室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の耐衝撃挙動

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 日本コンクリート工学会 公開日: 2012-07-18 キーワード (Ja): 高性能軽量コンクリート, 曲げ破壊型RC梁, 耐衝撃挙動, 重錘落下衝撃実験 キーワード (En): 作成者: 竹本, 伸一, 岸, 徳光, 安藤, 智啓, 松岡, 健一 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/1427

論文　高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の耐衝撃挙動

竹本伸一[*1]・岸　徳光[*2]・安藤智啓[*3]・松岡健一[*2]

要旨：本研究では，高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の耐衝撃挙動に関する基礎資料を収集するために，高性能軽量コンクリートおよび普通コンクリートを用いたRC梁を5体ずつ製作し，全10体に関する静的および重錘落下衝撃実験を実施した。耐衝撃挙動の検討は，普通コンクリートRC梁に関する実験結果と比較する形で行った。検討結果，重錘衝撃力，支点反力および載荷点変位波形は両梁でほぼ類似の分布性状を示し，高性能軽量コンクリートRC梁は普通コンクリートRC梁と同程度の耐衝撃性能を有することが分かった。

キーワード：高性能軽量コンクリート，曲げ破壊型RC梁，耐衝撃挙動，重錘落下衝撃実験

1．はじめに

近年，道路橋や鉄道橋等の上部構造の軽量化を図ることを目的として，新しい構造形式の開発のみならず，新しい材料の開発およびその適用性検討が盛んに行われるようになってきた。このうち，新材料として期待されるものの一つに，粗骨材に高性能軽量骨材を用いたコンクリート[1)]（以後，高性能軽量コンクリート）がある。高性能軽量骨材は，24時間吸水率が3～5％と非常に小さいこと，比重が0.8～1.2と小さいにも拘わらず圧かい荷重が1,000 N以上あること，この骨材を用いて35～65 MPaの圧縮強度を有するコンクリートの製作が可能になること等，従来の人工軽量骨材に比べて格段に品質が向上している。

既に，高性能軽量コンクリートを用いた梁や柱部材の静的な曲げおよびせん断性状に関する実験的・解析的研究が一部の機関で実施されている。その結果，1) 高性能軽量コンクリートの引張強度および曲げ強度は，土木学会コンクリート標準示方書[2)]（以後，示方書）の普通コンクリート梁に対する算定法を用いて評価可能であること[3)]，2) 高性能軽量コンクリートRC梁の静的曲げ耐力は示方書の規定に基づいて普通コンクリートRC梁の場合と同様の手法を用いて算定可能であること[4)]，等が明らかとなり，橋梁等の上部構造への適用の可能性が示されている。しかしながら，不慮の事故による車両衝突に対しても耐衝撃安全性が確保されなければならない高欄部等，耐衝撃用途構造部材への適用性に関してはこれまで検討された研究事例がない。また，高性能軽量コンクリートRC梁の衝撃荷重に対する曲げおよびせん断耐力の規定も，いずれの示方書にも見あたらない。

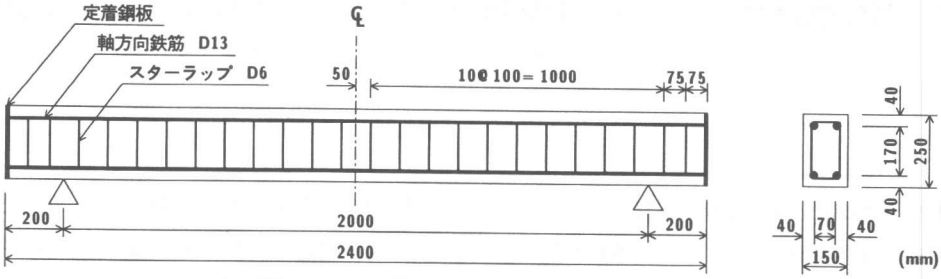
このような観点より，本研究では構造部材の基本である梁部材に着目し，高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の耐衝撃挙動に関する基礎資料を収集することを目的として，普通コンクリートを用いたRC梁と合わせて全10体を製作し，これらRC梁に関する静的および重錘落下衝撃実験を実施した。なお，耐衝撃挙動は，普通コンクリートRC梁に関する実験結果と比較する形で検討を行っている。

