

# 大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験

室蘭工業大学 正員 岸 徳光  
 開発土木研究所 正員 佐藤 昌志  
 三井建設(株) 正員 三上 浩  
 室蘭工業大学 学生員 村瀬 尚久

## 1. はじめに

著者らは、耐衝撃用途のコンクリート構造物の安全性を向上させる目的で、RC 梁や PC 梁の衝撃応答特性ならびに耐衝撃性に関する研究を行ってきた [1-3]。特に最近の研究では、比較的低速度の衝撃を受ける RC 梁の耐衝撃設計法について、主として曲げ破壊する場合に限定した一提案を行った [4]。すなわち、衝撃曲げ破壊する RC 梁の動的耐力は静的曲げ耐力と同程度であること、同一載荷速度で比較するとエネルギー吸収量が多い梁ほど最大載荷速度からみた耐衝撃性に劣ることなどを明らかにしてきた。

本研究では単位幅 (1 m)、同一純スパン長 (4 m) を有し、梁の高さ (25, 50, 75 cm) および補強筋量 (0.5, 1.0 %) ならびに配置方法 (単筋, 複筋配置) を変化した大型の梁に重錘衝撃力を載荷して、各梁の耐衝撃性態を比較検討している。なお、梁の破壊は残留変形量が梁の純スパンの 1/50 程度に達した状態として定義している。本文ではまず、梁のひびわれ性状、残留変形特性ならびにロードセル反力と梁中央変位の関係を基に梁の破壊形式を特定して、衝撃耐力と静的曲げ耐力やせん断耐力との関係を明らかにしている。

## 2. 実験概要

試験体の一覧を表-1 に示す。試験体は梁高が 25 cm が 3 体、50 cm が 3 体、75 cm が 2 体の合計 8 体である。D25, D50 梁では下端補強筋比が 0.5, 1.0% の単筋配置と 0.5% の複筋配置があり、D75 梁は下端補強筋比が 0.5% の単筋および複筋配置である。なお、試験体名の末尾は使用した重錘の重量 (tf) を示している。

衝撃載荷は載荷速度が  $V = 1 \text{ m/sec}$  から  $1 \text{ m/sec}$  刻みで破壊するまで行った。なお、表中には断面分割法によって求めた各梁の静的曲げ耐力と実験終了時のスパン中央部における残留変形量を示している。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  $257 \sim 262 \text{ kgf/cm}^2$  である。

図-1 に試験体の形状寸法および配筋位置と変位計の位置を示す。なお、配筋図は 0.5W を標準として示している。梁の全長は 5 m で純スパンは 4 m である。本実験では、支点部のリバウンドを防止するため、梁の両端面

表-1 試験体および実験結果

試験体名	梁高 (cm)	補強筋比 (%)	鉄筋配置	載荷速度 (m/sec)	静的曲げ耐力 (tf)	残留変形量 (cm)
D25-0.5S-1	25	0.5	単筋	1~5	5.430	7.97
D25-0.5W-1	25	0.5	複筋	1~4	6.552	11.52
D25-1.0S-1	25	1.0	単筋	1~4	10.180	14.36
D50-0.5S-3	50	0.5	単筋	1~4	23.534	9.28
D50-0.5W-3	50	0.5	複筋	1~4	25.323	5.66
D50-1.0S-3	50	1.0	単筋	1~5	46.469	7.98
D75-0.5S-3	75	0.5	単筋	1~6	60.291	5.53
D75-0.5W-5	75	0.5	複筋	1~5	62.239	6.42

