

I - 3

RC 短柱模型の横衝撃載荷実験

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

1. はじめに

平成 7 年 1 月に阪神・淡路大地震が発生し、多くの尊い人命および莫大な社会資本を損失した。特に、鉄道、道路橋脚が曲げ・せん断破壊を起こし、上部工が落下するなど、重要なライフラインが壊滅的な損害をこうむった。その結果、コンクリート構造物の耐震性に対して多くの疑念を頂かれることになった。今回の地震波は、従来の海洋型地震と異なり、地震波の主波動が急激に卓越するいわば衝撃的な波形を示した所に特徴がある。

そこで、著者らは既往の研究¹⁾で、RC 橋脚を模擬した試験体に横方向衝撃力を作用させた際の破壊性状と耐衝撃性を検討してきた。あわせて、地震波の方向性を考慮して、圧縮および引張の軸力と横衝撃力が同時に作用する場合を想定した実験も行ってきた。その結果、(1) 比較的せん断スパン比の大きな橋脚模型 ($a/d = 4$ 以上) でもせん断破壊を示しやすく、耐衝撃性はせん断補強を十分に行った試験体で優れている。(2) 軸圧縮力は残留変形量を抑制する一方で破壊を壊滅的にさせる。(3) 曲げ破壊型の試験体では重錘の運動量と力積はほぼ等しいが、せん断破壊型では運動量に比べて力積が小さい。(4) 衝撃耐力は静的曲げ耐力や静的せん断耐力と同程度であると考えerことは安全側である。などが明らかとなった。

本研究では、せん断スパン比がより小さな ($a/d = 2$ 以下) 橋脚模型について着目し、主として衝撃せん断破壊する際の重錘衝撃力特性および運動量と力積の関係などについて検討したのでその結果を報告するものである。

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 12 体である。試験体の名称のうち第 2 項は軸方向筋の呼び径 (D6 または D10) を示し、第 3 項はせん断補強筋の本数 (0 または 6 本) を示し、第 4 項は軸方向の応力度を示す。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。なお、載荷治具の関係から、軸引張応力を 40 kgf/cm^2 に保ちながら横方向衝撃力を加力することは困難なため、T40 は軸引張力を横方向衝撃力載荷前に加力した。

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。衝撃載荷は載荷速度 $v = 1 \text{ m/sec}$ から 1 m/sec 刻みで破壊するまで行った。なお、破壊は載荷点の残留変形量が 19 mm 程度 (変形角: $1/10 \text{ rad}$) 以上になった場合として定義した。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。

2.2 材料特性

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 以上) を

表-1 試験体一覧

試験体の名称	軸方向筋	せん断補強筋	軸方向応力 (kgf/cm^2)	載荷速度 (m/sec)	残留変形量 (mm)
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

Lateral Impact Tests on RC Short Columns
 by Hiroshi MIKAMI, Masashi SATO, Norimitsu KISHI, Takateru OHYAMA

用いた。コンクリートは設計基準強度が 400 kgf/cm^2 であり、実験時の材令における圧縮強度の平均値は 389 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

衝撃試験は室蘭工業大学に設置されている落下衝撃万能試験機を用いて行った。衝撃荷重は、直径が 15 cm で重量が 200 kgf の鋼製の円柱からなる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。

試験機の概要を図-2に示す。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荷重を管理し、油圧ジャッキによって作用させた。

本実験での測定項目は、重錘に内蔵した歪ゲージ型の衝撃荷重測定用に開発した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。また、実験終了後に試験体のひびわれをスケッチし、ひびわれ性状および破壊性状を検討した。

