

## 軽量コンクリートを用いたせん断補強筋の無いRC梁の重錘落下衝撃実験

FALLING-WEIGHT IMPACT TEST OF LIGHT-WEIGHT CONCRETE RC BEAMS WITHOUT STIRRUPS

竹本 伸一\*, 岸 徳光\*\*, 三上 浩\*\*\*, 今野 久志\*\*\*\*

Sin-ichi TAKEMOTO, Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI and Hisashi KONNO

\*ドービー建設工業(株) 北海道本店 統括部長 (〒060-0001 札幌市中央区北1条西6丁目)

\*\*工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

\*\*\*フェロー会員 博(工) 三井住友建設(株)技術研究所 室長 (〒270-0132 千葉県流山市駒木518-1)

\*\*\*\*博(工) (独) 北海道開発土木研究所主任研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3)

キーワード: 軽量コンクリート, RC梁, せん断破壊, 耐衝撃性状

(light-weight concrete, RC beams, shear-failure, impact resistant behavior)

### 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, 新しい材料の開発やその適用性検討が盛んに行われている。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<sup>1)</sup>(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作が可能になること, 有害化学物質を含まないことや, 塩分を含まずアルカリ骨材反応が生じないこと等, 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。

軽量コンクリートの各種RC構造物への適用を目的に, 梁や柱部材の静的な曲げおよびせん断耐荷性状に関する実験的・解析的研究が既に実施されている<sup>2), 3)</sup>。一方, 軽量コンクリートは耐衝撃用途構造物への応用も考えられ, 著者らは曲げ破壊型RC梁を対象とした重錘落下衝撃実験を実施している。その結果, 圧縮強度が同程度の場合には, 普通コンクリートを用いる場合と同程度の耐衝撃性状が期待でき, かつ著者らが提案している耐衝撃設計用静的耐力算定式の適用が可能であることが明らかとなって

いる<sup>4)</sup>。しかしながら, この種のRC梁に関する耐衝撃設計手法を確立するためには, 曲げ耐力の算定法のみならずせん断耐力の算定法も確立することが必要である。

このような観点より, 本研究では, 静載荷時にせん断破壊で終局に至る軽量コンクリートを用いたせん断補強筋を有しないRC梁の耐衝撃性状を検討することを目的として, 重錘落下衝撃実験を実施した。本研究では, 軽量コンクリートを用いる場合の耐衝撃性状を同一断面形状で圧縮強度が同程度の普通コンクリートを用いる場合と比較する形で検討を行うこととした。

### 2. 実験の概要

#### 2.1 RC梁の形状寸法および静的設計値

図-1には, 本実験に用いた軽量コンクリート(Light-Weight Concrete)を用いたRC梁(以後, LW梁)と普通コンクリート(Normal Concrete)を用いたRC梁(以後, N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せん断破壊性状を比較するために, 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×純スパン長)は両梁共に, 200×300×2,000mmの複鉄筋矩形RC梁としている。ただし, いずれもせん断補強筋は配筋していない。

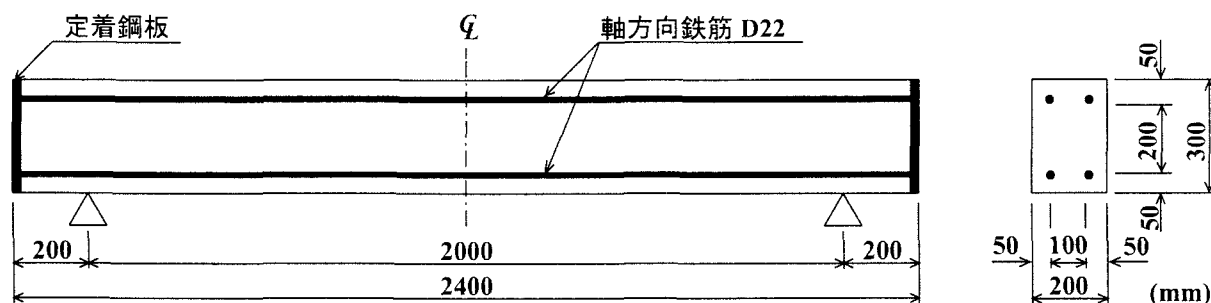


図-1 試験体概要図

表-1 試験体の一覧

試験体名	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 $\alpha$	実測静的 せん断耐力 $P_{us}$ (kN)	実せん断 余裕度 $\alpha'$	衝突速度 $V$ (m/s)
N	0.015	4.0	115.3	132.4	0.87	134.1	1.01	4, 4.5, 5, 5.25, 5.5
LW			80.7	131.3	0.61	101.7	0.77	3, 3.5, 3.75, 4, 4.25