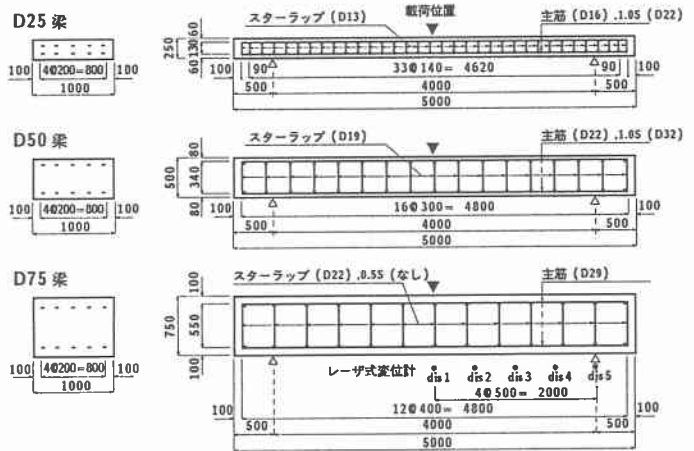


図-1 試験体の形状寸法および配筋位置と変位計の位置

から 50 cm の位置で鋼製の治具を用いて梁の上下を固定している。治具全体は梁の回転を許容し、ピン支持に近い構造となっている。なお、支点部には衝撃荷重測定用に開発したロードセルを設置して動的反力を測定している。

衝撃荷重はピン支持した梁の中央に重量が 1 tf (直径 50 cm) または 3, 5 tf (直径 100 cm) の重錘を所定の高さから自由落下させて載荷した。なお、重錘の底部にはテーパが設けられており、片当たりしない様になっている。また、梁には非接触式変位計 (レーザ式変位計) を設置して変位応答、残留変位量を測定した。実験終了時にはひびわれをスケッチし、ひびわれ及び破壊性状を検討した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ひびわれ及び破壊性状

図-2 に繰り返し載荷後の各梁の最終ひびわれ性状および破壊性状を示す。D25 梁の 0.5S では、載荷点近傍に 2 本の大きなひびわれが発生し、これらは梁上部で斜め上方に進展して連結している。すなわち、破壊性状としては載荷点直下に重錘の直径程度の押抜きせん断面が生じる押抜きせん断型破壊である。ただし、梁の幅が 1 m のためにせん断面は円錐状には形成されていない。また、梁上部は圧壊の性状を示している。

一方 0.5W は、0.5S と同程度の曲げひびわれ分散性を示し、2 本の大きな曲げひびわれが載荷点近傍に発生している。ただし、0.5S と異なり、梁上部では水平方向のひびわれが形成されて、斜めひびわれや押抜きせん断面はみられない。1.0S は載荷点直下の 1 本の曲げひびわれが卓越し梁上部が圧壊するなど、典型的な曲げ破壊の性状を示している。一般的に、D25 梁のように梁の高さに比べてせん断スパンの長い梁 ( $a/h = 200/25 = 8$ ) に静的な荷重が作用する場合には、完全な曲げ型の破壊形式になると予想される。しかし、D25-0.5S の様に、梁の幅が荷重の載荷幅に比べて広い試験体に衝撃的な荷重が作用するとせん断型のひびわれが発生する可能性があることに留意する必要がある。

D50 梁の 0.5S では、載荷点直下の梁の下端付近に扁平な押抜きせん断型のひびわれが発生している。また、ひびわれ幅の大きな曲げのひびわれが載荷点直下に集中して 3 本程度発生している。一方、0.5W では 0.5S よりも曲げひびわれの分散性が良いが、載荷点近くの梁上部では水平および斜め方向のひびわれが多数発生している。また、載荷点直下にはひびわれ幅の大きな曲げのひびわれが 3 本程度発生している。1.0S では、載荷点直下に釣り鐘状の押抜きせん断面が明瞭に形成され、押抜き面の内部には斜めひびわれも発生している。また、梁の下端ではコンクリートが主鉄筋に沿って部分的に剥落している。D50 梁の  $a/h$  は  $200/50 = 4$  であり、静的に荷重が作用した場合には曲げ破壊することが予想される。しかし、本衝撃試験では、いずれの梁も曲げひびわ

