

## せん断スパン比を変化させた軽量コンクリート RC 梁の重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact tests of LW-RC beams with different shear span ratio

(独) 北海道開発土木研究所    ○ 正 員    今野 久志 (Hiroshi Mikami)  
 ドービー建設工業 (株)            正 員    竹本 伸一 (Shin-ichi Takemoto)  
 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    岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

## 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目的として、軽量コンクリートの適用が検討され<sup>1)</sup>、一部で実用化されている。軽量コンクリートを用いた構造部材の設計法を確立するために、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<sup>2), 3)</sup>。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<sup>4)</sup>。その結果、1) 曲げ破壊型の場合の衝撃耐荷性状は普通コンクリートを用いる場合とほぼ同様であること、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<sup>5)</sup>、3) せん断補強筋のないせん断破壊型 RC 梁の終局時の最大支点反力に対する静的せん断耐力の比は 2.3 前後、吸収エネルギー比は 0.7 程度になること<sup>6)</sup>、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、せん断補強筋のない RC 梁の耐衝撃挙動解析が大略可能であること<sup>7)</sup>等が明らかになっている。一方、軽量コンクリート部材の設計法を確立するためには、破壊形式の予測が可能となる必要がある。軽量コンクリート RC 梁の破壊形式は静載荷時にはせん断余裕度 (= せん断耐力 / 曲げ耐力) を用いて予測することができる。しかしながら、衝撃荷重載荷時における破壊形式の予測法は未だ確立されていない。

このような背景より、本研究では静載荷時に破壊形式の予測に用いられるせん断余裕度に着目して、衝撃荷重載荷時の破壊形式予測法の確立に必要なデータの収集を行った。本研究ではせん断余裕度を 1.0 程度 (0.8, 0.9, 1.1) とした軽量コンクリート RC 梁を用いて静載荷および衝撃荷重載荷実験 (以後、衝撃実験) を実施し、せん断余裕度と破壊形式および破壊性状との関係について検討を行った。

## 2. 実験概要

## 2.1 RC 梁の形状寸法および実験方法

図-1 には、RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体の断面寸法 (幅 × 高さ) はすべて 25 × 25 cm である。純スパン長はせん断余裕度を変化させるために 2.2, 2.6, 3.0 m の 3 種類とした。軸方向鉄筋には D22 を上下端に各 2 本配筋している。なお、鉄筋の降伏強度は 398 MPa であった。

静載荷実験は、容量 500 kN の油圧ジャッキを用い、単純支持状態で実施した。静荷重は鋼製の載荷治具を用い梁幅方向に全幅、スパン中央部に 100 mm の部分分布荷重が作用するように載荷している。衝撃実験は、跳ね上がり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、所定の高さから重錘を自由落下させることにより実施している。なお、支点治具全体は RC 梁の回転のみを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り、その底部には衝突時の片当たりを防止するため高さ 2 mm のテーパが施されている。本実験の載荷方法には、漸増繰り返し載荷および単一載荷を採用した。前者は初速度および増分速度を 1 m/s と設定して、終局に至るまで繰り返し重錘を落下させる方法であり、後者は試験体に重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる方法である。単一載荷実験の初回衝突速度は、漸増繰り返し載荷実験の最大衝突速度とし、試験体が終局に至った場合は -1 m/s、終局に至らなかった場合は +1 m/s として実験を行った (表-1 参照)。漸増繰り返し載荷の終局は梁側面に明瞭なアーチ状のひび割れが発生し試験体が著しく損傷した場合、あるいは累積残留変位が純スパン長の 2% に達した時点とした。

