

断面寸法が異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状に関する実験的研究

Experimental Study on Impact Resistant Behavior of Shear-Failure-Type RC Beams with Various Cross Section

|          |      |                           |
|----------|------|---------------------------|
| 室蘭工業大学   | 正員   | 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)    |
| 三井建設 (株) | フェロー | 三上 浩 (Hiroshi Mikami)     |
| 防衛庁第4研究所 | 正員   | 安藤 智啓 (Tomohiro Ando)     |
| 室蘭工業大学   | フェロー | 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka) |
| 室蘭工業大学   | ○学生員 | 盛田 行彦 (Yukihiko Morita)   |

1. はじめに

著者らは、これまでせん断破壊に対する合理的な耐衝撃設計手法を確立することを目的として、静載荷時にせん断破壊が卓越する（以後、せん断破壊型）RC 梁の耐衝撃性状に関する実験的・解析的研究を継続して行ってきた。その結果、せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状に与える主鉄筋比、せん断スパン比、コンクリート強度および載荷方法（単一載荷と繰り返し載荷）の影響が、ある程度明らかになった<sup>1)</sup>。

しかしながら、耐力やエネルギー収支関係に基づく合理的な耐衝撃設計手法を確立するためには、さらに1) 静的せん断耐力が同程度である場合における断面寸法の耐衝撃性状に与える影響（以後、断面寸法の影響）や、2) 入力エネルギー（ $MV^2/2$ ：M；重錘質量，V；衝突速度）が一定である場合における M，V 値の違いが耐衝撃性状に与える影響等を明らかにする必要があると判断される。

このような観点より、本研究では上述の断面寸法の影響に着目して、せん断破壊型 RC 梁に関する全 15 体を用いた単一載荷による重錘落下衝撃実験を行い、その影響に関して検討を試みた。

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 梁試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、全てせん断補強筋を有しない純スパン長 2 m の RC 梁である。図-1 (b) に示す A1 および B 梁は、断面寸法（梁幅×梁高）がそれぞれ 200×300 mm と 250×250 mm のものである。また、上端鉄筋の有無が RC 梁の耐衝撃性状に与える影響も検

討するため、A1 と同様の断面寸法で上端鉄筋を配筋しない A2 試験体も製作した。3 種類の試験体は、いずれも設計的にはほぼ同様の静的せん断耐力を有する RC 梁である。

RC 梁はリバウンド防止用治具付の支点治具上に設置している。支点治具全体は、回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。実験は、重錘を RC 梁のスパン中央部に所定の高さから一度だけ自由落下させる単一載荷により行っている。用いた重錘は、質量が 300 kg、載荷点部の直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘である。重錘底部は、衝突時の片当たりを防止するために、曲率半径 1,407 mm で高さ 2 mm のテーパを有する球状となっている。測定項目は、重錘衝撃力 P、合支点反力 R（以後、支点反力）および変位 δ（200 mm ピッチに測定）の各応答波形である。また、実験終了後には梁側面に生じたひび割れを記録している。

2.2 RC 梁の設計値一覧

表-1 には、各試験体の設計値一覧を示している。表中の静的せん断耐力  $V_{usc}$  および静的曲げ耐力  $P_{usc}$  は、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に基づいて算定している。各試験体は、せん断余裕度が  $\alpha (= V_{usc} / P_{usc}) < 1.0$  であることより、静載荷時には設計的にせん断破壊で終局に至ることを意味している。表-2 および表-3 には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を一覧にして示している。また、表-1 には、別途実施した静載荷実験結果の静的せん断耐力  $P_u$  も合わせて示している。なお、静載荷実験時のひび割れ分布は、いずれの試験体も載荷点から支点部に至る斜めひび割れの発生によって、終局に至っていることを確認している。