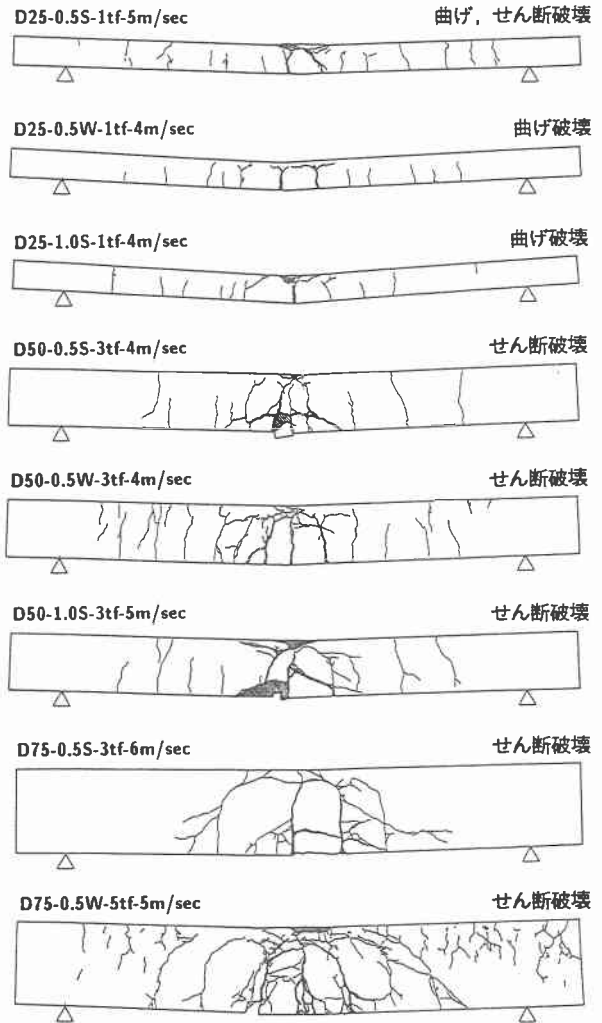


図-2 最終ひびわれ性状および破壊性状

れと斜めひびわれ及び押抜きせん断型のひびわれが発生している。押抜きせん断面の大きさは 1.0S が最も大きく、次が 0.5W、最も小さく偏平なのが 0.5S である。

D75 梁の 0.5S では、曲げひびわれの本数が少なく、せん断スパンの半分の位置の梁の腹部に斜めひびわれが発生している。また、梁の上部では曲げひびわれが水平及び斜め上方に進展し、全体的には大きな押抜きせん断面を形成している。また、荷点直下の梁の下端には偏平な押抜きせん断面が形成されている。一方、0.5W では微細なひびわれが 0.5S よりも多いものの、幅の大きなひびわれの本数は 0.5S と差がなく、荷点直下で明瞭な押抜きせん断面が形成されている。D75 梁の  $a/h = 200/75 = 2.67$  であり、静的に線荷重を荷点した場合には斜めひびわれが発生すると予想されるが、本実験では押抜きせん断型のひびわれになっている。これは、重錘底部にはテーパが設けられており、衝撃荷重の荷点が荷点に近いのに対して梁の幅が 1 m と大きいために押抜きせん断型のひびわれ性状を示したものと考えられる。

### 3.2 残留変位分布

図-3 に実験終了時における各梁の残留変位分布を示した。D25 梁では、0.5S の最終荷速度が最も大きいにも関わらず、残留変位量は最も小さい。変位分布の傾向は曲げ型の破壊性状を示した 0.5W、1.0S では、下に凸のなだらかな曲率を有する変位分布を示すのに対して、押抜きせん断型のひびわれ性状を示した 0.5S は、0.5W、1.0S に比べてより直線的な変位分布を示している。

D50 梁では、いずれの梁の変位分布もなだらかな曲率を示さず、変位が大きい領域の変位量 (dis1 ~ dis5) が比較的同程度の値を示し、支点近傍では極端に変位が少なくなっている。これは斜めひびわれや曲げせん断型のひびわれが荷点からせん断スパンの半分程度の領域で発生し、それ以外の領域ではほとんどひびわれが発生しない、斜めせん断型の典型的な残留変位特性と推察される。

D75 梁では、いずれも残留変位分布の傾向は直線的であり、この傾向は D25-0.5S と同様である。いずれの梁も押抜きせん断面が明瞭に形成されていることから、この極めて直線的な変位性状は押抜きせん断型のひびわれ性状に対応した変位分布性状であることが分かる。

