

論文 低速度衝撃を受ける大型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究

岸 徳光*1・佐藤昌志*2・西 弘明*3・三上 浩*4

要旨：本研究では幅 1m, スパン長 4m を有し, 梁高 (25, 50, 75 cm), 下端補強筋比 (0.5, 1.0%), 配置方法 (単筋, 複筋配置) を変化させた大型の単純支持 RC 梁に底部が球状の重錘を用いて自由落下による衝撃力を載荷させ, 各梁の耐衝撃性状を比較検討した. その結果, (1) 梁高が高くなるに従い, 破壊性状は曲げ型から斜めせん断型あるいは押し抜きせん断型の破壊性状に移行する, (2) 曲げ型の破壊性状を示す梁の吸収エネルギーはせん断型の破壊性状を示す梁よりも大きい, (3) 梁の最大支点反力は静的耐力とほぼ同程度であり, せん断型で破壊する梁の最大支点反力は梁高の 2 乗にほぼ比例して励起される, 等が明らかになった.

キーワード：重錘衝撃, 耐衝撃性, エネルギー吸収性能, 大型 RC 梁

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 [1-2]. 特に最近の研究では, 比較的 low velocity 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 [3]. 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.

本研究では同一の梁幅 (1m), 純スパン長を有し, 梁の高さおよび下端補強筋比ならびに配置方法を変化させた大型の RC 梁に重錘衝撃力を繰り返し載荷して, 各梁の耐衝撃性状を比較検討している. なお, RC 梁の破壊は既往の研究 [2] と同様に累積残留変位量が梁の純スパンの 1/50 程度に達した状態と定義している. 本文では, まず RC 梁のひびわれ性状, 残留変位特性ならびに合支点反力 (以後, 本文ではこれを簡略化して単に支点反力と呼ぶこととする) と梁中央変位の関係を基に梁の破壊形式を特定し, 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. 試験体は梁幅が 1 m で, 梁高 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 (S) と 0.5% の複筋配置 (W) 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.

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)	残留変位量 (cm)
D25-0.5S-1	25	0.5	単筋	1~5	5.43	7.97
D25-0.5W-1	25	0.5	複筋	1~4	6.55	11.52
D25-1.0S-1	25	1.0	単筋	1~4	10.18	14.36
D50-0.5S-3	50	0.5	単筋	1~4	23.53	9.28
D50-0.5W-3	50	0.5	複筋	1~4	25.32	5.66
D50-1.0S-3	50	1.0	単筋	1~5	46.47	7.98
D75-0.5S-3	75	0.5	単筋	1~6	60.29	5.53
D75-0.5W-5	75	0.5	複筋	1~5	62.24	6.42

*1 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科, 工博 (正会員)

*2 北海道開発局 開発土木研究所 構造研究室長, (正会員)

*3 北海道開発局 開発土木研究所 研究員, 工修 (正会員)

*4 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員, 工博 (正会員)

衝撃荷重は荷重速度を $V = 1 \text{ m/sec}$ から 1 m/sec 刻みで増加させ破壊するまで繰り返し載荷させることとした。表中には断面分割法で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累積残留変位量を示している。なお、断面分割法は実測のコンクリート強度および鉄筋の規格値を基に、ほぼ同様な解が得られる分割数以上とし 5 mm 厚の 50 分割以上で計算した。コンクリート強度は設

計基準強度が 240 kgf/cm^2 で実験時の圧縮強度が $257 \sim 262 \text{ kgf/cm}^2$ 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。RC 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。また、支点部には衝撃荷重測定用に開発したひずみゲージ式のロードセルを設置して動的支点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 $3, 5 \text{ tf}$ (直径 100 cm) の重錘を所定の高さから自由落下させることにより載荷した。重錘の底部は片当たりを防止するため球状にしている。また、梁各点に非接触式レーザ変位計 (容量 150 mm) を設置し、梁の変位応答、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ひびわれおよび破壊性状、ひびわれ性状から推定した破壊形式を示している。

