

I - 5

横方向衝撃力を受ける RC 柱模型の衝撃力継続時間に関する一考察

室蘭工業大学 正 員 岸 徳 光
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 吉 川 卓

1. はじめに

平成7年1月に発生した阪神・淡路大地震は、RC 製道路橋脚をはじめとするライフラインに壊滅的な被害を与え、RC 橋脚などのコンクリート部材のせん断破壊を防止することの重要性を再認識させた地震であった。著者らは、既往の研究¹⁾において a/d (せん断スパン比) が比較的大きな RC 柱模型を製作し、柱頭部に横方向衝撃力を作用させて破壊性状や耐衝撃性を検討した。検討は、RC 橋脚の耐衝撃性に影響を与えると考えられる軸方向筋量やせん断補強筋の有無および地震波の方向性を考慮した横方向衝撃力と軸圧縮力の組み合わせなどに着目して行った。

本研究では、 a/d が 1.6 程度と小さな試験体を製作し、主として衝撃せん断破壊する場合の応答特性や耐衝撃性を検討した。着目した因子は、既往の研究と同様に軸方向筋量、せん断補強筋の有無および軸力と横方向衝撃力の組み合わせである。検討は主としてロードセルを内蔵した重錘による重錘衝撃力特性に着目して行った。最後に、既往の研究結果を含めて、RC 橋脚が横方向衝撃力を受ける場合の耐衝撃設計法を提案する上で重要な衝撃力継続時間について考察を行っている。

2. 実験の概要

2.1. 試験体の概要

実験に用いた試験体は表-1に示す 24 体である。試験体の名称のうち第1項は橋脚模型のタイプ (L: 長柱 $a/d=3.6$ または S: 短柱 $a/d=1.6$)、第2項は軸方向筋の呼び径 (D6 または D10)、第3項はせん断補強筋の本数 (0 または 9 本もしくは 6 本)、第4項は軸方向の応力度を示している。C40、T40 は各々圧縮応力と引張応力が 40 kgf/cm^2 であることを示し、NS は軸方向力を加えていないことを示している。載荷速度とは、重錘が試験体に衝突する直前での重錘の速度である。衝撃荷重の載荷は、載荷速度 $V = 1 \text{ m/sec}$ から 1 m/sec 刻みで増加させ破壊するまで繰り返し行った。載荷方法には繰り返し載荷と単一載荷があるが、本実験では繰り返し載荷の最大載荷速度における単一載荷と繰り返し載荷ではほぼ同様な実験結果が得られることを確認し、繰り返し載荷を行うこととした。なお、破壊の定義は載荷点の残留変形

表-1 試験体の一覧

試験体の名称	軸方向筋	せん断補強筋	軸方向応力度 (kgf/cm^2)	載荷速度 (m/sec)	最大変形量 (mm)
L-6-0-C40	D6,8本 1.13%	なし	圧縮 40	1~4	156.5
L-6-0-NS			0	1~3	101.5
L-6-0-T40			引張 40	1~3	100.0
L-6-9-T40	D6,8本 1.13%	$\phi 4,9$ 本 0.22%	圧縮 40	1~5	156.0
L-6-9-NS			0	1~3	45.5
L-6-9-T40			引張 40	1~4	115.0
L-10-0-C40	D10,8本 2.54%	なし	圧縮 40	1~4	139.5
L-10-0-NS			0	1~4	85.5
L-10-0-T40			引張 40	1~4	159.0
L-10-9-C40	D10,8本 2.54%	$\phi 4,9$ 本 0.22%	圧縮 40	1~5	158.5
L-10-9-NS			0	1~4	45.0
L-10-9-T40			引張 40	1~4	49.0
S-6-0-C40	D6,8本 1.13%	なし	圧縮 40	1~4	43.5
S-6-0-NS			0	1~3	43.5
S-6-0-T40			引張 40	1~4	149.5
S-6-6-C40	D6,8本 1.13%	$\phi 4,6$ 本 0.22%	圧縮 40	1~4	53.5
S-6-6-NS			0	1~3	24.5
S-6-6-T40			引張 40	1~3	26.5
S-10-0-C40	D10,8本 2.54%	なし	圧縮 40	1~4	44.5
S-10-0-NS			0	1~4	63.0
S-10-0-T40			引張 40	1~4	30.0
S-10-6-C40	D10,8本 2.54%	$\phi 4,6$ 本 0.22%	圧縮 40	1~5	78.0
S-10-6-NS			0	1~4	41.0
S-10-6-T40			引張 40	1~4	24.0

