

I-61

大型 RC 版の重錘落下衝撃実験

開発土木研究所 正員 佐藤 昌志  
 開発土木研究所 正員 谷本 俊充  
 三井建設(株) 正員 三上 浩  
 室蘭工業大学 正員 松岡 健一  
 室蘭工業大学 学生員 小番 一広

1. はじめに

RC 落石覆工は現在落石対策便覧<sup>1)</sup>に基づいて設計が行なわれている。具体的には、90 cm 厚の敷砂を緩衝材とし、ラーメ定数  $\lambda = 100 \text{ tf/cm}^2$  とする振動便覧式を用いて衝撃力を算定して、許容応力度法により設計を行なうものである。しかしながら、平成元年福井県越前海岸に発生した岩盤崩壊による災害を契機として、落石によって発生する衝撃力を適正に評価するためや、新しい緩衝構造の開発に伴う緩衝性能、荷重分散性評価のための各種大型実験が行われるようになった。<sup>2)</sup> また、落石時の RC 覆工の実挙動性状に関する現場実測や数値解析も行われている。<sup>3),4)</sup> これらの数値解析的、実験的研究により、許容応力度法に基づいた設計手法の整備が着々と進行している。一方、岩盤崩壊、崩落等の災害を想定した RC 覆工の限界耐力評価の重要性も指摘されており、RC 部材あるいは RC 構造体の耐衝撃性評価に関する研究も急務であると考えられる。

このような観点より、著者等は各種の大型 RC 版模型を作製し、北海道開発局開発土木研究所の屋外実験場において重錘落下による RC 版の耐衝撃性に関する実験研究を行った。実験は純スパン、幅とも 4 m の RC 版に対し、1 対辺単純支持、他対辺自由支持として、版中央部に版厚に応じて最大 5 tf の重錘を所定の高さから自由落下させることにより行った。本研究では特に独自に設定した破壊規定のもとに、重錘衝撃力、支点反力に関する実験結果および静的曲げ耐力、押抜きせん断耐力値を用いて RC 版の限界耐力について考察した。

2. 実験の概要

2-1 試験体

表-1 に試験体の一覧を示す。試験体は版厚が 25cm のものが 3 体、50cm のものが 5 体、75cm のものが 1 体の合計 9 体である。各試験体名は表に示してあるように、補強筋の種類(D: 異形鉄筋, As: 砂付き AFRP ロッド)、版厚(cm)、片面主筋の補強筋比(%), 配筋(S: 単筋配置, W: 複筋配置) および重錘重量(tf)の順に 2 つのパラメータごとにハイフンで結んで記号化している。配筋種類に関しては、版厚 25cm および 50cm の試験体に対しては単筋と複筋配置を設定しているが、版厚 75cm に対しては単筋配置のみである。なお、コンクリート強度は設計基準強度が  $240 \text{ kgf/cm}^2$  で、実験時の材令における圧縮強度は 249 ~ 257  $\text{kgf/cm}^2$  である。実験時のコンクリート強度が、設計基準強度と大差がないことより、耐力評価

表-1 試験体の一覧

試験体名	載荷速度 (m/sec)	版厚 (cm)	配筋	最大残留変形量 (mm)
D25-0.5S-1	1 ~ 5	25	単	23.4
D25-0.5W-1	1 ~ 6	25	複	31.4
D50-0.5S-3	1 ~ 5	50	単	19.6
D50-0.5W-3	1 ~ 5	50	複	17.8
D50-1.0S-3	1 ~ 6	50	単	19.4
D75-0.5S-5	1 ~ 6	75	単	15.7
As25-0.5W-1	1 ~ 5	25	複	27.9
As50-0.17W-3	1 ~ 5	50	複	19.5
As50-0.5W-3	1 ~ 6	50	複	16.1

表-2 配筋量の一覧

試験体名	かぶり (cm)	主筋			配力筋		
		呼径	ピッチ (cm)	配筋比 (%)	呼径	ピッチ (cm)	配筋比 (%)
D25-0.5 S,W	6	D-16	20	0.52	D-10	30	0.13
D50-0.5 S,W	8	D-22	20	0.46	D-16	30	0.16
D50-1.0S	8	D-32	20	0.95	D-19	30	0.23
D75-0.5W	10	D-29	20	0.49	D-22	30	0.20
As25-0.5W	6	RA-15S	20	0.45	RA-11S	30	0.15
As50-0.17W	8	RA-15S	20	0.20	RA-15S	30	0.13
As50-0.5W	8	RA-15S (3本束)	20	0.61	RA-15S	30	0.13

