

断面の大きさが異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状

Impact Resistant Behavior of Shear-Failure Type Rectangular RC Beams with Various Dimensions

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)
室蘭工業大学	フェロー	松岡 健一 (Ken-ichi G. Matsuoka)
室蘭工業大学	〇正 員	安藤 智啓 (Tomohiro Ando)

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 梁の静的せん断挙動が、梁の断面の大きさに影響を受けることは古くから知られている。すなわち、RC 梁の静的せん断強度は断面の寸法の増加に伴い小さくなる。これは、一般に寸法効果と呼ばれている。土木学会コンクリート標準示方書のせん断耐力評価式¹⁾にはこの寸法効果の影響が考慮されている。しかしながら、断面の大きさが RC 梁の衝撃せん断挙動におよぼす影響に関しては、これまで検討された研究事例が見あたらず、現在のところ明らかとなっていない。

本研究では、静載荷時にせん断破壊が卓越する (以下、せん断破壊型) RC 梁に着目し、断面の大きさが RC 梁の耐衝撃挙動におよぼす影響について検討することを目的として、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および三次元有限要素法に基づく数値解析を行った。また、本研究では静載荷時のせん断破壊に関する設計概念に従い、最初にせん断補強筋を有しない RC 梁を対象として検討を試みた。

2. 実験の概要

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。用いた試験体は、せん断補強筋を有しない複鉄筋矩形 RC 梁であり、図に示す A, B, C 試験体の 3 種類である。ここでは、各試験体の断面寸法が相似と

なるように試験体を設計・製作している。すなわち、A 試験体の断面寸法 (梁幅 × 梁高 × 純スパン長) は、100 × 200 × 1,000 mm であり、B, C 試験体の断面寸法はそれぞれ A 試験体のその 1.5 および 2.0 倍である。また、張出し部の長さや端面に設置した定着鋼板の厚さも相似にしている。軸方向鉄筋に関しては、公称断面積がほぼ相似となるように規格品の鋼棒を選定・採用している。なお、重錘は試験装置の制約もあり、全ての実験に対して質量 400 kg の同一のものを使用している。

衝撃実験は、RC 梁を支点治具上に設置し、梁スパン中央部に重錘を所定の高さから 1 回だけ自由落下させることにより実施している。支点治具は、治具全体が回転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 400 kg、載荷点部直径 150 mm の円柱状鋼製重錘であり、その底部には重錘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。なお、測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以下、支点反力) および載荷点変位 δ (以下、変位) 波形である。

表-1 には、用いた試験体の設計値および衝突速度を一覧にして示している。表中、 V_{usc} は、土木学会標準示方書¹⁾に基づき算定したものである。 V_{usc} 算定時の部材係数には、 $\gamma_b = 1.0$ を用いている。表-2 および表-3 には、実験時のコンクリートおよび軸方向鉄筋の力学的特性を示している。