量が L-タイプで 43 mm, S-タイプで 19 mm 程度 (試験体とテーパ部の付け根における変形角: $1/10$ rad) 以上とした。表-1 に最終載荷速度における残留変形量を最大変形量として整理している。

試験体の形状寸法および補強筋の配置位置を図-1 に示す。試験体の底部にはテーパを設け、偏心載荷による局部的破壊を防止した。軸方向筋は D6 または D10 が 8 本で、試験体の全断面に対する補強割合は各々 1.13 %, 2.54 % である。なお、せん断補強筋として $\phi 4$ を 75 mm ピッチにて L-タイプで 9 本, S-タイプで 6 本配置した。せん断補強筋比はコンクリート標準示方書の棒部材に対する構造細目に準拠して丸鋼を用いた場合の最小量である 0.22 % とした。

2.2. 鉄筋およびコンクリートの特性

軸方向筋の D6, D10 は異形鉄筋 SD295A, せん断補強筋 $\phi 4$ は普通鉄線 SWM-B (引張強度 440 N/mm^2 , 降伏強度 300 N/mm^2 以上) を用いた。コンクリートは設計基準強度が 400 kgf/cm^2 であり、実験時の材令 21 日 ~ 37 日に対応する圧縮強度は $344 \sim 427 \text{ kgf/cm}^2$, 平均圧縮強度は 389 kgf/cm^2 である。一方、同材令における弾性係数は $2.36 \times 10^5 \sim 2.77 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、平均弾性係数は $2.56 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ である。なお、粗骨材の最大寸法は 20 mm である。

2.3. 実験方法

C40 試験体の載荷治具の概要を図-2 に示す。衝撃荷重は、直径が 15 cm で重量が 200 kgf の円柱状の鋼製重錘を所定の高さにセットした後、試験体の前面より 15 cm の位置に自由落下させて載荷した。試験体は横置きし、圧縮、引張の軸方向力は軸力管理用のロードセルで管理し油圧ジャッキにより作用させた。C40 は橋梁上部工の死荷重を模擬した圧縮応力を油圧ジャッキにより 40 kgf/cm^2 にホールドし、その状態で横方向衝撃力 (重錘衝撃力) を載荷した。一般に、単一柱形式の橋脚の上部工の死荷重による圧縮応力は $10 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ 程度である。しかしながら本論文では横衝撃荷重載荷時の RC 柱挙動に関する軸方向応力成分の影響の有無を確認するために、実橋脚の場合よりも大きな応力を導入することとした。軸方向力は、試験体全面の横拘束を取り除くために二つの半割の球体からなるピン・スライド機構を装着したセンターホール型のロードセルを介して同型の油圧ジャッキにより加力した。試験体とロードセルの接触面にはテフロンシートを挿入し、グリスを塗布している。本載荷方法は、従来より行われている死荷重を考慮した橋脚模型の水平交番加力試験方法になったものである。フーチングは 4 本のアンカーによって H 形鋼を用いて製作した治具に緊結した。なお、実地震動では橋脚基礎から衝撃的荷重が入力される。しかしながら、本実験では実験装置の制約より静的な靱性率に関する実験と同様に橋脚上端に衝撃力を載荷することとした。本実験法によって波動伝播による応答性状を完全に模擬することは不可能であるが、工学的には作用・反作用の法則から実地震動が作用した場合とほぼ同様の挙動特性が把握できるものと推察される。