Experimental Study on Impact Resistance of Prototype RC Slabs Against a Weight Falling Impact Force  
 by Masashi SATO, Toshimitsu TANIMOTO, Hiroshi MIKAMI, Ken-ichi MATSUOKA, and Kazuhiro KOTSUGAI

時には設計基準強度を用いることとする。また、表中に衝撃実験による最終的な最大残留変形量も示している。

表-2 に配筋量の一覧を示す。本実験は対辺単純支持で一方向版であることより、主筋は設定配筋量を、また配力筋は主筋配筋量にかかわらず示方書に従って 0.15 % 程度とした。各 RC 版の配筋は主筋および配力筋の配筋ピッチを固定し、補強筋の呼び径を変えることにより所定の配筋量に調整している。なお、As50-0.5W の場合には AFRP ロッド 3 本を束ねた状態で配置している。

## 2-2 実験方法

図-1 に試験体の形状寸法、および各測定点の位置を示している。実験に用いた RC 版は全スパン 5 m、純スパン 4 m、幅 4 m であり、1 対辺単純支持、他 1 対辺自由支持とする境界条件とした。各版の支点部は出来るだけ回転を拘束しないようにするために RC 版の上下に  $\phi 50\text{mm}$  の鋼棒を設置し、かつそれらを一辺あたり 8 本の太径ボルトを用いて締め付け支点部のリバウンドによる跳ね上りを防止している。また、1 支持辺には支点反力を測定するために、衝撃荷重測定用ロードセル (容量 5 tf) を 2 列、40mm ピッチに合計 20 個設置している。総支点反力はこれらを合算し、かつ 2 倍して評価している。

本実験では、重量が 1 tf (直径 50cm)、3 tf および 5 tf (いずれも直径 100cm) の 3 タイプの重錘を各版厚毎に対応させて載荷している。1 tf の重錘の場合には底部高さ 10mm 部を、また 3tf, 5tf の重錘の場合には 17.5cm 部を球状にしており、出来るだけ片当たりを防ぐようにしている。また、重錘内部には重錘衝撃力を算定するために、いずれの重錘に対しても容量 1000G および容量 500G の歪ゲージ型の加速度計を 4ch 設置している。

写真-1, 2 はそれぞれ実験の全景、支点部に設置した衝撃荷重測定用ロードセルおよび回転支持用の鋼棒の設置状況を示している。RC 版の裏面には載荷点下より片側対称軸線上に応答変位測定のためのレーザ式非接触型変位計を 9 個設置している。実験は、載荷点近傍部の最大残留変形量が 20mm 程度 (純スパンの 1/200 程度) に達した状態を破壊と定義し、版厚 25cm については 1 tf, 50cm については 3 tf, および 75cm については 5 tf の重錘を用い、重錘の載荷速度を  $V = 1 \text{ m/sec}$  から RC 版が破壊に至るまで、1 m/sec 刻みで増加させて行った。表-1 には最終載荷時の残留変位量を示している。