測定項目は荷重 (以後、静載荷の場合には静荷重、衝撃

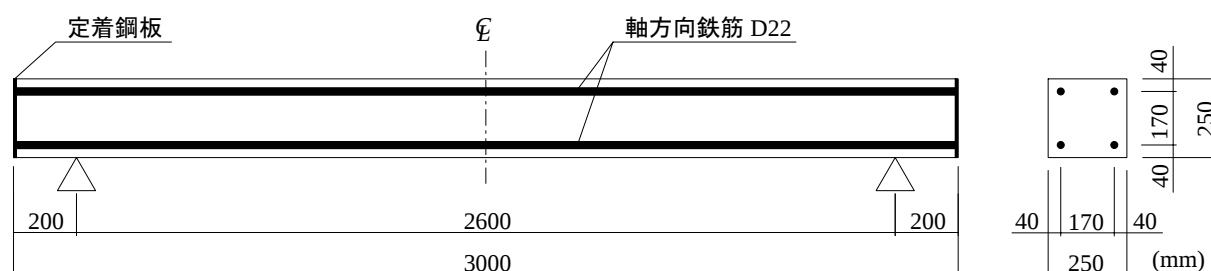
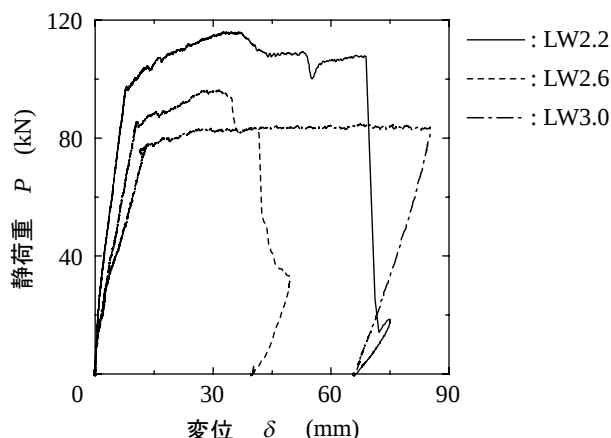


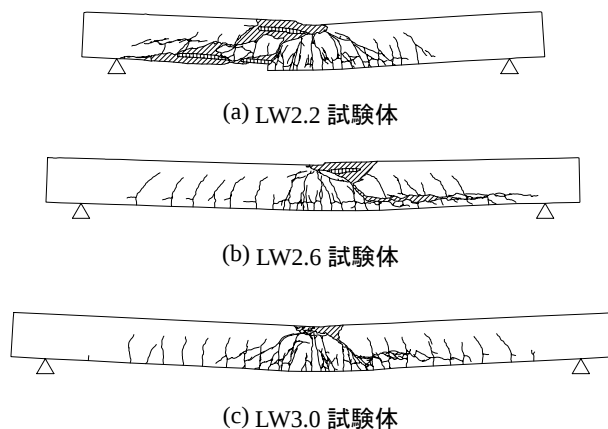
図-1 試験体概要図 (LW2.6)

表－1 試験体の一覧

| 試験体名  | 純スパン長 (m) | せん断スパン比 $a/d$ | 軽量コンクリートの圧縮強度 $f'_c$ (MPa) | 計算せん断耐力 $V_{usc}$ (kN) | 計算曲げ耐力 $P_{usc}$ (kN) | せん断余裕度 $\alpha$ | 衝突速度 $V$ (m/s) |      |
|-------|-----------|---------------|----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------|----------------|------|
|       |           |               |                            |                        |                       |                 | 漸増繰り返し         | 単一   |
| LW2.2 | 2.2       | 5.2           | 38.4                       | 83.4                   | 106.1                 | 0.79            | 1～3            | 3, 4 |
| LW2.6 | 2.6       | 6.2           |                            |                        | 89.8                  | 0.93            | 1～5            | 4, 5 |
| LW3.0 | 3.0       | 7.1           |                            |                        | 77.9                  | 1.07            | 1～5            | 4, 5 |



図－2 静荷重－変位関係



図－3 ひび割れ分布性状（静荷重実験）

実験の場合には重錘衝撃力)  $P$ , 合支点反力（以後、支点反力)  $R$  および荷点変位（以後、変位)  $\delta$  である。また、実験終了後には、RC 梁側面に生じたひび割れをトレースしてひび割れ分布図を作成している。

