

論文 純スパン長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

今野 久志*1・岸 徳光*2・竹本 伸一*3・三上 浩*4

要旨: 本研究では静載荷時のせん断余裕度に着目した場合の衝撃荷重載荷時における軽量コンクリート RC 梁の破壊形式を特定することを目的に, 同一断面形状で純スパン長のみを変化させてせん断余裕度を変化させた, せん断補強筋を配筋しない場合の軽量コンクリート RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施した。本研究により, 1) 静載荷実験時にはせん断余裕度が $\alpha = 1.1$ 前後で曲げ破壊型となるのに対して, 2) 衝撃荷重載荷時には, せん断破壊型で終局に至ること等が明らかとなった。

キーワード: RC 梁, 軽量コンクリート, 破壊形式, せん断余裕度, 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およびそれに伴う基礎構造の小型化を目的として, 軽量コンクリートの適用が検討され¹⁾, 一部で実用化されている。軽量コンクリート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^{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, 比重が 1.8 程度の軽量コンクリートの場合には, 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) せん断補強筋のないせん断破壊型 RC 梁の静的せん断耐力に対する終局時の最大支点反力の比は 2.3 前後, 入力エネルギーに対する吸収エネルギーの比は 0.7 程度になること⁵⁾, 3) 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, 曲げ破壊型で終局に至る場合やせん断補強筋のないせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃挙動解析が大略可能であること⁶⁾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, 曲げ耐力のみならずせん断耐力

の適切な評価手法を確立することが重要である。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可能である。しかしながら, 衝撃荷重載荷時における耐力評価あるいは破壊形式の予測法は未だ確立されていないのが現状である。

このような背景より, 本研究では, 静載荷時のせん断余裕度に対応する衝撃荷重載荷時の破壊形式を特定することを目的に, 同一断面を有しせん断余裕度のみを変化させたせん断補強筋を配筋しない場合の軽量コンクリート RC 梁に関する重錘落下衝撃実験 (以後, 衝撃実験) を実施した。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 梁を対象として実験を行っている。

2. 実験概要

2.1 RC 梁の形状寸法および実験方法

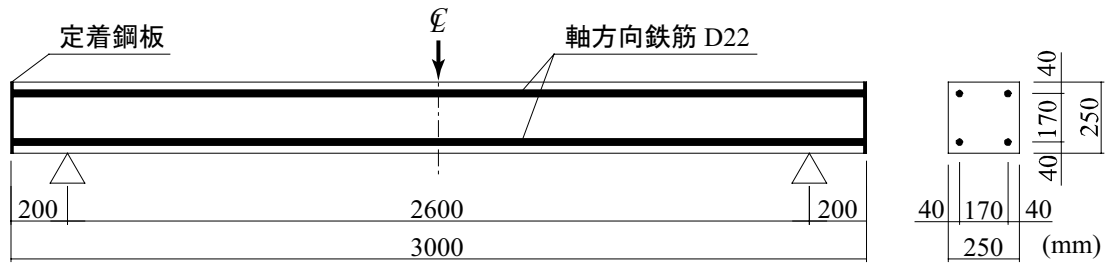
図-1 には, RC 梁の形状寸法および配筋状況を示している。本実験に用いた試験体の断面寸法 (幅 × 高さ) はすべて 25 × 25 cm である。純スパン長はせん断余裕度を変化させるために 2.2, 2.6, 3.0 m の 3 種類とした。軸方向鉄筋には

*1 (独) 北海道開発土木研究所構造研究室主任研究員 博(工) (正会員)

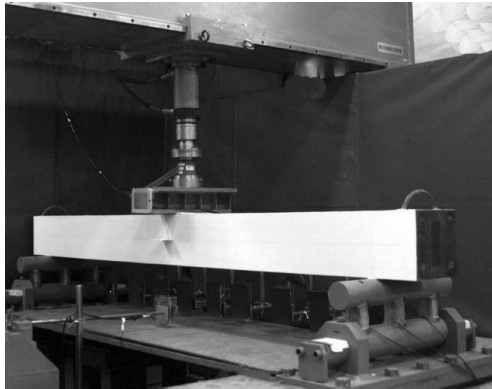
*2 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 ドーピー建設工業(株) 北海道本店統括部長 博(工) (正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)