### 3.3 残留変位量

図-4 に、各梁の繰返し荷点時における梁中央の残留変位量を荷点速度ごとに示した。なお、残留変位量は各荷点速度で生じた量を加算して求めた。D25 梁では、0.5S の変位が他に比べて極端に小さく、本梁はせん断変形が卓越し、他の梁は曲げ変形が卓越したことを示している。

D50 梁では、各梁の変位傾向には差がなく、主筋量の大きな 1.0S で最も変位が抑制され、そのため最大荷速度も大きくなっている。このように D50 梁では主筋量が残留変位量に大きな影響を与えている。一方、D25 梁では主筋量が少ない 0.5S 梁の変位が少ないことから、主筋量の残留変位に与える影響には梁高さが影響すると考えられる。

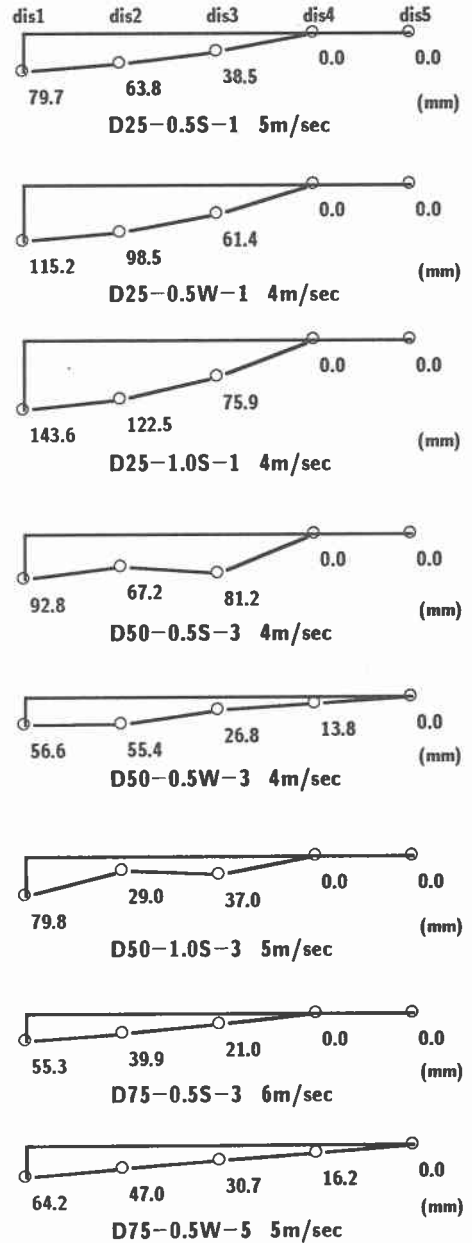


図-3 梁の残留変位分布

これは、D25 梁では梁高が小さく、耐衝撃性状に与えるコンクリートの影響が主筋量の影響よりも顕著であるためと推察される。

一方、D75 梁では、使用した重錘の重量が異なるため、0.5S と 0.5W の比較は 0.5S の各載荷速度に 1 m/sec の載荷速度を加え、運動エネルギーを等しくして比較する必要がある。両者を比較すると顕著な残留変位の差がないことが分かる。すなわち、D50 梁、D75 梁ともに、単筋配置と複筋配置で残留変位量には大差がない。これは、既往の室内実験結果 [1-2] と一致している。

