

版厚および主鉄筋比を変化させた各種 RC 版の耐衝撃性状

Effects of Thickness and Rebar Ratio of RC Slabs on Impact Resistance

室蘭工業大学 〇正 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)

1. はじめに

近年、道路落石防護施設、土石流対策施設および原子力発電所関連施設等の耐衝撃用途鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐衝撃安全性を向上させることを目的として、梁、柱、版等の RC 部材の耐衝撃性状に関する実験的・解析的研究が各研究機関で盛んに行われている¹⁾。

著者らも、これまでにコンクリート構造部材の基本である RC 梁の耐衝撃性状に関して詳細に検討してきた。その結果、衝撃荷重載荷時の RC 梁の曲げ破壊性状やせん断破壊性状が徐々に明らかになってきており、特に曲げ破壊型 RC 梁に関しては、簡易かつ合理的な耐衝撃設計手法も提案されている²⁾。しかしながら、RC 版の耐衝撃性状に関しては、未だ研究事例も少なく、合理的な耐衝撃設計手法を確立するには至っていない。

このような観点より、本研究では、RC 版の耐衝撃性状に関する基礎資料を得ることを目的として、版厚や主鉄筋比が異なる各種 RC 版を用いた重錘落下衝撃実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1には、試験体の一覧を示している。用いた RC 版は、版厚 H と主鉄筋比 p_t を変化させた全3体である。

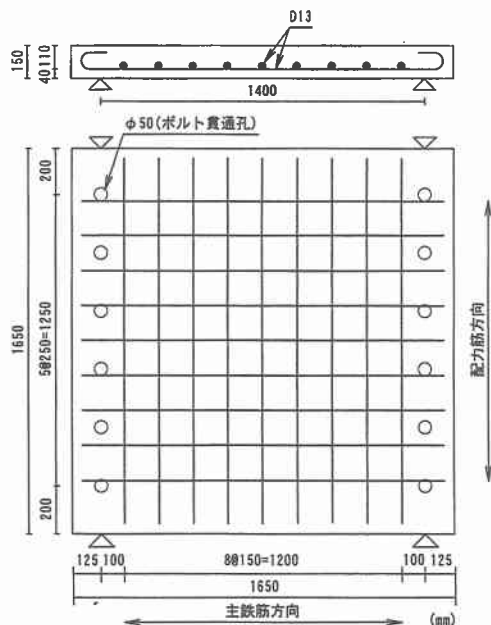


図-1 試験体の概要 (H15-0.9 試験体)

試験体名は、版厚 H と小数点1桁にまるめた主鉄筋比 p_t を組み合わせて表している。また、別途実施した静載荷実験より得られた実測静的耐力および衝撃載荷実験における重錘の衝突速度も合わせて示している。

図-1には、実験に用いた試験体の形状寸法および配筋状況の一例を示している。図の H15-0.9 試験体は、本実験の基準試験体である。基準試験体の形状寸法は $1,650 \times 1,650 \times 150$ mm である。主鉄筋および配筋筋には D13 を使用し、これらを 150 mm 間隔で配筋している。H15-1.4 試験体の場合には、鉄筋に D16 を用いることにより、基準試験体に比べて主鉄筋比を 0.5 % 増大させている。また、H18-0.9 試験体の場合には、版厚を 18 cm に増大させている。ただし、版厚のみの影響に着目するため、鉄筋には D16 を用い、これを 200 mm 間隔に配筋し、主鉄筋比 p_t が基準試験体とほぼ同様となるように配慮している。表-2および表-3には、実験時に用いたコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を示している。

2.2 実験方法

実験時には、RC 版の一辺対は支持間隔が 1,400 mm 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し、浮き上がりを拘束したピン支持に近い構造となっている。また、他辺対は自由となっている。

