

# 論文 RC 柱の耐衝撃挙動に関する基礎的研究

佐藤昌志\*1・岸 徳光\*2・三上 浩\*3・西 弘明\*4

要旨：本論文は、RC柱の耐衝撃挙動を主として帯鉄筋の量およびコンクリート強度の影響に着目して重錘落下衝撃実験によって検討したものである。実験の結果、(1)耐衝撃性に与える影響は、帯鉄筋の量よりもコンクリート強度の方が顕著であり、強度の大きい柱の方が耐衝撃性に優れている。(2)コンクリートの強度と帯鉄筋の本数は柱の損傷状態に大きな影響を与え、強度が高いほど、帯鉄筋の本数が多いほど損傷が軽微になることが分かった。

キーワード：RC 柱、耐衝撃性、落石覆工、帯鉄筋

## 1. はじめに

海岸地域や急峻な山岳地域の多い我国では、土砂崩壊や落石などにより道路網が寸断され、交通車両や人命にも影響を与える事故が少なからず発生している。そのため、これらを防護するために落石覆工が設置されているのが一般的である。従って落石覆工は衝撃的な外力を受ける構造物であり、衝撃力に対する考慮が必要である。最近、落石覆工を始めとする耐衝撃構造物の挙動研究が各研究機関でなされているが、RC 桁、PC 桁あるいは RC スラブを対象とした研究例が多い。一方、上述した落石覆工は景勝地に構築されることが多く、片側面には大きく開口部が設けられている。従って、開口部間の部位は柱として衝撃力に抵抗することになる。しかし、RC 柱の耐衝撃挙動の研究例は極めて少ないのが現状である。本研究は、RC 柱の耐衝撃挙動を主として帯鉄筋の量およびコンクリート強度の影響に着目して検討したものである。なお、RC 柱への衝撃荷重の載荷は重錘の自由落下衝撃によって行っている。また、試験体の形状寸法および配筋量は既存の落石覆工での実績を基にモデル化している。本研究では、特に重錘衝撃力と軸筋並びに帯鉄筋の歪の衝撃応答特性を検討し、実験終了後のひびわれ性状についてもあわせて検討した。

## 2. 実験の概要

実験に用いた試験体は表-1 に示す 18 体である。試験体名のうち、L と H は使用したコンクリートの圧縮強度の大きさを示し (L:低強度、H:高強度)、-A、-B、-C は各々帯鉄筋が 2、3、5 本であることを示している。-A、-B、-C は繰り返し衝

表-1 試験体の一覧

試験体名	載荷速度 (m/sec)	コンクリート強度	帯鉄筋本数	試験体名	載荷速度 (m/sec)	コンクリート強度	帯鉄筋本数
L-A	1~6	低	2	H-A	1~6.8	高	2
L-A1	6	低	2	H-A1	6.8	高	2
L-A2	6.8(2回)	低	2	H-A2	6.8(2回)	高	2
L-B	1~6	低	3	H-B	1~6.8	高	3
L-B1	6	低	3	H-B1	6.8	高	3
L-B2	6.8(2回)	低	3	H-B2	6.8(2回)	高	3
L-C	1~6	低	5	H-C	1~6	高	5
L-C1	6	低	5	H-C1	6	高	5
L-C2	6.8	低	5	H-C2	6.8(2回)	高	5

撃載荷を行ったもので、繰り返し載荷は重錘の載荷速度を  $v = 1 \text{ m/sec}$  から  $1 \text{ m/sec}$  刻みで行った。なお、最大の載荷速度は試験装置の制約から  $v = 6.8 \text{ m/sec}$  である。また、-A1、-B1、-C1 は、繰り返し載

\*1 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室長 (正会員)  
 \*2 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)  
 \*3 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員、工博 (正会員)  
 \*4 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 (正会員)