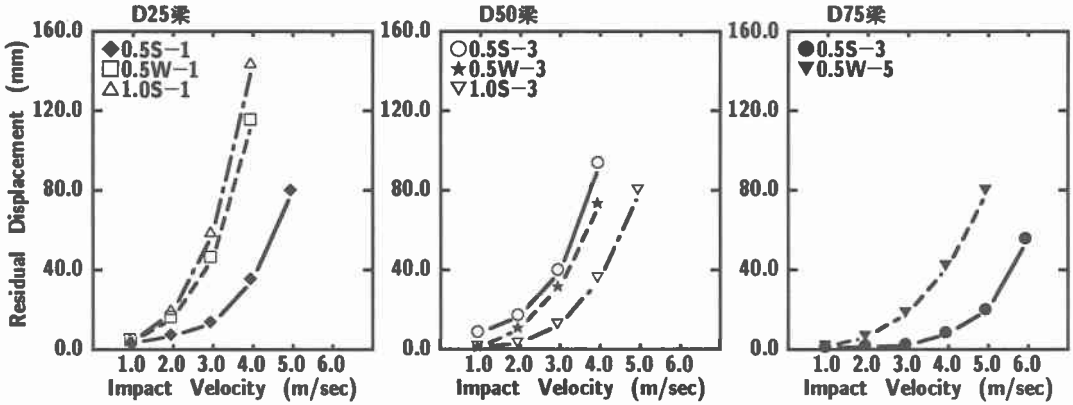


図-4 繰返し載荷時における梁中央の残留変位量

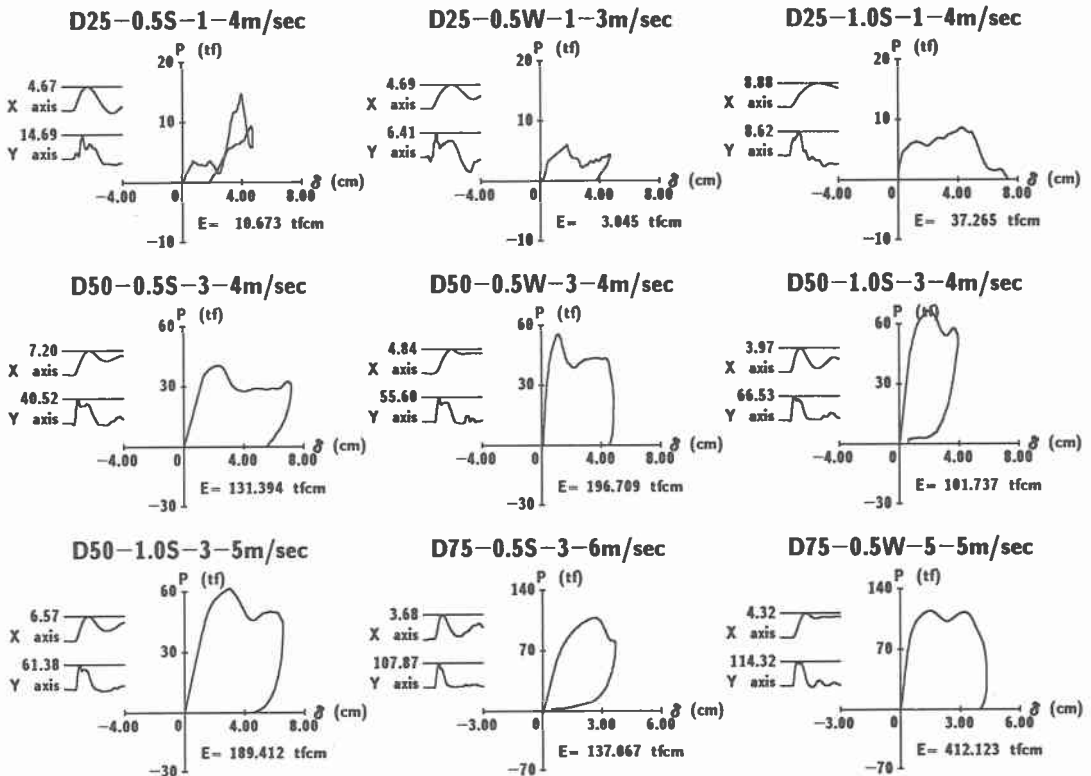


図-5 ロードセル反力と梁中央変位の関係

### 3.4 荷重-変位関係

図-5に最終載荷速度近傍における載荷速度でのロードセル反力と梁中央変位の関係を示す。なお、図中のX, Yは各々変位応答波形, ロードセル反力波形を示している。なお, ロードセル反力は4測定の測定結果の合計である。

D25梁では, 0.5Sとその他の梁の破壊性状が大きく異なることを示したが, 荷重-変位関係もこれに対応して大きく異なっている。すなわち, 押抜きせん断型の0.5S梁はいわば弾性的応答を示しているのに対して, 完全な曲げ型を示した1.0S梁では残留変形が大きく, エネルギー吸収性能は1.0Sの方が3倍以上大きいことが分かる。