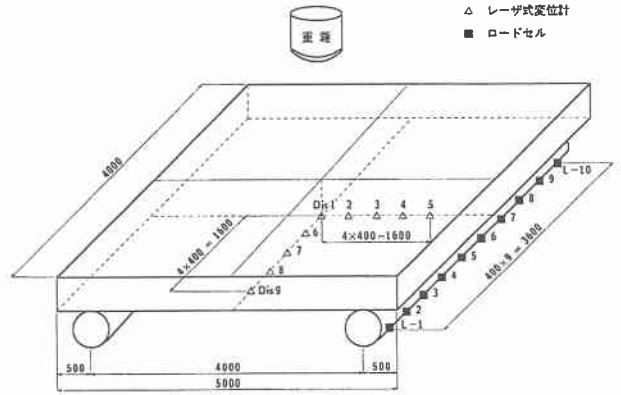


図-1 試験体の寸法および測定位置



写真 1

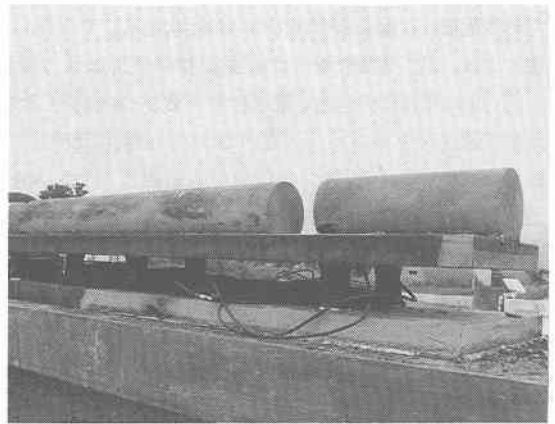


写真 2

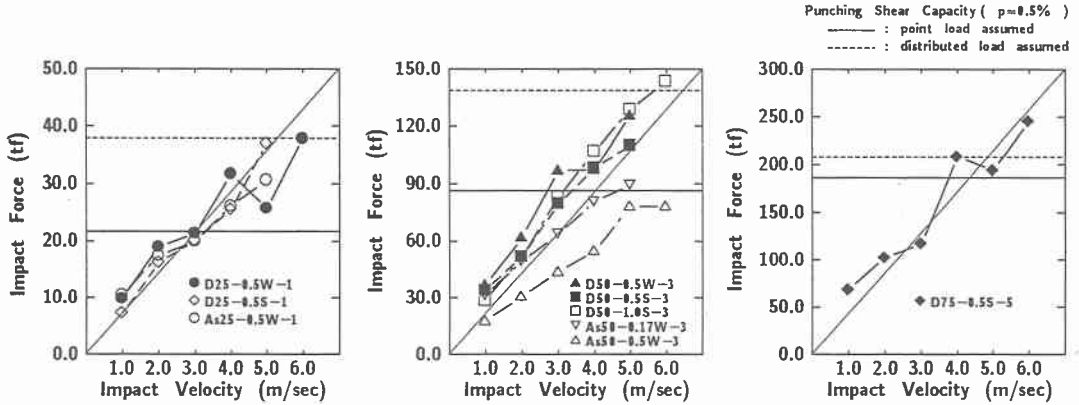


図-2 重錘衝突速度と最大重錘衝撃力の関係

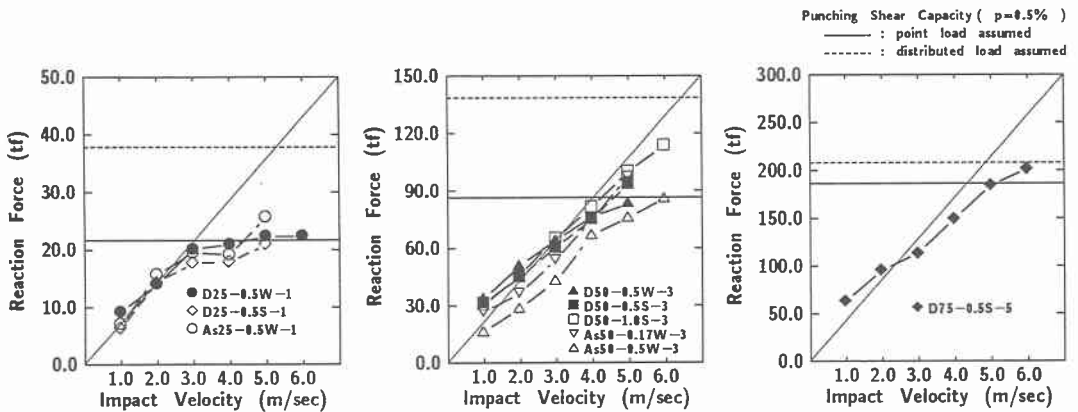


図-3 重錘衝突速度と最大合支点反力の関係

### 3 実験結果および考察

#### 3-1 重錘衝撃力と最大合支点反力

図-2 に繰り返し荷重載荷時の各版厚毎の重錘衝突速度と最大重錘衝撃力の関係を示す。図より、最大重錘衝撃力は総じて版厚、補強筋比および配筋材料に関わらず重錘の衝突速度の増大とともにほぼ線形に増加していることがわかる。また、重錘衝撃量は版厚によりその大きさが異なるものの、同一の版厚に対しては As50-0.5W の試験体を除き補強筋材料や配筋比に関わらず類似の分布性状を示していることがわかる。これより、本実験の範囲（配筋比が最大 1.0% 程度）では、最大重錘衝撃力は補強筋材料や配筋比よりもコンクリートの強度、剛性に依存しているものと考えられる。