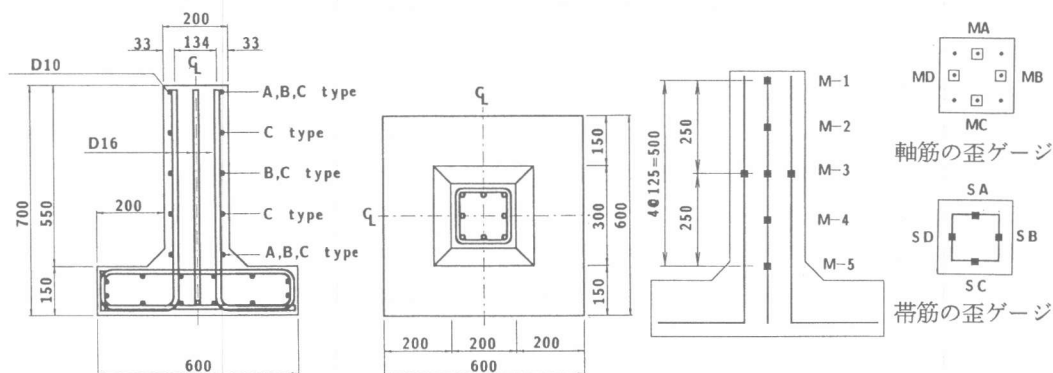
荷の最大載荷速度で 1 回のみ載荷したものを、-A2、-B2、-C2は、繰り返し載荷の最大載荷速度よりさらに大きな載荷速度で破壊と認められるまで繰り返し載荷したものを示す。ただし、最大載荷速度が  $v = 6.8 \text{ m/sec}$  の場合は同じ載荷速度で繰り返し載荷を行った。重錘は鋼製で、重量が 200 kgf、直径が 15 cm であり、所定の高さから柱の軸心に自由落下させている。

試験体を用いたコンクリートの力学的特性を表-2に示す。また、図-1に柱試験体の形状寸法および配筋位置と歪ゲージの位置を示す。柱試験体の底部にはテーバを設け、応力の集中による破壊を防止した。また、柱のフーチング部は 4 本のアンカーによって剛な鋼板と緊結し、上下、左右の移動を拘束するようにした。用いた鉄筋は軸筋が D16 (8本) で補強筋比は約 4%、帯筋は D10 (2,3,5本) である。

本実験での計測項目は容量 1000 G の歪ゲージ型加速度変換器による重錘加速度応答および -A、-B、-C 試験体では軸筋、帯筋に添付した歪ゲージによる歪応答である。また、全ての試験体で実験終了後に柱試験体前面、上面のひびわれをスケッチし、ひびわれ性状を検討した。

表-2 コンクリートの力学的特性

試験体名	実験時 材令(日)	圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	弾性係数 ( $\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ )	ポアソン比
L-A,A1,A2	21	277	2.37	0.218
H-A,A1,A2	21	322	2.38	0.200
L-B,B1,B2	17	314	2.27	0.167
H-B,B1,B2	29	346	2.45	0.211
L-C,C1,C2	17	299	2.33	0.207
H-C,C1,C2	29	328	2.60	0.238



(a) 試験体形状寸法および配筋位置

(b) 歪ゲージ取付け位置

図-1 試験体の形状寸法等

### 3. 実験結果および考察

2.で述べたように試験体数は全 18 体であるが、-A、-B、-Cシリーズの 6 体で繰り返し載荷を行い、補強筋歪のデータを計測している。従って、以降の考察は主としてこの 6 体に対して行い、ひびわれ性状についてのみ全試験体の考察を行うこととする。

#### 3.1 耐衝撃性

表-1に各柱の最大載荷速度をあわせて示した。-A1、-B1、-C1のシリーズ以外は破壊まで載荷を行なっている。なお、本実験では目視によって以下の項目に着目して破壊を定義した。

- ① 柱上面(載荷面)に重錘が 5 mm 程度貫没し、損傷が激しくなった状態。
- ② 柱側面に顕著なひびわれが発生し、ひびわれを境に段差が生じた状態。

表-1に示す繰り返し載荷試験体の最大載荷速度を基に各柱の耐衝撃性を比較する。コンクリート強度で比較すると、帯筋 5 本の柱を除いて強度の高い柱の最大載荷速度が大きい。一方、帯筋の本数で比較