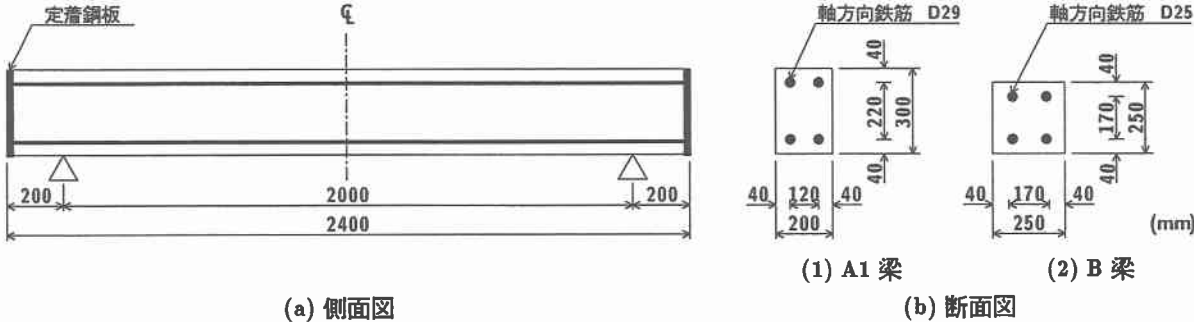


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表－１ 試験体の設計値一覧

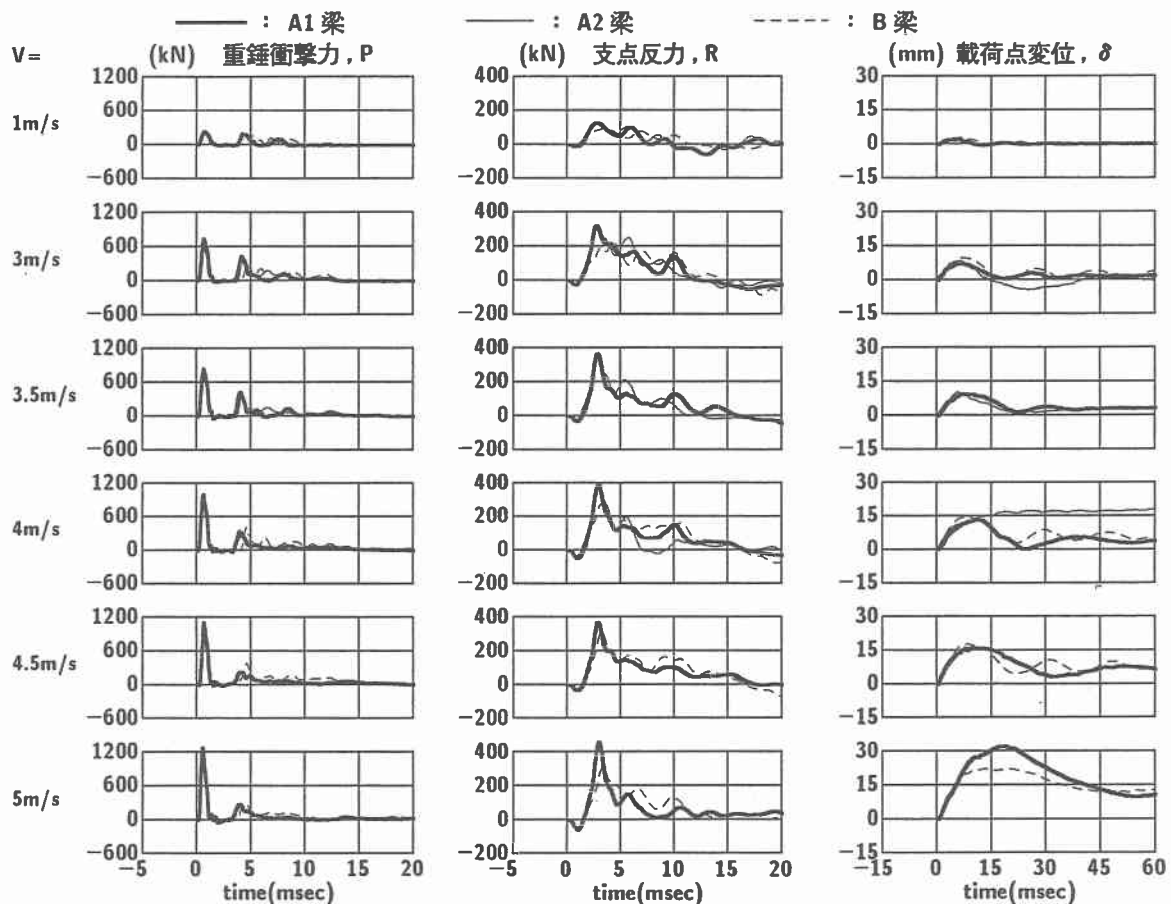
| 試験体名 | 主鉄筋比<br>$p_t$ | せん断<br>スパン比<br>$a/d$ | 静的せん断<br>耐力<br>$V_{usc}$ (kN) | 静的曲げ<br>耐力<br>$P_{usc}$ (kN) | せん断<br>余裕度<br>$\alpha$ | 衝突速度<br>$V$ (m/s)    | 実測静的<br>せん断耐力<br>$P_{us}$ (kN) |
|------|---------------|----------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------|
| A1   | 0.0247        | 3.85                 | 127.9                         | 243.3                        | 0.53                   | 1, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 | 136.4                          |
| A2   | 0.0247        | 3.85                 | 127.9                         | 230.6                        | 0.55                   | 1, 3, 3.5, 4         | 163.6                          |
| B    | 0.0193        | 4.76                 | 125.4                         | 146.3                        | 0.86                   | 1, 3, 4, 4.5, 5      | 144.5                          |