表-1 試験体一覧

試験体名	版厚 H (cm)	主鉄筋比 p_t (%)	実測静的耐力 (kN)	衝突速度 V (m/s)
H15-0.9	15	0.88	141.5	1, 2, 3, 4
H15-1.4	15	1.38	168.3	1, 2, 3, 4
H18-0.9	18	0.85	203.2	1, 2, 3, 4

表-2 コンクリートの力学的特性

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
140	19.6	20.7	0.28

表-3 鉄筋の力学的特性

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
D13	SD345	376	206	0.3
D16	SD345	388	206	0.3

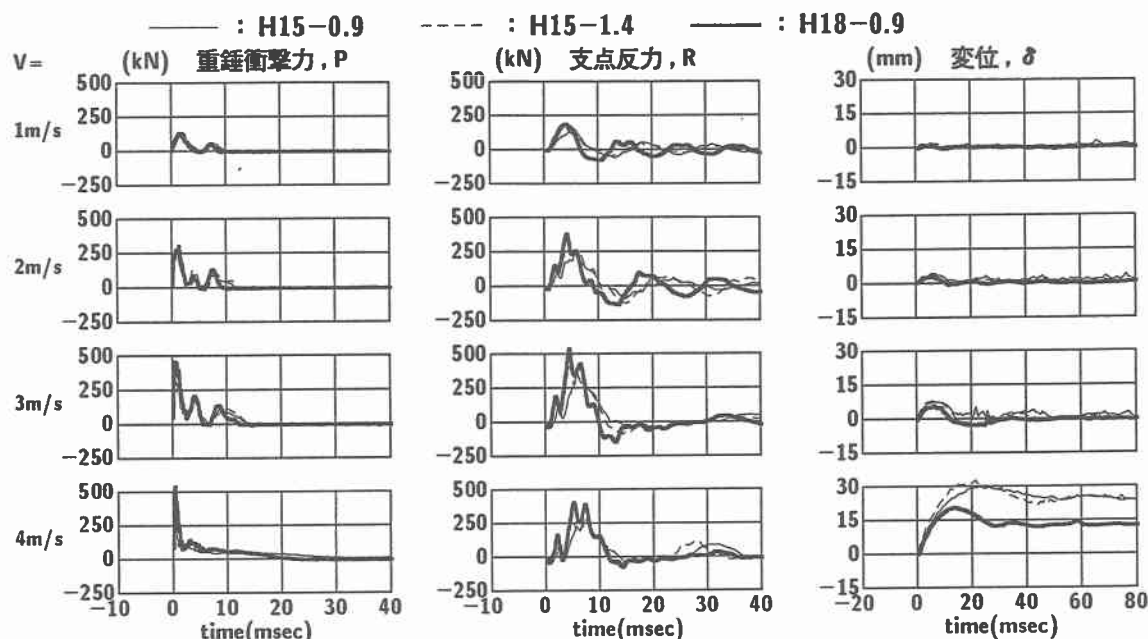


図-2 各種応答波形

実験は、RC版中央部に質量300 kg、先端部直径60 mmの鋼製重錘を用いて、所定の高さから自由落下させることにより行っている。重錘の先端部は衝突時の片当たりを防止するために高さ2 mmのテーパを施した球状となっている。なお、載荷方法には、処女速度および増分速度を1 m/sとして、RC版が破壊に至るまで同一試験体に繰り返し重錘落下させる繰り返し載荷法を採用している。本実験では、いずれの試験体も、 $V = 4 \text{ m/s}$ 時において下縁かぶりコンクリートが剥落し、断面欠損が著しくなったために実験を終了している。計測項目は、重錘衝撃力、合支点反力（以後、支点反力）およびRC版の載荷点変位（以後、変位）である。また、実験終了後には、RC版裏面のひび割れをスケッチし、版中央部を主鉄筋方向に切断することにより破断面を観察した。

3. 実験結果

3.1 各種応答波形

図-2には、各試験体の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する各応答波形を衝突速度毎に比較して示している。なお、各波形は重錘衝突時を0 msとして整理している。

