

# 論文 FRP シートを下面接着した RC 版の重錘落下衝撃実験

岸 徳光\*<sup>1</sup>・三上 浩\*<sup>2</sup>・安藤智啓\*<sup>3</sup>・今野久志\*<sup>4</sup>

**要旨:** 本研究では, FRP シート補強 RC 版の耐衝撃性状を検討するため, 各種 FRP シートを下面接着した RC 版を用いた重錘落下衝撃実験を行った。用いたシートは AFRP と CFRP の 1 方向シートおよび AFRP 2 方向シートである。本実験結果より, 1) FRP シート補強を施すことにより, 動的耐力は無補強の場合に比べて 1.2 ~ 1.3 倍程度増大する, 2) 動的耐力を静的耐力で除した動的倍率は, 補強の有無や補強方法に関わらず 2 倍程度である, 3) 接着する FRP シートの引張剛性が大きいほど裏面剝離に近い破壊性状を示す, 等が明らかとなった。

**キーワード:** FRP シート, RC 版, 耐衝撃性状, 裏面剝離

## 1. はじめに

近年, 既存鉄筋コンクリート (RC) 構造物の補強方法として, 各種の連続繊維シート (以後, FRPシート) を用いる工法が盛んに採用されるようになった。FRPシート補強工法は, 1) 材料が軽量で施工が簡便なため重機を必要としない, 2) 現場合わせの施工が可能で, 工期を短縮可能, 3) 耐食性に優れている, などの特徴を有している。しかし, 壁や版などの面部材を補強するためには, 通常 1 方向強化 FRP シートを直交して最低 2 枚接着する必要がある, さらなる工費縮減, 工期短縮が望まれている。また, FRP シートを接着した RC 版の静的耐荷性状に関する研究例<sup>1), 2)</sup> はいくつか見られるものの, 衝撃荷重作用下の耐荷性状に関する研究はほとんど見あたらない。

本研究では, FRP シートで補強した RC 版部材の耐衝撃性状を検討するために, 各種 FRP シートを下面接着した RC 版に関する重錘落下衝撃実験を行った。実験に用いた FRP シートは, アラミド繊維製 (AFRP) および炭素繊維製 (CFRP) の 1 方向シートと AFRP の 2 方向シートである。AFRP 2 方向シートは, アラミド繊維束を直交して織り上げシート状にしたもので, 1 回の

施工で 2 方向補強が可能となるため, 工費縮減, 工期短縮に資するものと考えられる。

## 2. 実験概要

表-1 には各試験体の補強方法と重錘の衝突速度を示している。また, 表-2 には本実験に用いた各 FRP シートの材料特性を示している。

本実験に用いた試験体は表-1 に示す通り, 無補強 RC 版と表-2 に示す各 FRP シートを下面接着した RC 版の計 5 体である。A1, C1 試験体は各々 AFRP および CFRP の 1 方向シートを直交して 1 層ずつ, A2-1, A2-2 試験体は AFRP の 2 方向シートを各々 1 層および 2 層接着した RC 版である。なお, A1, C1 および A2-1 試験体に用いた各シートの直交 2 方向の引張剛性 ( $E \cdot t$ ) はほぼ同等である。一方, A2-2 試験体のシートのそれは他試験体の約 2 倍となっている。

図-1 には, 本実験に用いた試験体の形状寸法と配筋状況およびシートの接着範囲を示している。RC 版の寸法は  $1,650 \times 1,650 \times 150$  mm である。また, 下端の主筋および配力筋には D13 を用い, これを 150 mm 間隔で配置している。RC 版の一

\*1 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)

\*2 三井建設 (株) 技術研究所 主席研究員 工博 (正会員)

\*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 工修 (正会員)

\*4 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室主任研究員 工修 (正会員)

表-1 試験体の補強方法と衝突速度の一覧

試験体名	補強方法	衝突速度 (m/s)
N	無補強	1, 2, 3, 4
A1	AFRP 1方向シート直交	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
C1	CFRP 1方向シート直交	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
A2-1	AFRP 2方向シート1層	1, 2, 3, 4, 4.5, 5
A2-2	AFRP 2方向シート2層	1, 2, 3, 4, 4.5, 5, 5.5