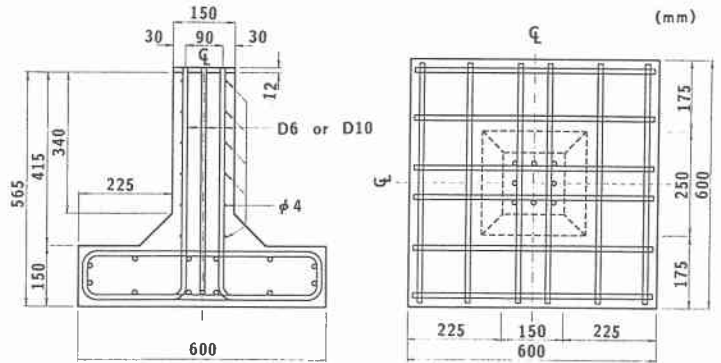


図-1 試験体の形状寸法

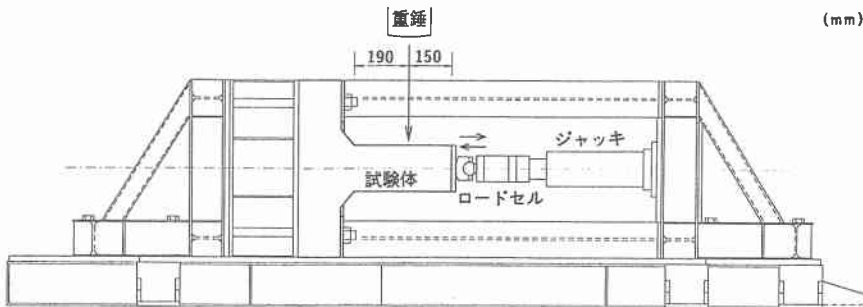


図-2 落下衝撃万能試験機

3. 実験結果

3.1 最大載荷速度からみた耐衝撃性

図-3に全試験体の最大載荷速度を軸方向応力の種類ごとに示した。なお、本図においては表-1に示す残留変形量が 100 mm 程度を示す試験体 (S-6-0-T40、S-10-6-C40) については $v = 1 \text{ m/sec}$ の載荷速度を減じた。これは、他の試験体が平均的に 50 mm 前後の残留変形量を示しているのに対応させて、ほぼ同様な残留変形量のレベルで全試験体の耐衝撃性を比較検討するためである。

S-6-0 と -6 を比較すると、せん断補強筋の有無に関わらず両者同一の載荷速度を示し、軸圧縮力を加えた C40 が NS と T40 よりも $v = 1 \text{ m/sec}$ 載荷速度が大きいがわかる。

一方、S-10-0 と -6 を比較すると、せん断補強筋の有無や軸力の種類に関わらず両者は同様な最大載荷速度を示していることが分かる。このように、せん断スパン比が小さな試験体では、せん断補強筋は最大載荷速度に顕著な影響を与えていない。また、軸力が最大載荷速度に影響を与えるのは S-6 の場合のみであり、軸方向筋量が少ない場合に軸力の影響が出現すると考えられる。

S-6 と S-10 を比較すると、軸力が圧縮力の場合は両者同様であるが、NS および T40 では S-10 が S-6 よりも $v = 1$

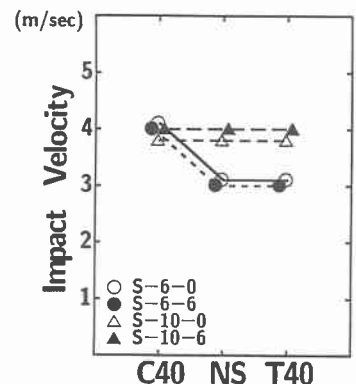


図-3 各試験体の最大載荷速度

m/sec 載荷速度が大きい。すなわち、軸方向筋量は C40 以外の場合には最大載荷速度に大きな影響を与えている。一方、C40 の場合には全試験体の最大載荷速度が $v = 4$ m/sec であることから、せん断スパン比の小さな梁の最大載荷速度には軸圧縮力の有無が極めて大きな影響を与えていることが分かる。

3.2 残留変形特性

図-4 に全試験体の各載荷速度における残留変形量を示す。まず、軸力の残留変形量に与える影響を各試験体で検討する。残留変形量は全般的に軸圧縮力が作用している試験体で小さい。この傾向は特に軸方向筋量が少ない試験体で顕著である。ただし、残留変形量が抑制されて最大載荷速度が増加した S-6-6 と S-10-6 では、最終の残留変形量は極めて大きくなっている。