本実験での計測項目は、重錘に内蔵した歪ゲージ型のロードセルによる重錘衝撃力、メジャーで測定した載荷点直下における残留変形量の 2 項目である。なお、重錘衝撃力は加速度計によって計測するのが一般的であるが、本実験のように重錘とコンクリート部材が直接衝突する際には加速度波形に高周波成分が多く含

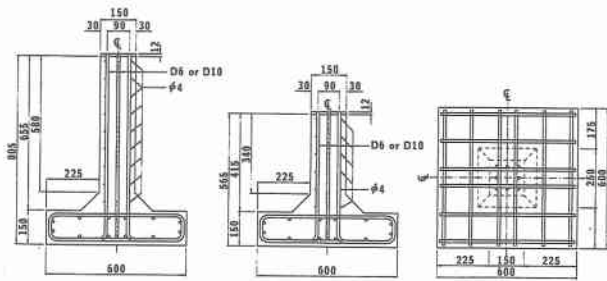


図-1 試験体の形状寸法

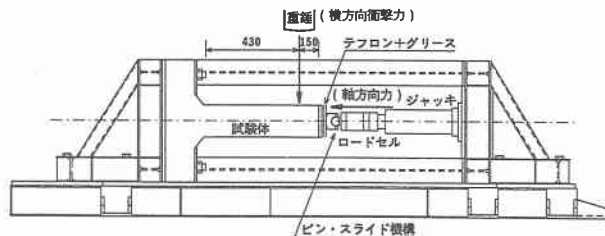


図-2 載荷治具の概要

まれるため、これをフィルターによって処理する必要がある。しかし、フィルターでの処理の仕方では計測値は大きく変化するため、必ずしも信頼性は高くない。本研究では起歪柱型のロードセルを新たに開発して使用した。なお、各波形は $50 \mu\text{sec}/\text{word}$ で A/D 変換を行い、 1.0 msec の移動平均によって数的にフィルター処理を行っている。

3. 実験結果および考察

3.1. 破壊形式

表-2 に静的せん断耐力と曲げ耐力の計算値およびこれらの結果を基に予想される破壊形式と衝撃載荷時における破壊形式を軸圧縮力を加えた試験体を除いて整理した。軸圧縮力を加えた試験体の場合には、その軸圧縮力によって横方向衝撃力作用時において端部断面の軸方向変形が拘束されるために、軸圧縮力が多少なりとも変動する。しかしながらその影響を考慮した静的耐力を一義的に決定することが難しいことより、破壊形式に関する考慮から除外することとした。静的曲げ耐力は、2.2. に示す材料定数を用いコンクリート標準示方書に即してコンクリートお

よび鉄筋の応力-歪曲線をモデル化し、断面分割法によって評価した。断面の分割数はほぼ一定の解が得られる分割数以上とし、 1 mm 刻みの 150 分割とした。また、静的せん断耐力はコンクリート標準示方書に即して算定したが、実験結果との対応を検討するための計算であることから部材係数 $\gamma_b = 1.0$ とした。表より、L-6-0 を除いて静的な耐力から予想される破壊形式と衝撃載荷時の破壊形式は対応することがわかる。なお、L-6-0 はせん断耐力が曲げ耐力を上回るものの、せん断余裕度（せん断耐力 / 曲げ耐力）が 1.20 程度と小さく、衝撃載荷時にせん断破壊を防止するためにはさらに大きなせん断余裕度を確保する必要がある。

3.2. 重錘ロードセル波形の特性

本研究では、衝撃荷重測定用のロードセルを内蔵した重錘を新たに開発し、それを用いて重錘衝撃力を載荷している。図-3 に重錘ロードセル波形の例として、L-タイプの L-10-0-NS と -10-9-NS、および S-タ

表-2 静的耐力および破壊形式

試験体の名称	せん断耐力 (tf) (静的)	曲げ耐力 (tf) (静的)	予想される破壊形式 (静的)	破壊形式 (動的)
L-6-0-NS,T40	1.43	1.19	曲げ	せん断
L-6-9-NS,T40	2.48	1.19	曲げ	曲げ圧縮
L-10-0-NS,T40	1.88	2.29	せん断	せん断
L-10-9-NS,T40	2.93	2.29	曲げ	曲げ圧縮
S-6-0-NS,T40	1.43	2.68	せん断	せん断
S-6-6-NS,T40	2.48	2.68	せん断	せん断
S-10-0-NS,T40	1.88	5.17	せん断	せん断
S-10-6-NS,T40	2.93	5.17	せん断	せん断