図－１ 試験体概要図（純スパン長 2600 mm の場合）



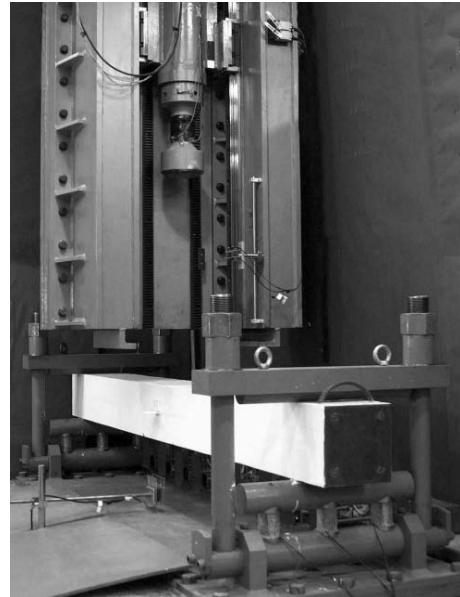
写真－１ 静載荷実験状況

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（写真－１参照）。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して載荷している。

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（写真－２参照）。

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。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に高さ 2 mm のテーパが施されている。本実験では漸増繰り返し載荷法と単一載荷法を採用した。前者は重錘衝突時の初速度およびその増分速度を 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、後者は設定した衝突速度で 1 度だけ



写真－２ 衝撃実験状況

だけ載荷させる方法である。また、単一載荷実験の場合には 2 体の試験体を用いることとし、第 1 体目の試験体に対しては、漸増繰り返し載荷実験の最大衝突速度で載荷させることとし、第 2 体目の試験体に対しては、試験体が終局に至った場合には -1 m/s、未だ終局に至らない場合には +1 m/s として実験を行った（表－１参照）。漸増繰り返し載荷実験時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 および載荷点変位（以後、変位） δ 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スケッチしてひび割れ分布図を作成している。

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 α	衝突速度 V (m/s)	
							漸増繰り返し	単一
LW0.8	2.2	5.2	38.4	83.4	106.1	0.79	1~3	3, 4
LW0.9	2.6	6.2			89.8	0.93	1~5	4, 5
LW1.1	3.0	7.1			77.9	1.07	1~5	4, 5

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⁷⁾を使用した。また、軽量コンクリートの比重は1.8である。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とせん断余裕度を組み合わせ示している。なお、試験体数は各梁毎に静載荷試験体1体、衝撃載荷試験体3体(繰り返し:1体, 単一:2体)の全12体である。

表中のせん断余裕度 α 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(以後、示方書)⁸⁾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。LW0.8/0.9梁はせん断余裕度 α が $\alpha < 1.0$ であることより、静載荷時にはせん断破壊、LW1.1梁は $\alpha > 1.0$ であることより曲げ破壊することが予想される。

3. 実験結果および考察

3.1 静載荷実験結果

(1) 静荷重-変位関係

図-2には、静載荷実験における静荷重(P)-変位(δ)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、LW0.8梁の場合には、主鉄筋降伏後

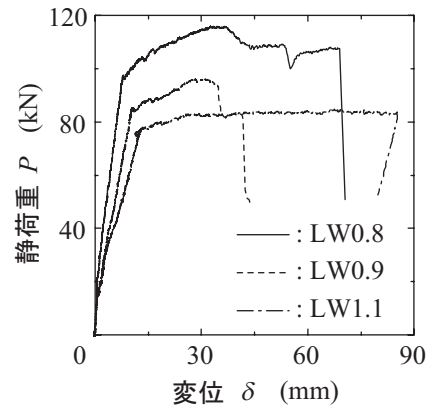


図-2 静荷重-変位関係

も荷重がゆるやかに上昇する傾向を示すものの、変位が35 mm前後に至った時点から除荷状態となり、最終的に載荷点部および下縁かぶりコンクリートが剥離しせん断破壊で終局に至っている。

