

軽量コンクリートを用いたせん断補強筋を有するせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状

Experimental study on impact resistant behavior of LW-RC beams with shear-rebar

ドーピー建設工業 (株)	○正 員	竹本 伸一	(Shin-ichi Takemoto)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
三井住友建設 (株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi mikami)
室蘭工業大学	フェロー	松岡 健一	(Ken-ichi Matsuoka)

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ているものの一つに、粗骨材に焼成人工軽量骨材を用いたコンクリート¹⁾ (以後、軽量コンクリート)がある。焼成人工軽量骨材 (以後、軽量骨材)は、24時間吸水率が9~11%と小さく、比重が1.2~1.3と小さいにもかかわらず圧壊荷重が1,000N以上あること、この骨材を用いて35~65MPaの圧縮強度を有するコンクリートの製造が可能であること、有害化学物質を含まないこと、塩分を含まずアルカリ骨材反応の心配がないこと等、従来の人工軽量骨材に比べて格段に高品質化している。

このようなことから、軽量コンクリートの実用化を目指して、梁や柱部材に関する静的な曲げおよびせん断耐荷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^{2),3)}。一方、耐衝撃性に関する研究も、矩形RC梁を対象に著者らによって実施されている⁴⁾。その結果、1) 曲げ破壊型の場合の動的応答性状や耐衝撃性は普通コンクリートを用いる場合と同程度であること、2) 数値解析的には、実測値の引張強度を用いることにより、普通コンクリートを用いる場合と同様の手法で解析可能であること⁵⁾、3) せん断補強筋の無いせん断破壊型RC梁の終局時の最大支点反力に対する静的せん断耐力による耐力比は2.3前後、吸収エネルギー比は、0.7程度になること⁶⁾、4) コンクリートの引張強度を圧縮強度の1/16程度とすることでせん断補強のないRC梁の耐衝撃挙動解析が大略評価可能であること⁷⁾等が明らかになっている。これより軽量コンクリートを用いたRC梁の衝撃曲げ耐力の算定は実務的に可能となっている。一方衝撃せん断耐力の算定はコンクリートと鉄筋による分担力のみならず、せん断補強筋による分担力の設計法

を確立しなければならない。このような観点より、本研究では軽量コンクリートを用いたRC梁の、せん断補強筋を配置した場合のせん断耐荷性状を明らかにすることを目的に、せん断補強鉄筋比を変化させた場合の重錘落下衝撃実験を実施した。本研究では、同一断面形状のRC梁において、せん断補強筋のみを変化させた3種類、全14体を製作して実験を行った。

2. 実験概要

2.1 RC梁の形状寸法および静的設計値

図-1には、軽量コンクリート (Light-Weight Concrete)を用いたRC梁 (以後、LW梁)の形状寸法および配筋状況の一例を示している。本実験に用いた試験体は、断面 (梁幅×梁高)が240×390mmの複鉄筋矩形RC梁である。本研究では、せん断補強筋を配置しない場合の他、D6のせん断補強筋を170mm、85mm間隔で配置する場合について実験を行った。表-1には、各試験体の静的設計値の一覧を示している。試験体名は軽量コンクリートを表すLWとせん断補強筋の配置間隔 (mm)を組み合わせ示している。表中の計算静的曲げ耐力 P_{usc} および静的せん断耐力 V_{usc} は、土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾ (以後、示方書)に基づき算定している。なお、 V_{usc} 値は示方書に基づき計算値の70%に低減して評価している。せん断補強筋間隔は、有効高さの1/2、1/4に設定している。実測静的耐力 P_{us} は計算せん断耐力 V_{usc} の1.2~1.43倍となっている。また、表中には別途実施した静載荷実験結果の実測静的耐力 P_{us} および P_{us} を P_{usc} で除して算定した実せん断余裕度 α' ($=P_{us}/P_{usc}$)も合わせて示している。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値を示している。軽量コンクリートは、寸法10~15mm程度の軽量骨材 (比重1.20)を粗骨材として用いている。表より、コンクリートの比重は1.83で、普通コンクリートの80%程度となってい