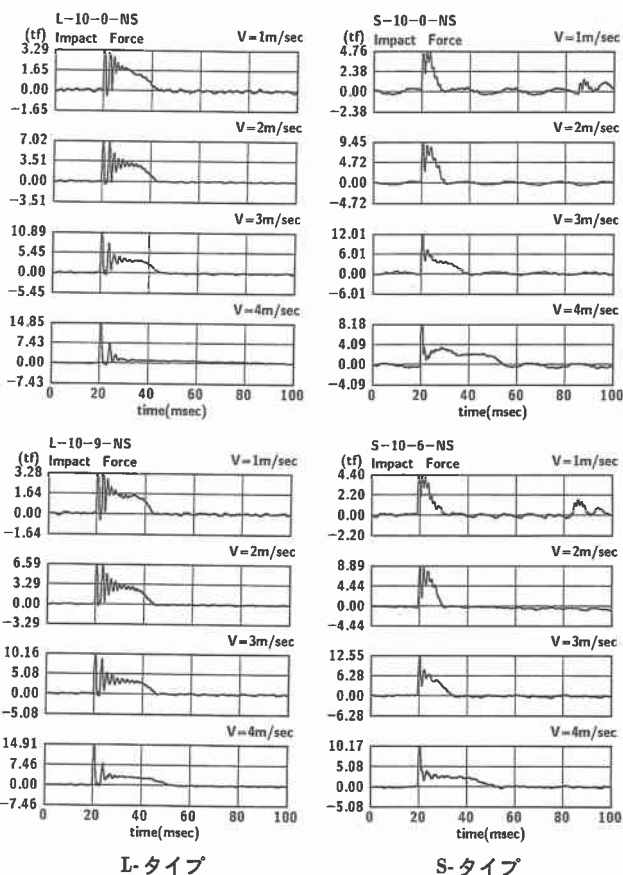
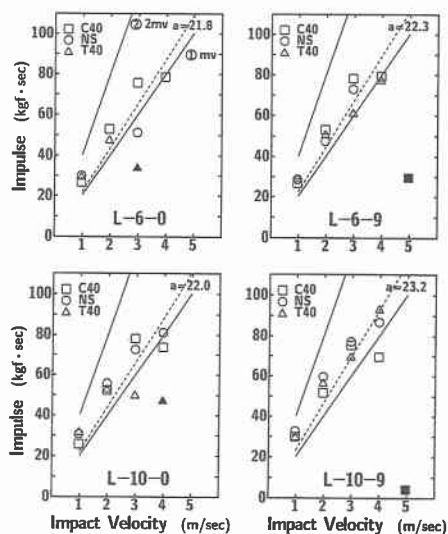