一方、LW0.9梁の場合には、LW0.8梁と同様の傾向を示すものの、変位が30 mmに到達した状態から除荷状態となり終局に至っている。

これに対して、LW1.1梁の場合には、主鉄筋降伏後の荷重の上昇も小さく、角折れ状態で曲げ破壊型で終局に至っていることが推測される。

(2) 静載荷実験後におけるひび割れ分布性状

図-3には静載荷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。また、斜め方向のひび割れはいずれの梁の場合も開口している。すなわち、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。

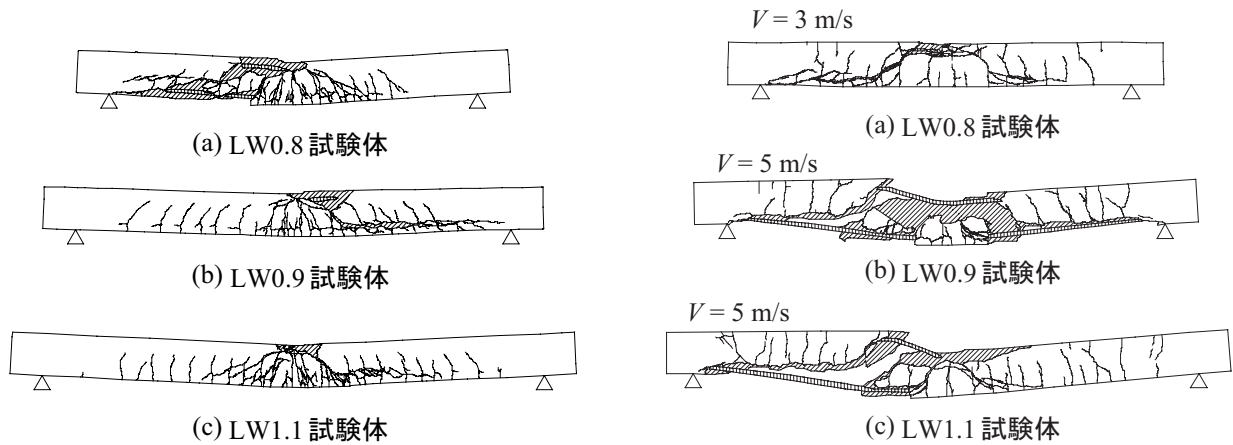


図-3 ひび割れ分布性状（静载荷実験）

図-4 ひび割れ分布性状（漸増繰り返し载荷実験）

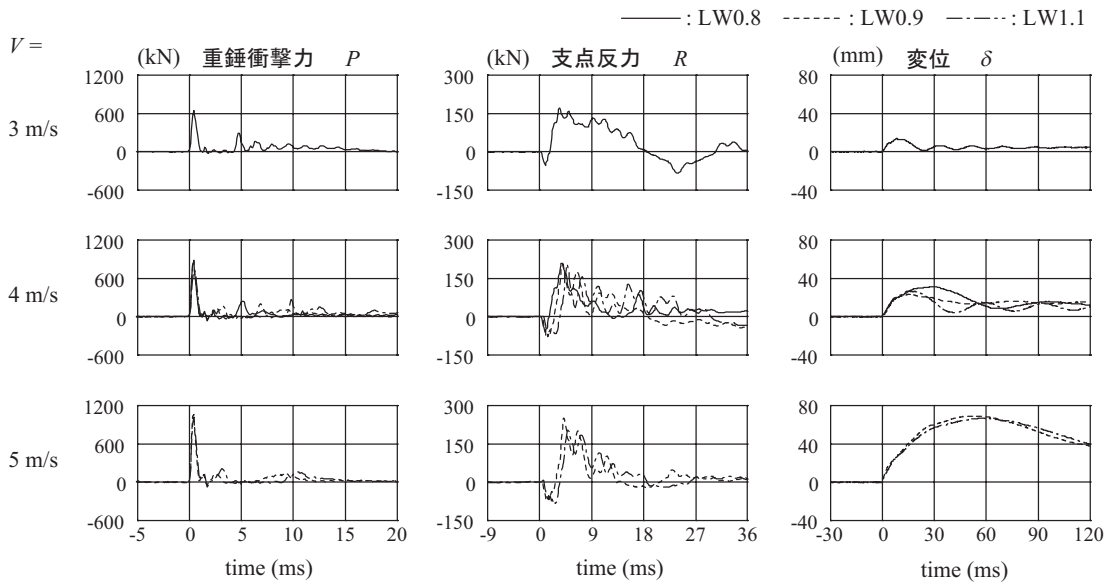


図-5 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

LW0.8 梁の場合には、主鉄筋に沿う割裂ひび割れに起因してかぶりコンクリートが剥落すると共に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。LW0.9 梁の場合には、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、最終的にはせん断破壊に至ったことが分かる。LW1.1 梁の場合には、载荷点から斜めひび割れが進展しているものの曲げ変形が卓越し、梁上縁が圧壊している様子がうかがえる。

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

$\alpha \leq 0.9$ の場合はせん断破壊型

$\alpha = 1.1$ の場合は曲げ破壊型

となることが明らかになった。

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载荷実験の結果を用いて行った。なお、漸増繰り返し载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（図-4 参照）。

(1) 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-5 には、各梁の重錘衝撃力 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。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。