表－２ コンクリートの力学的特性

| 実験時材令<br>(日) | 圧縮強度<br>$f'_c$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_c$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_c$ |
|--------------|----------------------|---------------------|------------------|
| 55           | 39.1                 | 24.3                | 0.19             |

表－３ 鉄筋の力学的特性

| 鉄筋名称 | 材質    | 降伏強度<br>$\sigma_y$ (MPa) | 弾性係数<br>$E_s$ (GPa) | ポアソン比<br>$\nu_s$ |
|------|-------|--------------------------|---------------------|------------------|
| D25  | SD345 | 383                      | 206                 | 0.3              |
| D29  | SD345 | 409                      | 206                 | 0.3              |



図－３ 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位の応答波形

### 3. 実験結果および考察

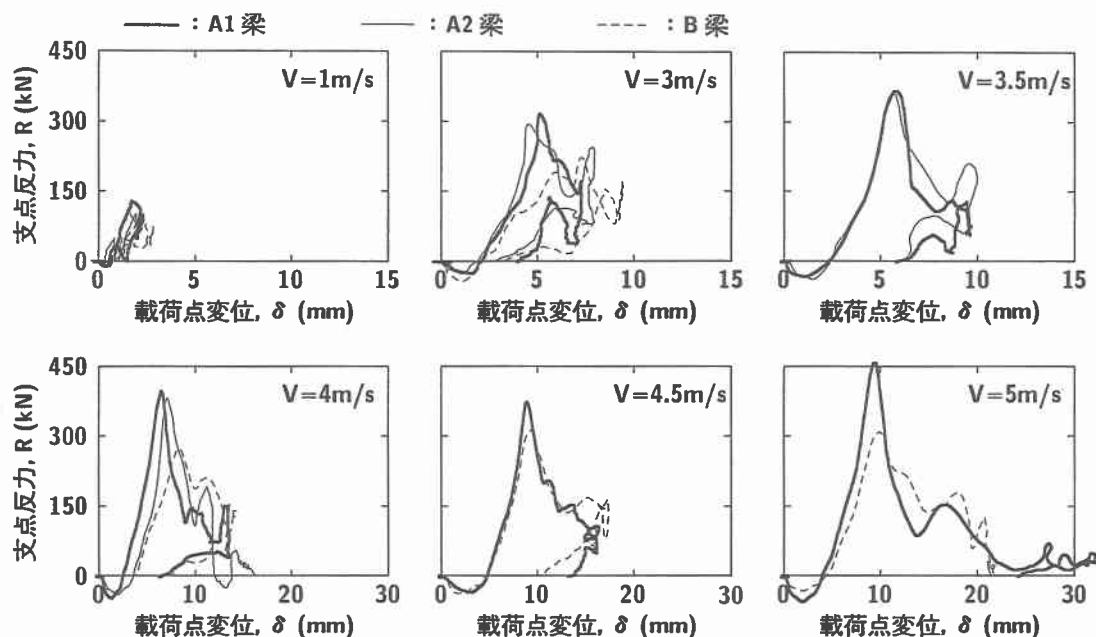
#### 3.1 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位の応答波形