表-2 各種 FRP シートの材料特性

名称	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ t (mm)	引張強度 (GPa)	弾性係数 E (GPa)	引張剛性 E · t (kN/mm)
AFRP 1方向シート	415	0.286	2.48	126.5	36.2
CFRP 1方向シート	300	0.167	4.07	230.5	38.5
AFRP 2方向シート	435/435	0.3/0.3	2.48	126.5	38.0/38.0

※ FRP シートの材料特性はカタログ値である。

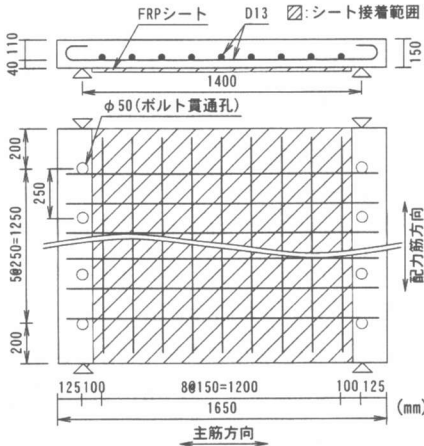


図-1 試験体の概要

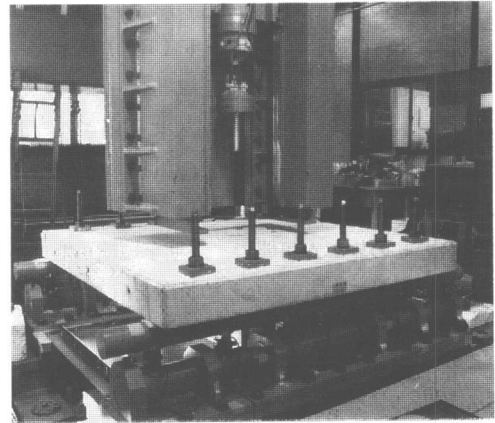


写真-1 実験状況

対辺は支持間隔が 1,400 mm であり、その支点部は支点反力測定用ロードセル付き支点治具を用いて試験体の浮き上がりを防止し、かつ回転のみ許容するピン支持に近い構造となっている。なお、他対辺は自由支持としている。写真-1 は実験状況を示している。実験時のコンクリートの材令は 107 日であり、その材料物性は、圧縮強度、弾性係数、ポアソン比が、それぞれ 16.7 MPa、13.9 GPa、0.23 であった。また、鉄筋には SD295A を使用し、その降伏強度は 354.5 MPa であった。

各 FRP シートの接着は、まず RC 版下面をショットブラスト処理（処理深さ 1~2 mm 程度）し、プライマーを 2 度塗りした後に実施した。1 方向シート接着の場合には 30 cm 幅のシートを用

い、1 層目を主筋方向に接着した後、2 層目を配力筋方向に接着している。2 方向シート接着の場合には、1 m 幅のシートを用い、A2-1 の場合には主筋方向中央部に接着し、その左右をラップ長 10 cm として対称になるように 42.5 cm 幅で接着している。A2-2 の場合にはさらに配力筋方向に A2-1 と同様に接着することとした。また、いずれの場合も、シートの端部は定着のための特別な処理を施していない。

実験は、質量 300 kg、先端部が直径 60 mm で 2 mm のテーパがついた球形状である鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行った。その重錘には衝撃力測定用ロードセルが組み込まれている。載荷法としては、第 1 回目の衝突速度