図-3 重錘ロードセル波形

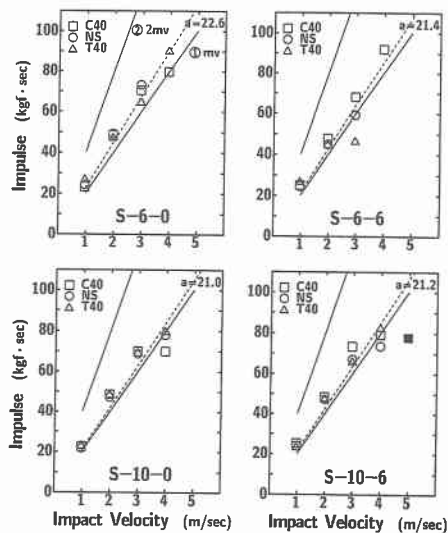
イブの S-10-0-NS と -10-6-NS について比較して示した。L-10-0-NS は、衝撃载荷初期に最大の重錘衝撃力がごく短時間だけ励起された後、最大衝撃力の $1/2 \sim 2/3$ 程度の大きさの衝撃力が徐々に減衰しながら 20 msec 程度継続している。最大重錘衝撃力は载荷速度の増加に対応し大きくなっている。一方、継続する衝撃力波形は、载荷速度の増大とともに最大衝撃力値に対する割合は小さくなり継続時間は長くなる。特に $V = 4 \text{ m/sec}$ 载荷時の継続時間は $V = 1 \text{ m/sec}$ 载荷時の 3 倍程度となっている。L-10-9-NS も载荷初期にごく短時間だけ大きな重錘衝撃力が励起された後、その $1/2$ 程度の大きさの波形が減衰しながら 20 msec 程度継続している。この継続する部分の衝撃力の最大重錘衝撃力に対する割合は、L-10-0-NS と同様に载荷速度が大きくなるに従って小さくなっている。しかしながら最終の载荷速度においては L-10-0-NS に比較して大きな衝撃力値と短かな継続時間を示している。一方、S-10-0-NS は L-タイプと異なり衝撃载荷初期に励起された最大重錘衝撃力が時間とともに直線的に減少し、三角形の衝撃力-時間関係を示している。また、継続時間は载荷速度が大きくなるほど長くなり、 $V = 4 \text{ m/sec}$ 载荷では $V = 1 \text{ m/sec}$ 载荷の 4 倍程度長くなっている。なお、最大重錘衝撃力は L-タイプと異なり、 $V = 3 \text{ m/sec}$ 载荷までは载荷速度に対応して増加するが、 $V = 4 \text{ m/sec}$ 载荷では $V = 3 \text{ m/sec}$ 载荷よりも小さくなっている。S-10-6-NS は S-10-0-NS と同様に衝撃力が時間とともにほぼ直線的に減少し、载荷速度の増加とともに継続時間が長くなっている。また、この試験体も $V = 3 \text{ m/sec}$ 载荷で衝撃力は最大を示し、 $V = 4 \text{ m/sec}$ 载荷では $V = 3 \text{ m/sec}$ 载荷よりも衝撃力は小さくなっている。

3.3. 運動量と力積の関係

図-4 に全試験体の各载荷速度における力積を示した。力積は図-3 に示した重錘衝撃力波形を継続時間について積分して求めた。継続時間は L-10-0-NS の $V = 4 \text{ m/sec}$ 载荷のように重錘衝撃力が 0 になる時間を特定しにくい場合には重錘衝撃力が最大重錘衝撃力の $1/10 \sim 1/20$ レベルに低下した時点とした。なお、図中には実線で重錘の運動量変化に等しい力積を示した。運動量変化は重錘の衝突前の速度 v が衝突後に 0 になる場合 ($m \cdot v$) と衝突後 $-v$ になる場合 ($2m \cdot v$) について簡便に計算した値である。この図から L、S-タイプともにせん断補強筋の有無や軸方向筋量の大小、軸力の種類などに関わらず力積はほぼ $m \cdot v$ と $2m \cdot v$ の間に位置することがわかる。また、力積は载荷速度が小さい場合には载荷速度の増加に対応して線形的に増加するが、破壊近傍の载荷速度では減少して $m \cdot v$ を下回る場合も見うけられる。これは、図-3 に示すように破壊近傍の载荷速度において継続時間が増大するものの衝撃力のレベルが大きく低下することに対応



L-タイプ



S-タイプ

図-4 载荷速度と力積の関係

している。すなわち、 a/d は両者で2倍以上異なるものの力積には大差がなく、また、せん断補強筋の有無や軸方向筋量の大小および軸力の種類にも力積は影響されないことがわかる。