2．実験概要

2.1　RC梁の概要

図－1には，高性能軽量コンクリート（High-performance and Light-weight concrete）を用いたRC梁（以後，HL梁）と普通コンクリート（Normal concrete）を用いたRC梁（以後，N

*1 ドーピー建設工業（株）北海道本店　副部長　設計部（正会員）
*2 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）
*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）



図－1　RC 梁の形状寸法および配筋状況

表－1　RC 梁の静的設計値一覧

試験体名	曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断耐力 V_{usc} (kN)	せん断余裕度 $\alpha\ (=V_{usc}/P_{usc})$
HL梁	40.9	99.3	2.42
N梁	40.4	140.2	3.47

表－2　コンクリートの力学的特性

コンクリート	比重	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
軽量	1.85	37.8	2.37	19.7	0.21
普通	2.34	34.6	2.67	25.0	0.23

梁）の形状寸法および配筋状況を示している。ここでは，コンクリート材料の違いのみに着目して耐衝撃挙動を比較するため，形状寸法および配筋は両梁で同様としている。すなわち，形状寸法（梁幅 × 梁高 × 全長）は，両梁とも 150 × 250 × 2,400 mm の直方体である。また，軸方向鉄筋（D13）は梁上下縁の真かぶり 40 mm の位置に2本ずつ配置し，スターラップ（D6）は 100 mm 間隔に配置している。なお，軸方向鉄筋は定着長を節約するため，梁両端面に設置した 9 mm 厚の定着鋼板に溶接している。

表－1には，HL 梁および N 梁の静的設計値の一覧を示している。表中の静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は，示方書[2)]に基づき算定している。なお，HL 梁に関する V_c 値は，示方書[2)]に基づき 70 % に低減して評価している。また，P_{usc}, V_{usc} 算定時の部材係数には，$\gamma_b = 1.0$ を用いている。　せん断余裕度 α はいずれの梁も $\alpha > 1.0$ であることより，設計的に静載荷時には曲げ型で破壊に至ることが予想される。

表－2および表－3には，実験時のコンクリートと鉄筋の力学的特性を示している。高性能軽量コンクリートは，寸法 5 ～ 15 mm の高性能軽量骨材（比重 0.77）と最大寸法 20 mm の白老産の骨材（比重 2.66）を約 1.2 : 1 の重量比で配合した粗骨材を用いて製作している。一方，普通コンクリートは敷生川産の骨材（比重2.67）を粗骨材

表－3　鉄筋の力学的特性

鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D13	SD345	393	206	0.3
D6	SD295A	373		

表－4　実験ケース

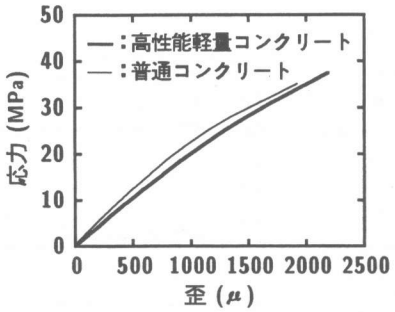
試験体名	静載荷	漸増繰り返し載荷		単一載荷	
	試験体数	試験体数	衝突速度 V (m/s)	試験体数	衝突速度 V (m/s)
HL梁	1	1	1 ～ 4	3	4, 5, 6
N梁	1	1	1 ～ 4	3	4, 5, 6

として用いて製作している。その結果，高性能軽量コンクリートの比重は普通コンクリートに比べて 20 % 程度小さくなっている。また，圧縮強度は若干大きいものの，引張強度および弾性係数はそれぞれ 10 %, 20 % 程度小さい。なお，鉄筋には両梁で力学的特性が同一のものを使用している。