図より、重錘衝撃力波形 P は衝突速度 V に関わらず、各試験体でほぼ類似した分布性状を示していることが分かる。すなわち、 $V = 1 \text{ m/s}$ では半周期5 ms程度の正弦半波が2波連なった分布性状を示している。 $V = 2 \text{ m/s}$ では、衝撃初期に波動が急激に立ち上がり、最大応答値到達後急激に零レベル程度まで減少する第1波と、後述の第1波に比べて振幅の小さい正弦半波が2波連なった分布性状を示している。 $V = 3 \text{ m/s}$ の場合も、 $V = 2 \text{ m/s}$ の場合と大略同様な分布となっている。しかしながら、第1波の振幅は $V = 2 \text{ m/s}$ の場合に比べて大きく、その継続時間は短くなっている。波動全体の継続時

間については逆に長くなっている。 $V = 4 \text{ m/s}$ の場合には、さらに第1波の振幅が増大し、その継続時間が短くなっている。また、後続の低振幅の波形成分に関しては、継続時間が30 ms程度と非常に長くなっている。

一方、支点反力波形 R は重錘衝撃力波形 P とは異なり、各試験体でその分布性状に差異が見られる。すなわち、いずれの試験体の場合も、衝突速度に関わらず全体的には正弦半波状の波動に高周波成分が含まれたような分布性状を示すものの、波動の立ち上がり勾配や最大応答値に各試験体で差異が見られる。なお、ここでは版厚18 cmのH18-0.9試験体の場合で、波動の立ち上がり勾配および最大応答値が最も大きく示されている。また、各波動の分布性状と衝突速度 V との関係に着目すると、いずれの試験体の場合も最大応答値は $V = 3 \text{ m/s}$ まで増大する傾向を示すものの、 $V = 4 \text{ m/s}$ では逆に減少している。しかしながら、波動の継続時間は、重錘衝撃力波形 P の場合と同様に V の増加に伴い徐々に増大している。

さらに、変位波形 δ について見ると、 $V = 3 \text{ m/s}$ まではいずれの試験体も高周波成分を含まない正弦波状の分布性状を呈し、残留変位はほぼ零となっていることが分かる。しかしながら、 $V = 4 \text{ m/s}$ では、応答変位が大幅に増大し、かつ残留変位も生じている。特に、版厚15 cmの試験体の場合には、最大応答値程度の変位が残留して終局に至っていることが確認できる。

以上を要約すると、 $V = 3 \text{ m/s}$ までは、各試験体の残留変位はほぼ零であり、また最大支点反力も増大傾向を示し、弾性応答が支配的であることが伺える。しかしながら、 $V = 4 \text{ m/s}$ においては、変位が大きく残留すること、また最大支点反力も減少に転じることから、塑性応答が支配的になったと考えられる。すなわち、後述するように支点反力が最大を示す $V = 3 \text{ m/s}$ 時は、試験

体によらず、各 RC 版の示す弾性限界であるものと推察される。

3.2 支点反力の変位に関する履歴曲線

図－3には、弾性限界と考えられる $V = 3 \text{ m/s}$ と、塑性化が一気に進行する $V = 4 \text{ m/s}$ における各試験体の支点反力 R の変位 δ に関する R - δ 履歴曲線を示している。

図より、 $V = 3 \text{ m/s}$ では、各試験体の支点反力 R はほぼ弾性的に増大し、同じ経路で除荷されている。また、 R - δ 履歴曲線で囲まれる面積（吸収エネルギー）はわずかであることが分かる。しかしながら、 $V = 4 \text{ m/s}$ では、いずれの試験体も三角形の分布を呈しており、吸収エネルギー量も大きくなっている。これより、各試験体は $V = 4 \text{ m/s}$ の時点で塑性化が一気に進行し、この時点で後述する押し抜きせん断面が形成されたものと判断される。

一方、各試験体の差異に着目すると、H18-0.9 試験体の場合には、塑性化が一気に進行した $V = 4 \text{ m/s}$ において、最も最大支点反力が大きく、逆に最も最大変位が小さく示されていることが分かる。これは、H18-0.9 試験体が最も塑性化の度合いの小さいことを示唆している。

