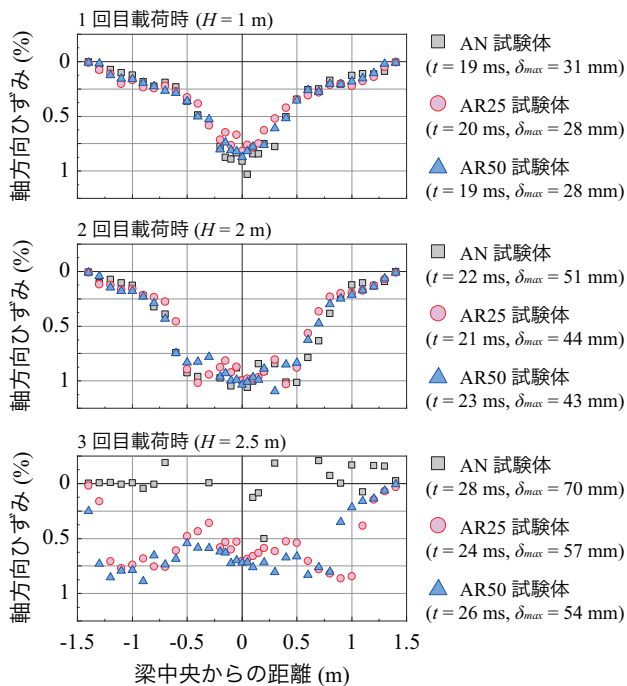


図-5 最大変位時における AFRP シートのひずみ分布

と比較して、載荷点部や支点部近傍を含めた梁全体の累積される損傷が大きいことより、その変形量も対応して大きく示されているものと推察される。

図-4には、各試験体側面における3回目載荷後のひび割れ分布性状を示している。なお、各載荷時に進展したひび割れごとに色分けして示しており、黒塗り部は圧壊による損傷領域を示している。

まず、緩衝ゴムを設置しないN試験体に着目すると、載荷点近傍下縁部において曲げひび割れに加えて多数の斜めひび割れが顕在化していることが分かる。また、その斜めひび割れは若干ではあるものの梁右側の方が多い。さらに、支点近傍部における上縁から下縁に進展するひび割れも確認でき、重錘衝突直後に載荷点直下に曲げひび割れが発生した後、曲げ波が両端固定梁のような状態で支点近傍に伝播していくことを暗示している。なお、載荷点部周辺においては、顕著な圧壊傾向も確認でき、シート剥離によって終局に至っている。

一方で、緩衝ゴムを設置する場合には、その厚さが大きくなるに伴って、梁全体の損傷が小さくなり、斜めひび割れの進展が徐々に抑制される傾向にあることが分かる。これは、緩衝ゴムの設置により、荷重の集中化を防ぎ、部分的に等分布荷重のように作用することが要因と考えられる。なお、緩衝ゴムを設置した場合においても同一の3回目載荷においてシート剥離によって終局に至った。

図-5には、各載荷時の最大変位発生時刻におけるAFRPシートの軸方向ひずみ分布を比較して示している。なお、図中の各ひずみ値には、各載荷時の残留ひずみは考慮していない。

図より、1回目載荷時に着目すると、いずれの試験体においても載荷点直下のスパン中央部約1mの範囲で0.5%以上のひずみが生じており、主鉄筋は降伏しているものと推察される。なお、顕著な差異はないものの、AN試験体

は他の試験体と比較して、ひずみ値が最も大きい。また、緩衝ゴム設置の有無による影響は小さく、その分布性状はほぼ同様である。これらは前述の載荷点変位波形と対応しているものと判断される。

2回目載荷時の分布性状に着目すると、落下高さが大きくなったことより、いずれの試験体に関してもスパン中央部では1%程度のひずみ値を示している。また、いずれも梁中央から0.5mの領域では、ひずみが一定値を示しており、シート剥離の傾向が現れていることを暗示している。なお、梁中央から右側の0.6m程度の範囲に着目すると、AN試験体の場合には他の試験体と比較して鉄筋の降伏領域が広く示されており、前述のひび割れ分布とも対応し、緩衝ゴムが無いことで損傷が大きいことを示唆している。

最後に、3回目載荷時の分布性状に着目すると、AN試験体に関しては最大変位到達前にシート剥離によって終局に至っており、全領域においてひずみが解放されていることが分かる。一方で、緩衝ゴムを設置したAR試験体の場合には、広い領域で平坦なひずみ分布を示しており、ほぼ全領域に渡ってシートの剥離傾向が現れている。なお、前述の通り、AR試験体に関してもその後シート剥離で終局に至っている。

4. まとめ

本研究では、緩衝ゴムを設置した場合におけるシート剥離で終局に至るAFRPシート接着曲げ補強RC梁を対象に、終局に至るまで落下高さを徐々に大きくしていく漸増繰返し衝撃荷重載荷実験を実施した。緩衝ゴムは厚さを25,50mmの2種類に変化させ、基準試験体として緩衝ゴムを設置しない場合についても同様に実験を行った。本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 緩衝ゴムを設置することによって、最大衝撃力を大幅に低減可能であるものの、緩衝ゴムが梁の全体応答に与える影響は小さい。
- 2) ただし、緩衝ゴムによって載荷点部の損傷が抑制され、かつ梁全体の損傷も低減される。これは、緩衝ゴムが荷重の集中を抑制し、分散化することによるもので、載荷回数増加によって梁全体に累積される損傷状況には差異が生じる。
- 3) 直接載荷時に「シート剥離」で終局に至るシート補強RC梁は、緩衝ゴム設置やその厚さに関わらず、同様に「シート剥離」によって終局に至る。

謝辞

本研究で用いたAFRPシートはファイベックス(株)、接着剤等は住友ゴム工業(株)、緩衝ゴムはシバタ工業(株)からご提供頂きました。ここに記して、感謝致します。

参考文献

- 1) 瓦井智貴, 小室雅人, 岸徳光, 三上浩, Le Huy Sinh: 衝撃荷重載荷時におけるAFRPシート接着曲げ補強RC梁の破壊形式に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 65A, pp. 901-911, 2019.
- 2) 鈴木健太郎, 小室雅人, 瓦井智貴, 岸徳光, 三上浩: 緩衝ゴムを設置したAFRPシート接着曲げ補強RC梁の重錘落下衝撃実験, 構造工学論文集, 土木学会, vol. 67A, pp. 804-911, 2021.