図-3 に重錘衝突速度と最大合支点反力との関係を示す。図より、版厚 25cm (D25-, As25-) における最大支点反力は載荷速度が  $V = 3$  m/sec 以内では載荷速度に比例して増加しているが、 $V = 3$  m/sec 以上では増加せず 25 tf 以下の値となっている。これは、RC 版の損傷程度が小さい場合に衝撃荷重はほぼ載荷速度に比例して増加するものの、載荷速度が 3 m/sec 以上の損傷程度の大きい場合には増加分の衝撃エネルギーが全て RC 版の損傷によって吸収され支点部に伝達されないことを示しているものと考えられる。一方、版厚が 50cm (D50-, As50-) の場合には、支点反力は重錘衝撃力に比較して小さな値となっているが、最終載荷速度まで載荷速度に比例して増加している。それは重錘衝撃力と同様各試験体での分布性状にさほど大きな差がみられず、いずれもほぼ線形に分布していることがわかる。また、版厚 75cm (D75-) の場合にも支点反力は重錘衝撃力よりも小さな値となっているが、載荷速度に比例したほぼ線形な分布であることがわかる。これより、版厚 50cm 以上の場合の動的最大支点反力は、最大重錘衝撃力と同様補強筋材料や補強筋の剛性よりもコンクリート剛性に強く影響されているものと考えられる。

### 3-2 各最大衝撃力と耐力

実験は前述のように載荷点部の残留変形が純スパンの 1/200 程度に達した時点で試験体が破壊に至ったと仮定して終了している。また、各 RC 版裏面のひびわれ状態の観察により、いずれも初期に曲げによるひびわれが発生し、最終段階では載荷点を中心とする同心円状の押抜きせん断型のひびわれが発生していることが明らかになっている。従って、ここでは特に押抜きせん断耐力と、最大重錘衝撃力および最大支点反力との関係について検討を行うものとする。

押抜きせん断耐力評価に関しては、重錘の底部形状が球状となっていること、および桁高と純スパン長が同一の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験による破壊モード（重錘直径程度の押抜きせん断型のひびわれが発生している）を参照して以下の 2 ケースに関して評価することとした。すなわち、

ケース 1：衝撃荷重が点載荷状態であると仮定し、破壊形状が半開角 45° の円錐状であると仮定する場合、

ケース 2：衝撃荷重が重錘径と同一の円形状載荷状態であると仮定し、破壊形状が同一径の円筒状と仮定する場合、である。各ケースの耐力評価式は土木学会コンクリート示方書<sup>5)</sup>に規定されている静的な押抜きせん断耐力評価式を用いることとする。

表-3 各最大衝撃力と耐力

試験体名	最大載荷速度 (m/sec)	実験結果		数値計算結果		
		最大衝撃力 (tf)		曲げ耐力 (tf)	押抜きせん断耐力 (tf)	
		重錘衝撃力	支点反力		点載荷仮定	分布載荷仮定
D25-0.5S-1	5	37.0	20.9	21.7	21.7	37.9
D25-0.5W-1	6	37.9	22.4	26.2	21.7	37.9
D50-0.5S-3	5	110.1	93.8	94.1	86.5	138.8
D50-0.5W-3	5	125.7	74.4	101.3	86.5	138.8
D50-1.0S-3	6	143.5	113.9	105.9	107.1	171.9
D75-0.5S-5	6	245.1	201.7	249.0	186.2	208.1
As25-0.5W-1	5	30.7	25.7	47.3	21.7	37.9
As50-0.17W-3	5	89.5	97.6	175.9	86.5	138.8
As50-0.5W-3	6	78.2	86.1	310.7	86.5	138.8

表-3、および 図-2、3 中に上記 2 ケースに関する数値計算結果を示している。表には参考のために RC 版を一方向版とした場合の曲げ耐力を示している。また 図-2、3 には比較のために、特に呼び主筋比 0.5% の場合における押抜きせん断耐力を示している。最大重錘衝撃力と各押抜きせん断耐力を比較すると、版厚 25cm (D25-, As25-) の場合に関しては As25- が両せん断耐力値の中間的な値になっているが、他 D25- はいずれも円形状載荷を仮定する場合のせん断耐力値に近い値になっている。版厚 50cm に関しては、As50-0.5W の実験結果が、点載荷を仮定するせん断耐力値より若干小さい値となっている。また、D50-1.0S の場合は、円形状載荷を仮定するせん断耐力値に近い値を示している。ただし表-3 より、主筋比 1.0% にして算定したせん断耐力の中間的な値になっていることがわかる。他の各 RC 版は両せん断耐力値の中間的な値を示していることがわかる。D75- において点載荷と円形状載荷を仮定する場合の差は版厚が厚いため 20 tf 程度と小さい。実験結果は若干円形状載荷を仮定する場合よりも大きめの値となっているが、本算定結果は比較的良好に近似しているものと判断される。