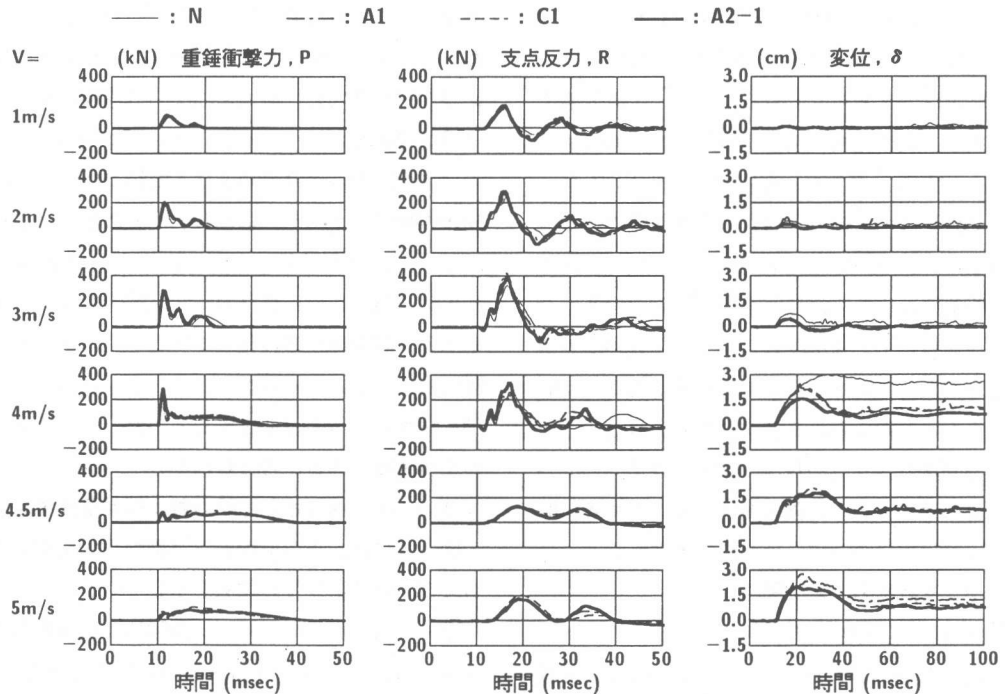


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

を 1 m/s, 増分速度を 1 m/s (終局時近傍では 0.5 m/s)として, 終局に至るまで版中央点に載荷する繰り返し載荷法を採用した。なお, 衝撃荷重載荷時の RC 版の終局状態は, 未だいずれの示方書にも基準化されていない。そのため, 本研究では最大累積残留変位が支点間距離の 1/50 (28 mm) に達した時点と設定した。計測項目は重錘衝撃力, 合支点反力 (以後, 支点反力) および非接触式レーザ変位計による RC 版の載荷点変位 (以後, 変位) の各応答波形である。各波形は高帯域用データレコーダ (応答周波数: DC~40 kHz) に一括収録し, 0.1 ms/word で A/D 変換を施している。また, 実験終了後には主筋方向に版中央部を切断して破壊面を観察した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 各種応答波形

図-2 には, 各試験体の重錘衝撃力, 支点反力および変位に関する応答波形を各衝突速度毎に示している。ここでは, 図が不明瞭になることを避けるため, A2-2 試験体の波形は省略している。

図より, 重錘衝撃力波形の波形性状は各試験体で大差なく, 載荷初期に急激に立ち上がる第 1 波目の振幅は  $V = 3 \text{ m/s}$  まで衝突速度の増加に対応して増大していることがわかる。 $V = 4 \text{ m/s}$  では第 1 波の振幅が減少に転じ, その後, 継続時間が 20 ms 程度の低振幅の波形が生じている。 $V = 4.5 \text{ m/s}$  以降では, 載荷初期の急激な立ち上がりが消し, 継続時間が 30 ms 程度で低振幅のほぼ正弦半波状の波形を示している。

一方, 支点反力波形は N 試験体と FRP シート補強試験体で若干振幅の大きさに差異がみられるものの, 全試験体でほぼ同様の波形性状を示している。また, 支点反力の第 1 波目の振幅は, 重錘衝撃力波形の場合と同様に  $V = 3 \text{ m/s}$  までは衝突速度の増加に比例して大きくなるものの,  $V = 4 \text{ m/s}$  の場合には減少し,  $V \geq 4.5 \text{ m/s}$  では継続時間が 25 ms 程度の正弦波的な分布を示している。

変位波形に関しては,  $V = 3 \text{ m/s}$  までは最大振幅が衝突速度の増加に対応して増大していることがわかる。残留変位もほぼ零である。その波形性状は, N 試験体の場合で若干振幅が大きく示され

ているものの全試験体で大略同様である。  $V = 4$  m/s では、各試験体の応答変位が大幅に増加し、かつ残留成分も発生している。特に、N 試験体では最大応答変位程度の変位が残留して終局に至っている。なお、 $V \geq 4.5$  m/s では、各 FRP シート補強試験体の変位波形形状は大略同様である。