## 2.2 RC 梁の静的設計値

表－1 には本実験に用いた試験体の一覧を示している。表には軽量コンクリートの圧縮強度も併せて示している。なお、軽量骨材には焼成人工軽量骨材<sup>8)</sup>を使用した。試験体は純スパン長（せん断スパン比）を3種類に変化させた軽量コンクリート RC 梁である。試験体名は軽量コンクリートを表す LW と純スパン長を組み合わせで示している。表中のせん断余裕度  $\alpha$  は、計算曲げ耐力  $P_{usc}$  に対する計算せん断耐力  $V_{usc}$  の比として算出している。ここで、 $P_{usc}$ ,  $V_{usc}$  は土木学会コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に準拠して算出している。なお、各梁の  $V_{usc}$  は、示方書に基づき普通コンクリートの場合の 70 % に低減して評価している。静荷重時には LW2.2/2.6 梁はせん断余裕度  $\alpha$  が  $\alpha < 1.0$  であることよりせん断破壊、LW3.0 梁は  $\alpha > 1.0$  であることより曲げ破壊すると予想される。本実験は断面形状を一定として、純スパン長を3種類とし曲げ耐力を増減させることにより、せん断余裕度を変化させた RC 梁を用いて実験を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 静荷重実験結果

#### (1) 静荷重－変位関係

図－2 には、静荷重実験における静荷重 ( $P$ )－変位 ( $\delta$ ) 曲線を示している。なお、実験の終了は斜めひび割れが開口し、せん断破壊に至った時点あるいは曲げ変形が卓越し、梁上縁のコンクリートの圧壊が著しくなる時点とした。

図より、LW2.2/2.6 梁では主鉄筋が降伏後に静荷重の低

下が起き、全体としては平行四辺形に近い曲線を示している。しかしながら、図－3 のひび割れ分布を見ると、両梁ともせん断破壊に至り実験を終了している。このことから、LW2.2/2.6 梁は主鉄筋降伏後に静荷重がせん断耐力に達し、せん断破壊に至ったことが分かる。ここで、主鉄筋降伏後にせん断破壊に至った要因としては、両梁のせん断耐力が計算値よりも大幅に大きいことが考えられる。軽量コンクリート RC 梁の計算せん断耐力は、普通コンクリート RC 梁の 0.7 倍と規定されているが、本実験においては LW2.2/2.6 梁のせん断耐力は 0.7 倍以上であった。LW3.0 梁に着目すると、主鉄筋降伏後に除荷に至るまで静荷重がほぼ同様な平行四辺形状の曲線を示している。また、図－3 のひび割れ分布においてもより曲げ破壊に近い状態で終局に至っていることが分かる。

#### (2) 静荷重実験後におけるひび割れ分布性状

図－3 には静荷重実験後のひび割れ分布性状を示している。図より、いずれの梁も梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れと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。また、斜め方向のひび割れはいずれの梁も開口している。つまり、各梁のひび割れ分布性状はせん断破壊型および曲げ破壊型両者の特徴を示している。これは、各梁のせん断余裕度が 1.0 近傍であるためと考えられる。

LW2.2 梁は、斜め方向のひび割れが大きく開口しており、せん断破壊に至ったことが分かる。なお、荷点部、梁下縁のコンクリートが剥落しているが、これは実験時に急激なせん断破壊が生じたためである。LW2.6 梁は斜め方向のひび割れ、主鉄筋に沿った割裂ひび割れが開口しており、せん断破壊に至ったことが分かる。LW3.0 梁は曲げ変形が卓越し、梁上縁が圧壊している様子がうかがえる。このことから、LW3.0 梁はより曲げ破壊に近い状態で終局に