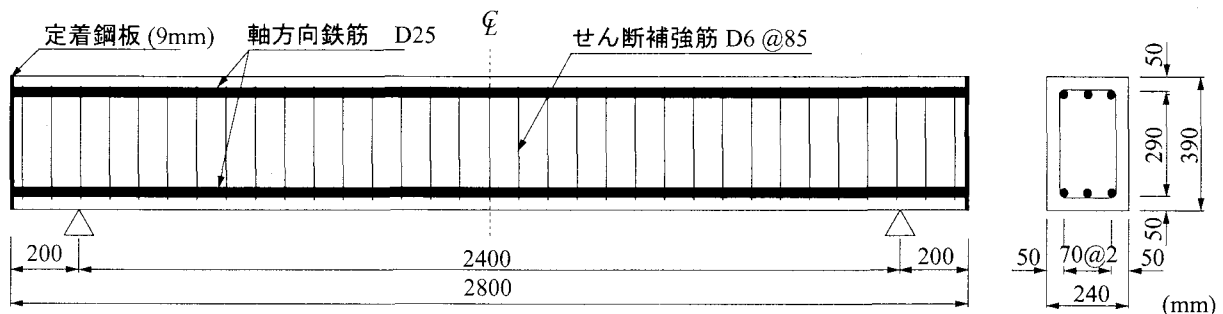


図-1 試験体概要図 (LW85)

表-1 試験体の一覧

試験体名	せん断補強筋比 P_s	せん断補強筋の有無とその間隔 (mm)	主鉄筋比 P_t	せん断スパン比 a/d	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断余裕度 α	実測静的耐力 P_{us} (kN)	実せん断余裕度 α'	衝突速度 V (m/s)
LW	0	無し	0.025	3.53	135.1	312.0	0.43	181.7	0.58	3.75, 4, 4.25, 4.5
LW170	0.00155	170			232.0		0.74	332.6	1.07	5.5, 6, 6.25, 6.5, 6.75
LW85	0.0031	85			328.9		1.05	396.2	1.27	6.5, 7.5, 8.5, 9.5, 10.5

表-2 コンクリートの力学的特性値

材令 (日)	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
33	1.83	49.4	2.16	21.2	0.23

表-3 鉄筋の力学的特性値

鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D25	SD345	395	625	206	0.3
D6	SD295A	440	508		