D25 梁の $0.5S$ では、載荷点近傍に 2 本の大きな曲げひびわれが発生し、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、載荷点直下に重錘の直径程度の釣り鐘状のせん断面が生じる押抜きせん断型の破壊を示している。ただし、面部材と異なり梁幅が 1 m であるため、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も示している。一方 $0.5W$ は、 $0.5S$ と同程度の曲げひびわれの分散性を示し、 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

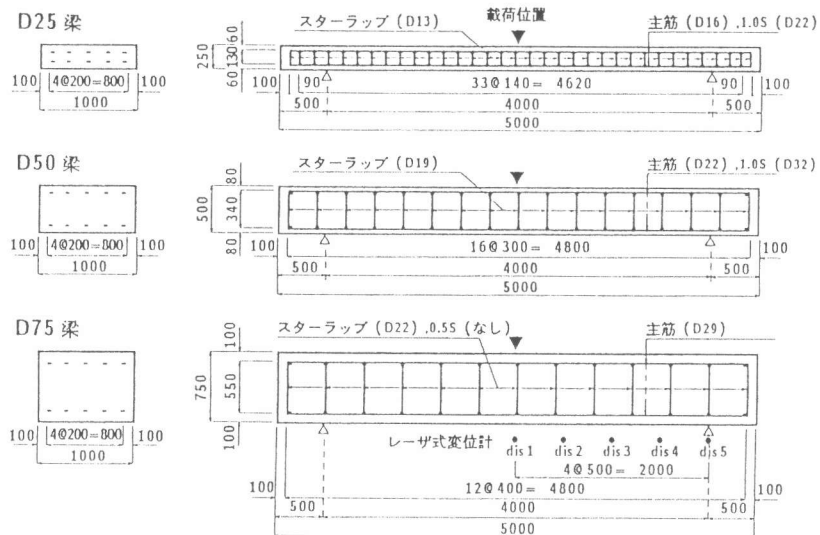


図-1 試験体の形状寸法および配筋位置

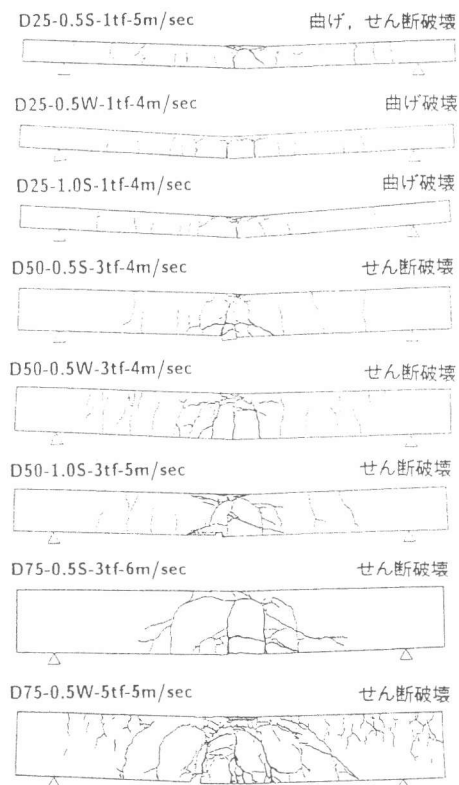


図-2 ひびわれおよび破壊性状

びわれが顕著であり、斜めひびわれや釣り鐘状のひびわれは示されていない。1.0Sは荷点直下の1本の曲げひびわれが卓越して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。しかしながら、0.5Sのように荷幅に比べて梁幅が広い梁に衝撃的な荷重が作用する場合には、せん断型のひびわれが発生する可能性があるものと考えられる。D50梁の0.5Sでは、荷点直下の梁の下端付近に扁平な釣り鐘状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荷点直下に4本程度集中して発生している。一方、0.5Wでは0.5Sよりも曲げひびわれの分散性は良いが、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。さらに、荷点直下にはひびわれ幅の大きな曲げひびわれが3本程度発生している。1.0Sでは、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、梁下端ではコンクリートが主鉄筋に沿って部分的に剝落している。D50梁の a/h は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。しかしながら、本衝撃試験では、いずれの梁も曲げひびわれと斜めひびわれあるいは釣り鐘状のひびわれが発生して破壊に至っている。