3.3 各種応答値と衝突速度の関係

図－4には、衝突速度 V と最大重錘衝撃力 P_{ud} 、最大支点反力 R_{ud} および累積残留変位 δ_{rd} の関係を示している。

(a)図より、各試験体の最大重錘衝撃力 P_{ud} は衝突速度 V の増加とともに増大していることが分かる。また、ほぼ弾性域である $V = 3 \text{ m/s}$ までは線形的に増大している。一方、各試験体の差異に着目すると、同一の版厚で鉄筋比が異なる H15-0.9、H15-1.4 試験体では、 P_{ud} がほぼ同様であることが分かる。しかしながら、ほぼ同様の鉄筋比で版厚の異なる H15-0.9、H18-0.9 試験体では、版厚の大きい H18-0.9 試験体で P_{ud} 値が大きく示されている。これより、最大重錘衝撃力は鉄筋比よりも版厚に大きく影響されるものと考えられる。

(b)図より、各試験体の最大支点反力 R_{ud} は、 $V = 3 \text{ m/s}$ まではほぼ線形的に増加する傾向を示していることが分かる。しかしながら、 $V = 4 \text{ m/s}$ では減少に転じている。これは、前節の考察より $V = 4 \text{ m/s}$ の時点で

押し抜きせん断面が形成され、入力エネルギーがその形成に費やされたために支点部に伝達されないことに起因しているものと考えられる。また、各試験体の差異に着目すると、基準試験体である H15-0.9 試験体の R_{ud} 値と比較して、H15-1.4、H18-0.9 試験体の R_{ud} 値は衝突速度に関わらず大きく示されていることが分かる。また、それら R_{ud} 値は H18-0.9 試験体の場合でより大きい。これより、版厚を同一とし鉄筋比を増加させる場合に比べて、鉄筋比を同程度とし版厚を大きくする場合の方が、最大支点反力に与える影響は大きいものと考えられる。

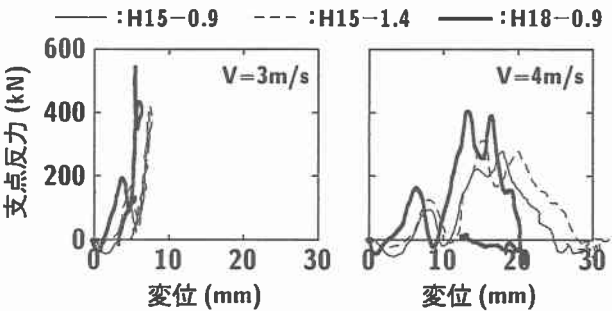
(c)図より、累積残留変位 δ_{rd} については、いずれの試験体も $V = 3 \text{ m/s}$ まではほぼ零レベルにあり、弾性的な挙動を示していることが分かる。 $V = 4 \text{ m/s}$ では、 δ_{rd} 値は急激に増加し、この時点で押し抜きせん断破壊に至ったことが伺える。しかしながら、 $V = 4 \text{ m/s}$ 時の H18-0.9 試験体の δ_{rd} 値は、他の試験体の 1/2 程度の値を示している。これは、RC 版の耐衝撃性を向上させるためには、版厚を大きくすることがより効果的であることを意味している。