一方, D50梁では3試験体がほぼ同様な荷重-変位関係を示しているが, 単筋配置の場合は主筋量が多いほど初期剛性が大きく, 最大応答変位を示した後にそれよりも少ない量の変形が残留している。これに対して0.5Wは変形の立ち上がりが極めて急であり, ほぼ同程度の荷重で変形が増大した後, 最大応答変位量にほぼ等しい残留変位量が生じている。V = 4 m/sec 載荷で比較した吸収エネルギーは, D50-1.0Sが最も小さく, 吸収エネルギーの小さい方が耐衝撃性が高いという既往の研究結果 [4] に対応している。

D75梁では, 重錘の重量が異なるため, 運動量がほぼ等しくなるようにD75-0.5WのV = 5 m/sec 載荷とD75-0.5SのV = 6 m/sec 載荷で吸収エネルギーを比較する。D75-0.5Wの方がD50の場合と同様に最大応答に等しい量の変形が残留しているため, 吸収エネルギーが倍以上大きい。また, D50梁と同様に0.5Wの方が0.5Sよりも荷重-変位関係の初期勾配が急である。

以上を要約すると, D25梁の結果から, 押抜きせん断型のモードを示す梁の吸収エネルギーは曲げ破壊する梁よりも小さい。D50梁の結果から, 同じせん断型で破壊する梁では, 補強筋比の大きい梁の方が吸収エネルギーが小さく, 最大載荷速度が大きくなり耐衝撃性に優れている。D50, 75梁の結果から, 複筋配置にした梁の方が残留変形量が増加して吸収エネルギーは大きくなる。

### 3.5 ロードセル反力と衝撃抵抗強さ

図-6に各梁のロードセル反力と載荷速度の関係を示した。また, 図中には破壊性状に対応した静的耐力を示した。D25梁の0.5Wと1.0Sは曲げ型の破壊であり, 最大ロードセル反力は静的曲げ耐力を若干下回る程度であることが分かる。一方, 押抜きせん断型の破壊性状を示した0.5Sのロードセル反力は曲げ耐力の3倍程度と大きく, せん断耐力よりも小さい。すなわち, 曲げとせん断の両方のモードが混在していることを示している。なお, せん断耐力は棒部材の斜めせん断耐力としてせん断補強筋を無視して計算した値である。

一方, D50梁はすべての梁に斜めひびわれや押抜きせん断型のひびわれが発生しているが, ロードセル反力は静的曲げ耐力を2倍程度上回り, 斜めせん断耐力に近い値を示している。なお, せん断面の大きさがD25-0.5Sよりも広がっているためせん断耐力は棒部材の耐力としてコンクリート及びせん断補強筋の両方が寄与すると算出した。