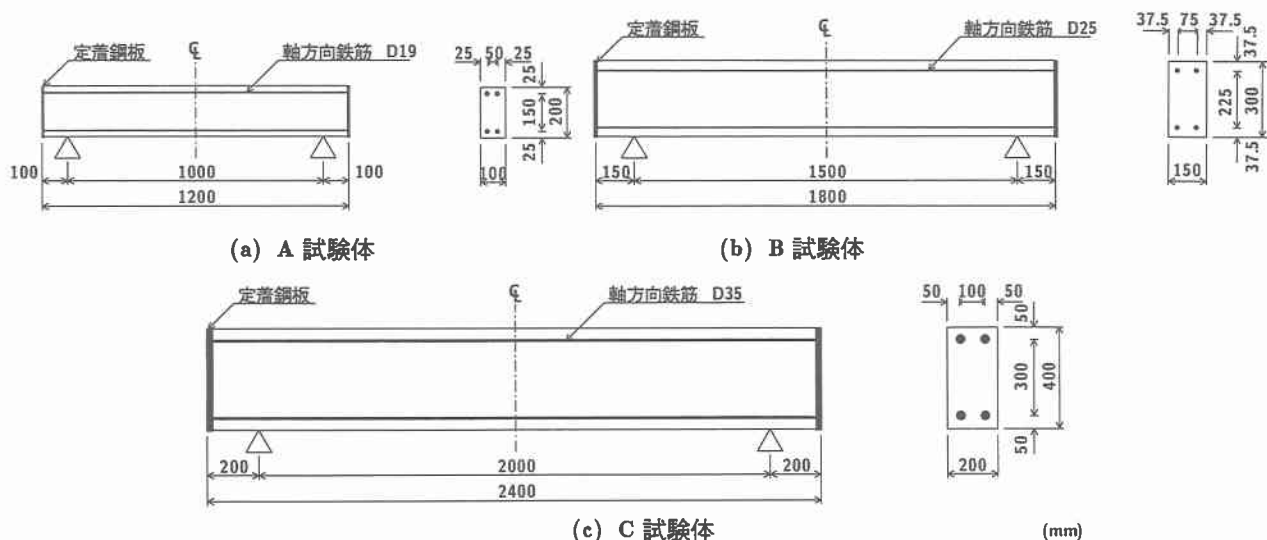


図-1 RC 梁試験体の形状寸法および配筋状況

表－1 試験体一覧

試験体名	せん断 スパン比 a/d	主鉄筋 比 p_t	静的せん断 耐力 V_{usc} (kN)	衝突速度 V (m/s)
A	2.86	0.0327	51.9	0.9, 1.4, 1.9, 2.3
B		0.0257	97.0	1.9, 2.3, 2.8, 3.7
C		0.0273	164.6	0.9, 3.7, 4.2, 4.6, 5.1, 5.6

表－2 コンクリートの力学的特性値

実験時材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
37	41.2	25.7	0.19

表－3 軸方向鉄筋の力学的特性値

鉄筋名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D19,25,35	SD345	386, 371, 373	206	0.3

3. 数値解析の概要

本研究では、実験結果を補間する目的で各 RC 梁に関する衝撃応答解析を行っている。解析には、三次元有限要素法に基づく衝撃解析用汎用コード LS-DYNA を用いている。図－2には、本解析に用いた解析モデルの一例を示している。なお、解析方法の詳細は紙面の都合によりここでは省略する。

4. 実験結果

4.1 ひび割れ分布

図－3には、A, B, C 試験体の実験終了後のひび割れ分布を示している。ここでは、紙面の都合により後述する RC 梁が真にせん断破壊する状態に最も近い衝突速度のひび割れ分布に着目して検討することとした。

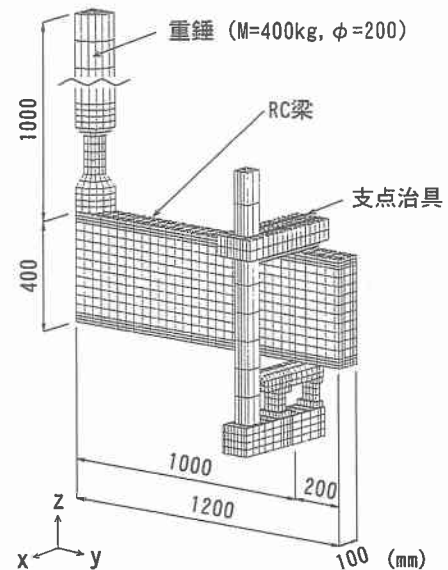
図より、各梁には、載荷点部から両支点部に向かう明瞭なアーチ状の斜めひび割れの発生していることが分かる。このひび割れは軸方向鉄筋位置まで達すると、軸方向鉄筋に沿う形で支点部まで進展している。また、C 試験体の場合には、ひび割れがさらに載荷点部から 45° 程度の角度で梁下縁に進展し、アーチリブを形成する傾向が示されている。このような傾向は、A, B 試験体の場合においてもさらに衝突速度を増大させることにより発生してくることを確認している。