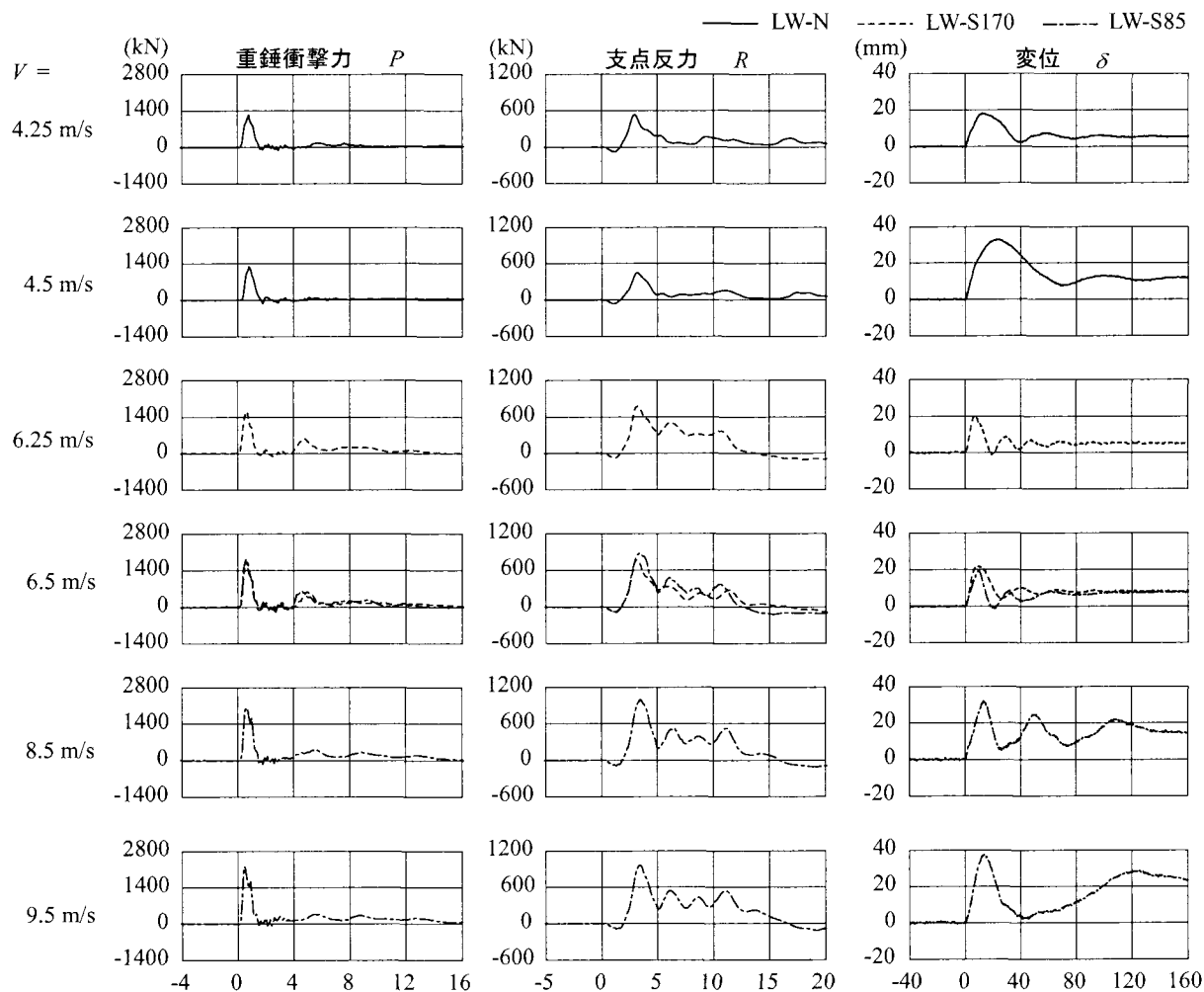


図-2 各応答波形

る。また、引張強度は圧縮強度の1/20程度であり、普通コンクリートに比べて小さいことがわかる。

2.2 実験方法

実験は、リバウンド防止用治具付の支点治具上に設置したRC梁のスパン中央部に所定の高さから一度だけ重錘を自由落下させる単一載荷法により実施している。治具全体は回転のみを許容するピン支持に近い構造である。重錘は質量400kgで載荷点部直径が150mmの円柱状鋼製であり、その底部には片当たりを防止するために2mmの球状のテーパが施されている。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をスケッチしている。

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-2には、衝突速度 V に対するLW0, LW170およびLW85梁の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する各応答波形を各終局時近傍で示している。いずれの梁も重錘衝撃力 P は、衝撃初期に衝突速度 V の大きさにかかわらず継続時間が1ms程度の正弦半波(第1波)の分布性状を示している。せん断補強筋無しのLW0梁の場合には、補強筋有りのLW170梁およびLW85梁の場合に見られる第2波の衝撃力波形が見られない。LW170