表-2 コンクリートの力学的特性値

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 $\nu_c$
普通	2.33	44.8	3.50	29.8	0.21
軽量	1.86	41.8	2.53	21.1	0.21

表-3 鉄筋の力学的特性値

鉄筋 名称	材質	降伏強度 $\sigma_y$ (MPa)	弾性係数 $E_s$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_s$
D22	SD345	367	206	0.3

表-1には、LW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、土木学会コンクリート標準示方書<sup>5)</sup>(以後、示方書)に基づき算定している。なお、LW梁に関する $V_{usc}$ 値は、示方書に基づき70%に低減して評価している。また、 $P_{usc}$ 、 $V_{usc}$ 算定時の部材係数は、真の耐荷性状を検討するために、 $\gamma=1.0$ としている。せん断余裕度 $\alpha$ は、いずれの梁も $\alpha < 1.0$ であることより、設計的には静載荷時にせん断破壊で終局に至ることが予想される。また、表中には別途実施した静載荷実験より得られた実測静的耐力 $P_{us}$ 、および $P_{us}$ と $P_{usc}$ を用いて算定した実せん断余裕度 $\alpha'$ も合わせて示している。なお、図-2に示すように、静載荷実験ではいずれの試験体もせん断破壊で終局に至っていることを確認している。なお、本実験に用いた試験体の内訳は、N梁、LW梁共に静載荷実験用を含め6体ずつである。

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、普通コンクリートの粗骨材のみを寸法10

~15mmの軽量骨材(比重1.2)に置き換えて製作している。その結果、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%程度低減している。また、圧縮強度 $f'_c$ は両者ほぼ同等の値を示しているが、引張強度 $f_t$ および弾性係数 $E_c$ は普通コンクリートに比べてそれぞれ25%、30%程度小さい。なお、鉄筋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

実験は、写真-1に示すように、リバウンド防止用治具付の支点上に設置した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によって実施している。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300kgで載荷点部の直径が150mm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2mm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 $\delta$ (以後、変位)波形

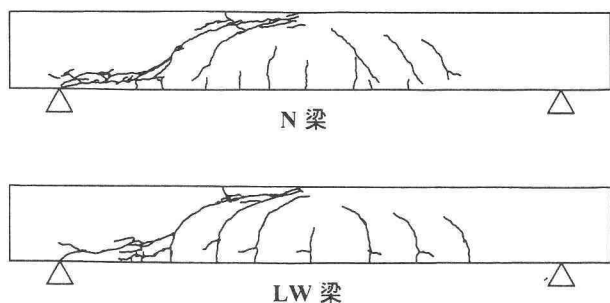


図-2 静載荷実験後のひび割れ図

である。また、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。

### 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-3には、各衝突速度 $V$ における重錘衝撃力 $P$ 、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。図中、時間軸は重錘衝撃力の立ち上がりを0 msと設定している。なお、紙面の都合上、各波形は衝突速度が $V=3.5, 4, 4.25, 4.5, 5$  m/sの場合のみを掲載している。

最初に、重錘衝撃力波形 $P$ について見ると、N 梁、LW 梁の応答性状は、衝突速度 $V$ の大きさにかかわらず衝撃初期には継続時間の短い正弦半波（第1波目）とその後の継続時間の長い正弦半波（第2波目）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。第1波目の波形は重錘の衝突によって初期に発生する波形であり、第2波目は重錘とその後形成されるRC 梁の低次振動との相互作用によって発生する波形であるものと推察される。詳細に見ると、LW 梁の重錘衝撃力波形の振幅はN 梁の場合よりも小さい傾向を示しており、両梁で発生する重錘衝撃力に差のあることが分かる。これは、重錘衝撃力は重錘とコンクリートの接触による相互作用によって発生する現象であることより、両コンクリートの弾性係数の差が大きく関与しているものと推察される。

次に、支点反力波形 $R$ に着目すると、LW 梁の場合には継続時間が7～10 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を示している。一方、N 梁の場合には三角形波の継続時間が13～15 ms程度とLW 梁に比較して長い。また、衝撃初期の最大支点反力発生時近傍の高周波成分の振幅は、N 梁の場合がLW 梁の場合より大きい。