一方、軸引張力を作用させた試験体と軸力のない試験体は S-6-0 を除いてほぼ同様な残留変形特性を示し、横方向衝撃力を載荷する前に軸引張力によるひびわれが発生していても、それが残留変形に与える影響は少ないと考えられる。

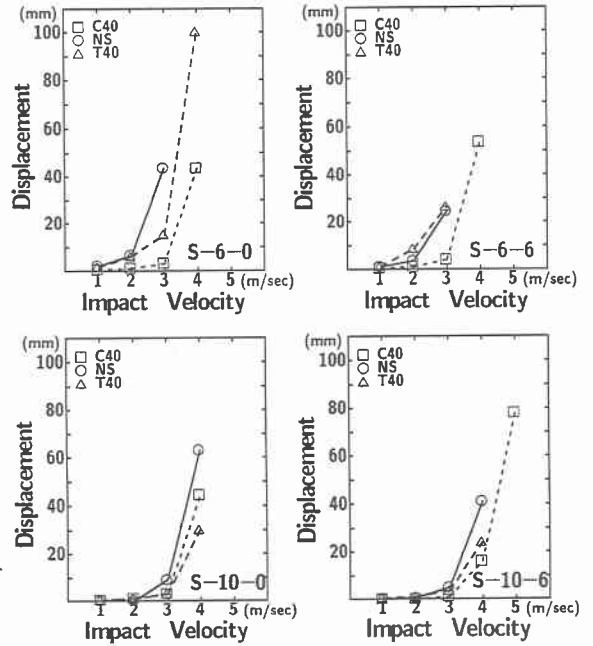


図-4 載荷速度と残留変形量の関係

せん断補強筋の有無で残留変形量を比較すると、S-6 ではせん断補強筋のある方が終局近傍での載荷速度における残留変形は少ないが S-10 では両者に大差がない。一方、軸方向筋量で残留変形量を比較すると、せん断補強筋の有無に関わらず、軸方向筋量が大きい試験体の方が残留変形量が抑制されている。この傾向は特に低載荷速度で顕著である。

以上を要約すると、せん断スパンの小さな試験体の残留変形量を抑制するには本試験体の程度のせん断補強筋量では不十分であり、むしろ低載荷速度における軸方向筋量の影響の方が残留変形量に与える影響は顕著である。また、軸圧縮力は残留変形を全般的に抑制している。