なお、図中には最小2乗法で求めた力積の回帰直線を破線で示した。 a 値は回帰直線の勾配を示す。図中の黒ぬりのデータは他と比べて明らかに破壊が著しく進行した状態のものであり、このデータは除いて回帰直線を決定している。重錘の運動量変化と力積の関係は、重錘の速度が衝突後に0になると仮定し、荷重を F 、荷重の作用継続時間を T 、重錘の質量を m 、載荷速度を v とすれば次式のように示される。

$$F \cdot T = m \times v \text{ (載荷速度)}$$

ここで、 $m = 200/9.8 = 20.4 \text{ (kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m})$ であり、各変数の単位は、 $F \cdot T : \text{kgf} \cdot \text{sec}$ 、 $v : \text{m/sec}$ である。従って図中の a は重錘の質量に対応することとなる。各タイプの平均的な勾配 $\bar{a}$ を求めると、L-、S-タイプでそれぞれ 22.3、21.6 ($\text{kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m}$) となる。これより重錘の速度が完全に0になる場合に比べて、L-タイプでは1.09倍、S-タイプでは1.06倍の力積が励起されていることになる。以上を要約すると、橋脚構造に横方向衝撃力が作用した場合に励起される力積は橋脚の断面、高さに関わらず重錘の速度が衝突後に0になるものとして算定した運動量変化とほぼ一対一に対応する。

3.4. 重錘衝撃力の継続時間

図-5に、最大重錘衝撃力（図中、黒ぬり）と平均重錘衝撃力（図中、白抜き）およびその継続時間を全試験体について示した。なお、L-6-0-NSの $V=2 \text{ m/sec}$ 載荷は計測不良である。ここで、平均重錘衝撃力とは、重錘衝撃力波形を継続時間について積分して求めた力積をその継続時間で除したものである。

L-タイプの最大重錘衝撃力と載荷速度の関係は、せん断補強筋の有無など試験体の種類に関わらずほぼ同様であり、一部の試験体の最大載荷速度において最大重錘衝撃力が大きく低下するものの衝撃力は全般的に載荷速度に比例して直線的に増大している。一方、S-タイプの両者の関係はL-タイプとほぼ同様であるが、L-タイプに比べて破壊近傍の載荷速度における最大重錘衝撃力の低下傾向が顕著である。これは、S-タイプの試験体の破壊が全てせん断破壊であることに