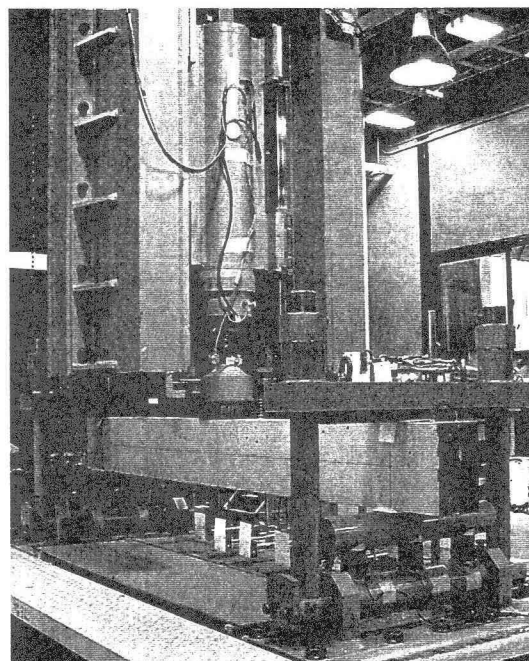


写真-1 衝撃実験状況

変位波形 $\delta$ は、120 msまでの時間に対して示されているが、両梁は正弦半波の分布性状を示した後、減衰自由振動に至っている。また、いずれの梁においても、衝突速度 $V$ の増大に伴い、初期波形の振幅および周期が増大していることが分かる。LW 梁とN 梁を比較すると、LW 梁はN 梁に比べて衝突速度 $V$ の増加に対する初期波動の継続時間の増加割合が大きく示され、損傷の進行度合の大きいことが分かる。

#### 3.2 各種応答値と衝突速度の関係

図-4には、各RC 梁の最大重錘衝撃力 $P_{ud}$ 、最大支点反力 $R_{ud}$ 、最大変位 $\delta_{max}$ および残留変位 $\delta_{rd}$ の各分布を衝突速度 $V$ を横軸に取って示している。

(a), (b) 図より、最大重錘衝撃力 $P_{ud}$ 、最大支点反力 $R_{ud}$ は、共にN 梁がLW 梁より大きいことが分かる。

一方、(c) 図の最大変位 $\delta_{max}$ に着目すると、せん断破壊が著しい $V=4, 4.25$  m/s時におけるLW 梁の結果を除くと、両梁の分布はほぼ線形に増加していることが分かる。これは、著しい破壊が生じるまでは、コンクリート材料にかかわらず、入力エネルギーに対応する変位が励起されていることを示している。また、LW 梁の場合には、衝突速度 $V=3.75$  m/sから $V=4$  m/sに増加させた時点で急激に最大変位、残留変位が増加していることから、脆性的に終局に至ることが推察される。