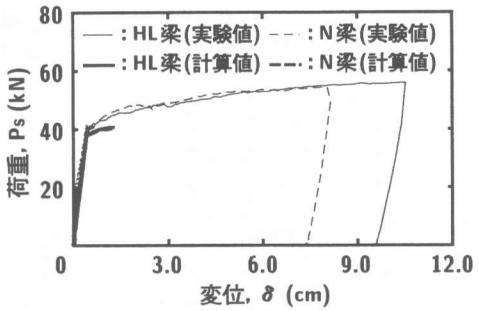
2.2　実験方法および実験ケース

静的実験は，鋼製の載荷治具を用いて，断面方向に全幅，スパン方向中央部に幅 100 mm の部分分布荷重を載荷させて行っている。なお，載荷方法には，荷重が 20, 30, 40 kN に達した時点で一旦零レベルまで除荷し，その後再載荷させる繰り返し載荷法を採用している。40 kN 以降は，上縁コンクリートの圧壊が著しくなる時点まで載荷を続けている。

衝撃実験は，リバウンド防止用治具付の支点治



図－２　応力－歪曲線（圧縮試験結果）



図－３　荷重－変位曲線

具上に設置したRC梁のスパン中央部に所定の高さから重錘を自由落下させることにより行っている。治具全体はRC梁の回転のみ許容するピン支持に近い構造となっている。用いた重錘は質量が300 kgで載荷点部の直径が150 mmの円柱状鋼製重錘である。その底部には衝突時の片当たりを防止するため高さ2mmのテーパが施されている。

表－４には実験ケースの一覧を示している。本衝撃実験では，載荷方法に漸増繰り返し載荷（以後，単に繰り返し載荷）と単一載荷の２種類を採用している。前者は処女載荷の衝突速度および増分速度を１m/sに設定し，RC梁が破壊に至るまで同一試験体に対して繰り返し重錘を落下させる方法であり，後者は繰り返し載荷の最終速度と同一速度およびその＋1，＋2 m/sで未使用の試験体に対して一度だけ重錘を落下させる方法である。ここでは，著者らの過去の研究に基づき[5]，RC梁の累積残留変位が純スパンの２％（４cm）に達した時点を破壊と定義することとした。なお，本実験では，両梁とも繰り返し載荷の衝突速度が4 m/sの時点で破壊に至ったことを確認している。

測定項目は，重錘衝撃力P，合支点反力R（以後，支点反力）および載荷点変位δ（以後，変位）波形である。実験終了後には，RC梁側面に生じたひび割れもスケッチしている。なお，各センサーの応答特性に関する詳細は文献5）に譲る。

３．静的実験結果および考察

図－２には，直径100 mm，高さ200 mmの高性能軽量コンクリートおよび普通コンクリート円柱供試体を用いた圧縮試験結果を示している。図より，高性能軽量コンクリートの応力－歪分布は，普通コンクリートより若干小さく示されていることが分かる。しかしながら，その分布性状は両者で良く類似している。また，圧縮強度も表－２に示されるように両者でほぼ同様となっている。

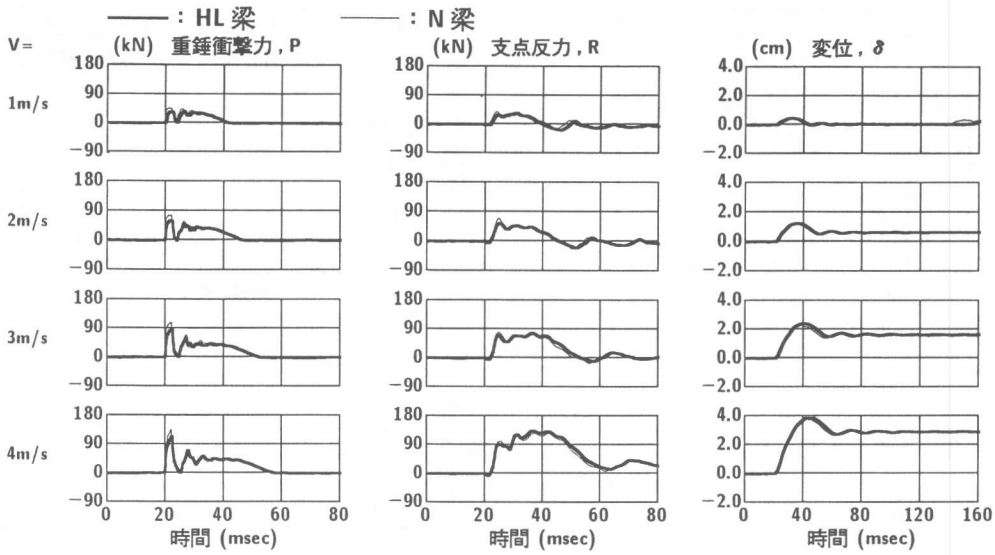
図－３には，HL梁およびN梁の静載荷実験および断面分割法より得られる荷重－変位曲線を示している。断面分割法の分割数は，断面高さおよびスパン方向に対してそれぞれ52, 8分割である。図より，実験より得られる荷重－変位曲線の分布は，両梁でほぼ同様であることが分かる。このことは，断面分割法に基づく計算結果でも同様である。しかしながら，実験結果と計算結果を比較すると，立ち上がりから計算値の降伏荷重程度までの分布は両者でほぼ同様であるものの，その後の分布は実験結果の変位性能が大きく示されている。これは，載荷点部のコンクリートひずみが設計終局ひずみである3500 μを超えた状態においても，圧かいの傾向を示しつつ載荷荷重が増大することを意味している。