以上より、全体的なせん断ひび割れの分布性状は、梁の断面の大きさに関わらず非常に良く対応していることが分かる。

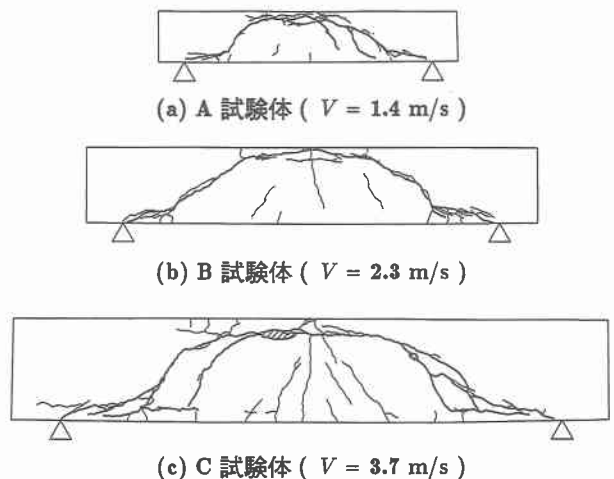
4.2 重錘衝撃力および支点反力の変位に関する履歴曲線

図－4には、A, B, C 試験体の各衝突速度における重錘衝撃力と変位に関する履歴曲線 ($P-\delta$ 曲線) と支点反力の変位に関する履歴曲線 ($R-\delta$ 曲線) を示している。

図より、重錘衝撃力 P に関しては、梁断面の大きさに関わらず変位のほとんど励起されない衝撃初期に大き



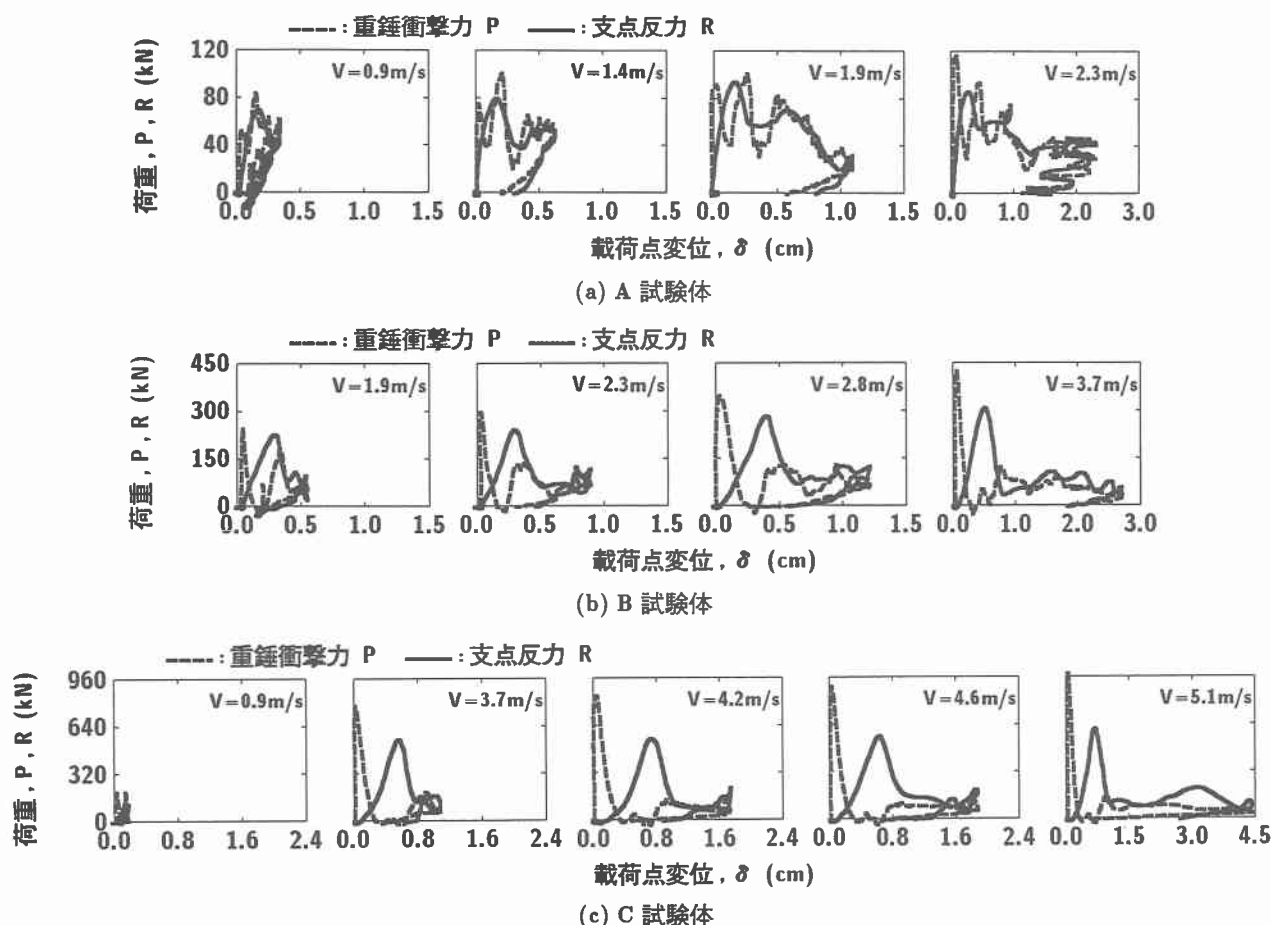
図－2 解析モデルの一例 (C 試験体)