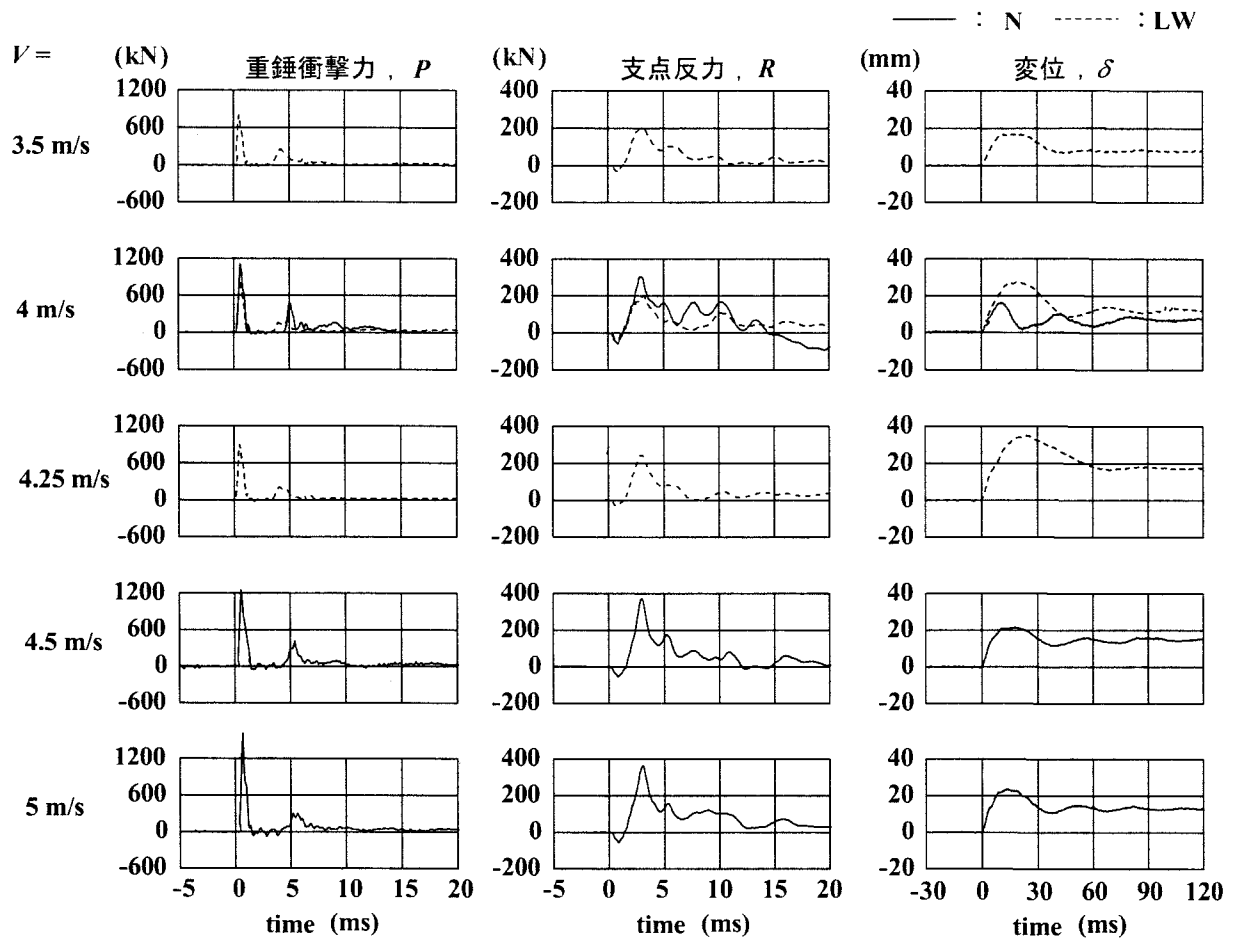


図-3 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

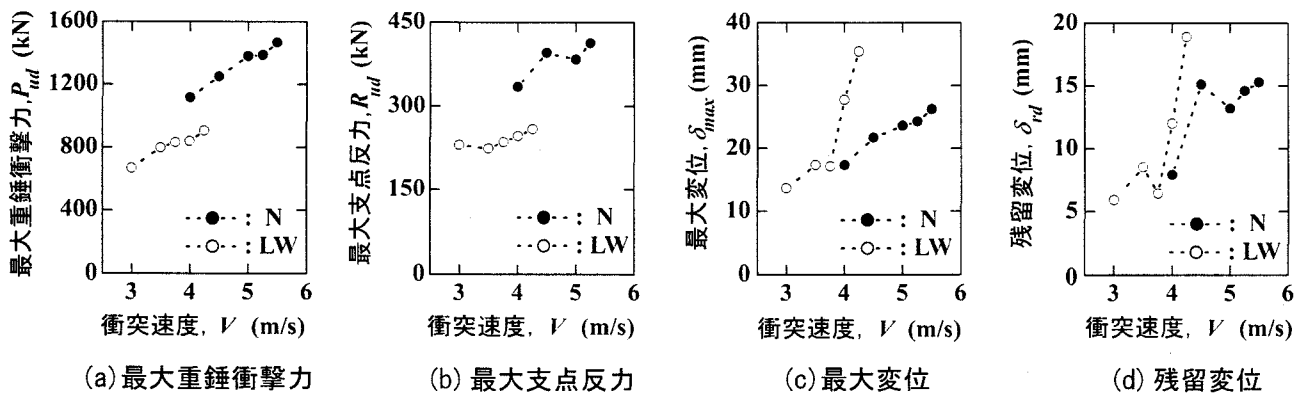


図-4 各種応答値

(d) 図の残留変位  $\delta_{rd}$  に着目すると、LW 梁の場合は  $V > 3.75$  m/s において急激に増加しており、入力エネルギーの増加に対応して損傷の程度も進行していることがうかがえる。一方、N 梁の場合は  $V = 4$  m/s から  $V = 4.5$  m/s で残留変位が急激に増加しているものの、 $V \geq 5$  m/s では入力エネルギーの増加に