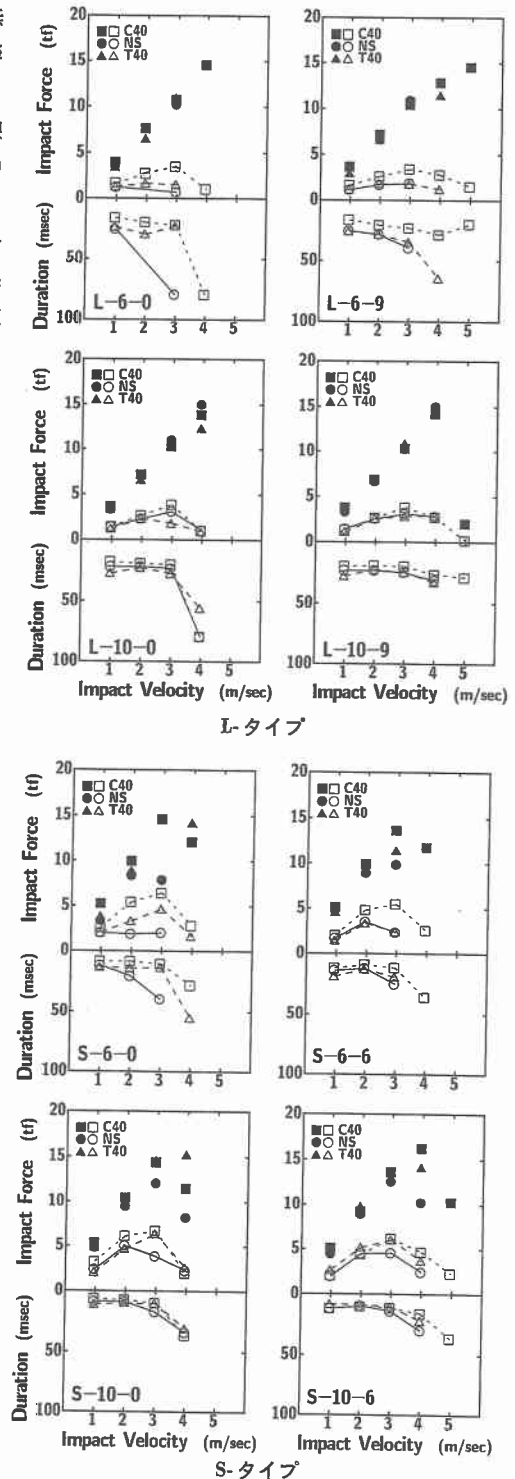


図-5 重錘衝撃力と継続時間の関係

関連するものと考えられる。

L-タイプの平均重錘衝撃力は $V=2 \sim 3$ m/sec 載荷で最大となり、その値は全般的に軸圧縮力が作用している試験体ほど大きく、この傾向は軸方向筋量が少ない場合に顕著である。一方、平均重錘衝撃力の継続時間は明瞭なせん断破壊を示した試験体の最終載荷速度で長くなる傾向にあるが、それ以前の載荷速度では試験体の種類によらず 20 ～ 25 msec 程度のほぼ同等な継続時間を示している。すなわち、L-タイプの継続時間 20 ～ 25 msec は試験体の断面寸法と載荷位置などに対して固有の値と考えられる。

一方、S-タイプの平均重錘衝撃力は L-タイプと同様に $V=2 \sim 3$ m/sec 載荷で最大となり、その値は軸圧縮力を作用している試験体ほど大きい。また、その傾向は軸方向筋量が少ない場合に特に顕著である。S-タイプの平均重錘衝撃力の継続時間は、いずれの試験体もせん断破壊したことから最大載荷速度において一様に増大している。なお、それ以前の載荷速度では試験体の種類によらず 10 msec 程度のほぼ同等の継続時間を示している。すなわち、S-タイプのせん断スパンの 2.2 倍である L-タイプの平均重錘衝撃力の継続時間は S-タイプの 2.0 ～ 2.5 倍程度長いことから、平均重錘衝撃力の継続時間はせん断スパンにほぼ比例することがわかる。一方、平均重錘衝撃力の最大値は、表-2 に示す静的曲げ耐力やせん断耐力を若干上回る程度であることがわかる。以上の様に、 a/d が比較的大きく衝撃載荷によって曲げ破壊する試験体や a/d が比較的小さくせん断破壊する試験体の重錘の運動量変化と力積はほぼ等しいことから、任意の RC 橋脚の衝撃継続時間が特定できれば、設計運動量変化に対して所要の衝撃耐力を有する橋脚を静的曲げ耐力やせん断耐力を求めることで安全側に設計することができる。このとき、衝撃荷重の継続時間は橋脚の断面寸法に影響され、また、 a/d にほぼ比例する。

今後、異なる断面寸法の橋脚模型を製作して実験を行い、衝撃荷重の継続時間を算定する方法を提案する予定である。

4. まとめ

RC 橋脚を模擬した試験体をせん断スパン比 a/d と軸方向筋量およびせん断補強筋量を変化させて製作し、それに衝撃的地震荷重を想定した軸力および横方向衝撃力を載荷する実験を行い、その結果を基に RC 橋脚の耐衝撃設計法の一提案を行う上で重要な、衝撃力の継続時間について考察を行った。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) せん断余裕度（せん断耐力 / 曲げ耐力）が 1.20 程度と小さい場合を除いて、静的耐力の計算値から予想される破壊形式と動的破壊形式は対応する。
- (2) 橋脚に横方向衝撃力が作用した場合に励起される力積はせん断スパン比 a/d に関わらず、ほぼ重錘質量（ m ）と載荷速度（ v ）の積で評価可能である。
- (3) 平均重錘衝撃力の継続時間は断面寸法に影響され、載荷スパン（橋脚高さ）にほぼ比例する。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 三上 浩, 西 弘明, 小山田 欣裕: 横方向衝撃力を受ける RC 橋脚模型の破壊性状と耐衝撃性, 構造工学論文集, Vol.42A, pp.1247-1254, 1996.