４．衝撃実験結果および考察

４.１　各応答波形

図－４には，繰り返し載荷の結果のみに着目し，各衝突速度における重錘衝撃力P，支点反力Rおよび変位δに関する応答波形を示している。ここでは，重錘衝撃力の立ち上がりより20 ms前に時間軸を設定して各応答波形を整理している。

最初に，重錘衝撃力波形Pについて見ると，両



図－4　重錘衝撃力，支点反力および変位の応答波形（繰り返し載荷の場合）

梁とも衝突速度の大きさに拘わらず，衝撃初期の継続時間の短い正弦半波（第1波）とその後の継続時間の長い正弦半波（第2波）が連なった，両者でほぼ類似した分布性状を示していることが分かる。前者の波形は重錘と衝撃初期に過渡的に励起される高次振動との相互作用によって，後者の波形は重錘とその後に形成される低次振動との相互作用によって発生するものと考えられる。なお，両梁とも第1波と第2波の振幅および2波を合わせた継続時間は，衝突速度 V の増加とともに増大している。これは，後述の支点反力波形や変位波形の振幅や継続時間にも同様に見られる。

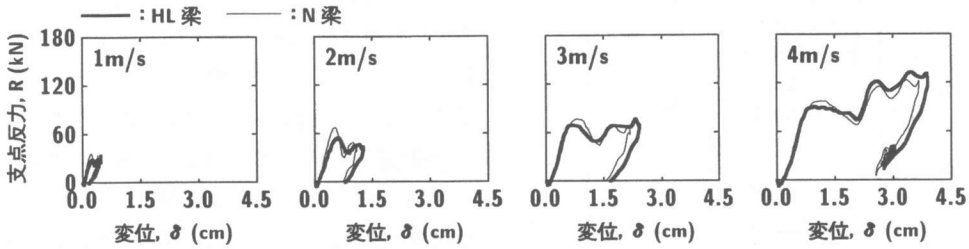
次に，支点反力波形 R について見ると，ここでも両梁の波動の分布性状が良く対応していることが分かる。すなわち，荷重載荷時には若干の高周波成分が含まれるものの大略正弦半波的な分布性状を，除荷後には減衰自由振動状態を呈している。

最後に，変位波形 δ について検討する。ここでは，160 ms までの時間に対して整理している。図より，両梁の波動は衝突速度 V の大きさに拘わらず，ほぼ同様の分布性状を示していることが分かる。すなわち，波動は荷重載荷時には継続時間が重錘衝撃力 P や支点反力波形 R に対応した正弦半波の分布性状を，除荷後には正方向にドリフトした状態で僅かに自由振動している分布性状を示している。なお，変位波形には重錘衝撃力や支点反力波形に見られる高周波成分は励起されていない。これは，両梁の最低次固有振動周期が 20 ～ 25 ms 程度であるのに対して，上述の高周波成分の周期が 7 ms 程度と小さく応答倍率が小さいことによるものと考えられる。