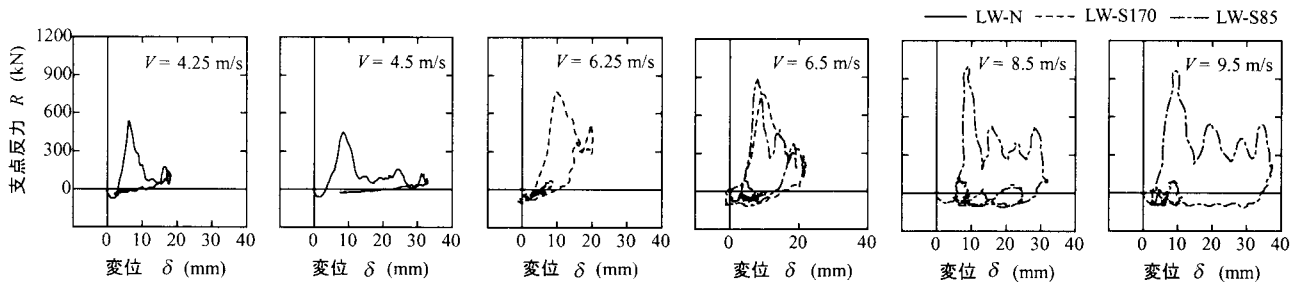


図-3 R- δ 履歴曲線

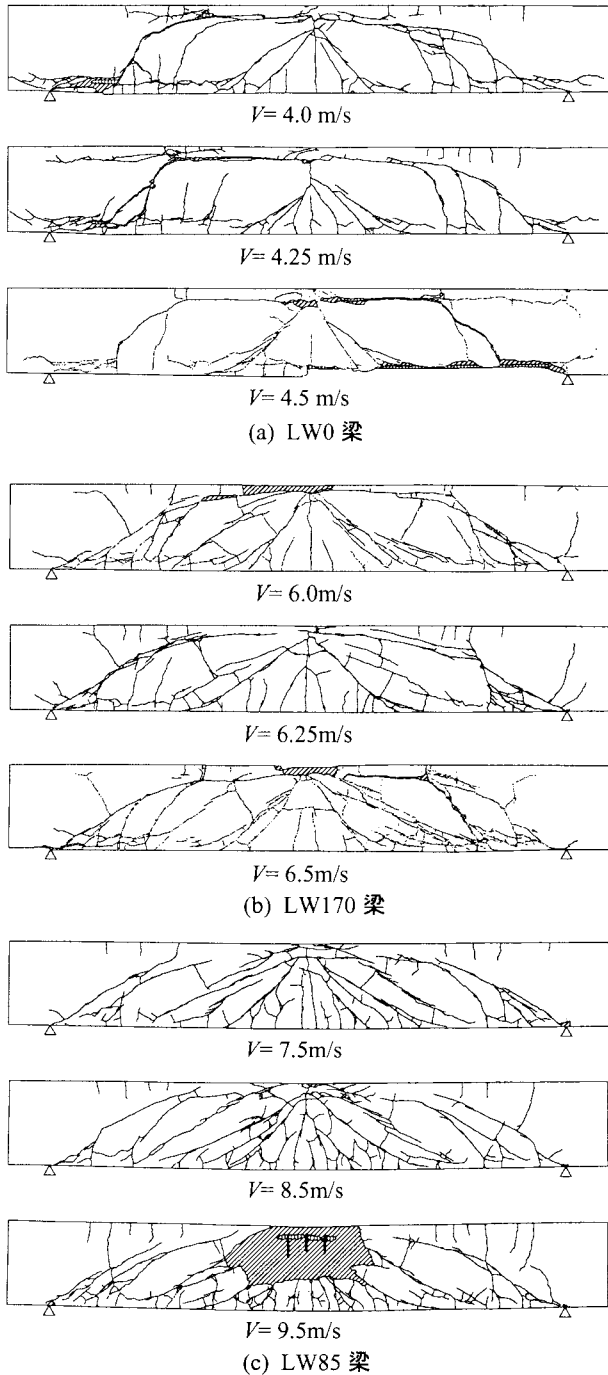


図-4 ひび割れ分布性状

梁および LW85 梁はいずれの場合も $V = 6.25$ ms 以上であるが、両者の第 2 波目の立ち上がり時間、振幅および継続時間はほぼ同一である。支点反力波形 R は、重錘衝撃力 P と同様に、補強筋有りの LW170, LW85 梁では大略