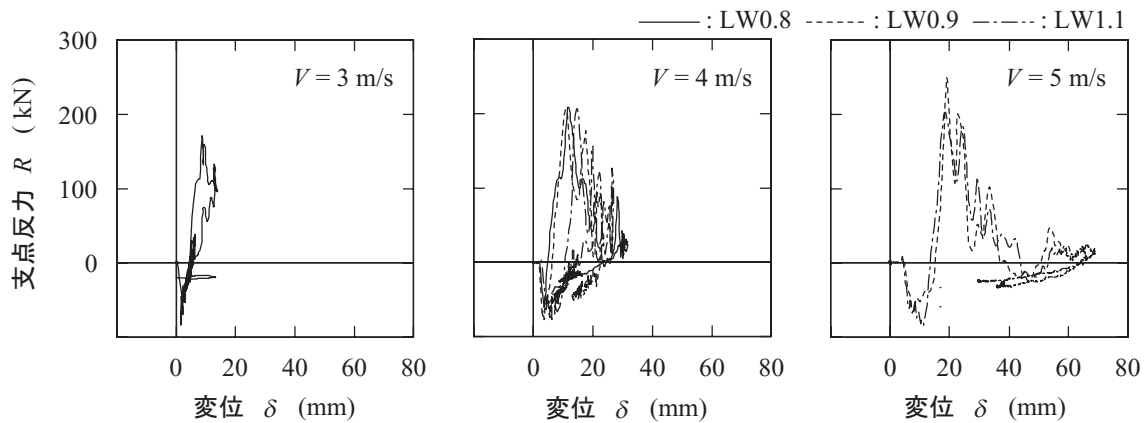


図-6 支点反力-変位履歴曲線

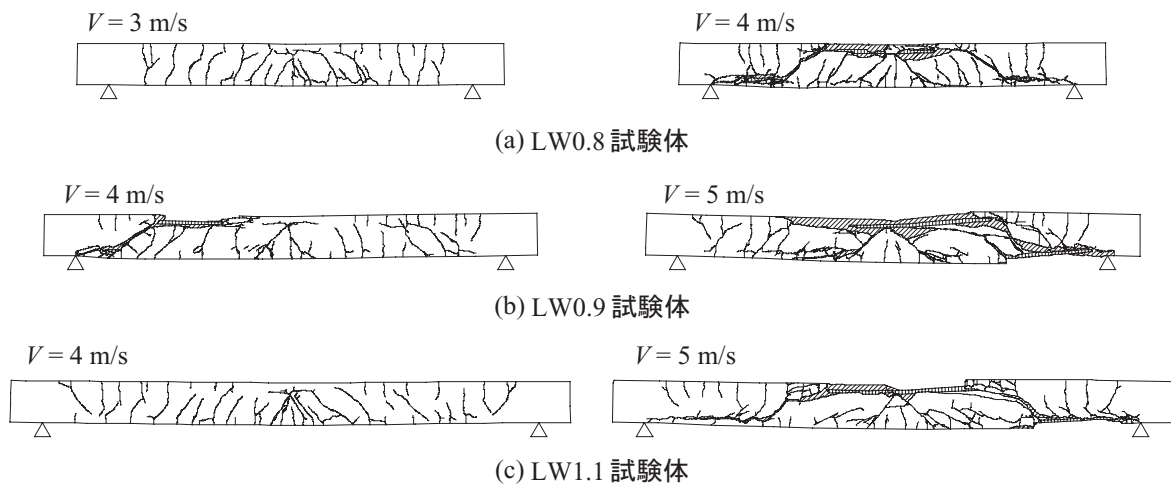


図-7 ひび割れ分布性状(単一載荷実験)

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(せん断余裕度大きい)梁ほど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曲げ応答変位が増加し、再衝突に用す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、純スパン長が短い(せん断余裕度が

小さい)梁ほど立ち上がり時間も早い。

変位波形 δ を見ると、各梁ともに正弦波状の波形性状を示している。LW0.8梁の $V=3$ m/s および LW1.1梁の $V=4$ m/s では減衰自由振動状態を示しており、両梁は未だ健全であることが分かる。これらを除いた LW0.8/0.9梁の $V=4$ m/s 時および LW0.9/1.1梁の $V=5$ m/s 時における波形は周期が長く示されており損傷が大きいことを暗示している。

(2) 支点反力-変位履歴曲線

図-6には、各梁の支点反力(R) - 変位(δ)履歴曲線を示している。LW0.8梁の $V=3$ m/s および LW1.1梁の $V=4$ m/s では吸収エネルギー量も小さくほぼ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

角形状の分布⁹⁾を示している。このことから、LW0.8/0.9 梁は $V = 4 \text{ m/s}$ 、LW1.1 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、LW0.9/1.1 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-7には、衝撃実験終了後のひび割れ分布を示している。LW0.8 梁の $V = 3 \text{ m/s}$ および LW1.1 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から斜め下方に進展するひび割れが発生しているが、未だ終局には至っていない。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かぶりコンクリートが剥落し、せん断破壊型で終局に至っていることが分かる。