D75梁は押抜きせん断型のひびわれ性状を示しているが, 本梁の幅は1mのため不完全な押抜きせん断となる。

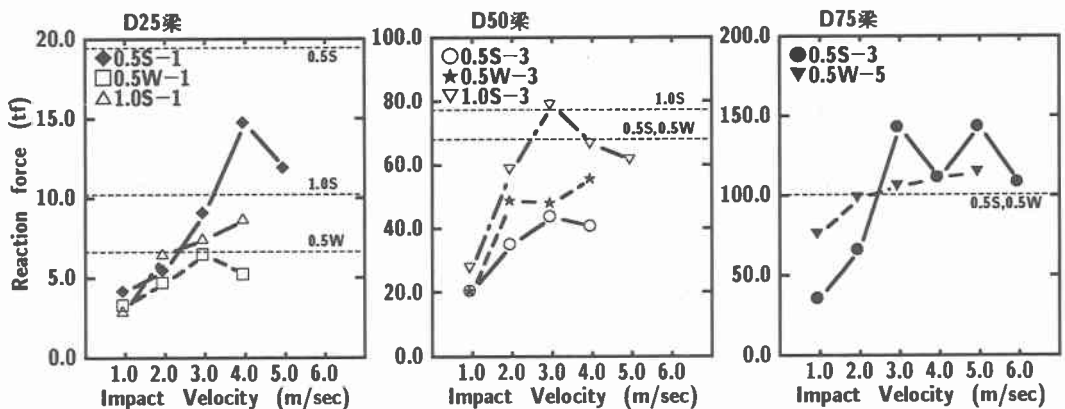


図-6 ロードセル反力と載荷速度の関係

そこで、D50 梁と同様に棒部材のせん断耐力としてコンクリート及びせん断補強筋が寄与するものとしてせん断耐力を算出した。その結果、両梁の動的耐力は静的せん断耐力程度と考えておけば安全側であることが分かった。なお、せん断型の破壊性状を示した梁について、そのロードセル反力の最大値を比較すると

$$\frac{D50-0.5S}{D25-0.5S} = 2.96 \text{ (梁高 } 25 \rightarrow 50 \text{ cm, } 2 \text{ 倍)} \quad , \quad \frac{D75-0.5S}{D25-0.5S} = 9.76 \text{ (梁高 } 25 \rightarrow 75 \text{ cm, } 3 \text{ 倍)} \quad ,$$

$$\frac{D75-0.5S}{D50-0.5S} = 3.30 \text{ (梁高 } 50 \rightarrow 75 \text{ cm, } 1.5 \text{ 倍)} \quad , \quad \frac{D75-0.5W}{D50-0.5W} = 2.06 \text{ (梁高 } 50 \rightarrow 75 \text{ cm, } 1.5 \text{ 倍)}$$

となる。

これから、梁高の変化のほぼ 2 乗に比例したロードセル反力が励起されていることが分かる。これは、衝撃的な載荷によって幅の広い梁がせん断破壊する場合には、コンクリートの影響が補強筋の影響よりもはるかに大きいことを示すものと考えられる。

#### 4. まとめ

単位幅を有し、純スパンが 4 m である大型 RC 梁について梁高、補強筋比、補強筋の配置方法を変化させて製作し、重錘落下衝撃実験を行って衝撃挙動を検討した。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 梁高の変化に従って破壊の性状が変化し、厚さが 50 cm 以上の梁では斜めせん断及び押抜きせん断型の破壊性状を示している。
- (2) 残留変位の分布性状はひびわれおよび破壊性状と密接に関連している。
- (3) 梁高が小さい場合には、残留変位量に与える主筋量の影響は小さく、梁高が 50 cm では主筋量の大きい方が残留変位量が小さい。また、鉄筋の配置方法は残留変位量の大小に顕著な影響を与えない。
- (4) 吸収エネルギーは曲げ型の破壊性状を示す方がせん断型の破壊性状を示す梁よりも大きい。せん断型の破壊であっても同一載荷速度における吸収エネルギーの大きな梁ほど最大載荷速度からみた耐衝撃性は劣る。
- (5) 曲げ型の破壊を示した梁の最大ロードセル反力はほぼ静的曲げ耐力程度である。一方、せん断型の破壊を示した梁の最大ロードセル反力は、ばらつきが大きいものの静的せん断耐力程度である。
- (6) 最大ロードセル反力は梁高の変化の 2 乗にほぼ比例して励起される。すなわち、せん断型で破壊する梁の動的耐力は主としてコンクリート（断面寸法）で決定される。

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松岡健一教授ならびに構造力学研究室の皆様へ感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 三上浩、田村富雄、岸徳光、松岡健一：組紐状 AFRP ロッドで補強した RC 梁の耐衝撃挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15, No.2, pp.923~928, 1993.
- 2) 岸徳光、三上浩、田村富雄、松岡健一：RC 梁の衝撃挙動におよぼす補強筋特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.2, pp.1105~1110, 1994.
- 3) 松岡健一、三上浩、岸徳光：低補強筋比 RC 梁の耐衝撃性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17, No.2, pp.929~934, 1995.
- 4) 三上浩、岸徳光、松岡健一、田村富雄：低速度衝撃を受ける RC 梁の耐衝撃設計法の一提案、構造工学論文集、Vol.42A, 1996.