以上より、全試験体において  $V = 3$  m/s までは残留変位は小さく弾性応答が支配的である。しかしながら、 $V \geq 4$  m/s において変位波形の残留成分が増大していることより、塑性応答が支配的になるものと考えられる。すなわち、後述のように、重錘衝撃力や支点反力が最大となる  $V=3$  m/s の場合には、シート補強の有無に関わらず各試験体は弾性限界に至っているものと推察される。

### 3.2 支点反力-変位関係

図-3 には、弾性限界と考えられる  $V = 3$  m/s と塑性化が進行する  $V = 4$  m/s における各試験体の支点反力-変位関係を示している。図より、変位レベルは  $V = 3$  m/s では N 試験体で大きく、 $V = 4$  m/s では A2-1, -2 試験体で小さく示されているものの、各試験体の支点反力-変位曲線の

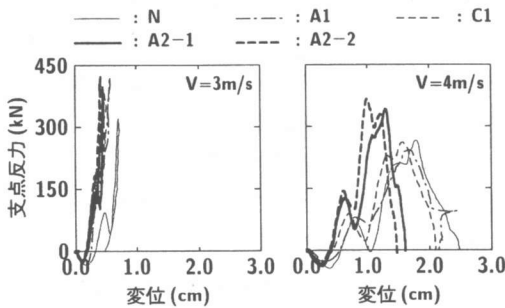


図-3 支点反力-変位関係

分布形状は大略類似していることがわかる。すなわち、 $V = 3$  m/s では各試験体の支点反力はほぼ線形的に増大し、最大支点反力到達後にほぼ同じ経路で除荷されている。これは、この衝突速度では支点反力と変位で囲まれる面積が小さく、試験体の吸収エネルギー量がわずかであることを示している。一方、 $V = 4$  m/s ではいずれの試験体も大略三角形の支点反力-変位関係の分布形状を示し、試験体が塑性化してエネルギーを大きく吸収していることがわかる。これより、後述する押し抜きせん断面が形成されるのは、 $V \geq 4$  m/s の衝突速度であると考えられる。

### 3.3 衝突速度と各衝撃力および累積残留変位の関係

図-4 には、衝突速度と重錘衝撃力、支点反力および累積残留変位の関係を示している。

図-4 (a) より、A2-1, -2 試験体の重錘衝撃力は  $V = 3$  m/s と  $V = 4$  m/s でほぼ同等であるが、他試験体の場合は  $V = 3$  m/s で最大値を示した後、 $V = 4$  m/s で若干低下していることがわかる。また、 $V = 4.5$  m/s では全試験体で 80 ~ 90 kN 程度まで大きく低下している。

図-4 (b) より、支点反力は N 試験体で最も小さいレベルを示し、全般的に A2-1, -2 試験体で大きいことがわかる。A1, C1 試験体の場合にはいずれも  $V = 3$  m/s で最大値を示し、特に A1 試験体の支点反力が A2-2 試験体と同程度に大きく示されている。しかしながら、 $V = 4$  m/s では両者とも N 試験体と同程度にまで大きく減少している。一方、A2-1, -2 試験体では重錘衝撃力の場合と同様に、 $V = 4$  m/s における支点反力の

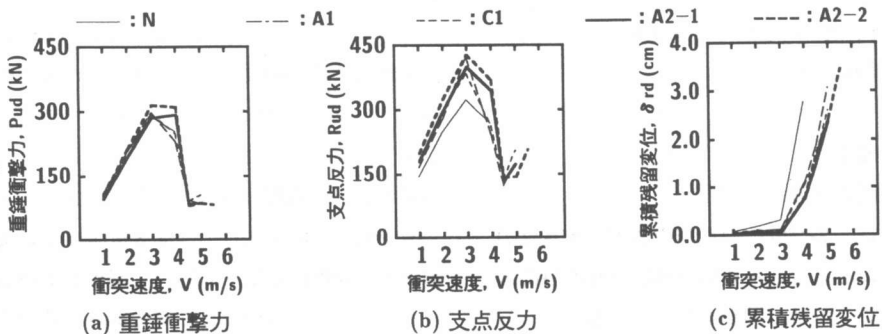


図-4 衝突速度と重錘衝撃力、支点反力および累積残留変位の関係

表-3 静的および動的耐力

試験体名	動的耐力 (kN) (1)	動的耐力比	静的耐力 (kN) (2)	静的耐力比	動的倍率 (1)/(2)
N	320.5	1.0	141.5	1.0	2.27
A1	421.1	1.31	186.4	1.32	2.26
C1	382.3	1.19	183.4	1.30	2.08
A2-1	398.5	1.24	187.8	1.33	2.12
A2-2	426.8	1.33	206.4	1.46	2.07