台形の時間的な分布性状を示しているが、補強筋無しの場合 LW0 では、ほぼ三角形の分布状態を示していることが分かる。変位波形 δ は、いずれの梁の場合においても衝突速度の増大に伴い荷重除荷後の振動周期が大きくなっていることが分かる。また、第 1 波目の正弦半波の周期は、せん断補強筋無しの場合 LW0 梁のは 40 ms 程度であるのに対して、せん断補強筋を配筋する場合には、上述よりも小さな値を示しており、かつ配筋間隔に対応して小さくなる傾向を示している。これよりせん断補強筋を配筋することにより剛性が向上傾向にあることが分かる。

3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3 には、各梁の支点反力-変位履歴曲線 ($R-\delta$ 曲線) を衝突速度 V 毎に示している。LW0 梁の $V = 4.25$ m/s では、 $R-\delta$ 曲線が三角形の分布を示しており、せん断破壊型特有の分布性状であることが分かる。また $V = 4.5$ m/s 時の履歴曲線は $V = 4.25$ m/s 時と同様に三角形の分布を示すものの除荷時に支点反力一定下で変位がこれまでの 2 倍程度に増加している。これは入力エネルギーがせん断破壊エネルギーよりも大きいためせん断破壊後に軸方向鉄筋の剛性のみによる曲げ振動に移行したことによるものと考えられる。

一方、せん断補強筋有りの LW170 梁に関する結果を見ると、 $V = 6.25$ m/s 時には最大支点反力の 1/2 程度で除荷後、載荷時と同程度の剛性で低下しており、未だ耐力的に余裕があることが分かる。 $V = 6.5$ m/s 時にはほぼ零点近傍で除荷後に復元しており、終局状態に近いことが見てとれる。LW85 梁に関する履歴曲線を見ると、 $V = 6.5$ m/s 時点では、ほぼ三角形の履歴曲線を示している。しかしながら速度が増加すると除荷後に最大支点反力の 1/2 程度の状態から平行四辺形状の履歴曲線に移行しており、載荷初期にせん断破壊型モードを呈し、その後曲げ破壊型に移行していることが推察される。これは実せん断余裕度が 1.27 であることから類推される。 $V = 9.5$ m/s 時には最大応答変位も 35 mm を超えており、明らかに終局点を越えているのが見てとれる。

3.3 ひび割れ分布性状

図-4 には、各梁の衝撃実験終了後のひび割れ分布性状を衝突速度 V 毎に示している。なお、図中のハッチ部分はコンクリートの剥落部あるいはひび割れ開口部を示している。せん断補強筋無しの場合 LW0 梁の場合には、載荷点から支点部へと進展するアーチ状のせん断ひび割れが発生している。このひび割れ分布性状は衝突速度 V が増加するにつれて顕在化し、 $V = 4.5$ m/s では載荷点付近と下端部でコンクリートの剥落が見られる。一方、せん断補強筋有りの LW170 梁の場合には、載荷点部から

表-4 終局時における各種応答値一覧

試験体名	入力エネルギー E_k (kJ)	最大重錘衝撃力 P_{ud} (kN)	最大支点反力 R_{ud} (kN)	最大変位 δ_{max} (mm)	残留変位 δ_{rd} (mm)	吸収エネルギー E_a (kJ)	耐力比 R_{ud}/P_{us}	エネルギー比 E_a/E_k
LW0-4.5	4.05	1285.1	468.6	33.3	11.2	3.67	2.58	0.91
LW170-6.5	8.45	1708.7	791.0	22.7	5.21	7.06	2.38	0.84
LW85-9.5	18.1	2196.0	1049.8	38.4	26.3	14.5	2.65	0.80