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。梁の上部では曲げひびわれが斜め上方に進展し、全体的には大きな釣り鐘状の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扁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の場合と大差がなく、荷点直下で重錘直径程度の明瞭な押抜きせん断面が形成されている。D75梁の a/h は2.67であり、静荷時には斜めひびわれが発生するものと想定されるが、本実験では押抜きせん断型のひびわれ性状を示している。これは、重錘底部にはテーパが設けられ点荷に近い状態であるものの、梁幅が1mと大きいことや荷重が衝撃荷重であることに起因しているものと考えられる。

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す。図から、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ことが分かる。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分布を示している。

D50梁では、dis1～dis3の変形量が同程度の大きな値を示し、支点近傍では極端に変位が小さくなっている。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、それ以外の領域でのひびわれが軽微な、斜めせん断型の梁の残留変位特性と考えられる。

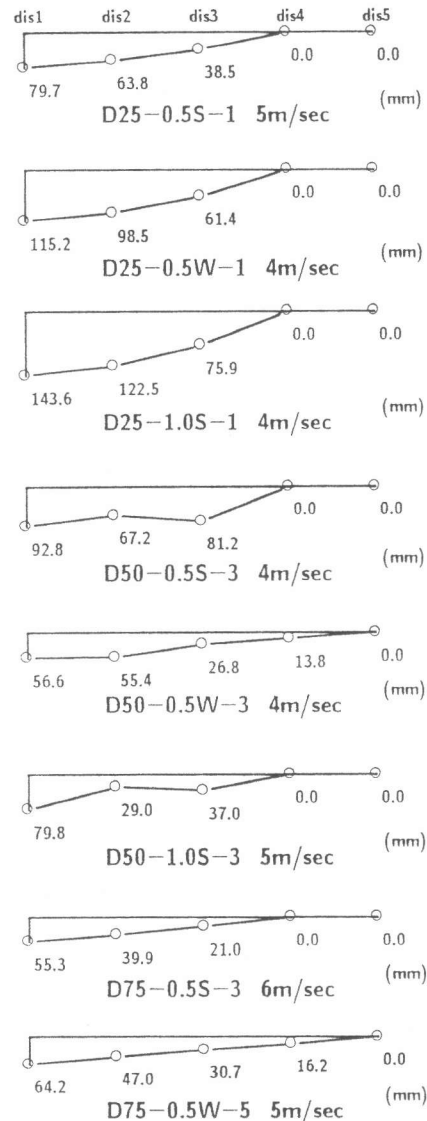


図-3 梁の残留変位分布

一方 D75 梁の残留変位分布は直線的であり、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分布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ものと考えられる。

3.3 残留変位量

図-4 に、各梁の繰返し載荷時における梁中央部の残留変位量を、D25、D50 梁に関しては横軸に載荷速度、また、D75 梁では入力運動エネルギーを取って整理している。なお、残留変位量は各載荷速度で生じた量を加算した累積値である。