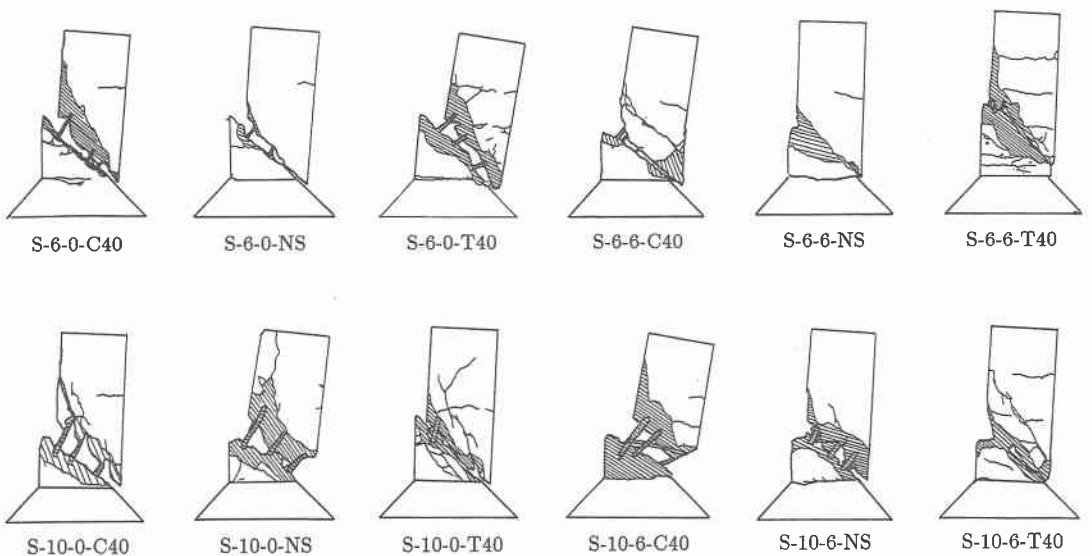


図-5 ひびわれおよび破壊性状

3.3 破壊性状

図-5に全試験体のひびわれおよび破壊性状を示す。全試験体とも斜めひびわれが発生し、明瞭なせん断破壊を示した。特に、軸圧縮力を加えた試験体ではせん断補強筋の有無や軸方向筋量の大小に関わらず、せん断面で分離し大きく開口している。軸力がない試験体や軸引張力を作用させた試験体では、せん断補強筋のある方が開口の量が少なく、せん断補強筋量は開口量に影響を与えている。一方、軸方向筋量で破壊性状を比較すると、S-6とS-10で大差がない。ただし、軸引張力によるひびわれの発生量はS-6よりもS-10の方が少なく、軸方向筋量の影響がうかがえる。

3.4 運動量と力積の関係

図-6に全試験体の各載荷速度における力積を示した。力積は重錘衝撃力波形を継続時間について積分して求めた。図-7に重錘衝撃力波形の一例を示す。継続時間は最大重錘衝撃力の1/20～1/10レベルに低下した時点とした。なお、図中には重錘の運動量に等しい力積を実線で示した。この図から、全試験体で低載荷速度から運動量に比べて小さな力積しか励起されていないことが分かる。

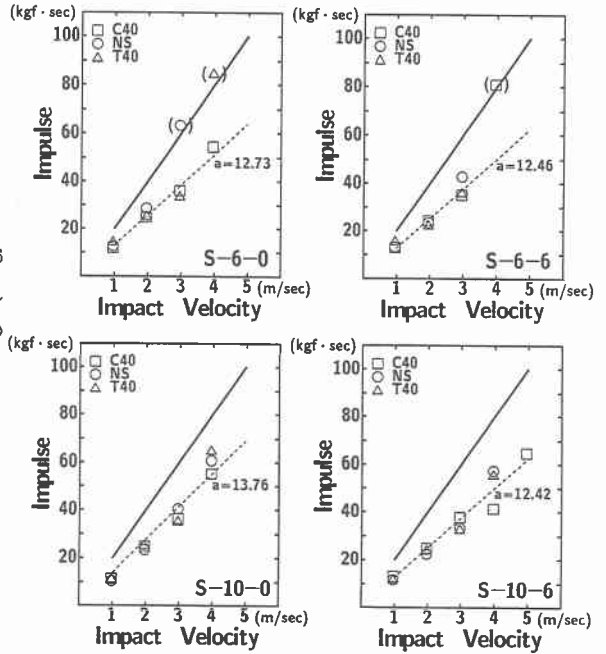


図-6 載荷速度と力積の関係

既往の研究¹⁾では、曲げ型の破壊を示した試験体では、運動量に等しい力積が発生することから、この関係は全試験体がせん断破壊したことに密接に関連するものと考えられる。なお、一部の試験体の終局近傍の載荷速度で運動量と力積がほぼ等しくなっているが(図中())、これは後述する様に継続時間が極めて長くなったためであり、本質的に運動量に等しい力積が生じたものではない。なお、図中