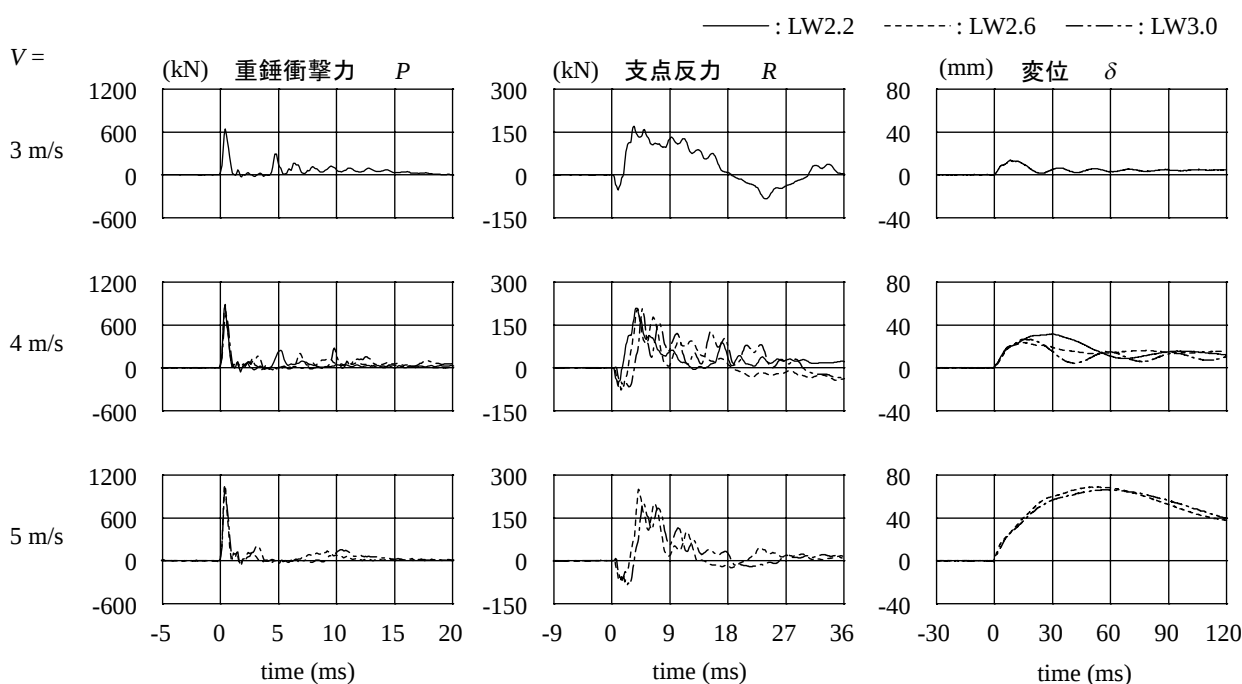


図-4 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

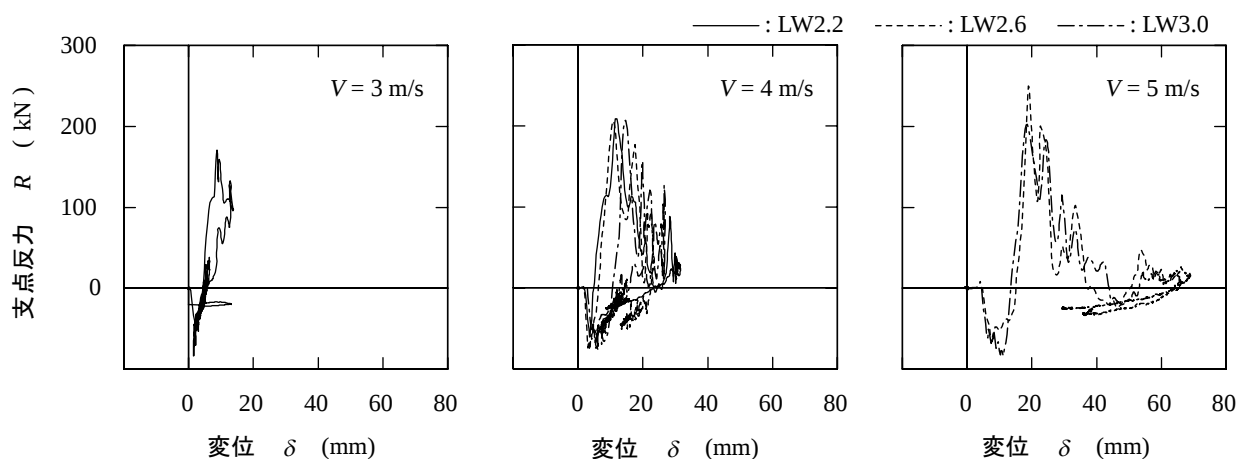


図-5 支点反力-変位履歴曲線

至ったといえる。

以上のことから、軽量コンクリート RC 梁の静載荷実験時における破壊形式は

$\alpha \leq 0.93$  の場合はせん断破壊

$\alpha = 1.07$  の場合は曲げ破壊

となることが分かった。

### 3.2 衝撃実験結果

衝撃実験における考察は、実構造物が受ける衝撃現象を想定して単一載荷実験の結果を用いて行った。なお、漸増繰返し載荷実験ではいずれの試験体もせん断破壊によって終局に至ったことを確認している。

#### (1) 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-4 には、各梁の重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および変位  $\delta$  に関する応答波形を示している。なお、時間軸は重錘衝撃力が励起した時刻を 0 ms として整理している。

重錘衝撃力波形  $P$  は、各梁ともに衝撃初期の振幅が大きく周期の短い第 1 波とその後の振幅が小さく周期の長い第

2 波から構成されている。第 2 波の波形性状に着目すると、純スパン長が長い程立ち上がり時間が遅れていることが確認できる。これは純スパン長が長くなることで応答変位が増加し、再衝突に用いる時間が長くなるためと推察される。

支点反力波形  $R$  は、いずれの梁も継続時間が 10 ～ 20 ms 程度の三角形波と周期が数 ms 程度の波形が合成された波形性状を示している。なお、支点反力波形  $R$  においても重錘衝撃力波形  $P$  と同様に立ち上がり時間に違いが見られる。すなわち、純スパン長が短く、せん断スパン比の小さな梁ほど立ち上がりは急激である。

変位波形  $\delta$  を見ると、各梁ともに正弦波状の波形性状を示している。LW2.2 梁の  $V = 3$  m/s および LW3.0 梁の  $V = 4$  m/s では減衰自由振動を示しており、両梁は未だ健全であることが分かる。これらを除いた波形は振動状態を示さず、変位は大きく残留している。このことから LW2.2/2.6 梁は  $V = 4$  m/s、LW3.0 梁は  $V = 5$  m/s において塑性化が進行したものと推察される。