図－３には、各衝突速度における重錘衝撃力  $P$ 、支点反力  $R$  および載荷点変位  $\delta$  に関する各応答波形を示している。図中、各波形は重錘衝突時を 0 ms として整理している。以下、A1, A2 梁に着目して上端鉄筋の有無の影響を、また、A1, B 梁に着目して断面寸法の影響を項目毎に検討している。

##### (1) 上端鉄筋の有無の影響（A1 と A2 梁の比較）

まず、重錘衝撃力波形  $P$  は、衝突速度  $V$  に関わらず、両試験体とも良く一致した分布性状を示している。すなわち、衝撃初期に振幅が大きくかつ継続時間が短い波形

成分が励起されている。その振幅は衝突速度  $V$  の増加に対応して増大の傾向を示している。その後、約 2 ms 経過後に衝突速度  $V = 1$  m/s では継続時間が 5 ms 程度の半波の低次波形成分と周期が数 ms 程度の波形成分から構成される波動が励起されている。その継続時間は衝突速度の増大とともに延びており、 $V = 4.5$  m/s では 10 ms 以上となっている。一方、支点反力波形  $R$  は、 $P$  で見られた衝撃初期における第 1 波は励起されず、時間の経過とともに単調に増大している。 $V = 1$  m/s では、 $P$  同様両梁で良く一致していることが分かる。しかしながら、 $V = 3$  m/s 以降では、衝撃初期の正弦半波はほぼ同様であるものの、後続の波形が若干異なっている。



図－4 支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線

すなわち、A2 梁の場合にはその波動継続時間が短く示されている。載荷点変位波形  $\delta$  に関しては、 $V = 3 \text{ m/s}$  から両梁で差異が見られる。すなわち、A1 梁の場合には衝突速度の大きさに関わらず、正載荷状態での振動現象を呈している。一方、A2 梁の場合には  $V = 3 \text{ m/s}$  の  $15 \text{ ms}$  以降において負載荷状態となっており、 $V = 3.5 \text{ m/s}$  の除荷後は振動が励起されていない。これは、A2 梁の場合には A1 梁に比較して梁の塑性化の進行が著しく、耐衝撃性に劣ることを示唆している。

以上より、せん断破壊型 RC 梁の場合には、曲げ破壊型の場合と同様に所定の耐衝撃性を確保するためには、上端鉄筋の配筋が重要であることが明らかとなった。

## (2) 断面寸法の影響 (A1 と B 梁の比較)

重錘衝撃力波形  $P$  は、前述(1)の考察同様、両試験体は比較的良く対応した分布性状を示している。一方、支点反力波形  $R$  は、 $V = 1 \text{ m/s}$  より衝撃初期の立ち上がり勾配や最大応答値が、B 梁で小さく示されている。しかしながら、波形の特性は類似している。載荷点変位波形  $\delta$  に関しては、 $V = 1 \sim 3 \text{ m/s}$  までは両梁で類似しているが、 $V = 4 \sim 4.5 \text{ m/s}$  では衝撃荷重除荷後、A1 梁が  $30 \text{ ms}$  程度の周期で緩やかに振動を呈しているのに対して、B 梁の場合は A1 梁の  $1/2$  程度の周期で振動している。これは、破壊の進行過程において振動モードが異なることに起因しているものと考えられる。また、 $V = 5 \text{ m/s}$  では、振幅が異なるものの両者類似した振動性状を示している。これは、終局時には断面形状に依存せず、同様の破壊モードを示すことを示唆している。