対する残留変位の増加割合は小さく示されている。これは 図-5 のひび割れ状況からも明らかのように、破壊性状の変化によるものと推察される。

### 3.3 ひび割れ分布性状

図-5 には、LW 梁と N 梁における各衝突速度  $V$  毎の実験終了後のひび割れ分布性状を示している。

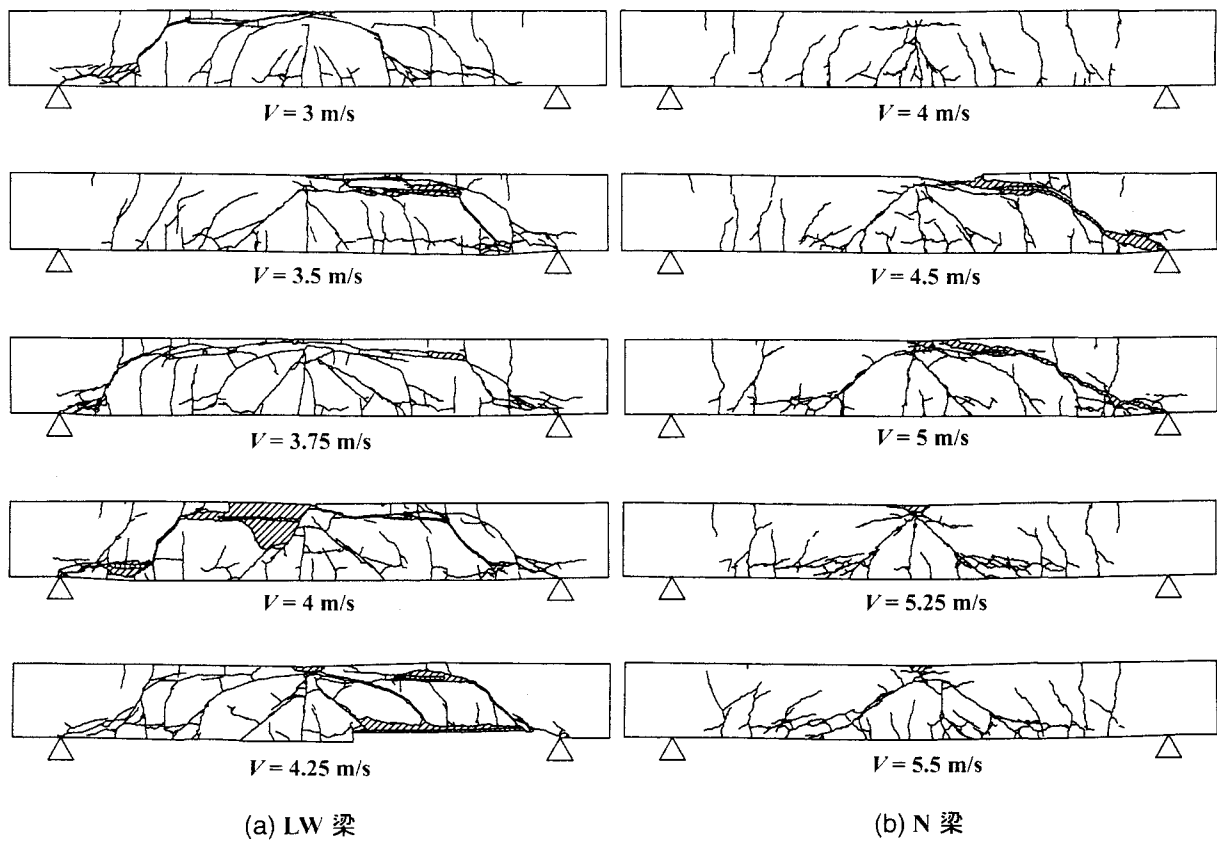


図-5 実験終了後のひび割れ分布性状

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。

(a) 図の LW 梁の場合には、 $V=3$  m/s 時から、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、 $V=4, 4.25$  m/s の場合は、荷点近傍のコンクリートブロックが剥落し、過度の損傷を受けていることが分かる。これより、LW 梁の場合には  $V=3.75$  m/s 時の応答が限界状態であるものと推察される。