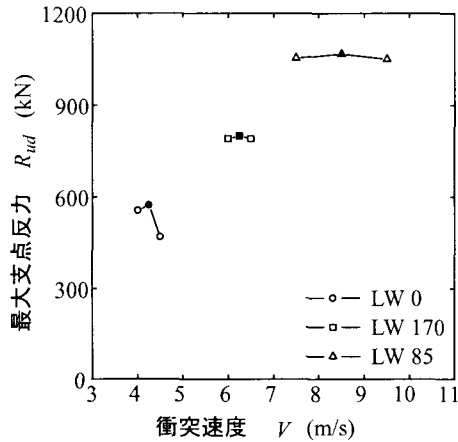


図-5 最大支点反力-衝突速度との関係

支点部にかけて、アーチ状および斜めひび割れが発生しているが、ひび割れ間隔はLW0梁に比べて、細かく広範囲に及んでおり、せん断補強の効果が見てとれる。衝突速度 $V=6$ m/s 以降、コンクリートの剥落、ひび割れが顕在化している。LW85梁の場合には、せん断破壊型特有のアーチ状ひび割れと裏面剥離を促進させる載荷点直下の三角形ひび割れが形成されているが、LW170梁に比較して曲げひび割れが多数発生しており、前述のせん断破壊と曲げ破壊が混在している状況が伺える。なお、 $V=9.5$ m/s 時には載荷点近傍が大きく割裂破壊を伴うコンクリートの剥離が見られ、既に終局に至っていることが分かる。

3.4 終局時における各種応答値

表-4には、各梁の終局時における各種応答値を示している。表中、耐力比は最大支点反力を実測静的耐力で除した値であり、エネルギー比は試験体が吸収したエネルギー量を入力エネルギー量 $E_k (=MV^2/2, M$; 重錘質量) で除した値である。なお、吸収エネルギー量 E_a は、 $R-\delta$ 曲線の第1象限を用いて評価している。

補強鉄筋比を増加させることにより、吸収エネルギー量 E_a も増加している。LW170梁はLW0梁のほぼ2倍でありLW85梁では4倍となっている。入力エネルギー量 E_k も同様に増加しており、エネルギー比 E_a/E_k は、0.80~0.91となっている。また、各RC梁の耐力比 R_{ud}/P_{us} は補強筋量にかかわらず、同程度の値となっていることが分かる。これは、最大支点反力と静的耐力の耐力比 R_{ud}/P_{us} を用いることにより、静的せん断耐力に基づく簡易な耐衝撃設計の可能性を示唆している。

3.5 最大支点反力と補強鉄筋量の関係

図-5には、各RC梁の最大支点反力 R_{ud} と衝突速度 V の関係を示している。LW梁では $V=4.25$ m/s で最大支点反力 $R_{ud}=572$ kN を示し、 $V=4.5$ m/s では、それを下まわっている。これは、補強筋無しの梁の塑性化が、衝

突速度の増加に伴い一気に進行したためと考えられる。LW170梁、LW85梁では、鉄筋量の増加とともに最大支点反力も増加している。また、衝突速度の増加に比べ支点反力の増加は見られない。

4. まとめ

本研究では、せん断補強筋の有無およびその量を変化させた軽量コンクリートを用いたせん断破壊型RC梁の耐衝撃性状について検討を行った。

- 1) せん断補強筋を配置することにより、重錘衝撃力、支点反力の増加が見られ、軽量コンクリート梁の剛性が向上する傾向にある。
- 2) 最大支点反力と静的せん断耐力の関係を用いることにより静的せん断耐力に基づく簡易なせん断破壊に対する耐衝撃設計が可能となる。

参考文献

- 1) 人工軽量骨材アサノライト, 太平洋マテリアル(株)
- 2) 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, pp.48-52, 1998.1
- 3) 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, pp.3-9, 2000.12
- 4) 竹本伸一, 岸 徳光, 安藤智啓, 松岡健一: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1339-1344, 2001.6
- 5) 岸 徳光, 安藤智啓, 松岡健一, 竹本伸一: 高性能軽量コンクリートを用いた曲げ破壊型RC梁に関する弾塑性衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1267-1277, 2003.3
- 6) 竹本伸一, 岸 徳光, 今野 久志, 松岡 健一: 軽量コンクリートを用いたせん断破壊型RC梁の耐衝撃性に及ぼすせん断スパン比の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, pp.1183-1836, 2003
- 7) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 竹本 伸一: 軽量コンクリートを用いたせん断補強筋のないせん断破壊型RC梁の重錘落下衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.50A, 投稿中
- 8) コンクリート標準示方書(平成14年制定)設計編, 土木学会, 2002