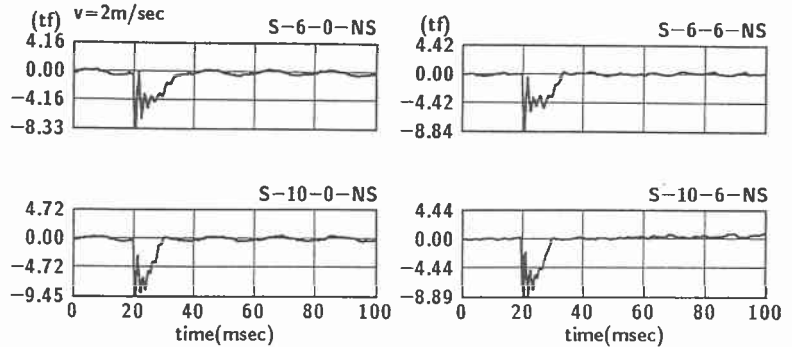


図-7 重錘衝撃力波形

には最小2乗法で求めた力積の回帰直線を示した。せん断補強筋の有無や軸方向筋量の大きさに影響されず、せん断破壊する試験体の力積は下式で求められる。すなわち、曲げ破壊する試験体の勾配 a が $200 \text{ kgf} / 9.8 \text{ m/sec}^2 = 20.4$ であるのに対して、せん断破壊する試験体の平均的な勾配 a は 12.84 であることから、力積は 63% 程度しか生じていないことが分かる。

$$\begin{aligned} \text{力積 (F} \cdot \text{T)} &= a \times v \text{ (載荷速度)} \\ \text{平均 } a &= 12.84 \end{aligned}$$

$$\begin{cases} \text{F} \cdot \text{T} : \text{kgf} \cdot \text{sec} \\ v : \text{m/sec} \\ a : \text{kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m} \end{cases}$$

3.5 耐衝撃設計法の一提案

図-8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。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。

最大重錘衝撃力と載荷速度の関係は、最大載荷速度およびその近傍で最大重錘衝撃力が一定あるいは減少するものの、それ以前の載荷速度では速度に比例してほぼ直線的に最大重錘衝撃力が増大している。その増加傾向は試験体の種類や軸力の種類によらずほぼ一定である。

一方、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方向筋量の多い試験体ほど、軸圧縮力が作用している試験体ほど大きい。平均重錘衝撃力の継続時間は、 $v = 2 \sim 3$ m/sec 程度まではほぼ同様であり、試験体の種類や軸力の種類に関わらず 10 msec 程度である。既往の研究¹⁾から、同一断面を有し、せん断スパンの長い（43 cm）曲げ型の破壊を示した試験体の継続時間が 20 ~ 25 msec 程度であったことから、せん断スパン長（43 cm → 19 cm）が継続時間に大きな影響を与えていることが考えられる。なお、せん断スパン長の変化に対応する継続時間は 9 ~ 11 msec である。

図-9に、軸圧縮力が作用していない梁の平均重錘衝撃力と静的せん断耐力の関係を示した。既往の研究²⁾では、単純梁の終局時残留変形量を純スパンの 1/50 と定義しているため、本研究でもこれを準用して、片持梁の終局時残留変形量をスパンの 1/25（7.6 mm）とすると、これに該当する載荷速度は図-4から、S-6 タイプで $v = 2$ m/sec、S-10 タイプで $v = 3$ m/sec である。この載荷速度における平均重錘衝撃力は、図-9に示すように S-6 タイプでは静的せん断耐力を若干上回る程度である。一方、S-10 タイプでは S-6 タイプよりも静的せん断耐力に比べて平均重錘衝撃力が大きくなっている。すなわち、せん断破壊する試験体でもその動的耐力を高めるには、軸方向筋量を多くすれば良いことがわかる。また、せん断補強筋のない試験体で軸引張力を作用させた場合に平均重錘衝撃力が静的せん断耐力を上回る割合が大きいのが、これはせん断補強筋がない場合には軸引張力によるひびわれがせん断面を形成するのを抑制するためと推察される。衝撃載荷によってせん断破壊する試験体は、その運動量の 63 % 程度の力積が励起され、かつ平均重錘衝撃力の継続時間もほぼ一定であることから、任意の柱高さの