## 3.2 支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線

図－4 には、各試験体の支点反力の載荷点変位に関する  $R-\delta$  履歴曲線を衝突速度毎に比較して示している。

### (1) 上端鉄筋の有無の影響 (A1 と A2 梁の比較)

$V = 1 \text{ m/s}$  時では、両試験体とも類似の弾性的な挙動を示していることが分かる。 $V \geq 3 \text{ m/s}$  では、両梁とも衝撃初期に三角形の分布を示し、せん断破壊型の傾向を示していることが分かる。従って、履歴曲線は  $V = 4 \text{ m/s}$  の除荷時の特性を除き、両梁で大略類似している。 $V = 4 \text{ m/s}$  では、A1 梁の場合には変位が減少する傾向を示すのに対して、A2 梁の場合には減少傾向は示さず、残留変位が増加している。これは、A2 梁に上端鉄筋が配筋されていないことにより、この時点で終局に至っていることを示唆している。

### (2) 断面寸法の影響 (A1 と B 梁の比較)

A1 梁と B 梁の履歴曲線に関する比較を行う。 $V = 3 \text{ m/s}$  では、A1 梁が B 梁に対して初期勾配が大きく、よりせん断破壊型の傾向を示している。その後、衝突速度の増大とともに、B 梁もせん断破壊型の性状を示し、 $V = 4.5 \text{ m/s}$  時には両梁は類似の性状を示していることが分かる。しかしながら、A1 梁の場合には  $V = 4.5 \text{ m/s}$  時の初期剛性の最大支点反力が  $V = 4 \text{ m/s}$  時より低減していることより、 $V = 4 \text{ m/s}$  時が終局状態であることが推察される。また、最大支点反力を比較すると、A1 梁がせん断スパン比の大きい B 梁よりも大きい。これより、静的せん断耐力が等価である場合のせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性は必ずしも等価であることが保証されないことが分かる。