3.4 静的および動的耐力

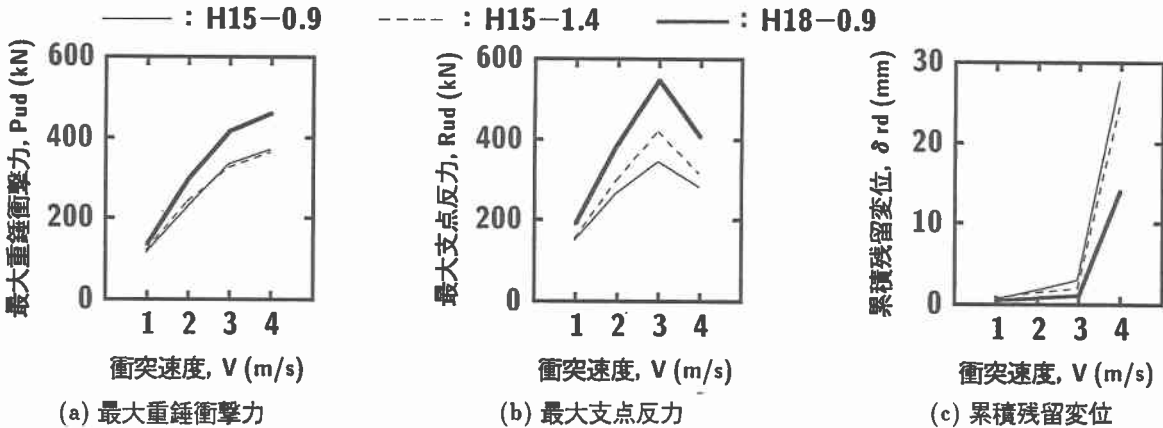
別途実施した静載荷実験では、いずれの試験体も押し

表－4 静的および動的耐力

試験体名	動的耐力 (kN) (1)	動的耐力比	静的耐力 (kN) (2)	静的耐力比	動的倍率 (1)/(2)
H15-0.9	341.4	1.0	141.5	1.0	2.41
H15-1.4	416.8	1.22	168.3	1.19	2.48
H18-0.9	546.9	1.60	203.2	1.44	2.69



図－3 支点反力の変位に関する履歴曲線



図－4 各種応答値と衝突速度の関係

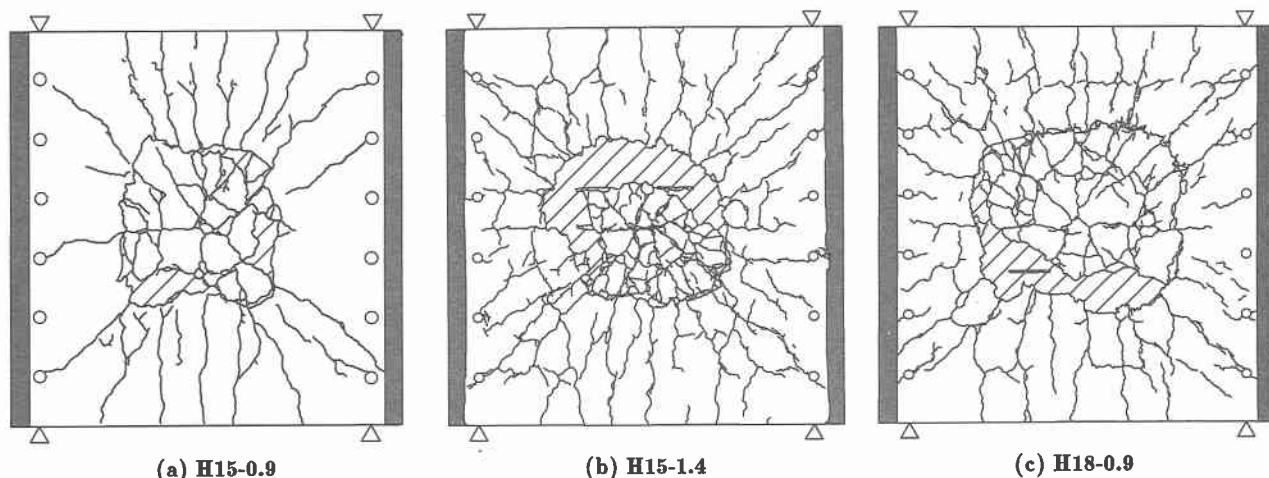


図-6 実験終了後の RC 版裏面のひび割れ性状

抜きせん断破壊に至ったことから、表-4には押し抜きせん断耐力と本実験における最大支点反力に関して取りまとめた。なお、ここでは最大支点反力を動的耐力と見なし評価することとする。