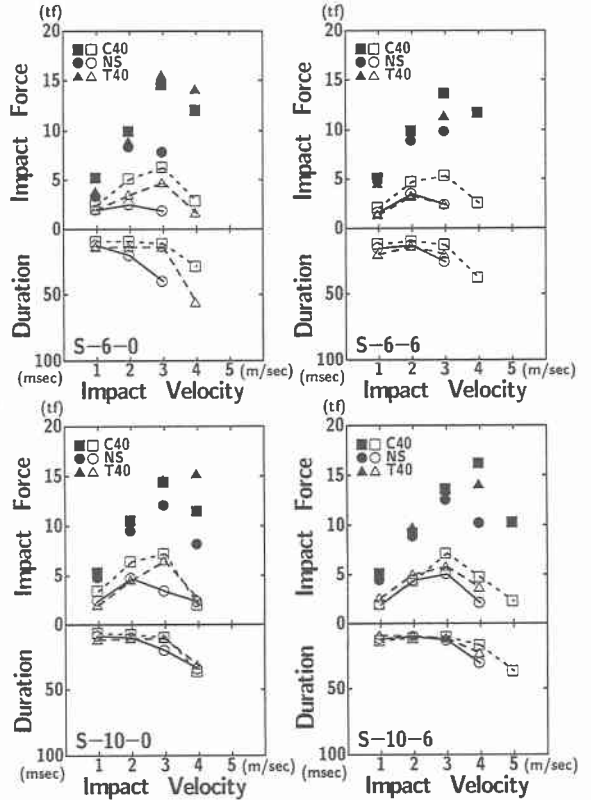


図-8 重錘衝撃力と継続時間の関係

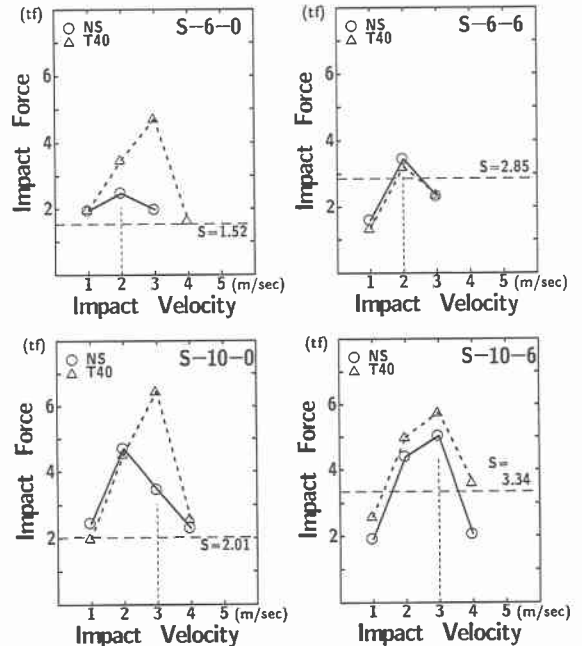


図-9 平均重錘衝撃力と静的せん断耐力の関係

低い橋脚の衝撃継続時間が特定できれば、設計運動量に対して所要の衝撃耐力を有する梁を、静的せん断耐力を求めることで安全側に設計できるものと考えられる。今後は異なる断面寸法の試験体を用いて重錘衝撃力の作用位置を変える等の実験を行い、衝撃継続時間に関するデータを収集する予定である。

4. まとめ

柱高さの低い RC 橋脚を模擬した試験体を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して耐衝撃性を比較検討した。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 最大載荷速度からみた耐衝撃性は、せん断補強筋の有無によらず同一であった。せん断スパン比の小さな試験体の耐衝撃性を向上させるためには、より多くのせん断補強筋量が必要である。
- (2) せん断スパンの小さな試験体の低載荷速度での残留変形量を抑制するためには、軸方向筋量を多くするのが有効である。
- (3) 軸圧縮力は残留変形量を抑制するがこの傾向は特に軸方向筋量が少ない試験体で顕著である。
- (4) せん断破壊する試験体の力積は運動量の 60 % 程度である。この値は、軸方向筋量やせん断補強の有無、軸力の種類には影響されない。
- (5) 平均重錘衝撃力の継続時間はほぼ 10 msec であり、この値も軸方向筋量やせん断補強の有無などに影響されない。
- (6) 動的せん断耐力は静的せん断耐力よりも大きい、その大きさは軸方向筋量や軸力の種類によって変化する。

本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科の松岡建一教授ならびに大学院生の亀石暁君を始めとする構造力学研究室の皆様にご支援を頂きましたことを付記し、感謝の意を表します。

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、1996.
- 2) 松岡建一、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.