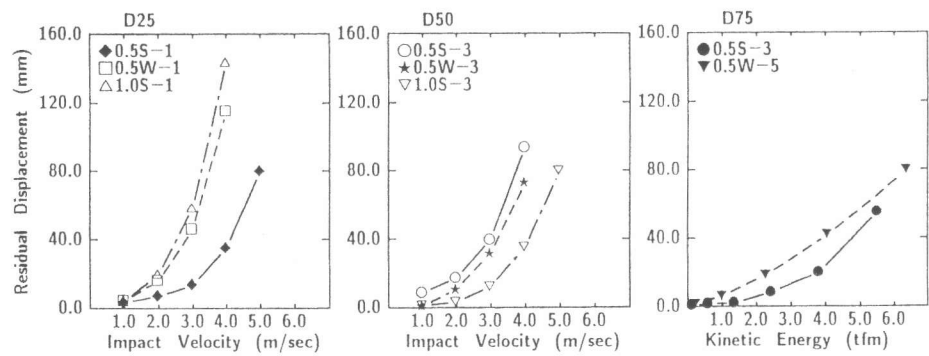


図-4 繰返し載荷時における梁中央部の残留変位量

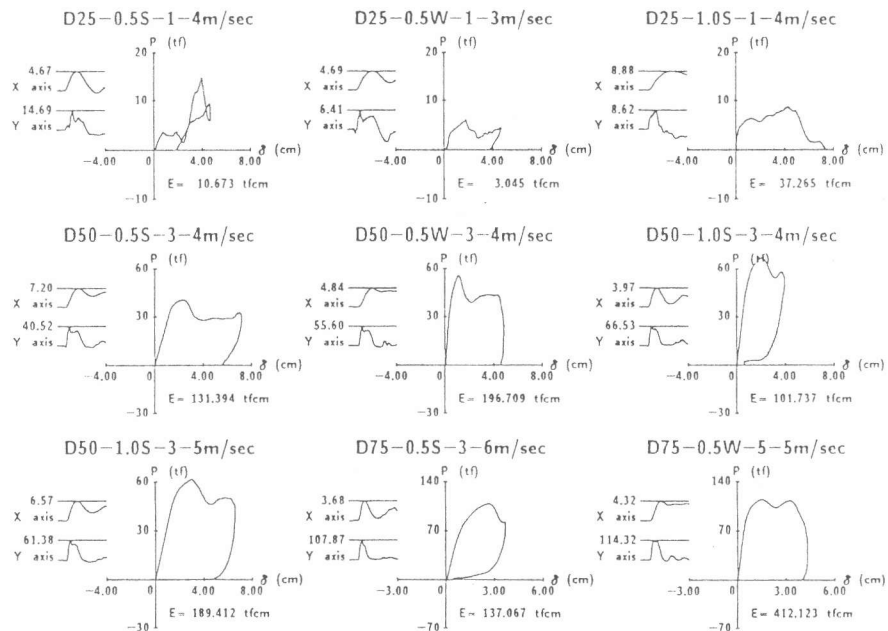


図-5 ロードセル反力と梁中央変位の関係

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ていることを示しているものと考えられる。D50 梁では、各梁の残留変位傾向には大差がないが、下端補強筋比の大きな 1.0S で変位が最も抑制され、そのため最大載荷速度も大きくなっている。一方、単筋配置と複筋配置では大きな差は見られない。このように D50 梁では下端補強筋比が残留変位量に大きな影響を与えている。これに対して、D25 梁では下端補強筋比が少ない 0.5S 梁の変位が少ないことから、下端補強筋比の残留変位に与える影響には梁高が影響しているものと考えられる。すなわち、D25 梁の場合は梁高が小さく、耐衝撃性状に与えるコンクリートの影響が下端補強筋比の影響よりも顕著であるものと推察される。

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 の比較は運動エネルギーを等しくして行う必要がある。そのため、横軸に重錘による入力運動エネルギーを取って整理している。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。この結果は、既往の室内実験結果 [1] と一致している。

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支点反力と梁中央変位の関係を示している。なお、図

中の X, Y は各々変位応答波形, 支点反力波形を示している。また, 支点反力と変位のなすループの面積を吸収エネルギー E と仮定して示した。D25 梁では 0.5S とその他の梁の破壊性状が異なることを示したが, 荷重-変位関係もこれに対応して異なっていることがわかる。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, エネルギー吸収量は 1.0S の方が 3 倍以上大きいことが分かる。