表より、H15-0.9 試験体を基準として評価した H15-1.4 試験体の動的耐力比および静的耐力比は、それぞれ 1.22, 1.19 であることが分かる。また、H18-0.9 試験体の場合には、それぞれ 1.60, 1.44 である。これより、RC 版の耐衝撃性は、静載荷時の場合と同様、版厚一定の下で主鉄筋比を 0.5 % 程度増大させるよりも、主鉄筋比が一定の下で版厚を 20 % 程度大きくした方がより向上することが明らかになった。なお、動的耐力と静的耐力の比として評価される動的倍率は、各試験体で 2.4 ~ 2.7 程度となっている。

3.5 押し抜きせん断性状

図-6および図-7には、実験終了後の RC 版裏面および版中央部切断面のひび割れ分布性状を示している。

図-6より、各試験体の裏面には、主鉄筋方向の曲げひび割れや、ねじりモーメントによる対角線方向に進展するひび割れおよび押し抜きせん断による円形状のひび割れが発生していることが分かる。しかしながら、基準試験体である H15-0.9 試験体に比べて他の試験体の場合には、版中央部から放射状に進展するひび割れが広範囲に分布していることが分かる。さらに、押し抜きせん断面に着目すると、円の直径は版厚の大きい H18-0.9 試験体で最も大きく示されている。

図-7より、版中央部切断面の状況について見ると、版厚を 15 cm とした H15-0.9, H15-1.4 試験体は、主鉄筋比の大小に関わらず、版上面から約 45° の角度で押し抜きせん断面が形成されている。しかしながら、版厚を 18 cm とした H18-0.9 試験体では版上面 40 mm 付近から、版厚を 15 cm とした試験体よりも若干緩やかな角度で押し抜きせん断面が形成されている。

4. まとめ

本研究では、RC 版の耐衝撃性状に関する基礎資料を得ることを目的として、版厚および主鉄筋比が異なる

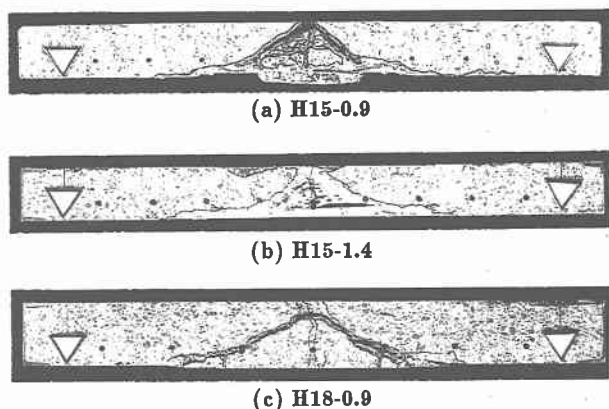


図-7 実験終了後の版中央部切断面のひび割れ性状

RC 版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) 最大重錘衝撃力は、衝突速度の増加に伴い増大する。一方、最大支点反力は RC 版の塑性化が一気に進行する場合には、弾性限界の場合に比べて小さくなる。
- 2) 最大支点反力は、主鉄筋比や版厚を増加させることにより増大する。また、増大の度合いは、静載荷時と同様に版厚を変化させた場合の方でより大きい。
- 3) 累積残留変位は、2) の場合と逆に、版厚の大きい場合で最も小さい。従って、RC 版の耐衝撃性を向上させるためには、版厚を大きくすることがより効果的である。
- 4) 主鉄筋比および版厚を大きくすることで、版裏面に生じる曲げひび割れの本数は増大し、押し抜きせん断面も大きくなる。また、版厚を大きくさせる場合には、押し抜きせん断面の形成される位置が版上面より下方方向に移動する。

参考文献

- 1) 第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 2000
- 2) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓: 静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の耐衝撃設計法に関する一提案, 土木学会論文集, No.647 /I-51, 2000. 4