低下が A1, C1 試験体ほど顕著ではない。以上より、2 方向シート補強によって、衝撃荷重載荷時における RC 版の壊滅的破壊が抑制されることがわかる。これは、2 方向シートの応力分配性が、1 方向シートを直交して貼り付ける場合より優れていることを暗示している。しかしながら、2 方向シートの層数による効果はさほど顕著ではない。

図-4 (c) より、全試験体における累積残留変位（以後、残留変位）は  $V = 3 \text{ m/s}$  程度までは衝突速度の増加とともにほぼ線形に増加し、 $V \geq 4 \text{ m/s}$  では指数関数的に増大していることがわかる。また、 $V = 4 \text{ m/s}$  で残留変位を評価すると、N 試験体の場合が最も大きく、A2-1, -2 試験体で最も小さい。なお、最大支点反力は全試験体で  $V = 3 \text{ m/s}$  で生じている。一方で、この時の衝突速度における残留変位は N 試験体で 3 mm 程度、他試験体で 1 mm 以下と極めて微小である。

### 3.4 静的耐力および動的耐力

別途実施した静載荷実験では全ての試験体が押し抜きせん断破壊に至ったことから、表-3 には押し抜きせん断耐力（以後、静的耐力）と本実験より得られた最大支点反力を合わせて示している。ここでは、最大支点反力を動的耐力と見なして整理している。また、表中には N 試験体を基準に無次元化した動的耐力比と静的耐力比および動的耐力を静的耐力で除した動的倍率も合わせて示している。なお、静載荷実験は載荷治具の先端形状が衝撃実験の場合と等しく、載荷速度（衝突速度）のみが異なるだけである。

表より、動的耐力比は、A2-2 試験体の場合が 1.33 と最も大きいものの、FRPシートの方向性や材料特性、補強層数に関わらず、FRPシート補強を施すことにより、動的耐力が 1.2 ~ 1.3 倍程度

向上することがわかる。一方、静的耐力比は FRPシートの引張剛性がほぼ等しい A1, C1, A2-1 試験体で 1.3 程度、A2-2 試験体で 1.5 弱であり、衝撃載荷時よりも耐力比が大きい。この理由は後節 3.5 で検討することとする。なお、動的倍率に関しては、いずれの試験体も 2 程度であった。

### 3.5 押し抜きせん断性状

図-5 には、実験終了後の RC 版の裏面および中央部切断面のひび割れ性状を示している。裏面の状況を見ると、N 試験体の場合には配筋方向の曲げひび割れとねじりモーメントによる対角線状のひび割れ、および押し抜きせん断による円形のひび割れが発生している。一方、シートの引張剛性がほぼ同等である A1, C1, A2-1 試験体の裏面の状況はほぼ同様である。すなわち、版中央部ではシートとコンクリートが円形状に固着、その外周ではコンクリートがリング状に塑性化、さらにその外周ではコンクリートとシートが完全に接着している。しかしながら、A2-2 試験体では載荷点直下の円形固着部分が小さく、その外周に広範囲なコンクリートの塑性化部分が進行し、他の補強試験体の性状と異なっている。

次に、切断面の状況を見ると、N 試験体では版上面から約  $45^\circ$  の押し抜きせん断面が形成され終局に至っている。一方、FRPシート補強を施した試験体の押し抜きせん断面の性状は、シートの引張剛性がほぼ同等である A1, C1, A2-1 試験体間で類似である。また、それらの押し抜きせん断面は N 試験体と異なり、版厚中心付近から下方に緩やかな角度で形成されている。一方、引張剛性の大きいシートを用いた A2-2 試験体の場合には、押し抜きせん断面の形成される位置がさらに下方に推移し版下面に接近している。このように、