これより、LW0.8/0.9 梁は $V = 4 \text{ m/s}$ 、LW1.1 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、本研究の範囲内では静的せん断余裕度が $\alpha \leq 1.1$ の軽量コンクリート RC 梁は重錘落下衝撃荷重載荷時にせん断破壊型で終局に至ることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、せん断補強筋を配筋しない軽量コンクリート製 RC 梁を対象に、静載荷時の 1.0 前後におけるせん断余裕度に対応する衝撃荷重載荷時の破壊形式を特定することを目的に、同一断面を有し純スパン長を変化させることによりせん断余裕度を変化させた場合の静載荷実験および重錘落下衝撃実験を実施した。本研究では、静的せん断余裕度 α を 0.8, 0.9, 1.1 の 3 種類に変化させた。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 静載荷における破壊形式は、せん断余裕度 $\alpha \leq 0.9$ の場合はせん断破壊型、 $\alpha = 1.1$ の

場合は曲げ破壊型となる。

- 2) 単一載荷法に基づいた衝撃実験時における破壊形式は、せん断余裕度 $\alpha = 1.1$ の場合でもせん断破壊型となる。

今後、せん断余裕度が $\alpha > 1.1$ である試験体に対する同様の実験を行い、衝撃実験時に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したいと考えている。

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) 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
- 6) 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, pp.1361-1372, 2004
- 7) 人工軽量骨材アサノライト, 太平洋マテリアル (株)
- 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
- 9) 安藤智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 蟹江俊仁: スターラップを有しないせん断破壊型 RC 梁の単一載荷衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1809-1818, 2000.3