次に、支点反力と押抜きせん断耐力の算定値について比較する。D25-, As25- に関しては、載荷速度が 3 m/sec までは載荷速度に比例してほぼ線形に支点反力が増加しているが、3 m/sec 以上ではそれらが横ばい状態となっており、最終的には点載荷で仮定した場合の押抜きせん断耐力値に近い値で破壊していることがわかる。これは、前述の載荷速度と最大衝撃力との関係に示されるような重錘衝撃力の最終載荷速度までの線形的増加、および最大合支点反力が載荷速度 3 m/sec 以上で増加の傾向が著しく低下していることより、版厚が薄いため載荷速度 3 m/sec 近傍より曲げによる損傷が進行するものの破壊に至らず、やがて押抜き型の破壊に至るためと考えられる。版厚 50cm (D50-, As50-) の場合には、最大合支点反力は載荷速度に比例してほぼ線形な増加を示しているものの、重錘衝撃力の値よりも低下しており、版厚 25cm と同様点載荷を仮定する場合の押抜きせん断耐力値に近い値になっていることがわかる。また、版厚 75cm (D75-) の場合には、最大合支点反力は点載荷と円形状載荷を仮定する場合の中間的な値になっている。

一方、前節の考察より最大支点反力および最大重錘衝撃力がコンクリートの剛性に最も強く影響されていることが明らかになっている。これらの実験結果に基づき点載荷を仮定し、版厚全体に渡って円錐型のせん断コーンが発生するものとして、押抜きせん断耐力式を最大支点反力に関する実験結果を用いて最小自乗法により決定すると、

$$V_{pcd} = 11.6\pi h^2 \quad (\text{kgf}) \quad (1)$$

として示される。この係数は  $\text{kgf}/\text{cm}^2$  の次元を示しており、示方書におけるコンクリートの押し抜きせん断強度  $f_{pcd}$  に対応するものであることがわかる。この値は  $f'_{cd} = 240 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  とすると、コンクリート標準示方書式 (8.3.9) の 1.25 倍の大きさになっていることがわかる。図-4 に最大支点反力に関する実験結果と式 (1) を比較して示している。

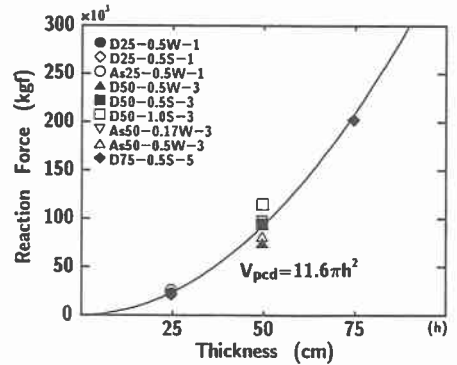


図-4 最大支点反力と耐力評価式の関係

以上の結果を総括して考えると、本実験のような重錘底部が球状になっている場合の RC 版の耐力は、円形状載荷を仮定する場合よりも点載荷を仮定する場合の押抜きせん断耐力に近似していることがわかる。従って、衝撃荷重載荷時の RC 版の押抜きせん断耐力は点載荷を仮定する土木学会コンクリート標準示方書の静的な押抜きせん断耐力評価式か、同様に点載荷を仮定して押抜きせん断時のコンクリートせん断強度と全版厚のみを考慮して得られた評価式 (1) を用いることによって安全側で評価が可能であるものと考えられる。

### 3-3 載荷点下の残留変形量

図-5 に載荷点下の累積残留変形量を載荷速度を横軸にとって各版厚ごとに整理している。D25- の実験結果は、最終載荷速度の 1 つ前までの残留変形の分布が載荷速度にほぼ比例して増加しているが、最終載荷速度で急激に増加しており、この様子からも押抜きせん断破壊に至った状況が観察できる。一方、As25- の場合の残留変形量は載荷速度に対して最終段階までほぼ線形に増加しており、D25- の分布特性と異なった特性を示している。これは、AFRP ロッドの高弾性伸び特性によって載荷点近傍部の補強筋がまだ弾性域内にあるために、曲げの状態で破壊時の残留変形値に達したことを意味しているものと考えられる。