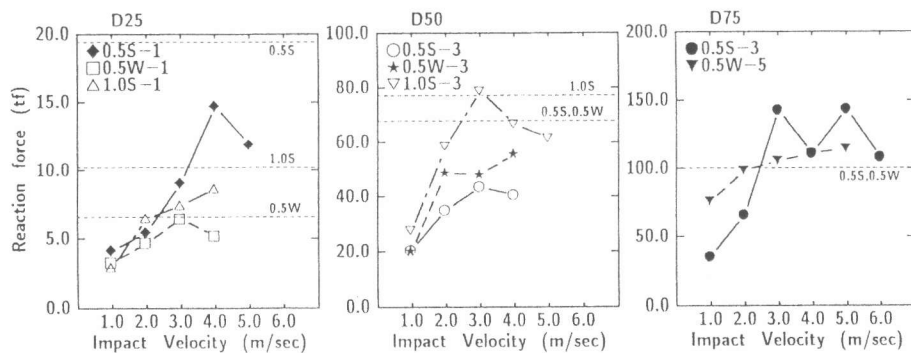


図-6 支点反力と載荷速度の関係

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, 単筋配置の場合は補強筋比が大きいほど初期剛性が大きく, 残留変位量が小さいことが分かる。これに対して 0.5W は, 0.5S, 1.0S に比べて初期剛性が大きく, ほぼ同程度の荷重レベルで変位が増大した後, 最大応答変位量にほぼ等しい残留変位を示している。V=4m/sec 載荷で比較した吸収エネルギーは, 1.0S が最も小さく, 同一載荷速度で比較すると吸収エネルギーの小さい梁が最大載荷速度からみた耐衝撃性に優れている既往の研究結果 [2] に対応している。

D75 梁では, 重錘重量が異なるため, 重錘による入力運動エネルギーがほぼ等しくなるように 0.5W の V = 5 m/sec 載荷と 0.5S の V = 6 m/sec 載荷で吸収エネルギーを比較する。0.5W は D50-0.5W の場合と同様に最大応答変位にほぼ等しい量の変位が残留しているため 0.5S の吸収エネルギーより 2 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-変位関係のなす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, 複筋配置にした梁は残留変形量が大きく, 従って吸収エネルギーも大きくなる。

なお, 部材の衝撃吸収エネルギーを同一にした場合, 耐衝撃性に優れている部材の作用衝撃力あるいは入力運動エネルギーは大きくなる。これは, 作用衝撃力あるいは入力運動エネルギーが一定の場合には, 衝撃吸収エネルギーが小さい部材が耐衝撃性に優れていることに対応している。本論文では効率的に実験を行うために, 後者の考え方に基づいて部材の耐衝撃性を論じている。

3.5 支点反力と衝撃抵抗強さ

図-6 に各梁の支点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破線で示した。D25 梁の 0.5W と 1.0S は曲げ型の破壊であるが, 最大支点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 の支点反力は静的曲げ耐力の 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, せん断耐力はせん断面が載荷点直下に限定されていることにより, せん断補強筋の効果を見逃して評価している。

一方, D50 梁では全ての梁に斜めひびわれが発生しているが, 支点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 の場合より広がって

ることより、この場合の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を考慮して算出した。D75 梁は釣り鐘状の押抜きせん断型のひびわれ性状を示しているが、面部材と異なり本梁の幅が 1 m であるため不完全な押抜きせん断となる。それより、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。

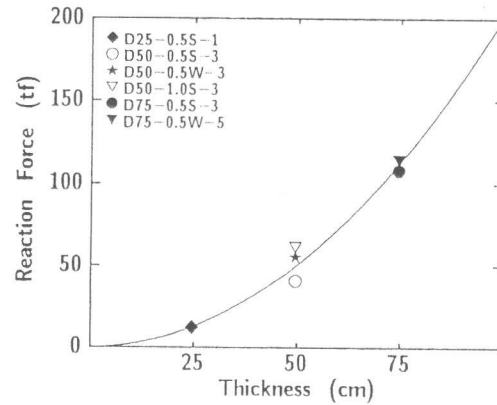


図-7 最大支点反力と梁高の関係

図-7 には、せん断型の破壊を示した梁の最大支点反力と梁高の関係を、最大支点反力が梁高の 2 乗に比例するとして回帰した曲線と共に示した。図より、せん断型の破壊を示した梁では、ほぼ梁高の 2 乗に比例した最大支点反力が励起されていることが分かる。これは、衝撃的な荷重を点載荷すること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顕著であることを示していると考えられる。

4. まとめ

梁幅 1 m、純スパンが 4 m の大型 RC 梁を梁高、下端補強筋比、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) 梁高の変化に対応し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釣り鐘状の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下端補強筋比の影響は小さく、梁高が 50 cm では補強筋比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梁がせん断型の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耐衝撃性は劣る。
- (5) 曲げ型の破壊を示した梁の最大支点反力は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支点反力は、ばらつきが大きいものの静的せん断耐力程度である。
- (6) せん断型で破壊する梁の最大支点反力は梁高の 2 乗にほぼ比例して励起される。

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に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.