図－3 実験終了後のひび割れ分布

な衝撃力の発生していることが分かる。A 試験体の場合には、重錘衝撃力 P は数回の増減を繰り返しながら作用し、最大変位値到達後に減少している。その最大値は衝突速度 $V = 1.9$ m/s までは 0.2 ~ 0.3 cm 変位時で生じている。一方、B, C 試験体の場合には、ほとんど変位が生じない段階で最大値を示した後、一旦急激に零レベルまで減少している。その後再度増加し、第2ピーク値を示した後緩やかに減少している。その分布は、完全に分離した2つのループから成る性状となっており、A 試験体の分布とは異なっている。

一方、支点反力 R は変位 δ の増加に伴い単調に増大しており、最大応答値を示した後一旦減少している。この衝撃初期の分布はいずれの試験体も三角形の様相を呈している。また、斜めひび割れによる損傷度合いが著しくなる衝突速度に対応してほぼ一様な支点反力が作用した状態で変位が増大するループ (第2ループ) が出現している。これは、1) 斜めひび割れの発生によって、梁が主鉄筋を介して大きく二分されること、2) 従って、斜めひび割れ発生後の衝撃力は、残存エネルギーによ



図－４ 重錘衝撃力および支点反力の変位に関する $P-\delta$, $R-\delta$ 履歴曲線

表－４ 耐力およびせん断強度の一覧

試験 体名	衝撃実験結果		静載荷実験結果	
	最大支点 反力	最大動的 せん断 強度	静的 せん断 耐力	静的 せん断 強度
	R_{ud} (kN)	τ_{ud} (MPa)	V_{us} (kN)	τ_{us} (MPa)
A	80.6	4.03	56.9	2.85
B	244.8	5.44	108.1	2.40
C	555.4	6.94	196.2	2.45