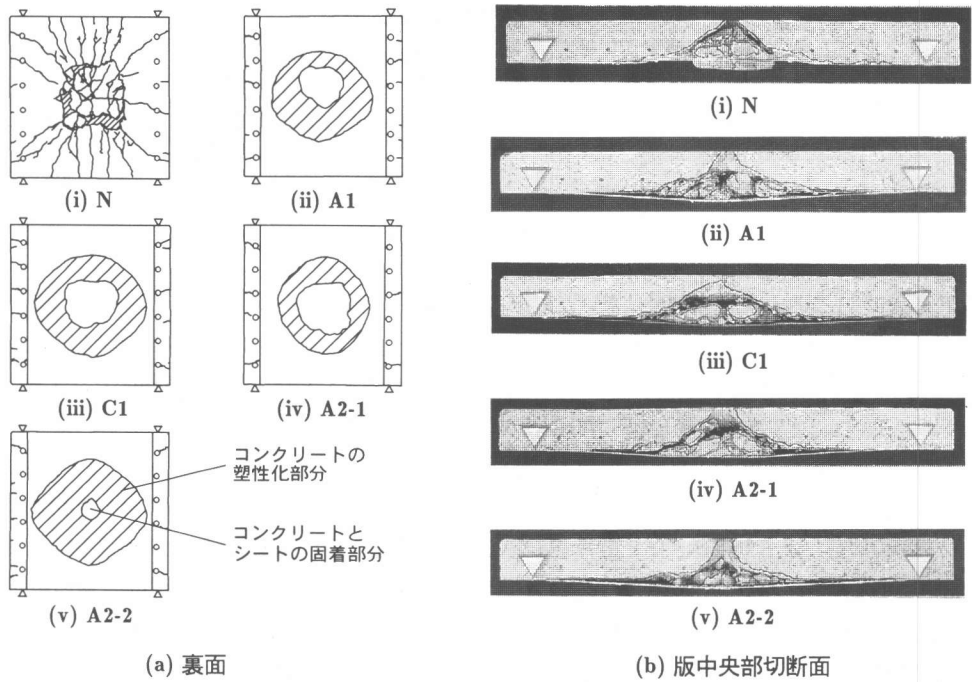


図-5 実験終了後の RC 版裏面および版中央部切断面のひび割れ性状

FRPシート補強した試験体では、押し抜きせん断面がシートの引張剛性に対応して版下方に推移して形成され、裏面剝離に近い状態となる。シート補強によって動的耐力が大幅には向上しないのは、このように版の有効高さが見かけ上小さくなることによるものと推察される。

#### 4. まとめ

衝撃的外力を受けるRC版の補強方法として版下面にFRPシートを接着する工法に着目し、シートの材料特性、補強方向（接着方向）および層数が耐衝撃性状に与える影響を重錘落下衝撃実験を行うことにより検討した。本実験の範囲内で得られた知見を要約すると、以下の通りである。

- (1) 重錘衝撃力、支点反力、変位波形の性状には試験体による差異は少ない。いずれの試験体も  $V=3\text{m/s}$  までは弾性応答が支配的であり、 $V=4\text{m/s}$  において塑性化が著しく進行する。
- (2) AFRP 2方向シートを用いて補強する場合には、衝突速度の増加に伴う支点反力の著しい低下や壊滅的な破壊が抑制される。

- (3) 無補強試験体を基準とした補強試験体の耐力は、静載荷では 1.30 ~ 1.46 倍、衝撃載荷では 1.19 ~ 1.33 倍であり、衝撃載荷時の補強効果が若干低い。また、衝撃耐力を静的耐力で除した動的倍率は 2 程度であり、補強の有無や補強方法による差異は少ない。
- (4) 押し抜きせん断耐荷性状は補強の有無や補強材の引張剛性に大きく影響され、引張剛性が大きいほど押し抜きせん断面の形成される位置が下方に推移する。その結果、裏面剝離が形成されやすくなり、衝撃耐力の向上効果が静載荷時に比べて小さくなる。

#### 参考文献

- 1) 中島規道, 三上 浩, 角田 敦, 鍋島益弘: 二方向アラミド繊維シートによる RC スラブの押し抜きせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, 1465-1470, 1999.
- 2) 森 成道, 若下藤紀, 松井繁之, 西川和廣: 炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究, 橋梁と基礎, 1995.