版厚 50cm の場合では、配筋量の増大に伴って残留変形量が小さくなっていることがわかる。また補強筋比が同じ 0.5% の 2 つの試験体において単筋配置 (0.5S) と複筋配置 (0.5W) による差がほとんどなく、D25- の場合と同様に最終載荷速度時における残留変形量の増加勾配が急激に大きくなっていることより押抜きせん断型の破壊モードであることを暗示している。As50-0.17S の場合は As50-0.5S に比較して残留変形量の増加率が載荷速度とともに大きくなっており、最終載荷時には D50- と類似の増加率を示している。これは AFRP ロッドの高弾性伸び特性が発揮されては

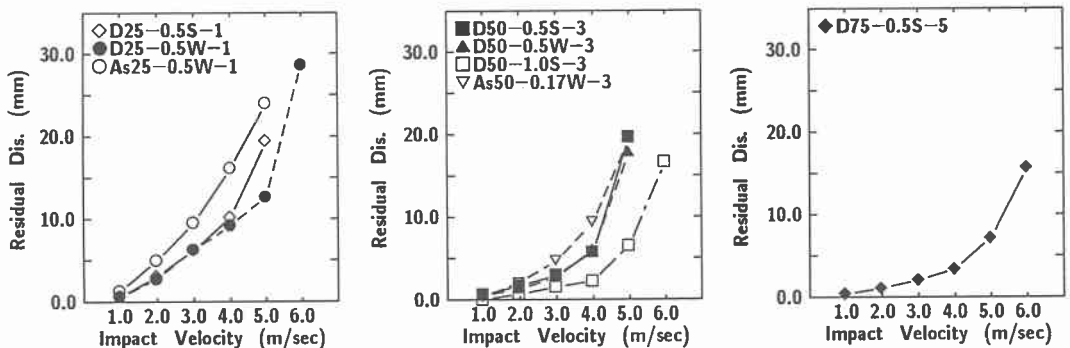


図-5 累積残留変形量と載荷速度の関係

いるものの、版厚が厚いため載荷速度が 4 m/sec 時より押し抜きせん断型に移行したためと考えられる。また配筋比が 0.17 % であり D50-0.5S, W と比較して約 1/3 程度と低めであるが、耐力は他のものと比較して同等であることにより、AFRP ロッドの長所が十分に発揮されていることがわかる。版厚 75cm の場合も、載荷速度が 4 m/sec までは残留変形量が載荷速度に線形に比例している。それ以上の場合には残留変形量の増加率も載荷速度とともに増加し、やがて破壊に至っている。以上より、版厚によらず載荷速度が小さい場合には残留変形が載荷速度にほぼ比例しており、曲げが卓越しているものと考えられる。載荷速度の大きい場合には残留変形量の増加率も大きくなりやがて破壊に至っており、変形モードが曲げ型から押し抜きせん断型に移行しているものと考えられる。

#### 4. まとめ

RC 版の耐衝撃性を検討することを目的として、純スパン、幅をそれぞれ 4 m に固定した大型 RC 版模型について補強筋の種類、版厚、補強筋比および配筋を変化させて作製し、重錘落下による衝撃試験を行った。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 最大衝撃力および最大支点反力は、補強筋材料やその特性、または配筋比に関わらず、コンクリートの剛性に顕著に影響されて励起されるものと考えられる。
- (2) 重錘底部が球状になっている場合の RC 版の耐力は、点載荷を仮定する場合の押し抜きせん断耐力に近似している。従って、衝撃荷重載荷に対する RC 版の押し抜きせん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書あるいは RC 版の押し抜きせん断破壊時のコンクリートのせん断強度と全版厚のみを考慮して評価した静的な押し抜きせん断耐力評価式を用いることによって安全側で評価することができるものと考えられる。
- (3) 破壊の性状はいずれも載荷速度が小さい初期の段階では曲げが卓越するが、載荷速度が大きくなるとともに押し抜きせん断型に移行して破壊しているようである。

最後に、本研究を行うに当たってご支援を頂いた室蘭工業大学建設システム工学科の岸徳光助教授ならびに構造力学研究室の皆様へ感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983.
- 2) 構造工学シリーズ 6、構造物の衝撃挙動と設計法、土木学会、1993
- 3) 中野修、今野久志、岸徳光、三上浩、遠藤紘：各種緩衝構造を用いた落石覆工の実証実験、第 2 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集、pp.230 ~ 235、1993.6.
- 4) 菅田紀之、岸 徳光、中野 修：RC 落石覆工の衝撃応答解析と断面力算定に関する一考察、土木学会論文報告集、No.495/I-28, pp.73~82, 1994.7.
- 5) コンクリート標準示方書、平成 3 年版、設計編、土木学会、1986