一方、(b) 図の N 梁の場合は、 $V=4$  m/s 時において曲げひび割れが卓越しており、LW 梁の  $V=4$  m/s の場合とは異なっていることが分かる。これは、N 梁の実せん断余裕度  $\alpha'$  が 1.0 程度であることによるものと推察される。しかしながら、 $V=4.5 \sim 5$  m/s 時には荷点から斜めひび割れが発生すると共に梁右側部にアーチ状のひび割れが発生しており、せん断破壊によって終局状態に至っていることをうかがわせる。さらに、衝突速度  $V$  を増加させると、荷点近傍部に発生する押し抜け型の斜めひび割れが卓越し、主鉄筋に沿う割裂ひび割れが支点に向かって

進展している。なお、図-4 より  $V=5 \sim 5.5$  m/s までの最大支点反力  $R_{ud}$ 、最大変位  $\delta_{max}$ 、残留変位  $\delta_{rd}$  には大差のないことが分かる。しかしながら、 $V=4 \sim 4.5$  m/s において残留変位が急激に増加し、梁右側部にアーチ状のひび割れが発生していることより、N 梁においては耐衝撃設計のための最大変位、残留変位は  $V=4.5$  m/s 時の値を用いて議論すべきであるものと判断される。

### 3.4 終局時における応答値の比較

ここでは、上述の議論より、各梁の終局時点を安全側で評価することとして、LW 梁、N 梁でそれぞれ  $V=3.5$  m/s、 $4.5$  m/s 時点とし、LW 梁の耐衝撃性状を N 梁と比較する形で検討することとする。なお、ここでは、図-3 から明らかなように、支点反力波形  $R$  と変位波形  $\delta$  は位相差も小さく、かつ低周波成分が卓越していることより、支点反力が静載荷時の荷重と同様の作用をしているものと仮定し、終局時の最大支点反力  $R_{ud}$  を動的耐力であるものとして評価することとする。表-4 には、両梁の終局時における各種応答値を示している。応答比は、LW 梁に関する応答値の N 梁に対する比率である。ま

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 $\delta_{max}$ (mm)	残留変位 $\delta_{rd}$ (mm)	吸収 エネルギー $E_a$ (kJ)	耐力比 $R_{ud}/P_{us}$	エネルギー比 $E_a/E_k$
① LW-3.5	1.84	797.1	223.8	17.3	8.5	1.39	2.20	0.76
② N-4.5	3.04	1249.5	395.2	21.7	15.1	2.26	2.95	0.74
応答比 ①/②	0.61	0.64	0.57	0.79	0.56	0.62	0.75	1.01

た、表中、耐力比は最大支点反力  $R_{ud}$  を実測静的せん断耐力  $P_{us}$  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  $E_a$  (以後、吸収エネルギー量) 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、支点反力-変位曲線の第1象限を用いて評価している。

表より、終局時の LW 梁の入力エネルギー量  $E_k$ 、最大支点反力  $R_{ud}$ 、吸収エネルギー量  $E_a$  は N 梁の 0.6 前後の値となっており、静載荷時のせん断耐力比 (表-1 より、0.76) よりも耐荷性に劣ることが分かる。また、残留変位  $\delta_{rd}$  は N 梁の 0.56 となっている。これは、N 梁の 1/2 強の残留変位でせん断破壊型の損傷が顕在化することを意味している。一方、エネルギー比  $E_a/E_k$  は N 梁と同程度であり、コンクリート材料を問わず 0.75 程度となっていることが分かる。

#### 4. まとめ

本研究では、軽量コンクリートを用いたせん断補強筋を有しないせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状を明らかにすることを目的に、同一スパン長、同一断面形状を有する軽量コンクリート製 (LW 梁) および普通コンクリート製 RC 梁 (N 梁) を製作して、300 kg 重錘を1度だけスパン中央部に落下させる単一載荷重錘落下衝撃実験を実施した。本実験結果から得られた結論を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 重錘衝撃力、支点反力、載荷点変位波形は最大応答値が異なるものの、各波形性状は LW 梁、

N 梁で大略類似である。

- 2) 終局時の LW 梁の入力エネルギー量、最大支点反力、吸収エネルギー量は N 梁の場合の 0.6 程度である。
- 3) その値は、静的実測せん断耐力比の 0.76 よりも小さい。
- 4) 終局時の LW 梁の残留変位は N 梁の 0.56 程度と小さい。
- 5) 一方、終局時のエネルギー吸収量の入力エネルギー量に対する比は LW 梁と N 梁で大略等しく 0.75 前後である。

#### 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) 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