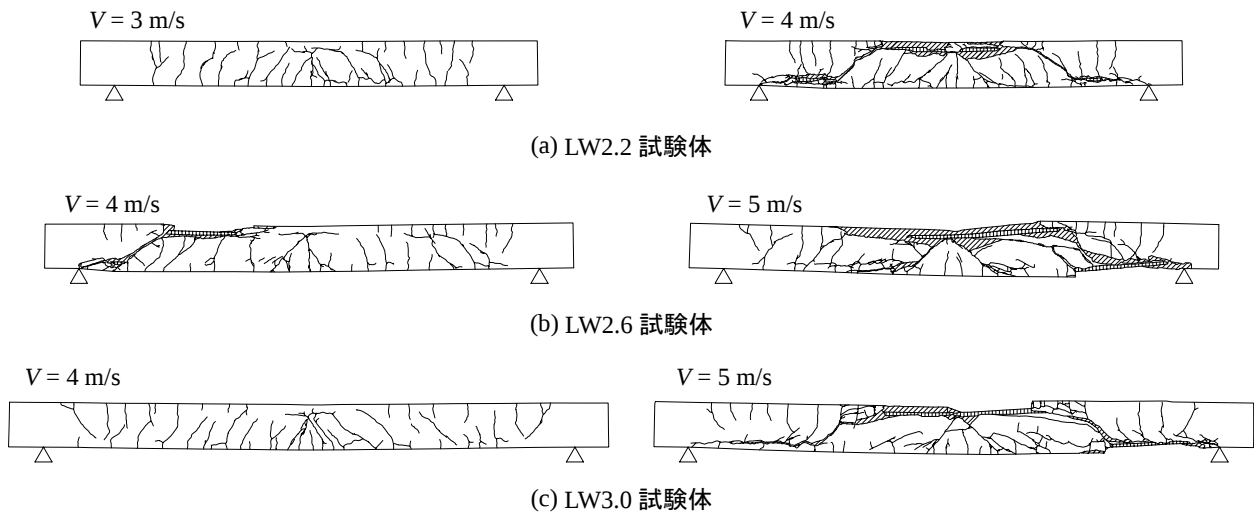


図-6 ひび割れ分布性状 (衝撃実験)

## (2) 支点反力-変位履歴曲線

図-5 には、各梁の支点反力 ( $R$ ) - 変位 ( $\delta$ ) 履歴曲線を示している。LW2.2 梁の  $V = 3 \text{ m/s}$  および LW3.0 梁の  $V = 4 \text{ m/s}$  では弾性的な挙動を示している。これらを除いた履歴曲線はせん断破壊時特有の三角形の分布を示している。このことから、LW2.2/2.6 梁は  $V = 4 \text{ m/s}$ 、LW3.0 梁は  $V = 5 \text{ m/s}$  の時点でせん断破壊により終局に至っているものと考えられる。なお、LW2.6/3.0 梁の  $V = 5 \text{ m/s}$  では三角形の分布を示した後再度載荷状態となり、変位が増加していることが分かる。これは、せん断破壊によってエネルギーが吸収された後も余剰エネルギーによって主鉄筋を介して梁の振動が励起されたためと考えられる。

## (3) 衝撃実験後におけるひび割れ分布性状

図-6 には、衝撃実験終了後のひび割れ分布を示している。LW2.2 梁の  $V = 3 \text{ m/s}$  および LW3.0 梁の  $V = 4 \text{ m/s}$  では梁下縁から鉛直方向に進展する曲げひび割れと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が、未だ破壊には至っていない。これらを除いた試験体では、アーチ状のひび割れの開口、梁上縁あるいは下縁のコンクリートが剥落し、せん断破壊に至っていることが分かる。以上のことから、LW2.2/2.6 梁は  $V = 4 \text{ m/s}$ 、LW3.0 梁は  $V = 5 \text{ m/s}$  においてせん断破壊に至ったことが分かる。

以上のことから、軽量コンクリート RC 梁の衝撃載荷実験時における破壊形式は

$\alpha = 1.07$  の場合でもせん断破壊となることが分かった。

## 4. まとめ

本研究より得られた結果を整理すると、

- (1) 静載荷実験において、せん断余裕度が 1.0 近傍の場合のひび割れ分布はせん断破壊、曲げ破壊両者の特徴を示す。
- (2) 静載荷実験時における破壊形式はせん断余裕度  $\alpha \leq 0.93$  の場合はせん断破壊、 $\alpha = 1.07$  の場合は曲げ破壊となる。
- (3) 衝撃実験において、せん断余裕度が異なると重錘衝撃力波形の第 2 波および支点反力波形の立ち上りに差異

が生じる。

- (4) 衝撃実験時における破壊形式は、せん断余裕度  $\alpha = 1.07$  の場合でもせん断破壊となる。
- (5) 以上のことから、静載荷実験時と衝撃実験時における破壊形式の予測結果は異なる場合がある。

今後、せん断余裕度が  $\alpha \geq 1.2$  である試験体に対して実験を行い、衝撃実験時における破壊形式が曲げ破壊型となる限界のせん断余裕度を把握する必要がある。

## 参考文献

- 1) 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
- 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) 人工軽量骨材アサノライト, 太平洋マテリアル (株)
- 9) 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