て主鉄筋の剛性のみで支点到伝達されるためと推察される。これより、RC 梁が真にせん断破壊する場合の $R-\delta$ 曲線は、第 2 ループがまさに出現してくる状態に対応しているものと判断される。本実験では、衝突速度が A, B, C 試験体でそれぞれ $V = 1.4, 2.3, 3.7$ m/s の場合に、ほぼこのような状態にあるものと判断される。

以上より、 $R-\delta$ 曲線の分布は断面の大きさに関わらず大略類似の性状を示すこと、また RC 梁が真にせん断破壊する状態を $R-\delta$ 曲線を用いて評価可能であることが明らかになった。

4.3 最大支点反力と最大動的せん断強度

ここでは、4.2 の結果を踏まえ、衝撃力の評価として支点反力の最大値 R_{ud} (以下、最大支点反力) を用い、断面の大きさが R_{ud} や R_{ud} を梁断面積で除して求めた最大動的せん断強度 τ_{ud} におよぼす影響に関して検討を

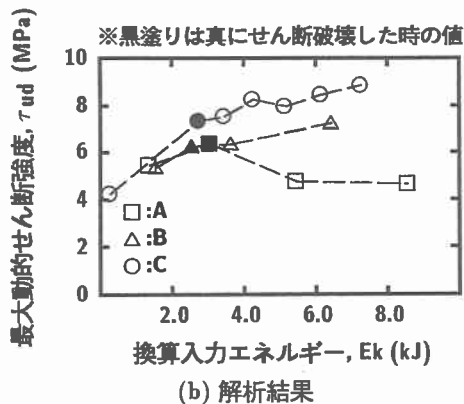
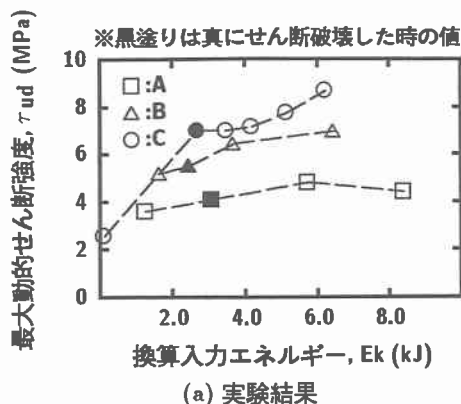
行う。表－４には、図－４において RC 梁が真にせん断破壊した衝突速度時の R_{ud} および τ_{ud} を示している。また、別途行った静載荷実験より得られた静的せん断耐力 V_{us} および静的せん断強度 τ_{us} も合わせて示している。

表より、耐力について見ると、最大支点反力 R_{ud} および静的せん断耐力 V_{us} は、断面の大きい試験体ほど大きく示されていることが分かる。すなわち、 V_{us} は寸法の小さい方から A, B, C の順に大きい。一方、せん断強度について見ると、静的せん断強度 τ_{us} の場合には、B, C 試験体の τ_{us} が A 試験体のそれよりも小さく示されている。この静載荷実験の結果は、一般に良く知られている断面寸法の増加に伴いせん断強度が低下する寸法効果と呼ばれる現象に対応している。しかしながら、最大動的せん断強度 τ_{ud} の場合には、これと逆の傾向を示している。すなわち、本実験結果からは梁の衝撃耐力は断面寸法の増加に伴い見かけ上増大する傾向を示している。なお、この傾向は衝撃荷重載荷時の固有の結果であるが、本実験の重錘と試験体間との寸法比が一律ではないこと等の影響も考えられる。

5. 最大動的せん断強度に関する寸法効果の検討

5.1 最大動的せん断強度と換算入力エネルギーの関係

本節では、各 RC 梁の全ての衝突速度に関する実験を対象として、梁断面の大きさが最大動的せん断強度 τ_{ud} におよぼす影響に関して実験的および解析的に検討する