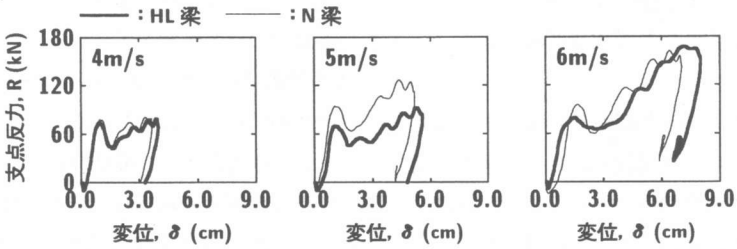
以上より，同程度の静的曲げ耐力を有する HL 梁と N 梁の各応答波形は非常に良く対応していることが明らかとなった。これは，静載荷実験結果，HL, N 梁の両者が類似の荷重−変位曲線を示していることと対応しており，この程度のコンクリートの弾性係数および質量の差や重錘衝突速度では顕著な応答差が現れないことを示唆している。また，このことは，高性能軽量コンクリートを用いた RC 梁が耐衝撃用途構造部材にも十分適用可能であることを示唆している。

4.2　支点反力と変位の関係

図－5には，繰り返し載荷および単一載荷における支点反力と変位に関する R−δ 履歴曲線を示している。図より，両梁の支点反力 R は，載荷方法や衝突速度 V に拘わらず，変位の増加とともに第1極大値まで単調に増大していることが分かる。その後は重錘と高次振動との相互作用による除荷

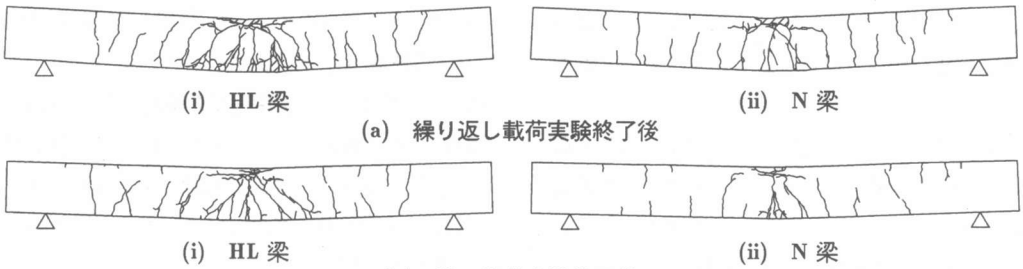


(a) 繰り返し載荷の場合



(b) 単一載荷の場合

図－5　支点反力と変位に関する $R-\delta$ 履歴曲線

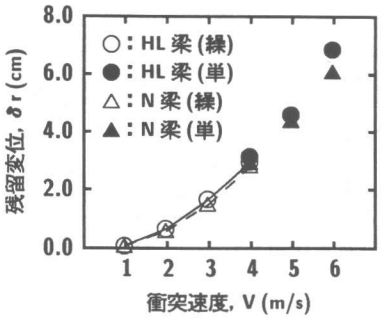


図－6　ひび割れ分布（ $V = 4$ m/s ）

と載荷が交番する成分が励起され，第1極大値程度の荷重あるいはそれ以上の荷重が最大応答変位値まで作用した状態になっている。最大応答変位値到達後は初期剛性程度の勾配で除荷されている。このように，$R-\delta$ 曲線は，波形の立ち上がりから除荷に至るまで両梁で非常に良く対応した分布性状を示している。さらに詳細に見ると，分布曲線の面積として評価される吸収エネルギーは，載荷方法に拘わらず衝突速度 V の増加に伴い増大していることが分かる。また，V の大きいレベルでは第1極大値以降も変位の増加に対応して支点反力 R が増大する傾向が見られる。しかしながら，$R-\delta$ 曲線の分布は，第1極大値以降も R が著しく増大する $V = 6$ m/s の場合を除き，全般的に平行四辺形状を呈している。