## 3.3 ひび割れ分布

図－5 には、衝撃実験終了後のひび割れ分布を衝突速度毎に比較して示している。

### (1) 上端鉄筋の影響 (A1 と A2 梁の比較)

まず、 $V = 3 \text{ m/s}$  では両梁のひび割れ分布性状はほぼ類似している。すなわち、載荷点部から支点部に至る明

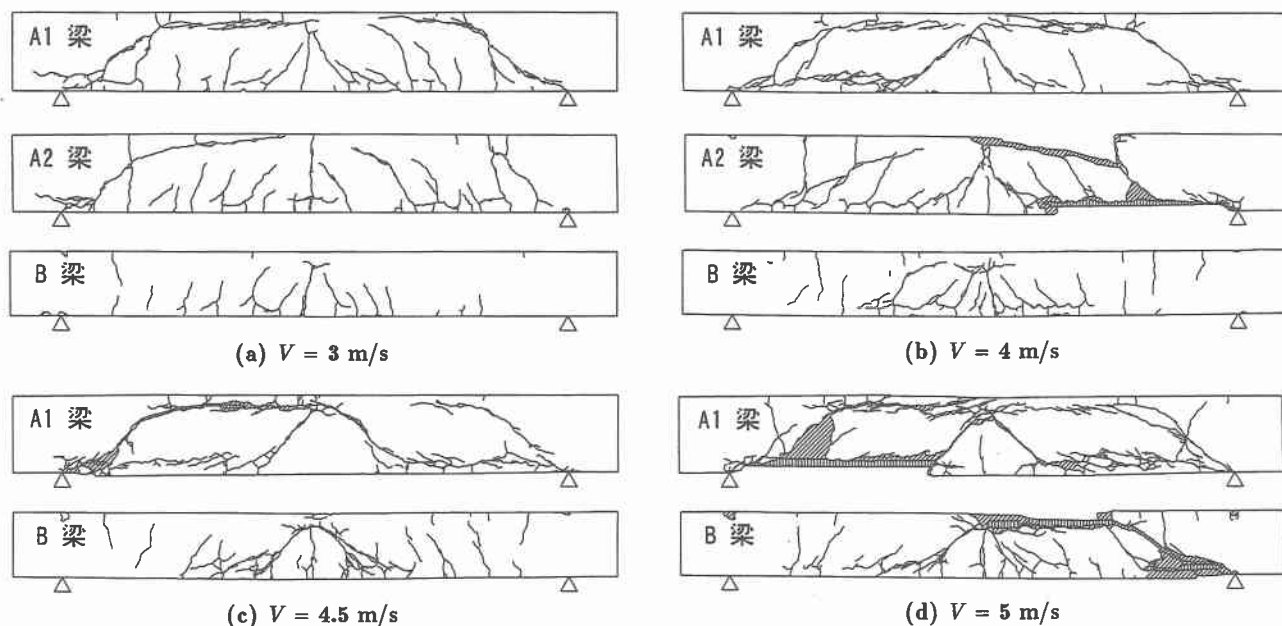


図-5 衝撃実験終了後のひび割れ分布

確なアーチ状のひび割れや、載荷点部から約  $45^\circ$  の角度で梁下縁に向かうひび割れが発生していることが分かる。しかしながら、 $V = 4 \text{ m/s}$  では A1 梁の場合には  $V = 3 \text{ m/s}$  の場合とほぼ同様のひび割れ分布を示しているが、載荷点部から約  $45^\circ$  の角度で進展するひび割れは、下端鉄筋に沿って支点部まで進展していることが伺える。一方、A2 梁の場合には、A1 梁と同様のひび割れを確認できるものの、上端鉄筋が配筋されていないことにより、上縁コンクリートの剝離や下縁コンクリートの剝落が生じ、壊滅的な損傷状態となっていることが分かる。このことから、せん断破壊型 RC 梁の所定の耐衝撃性を確保するためには、上端鉄筋を配筋することが必要であるものと判断される。

## (2) 断面寸法の影響 (A1 と B 梁の比較)

まず、 $V = 3 \text{ m/s}$  では、B 梁の場合には、前述した A1 梁に見られるアーチ状の斜めひび割れや載荷点部から梁下縁に約  $45^\circ$  の角度で進展する明瞭なひび割れは発生していないことが分かる。この衝突速度レベルでは、せん断破壊の傾向を示している A1 梁とは異なり、B 梁には曲げひび割れが顕在化し、曲げ破壊型のひび割れ分布性状を呈している。

$V = 4, 4.5 \text{ m/s}$  では、A1 梁の場合には基本的に  $V = 3 \text{ m/s}$  の場合と同様のひび割れ分布を呈していることが分かる。しかしながら、 $V$  の増加により、アーチ状のひび割れ間隔は増大している。一方、B 梁の場合には、 $V = 4 \text{ m/s}$  では  $V = 3 \text{ m/s}$  の場合と同程度の曲げひび割れが生じているものの、載荷点部から梁下縁に約  $45^\circ$  の角度で進展する斜めひび割れが発生している。さらに、 $V = 4.5 \text{ m/s}$  では、その斜めに進展するひび割れは明瞭に現れている。これより、断面形状が異なる場合の耐衝撃性は衝突速度の増加とともに曲げ破壊型からせん断破壊型に移行することが分かる。

さらに、 $V = 5 \text{ m/s}$  では、A1 梁は梁下縁のかぶりコ

ンクリートが剝落する著しい損傷状態を示している。しかしながら、全体的なせん断ひび割れ分布は、 $V = 4, 4.5 \text{ m/s}$  の場合と同様である。一方、B 梁の場合には、載荷点部近傍に形成される斜めひび割れの他、A1 梁の場合と同様に載荷点部から支点部に貫通するアーチ状の斜めひび割れの発生していることが確認できる。これより、断面形状が異なる場合には、終局時の破壊モードが大略類似であるものの、各入力エネルギー段階における損傷モードは異なることが明らかになった。

## 4. まとめ

本研究では、断面寸法の異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状を検討するため、同程度の静的せん断耐力を有する断面寸法の異なる 3 種類の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を行った。本実験の範囲内で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 上端鉄筋を配筋しない RC 梁は、上端鉄筋を配筋する場合に比較して、塑性化の進行が早い。そのため、曲げ破壊型 RC 梁と同様に所定の耐衝撃性を確保するためには、上端鉄筋を配筋することが必要である。
- 2) 同程度の静的せん断耐力を有する断面寸法の異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状は終局時の破壊モードが類似であるものの、各入力エネルギー段階における損傷モードが異なる。

## 参考文献

- 1) 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.
- 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