図－5 最大動的せん断強度と換算入力エネルギーの関係

こととする。なお、本実験では全ての実験に対して同一の重錘を使用していることより、重錘と試験体間との寸法比が一律ではない。従って、同一衝突速度から見た真の τ_{ud} に関する定量的な評価を行うことができない。ここでは、同一尺度で τ_{ud} の評価を可能にするために、入力エネルギー E_k を取り上げ、各試験体間の E_k に関する相似関係より各梁の入力エネルギーを換算することとした。ここでは、C 試験体の E_k を基準として、A, B 試験体のそれを試験体寸法比の3乗倍に換算している。このようにして求めた最大動的せん断強度 τ_{ud} と換算入力エネルギー E_k の関係を図－5に示している。

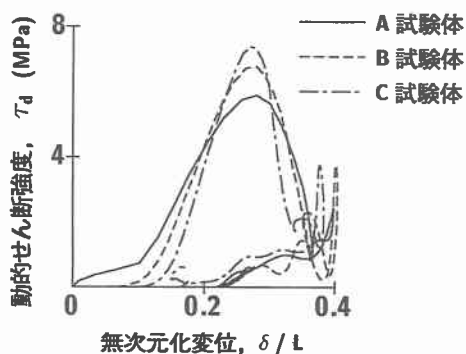
(a)図より、RC 梁が真にせん断破壊する場合の入力エネルギー E_k は、各梁でほぼ等しいことが分かる。しかしながら、 τ_{ud} は、RC 梁が真にせん断破壊する場合の入力エネルギーも含め、いずれの E_k のレベルに対しても寸法の小さい方から A, B, C の順に大きくなっている。すなわち、 τ_{ud} は断面の大きい梁ほど大きく示されている。これは、前節 4.3 の結果に対応している。

一方、(b)図に示す数値解析結果でも、A 試験体の入力エネルギーの小さい場合の分布を除くと、(a)図で示された結果と定性的に類似の傾向が示されていることが分かる。

5.2 重錘形状を相似とした場合の解析結果

本節では、本数値解析手法により大略実験結果が再現可能である前節の結果を踏まえ、重錘形状も RC 梁と同様に相似とした場合の解析を試みた。また、ここでは実験結果の C 試験体の真にせん断破壊した衝突速度が $V = 3.7 \text{ m/s}$ であることより、この衝突速度を適用して他試験体に関する解析を実施した。従って、数値解析のための重錘形状は C 試験体の載荷時を実験時と対応させることとし、A, B 試験体に関する解析時には相似に縮小させている。

図－6には、各 RC 梁の動的せん断強度と無次元化変位曲線 ($\tau_d - \delta/L$ 曲線) を示している。ここで、無次元化変位は、各 RC 梁の履歴曲線を同一尺度で評価するために便宜的に純スパン L で除したものである。図より、各 $\tau_d - \delta/L$ 曲線は、 τ_d の立ち上がりから除荷に至る



図－6 動的せん断強度と無次元化変位 ($V = 3.7 \text{ m/s}$)

まで大略類似した分布となっていることが分かる。しかしながら、最大動的せん断強度は、重錘形状が相似でない場合の実験および解析結果と同様、梁断面が大きくなるほど大きく示されている。

6. まとめ

本研究では、断面の大きさがせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状におよぼす影響について検討することを目的として、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および衝撃応答解析を行った。本研究より得られた結果を要約すると、

- (1) RC 梁がせん断破壊する場合のひび割れ分布は、載荷点部から支点部に至る斜めひび割れが明瞭に励起される等、断面の大きさに関わらず類似の性状を示す。
- (2) 支点反力変位曲線は、断面の大きさに関わらず大略類似の性状を示す。また、支点反力変位曲線を用いることで、RC 梁が真にせん断破壊する状態の耐衝撃性評価が可能である。
- (3) 最大支点反力より求まる最大動的せん断強度は、断面の大きさが大きくなるに従い増大する傾向を示す。これより、RC 梁の衝撃耐力は断面寸法の増加に伴い見かけ上増大する。

参考文献

- 1) 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.