4.3　ひび割れ分布

図－6には，実験終了後のひび割れ分布を衝突速度 $V = 4$ m/s に着目して示している。図より，載荷点部において，載荷方法に拘わらず HL 梁のひび割れの数が N 梁に比べて多く示されていることが分かる。詳細に見ると，HL 梁の場合には梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れの他，載荷点部に向かって斜め方向に進展するひび割れが発生している。特に，単一載荷ではそのひび割れ角度が 45° 程度となっている。これは，HL 梁のせん断耐力が N 梁に比べて小さいことを暗示している。また，これは二羽らの高性能軽量コンクリート RC 梁の静的なせん断耐力が普通コンクリート RC 梁に比べて 20～30 % 低下する結果[4]に対応しているものと考えられる。しかしながら，



図－7　残留変位と衝突速度の関係

曲げひび割れの軸方向への広がりの程度や梁の角折れの程度は両梁でほぼ同様であり，梁全体の損傷度合いは両梁で大略類似しているものと推察される。このことは，支点反力と変位に関する $R-\delta$ 履歴曲線が両梁で類似であることを裏付けている。また，このような性状は，基本的には静載荷時の荷重−変位曲線が両梁において大略等しく，従って接線剛性も類似していることによるものと推察される。

載荷方法の違いに着目すると，両梁とも単一載荷時には載荷履歴の影響がないことより，明瞭な角折れ状態には至っていないことが分かる。

4.4　残留変位と衝突速度の関係

図－7には，各梁の残留変位 δ_r と衝突速度 V の関係を示している。図より，繰り返し載荷の場合には，δ_r が両梁とも衝突速度 V に対して2次曲線状の傾向を示していることが分かる。また，その値は V の大きさに拘わらず両者でほぼ同様である。一方，単一載荷の場合にも繰り返し載荷時の延長線上に分布しており，入力エネルギーの小さい載荷履歴が δ_r に与える影響の小さいことを示唆している。なお，単一載荷の両梁の δ_r 値は，V = 6 m/s 時に HL 梁の場合で若干大きいものの，V = 4, 5 m/s 時では大略類似している。

5．まとめ

本研究では，高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁の耐衝撃挙動を明らかにするために，同程度の静的曲げ耐力を有する高性能軽量コンクリートRC梁と普通コンクリートRC梁に関する静的および重錘落下衝撃実験を実施し，両者の実験結果を比較する形で耐衝撃挙動に関する検討を行った。高性能軽量コンクリートRC梁に関する結果を要約すると，以下のとおりである。

(1)静載荷時の荷重−変位曲線は普通コンクリートRC梁の場合と類似の性状を示す。

(2)重錘衝撃力，支点反力，変位波形および支点反力−変位曲線は，普通コンクリートRC梁と類似の分布性状を示す。

(3)重錘衝突時には普通コンクリートRC梁に比べて載荷点近傍部にひび割れが若干多く発生する。しかしながら，曲げひび割れの軸方向への広がりの程度や角折れの程度はほぼ同様である。

(4)残留変位は衝突速度に拘わらず普通コンクリートRC梁とほぼ同様である。またその分布は衝突速度に対して2次曲線状となる。なお，入力エネルギーの小さい載荷履歴が残留変位に与える影響は小さい。

(5)(2)～(4)より，衝撃荷重載荷時に対する曲げ耐荷性状は普通コンクリートRC梁と同程度である。従って，高性能軽量コンクリートRC梁は，耐衝撃用途構造部材にも十分適用可能であるものと判断される。

今後は，衝撃荷重載荷時の高性能軽量コンクリートRC梁のせん断破壊性状に関しても詳細に検討を行う予定である。

参考文献

1) 岡本享久，早野博幸，柴田辰正：超軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol.36, No.1, 1998.1

2) コンクリート標準示方書（平成8年制定）設計編，土木学会，1996

3) 高性能軽量骨材アサノスーパーライト，太平洋セメント（株）

4) 二羽淳一郎，岡本享久，前堀伸平：高品質軽量コンクリートの構造部材への適用，コンクリート工学，Vol.38, No.12, 2000.12

5) 岸　徳光，三上　浩，安藤智啓：せん断破壊型RC梁の耐衝撃性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.45A, 1999.3