すると、コンクリート強度が低い柱では帯筋の本数に関わらず  $v = 6 \text{ m/sec}$  載荷で破壊しているのに対して、強度の高い柱では帯筋数が 5 本のものが最も載荷速度が低い。これより、最大載荷速度に与える影響は帯筋の本数よりもコンクリート強度の方が大きいことが分かる。なお、本実験では上述したように目視で破壊を定義しているため破壊の定義が必ずしも定量的ではない。従って、後述する損傷の程度をあわせて考慮すると、H-C も  $v = 6.8 \text{ m/sec}$  載荷は可能であったものと思われる、強度の高いコンクリートを用いたすべての柱で  $v = 6.8 \text{ m/sec}$  が最終載荷速度となる。

また、-A2、-B2、-C2 シリーズの最大載荷速度からは、L-C2 を除いていずれの柱も単一載荷における最大載荷速度は  $v = 6.8 \text{ m/sec}$  以上であることが分かるが、装置の制約から正確な最大載荷速度を確認することはできなかった。

### 3.2 載荷速度と重錘衝撃力の関係

図-2 (a)、(b) にコンクリート強度ごとに載荷速度と最大重錘加速度に重錘質量を乗じて求まる重錘衝撃力の関係を示した。

(a) 図より、コンクリート強度が低い柱では、 $v = 4 \text{ m/sec}$  載荷までは帯筋の本数に関わらずいずれも同程度の衝撃力を示し、載荷速度の増加に対応して重錘衝撃力が線形的に増加していることが分かる。しかし、 $v = 5 \text{ m/sec}$  載荷以後は L-B を除いて重錘衝撃力はほぼ一定となっている。なお、衝撃力は一般的に帯筋の本数が最も多い L-C で大きい傾向にある。

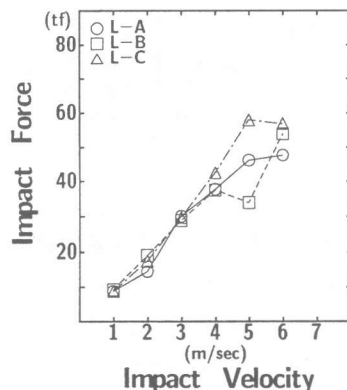
(b) 図より、コンクリート強度が高い柱では、帯筋の本数が 5 本の柱は  $v = 4 \text{ m/sec}$  載荷で衝撃力が急増し、 $v = 4 \text{ m/sec}$  以降はほぼ同程度か減少する傾向にあることが分かる。一方、帯筋が 2 本、3 本の柱は  $v = 6 \text{ m/sec}$  載荷まで線形的に衝撃力が増加して、 $v = 6.8 \text{ m/sec}$  載荷では衝撃力が減少している。

コンクリート強度で比較すると、衝撃力は一般的に両者でほぼ同等であることが分かる。しかし、帯筋が 2 本、3 本の柱では、コンクリート強度が高いほど衝撃力が線形的に増加する限界の載荷速度は大きくなるが、帯筋が 5 本の場合には逆に小さな載荷速度で衝撃力の上限を示している。これは、コンクリート強度が大きく帯筋の本数が多い柱ほど剛性が高いために衝撃力が大きくなりやすく、さらに衝撃力が大きいことに対応して柱頭部の損傷が激しくなるため、衝撃力が一定あるいは減少する載荷速度が低くなるものと考えられる。

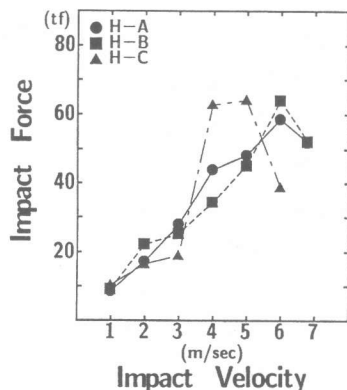
### 3.3 載荷速度と軸筋の歪分布性状の関係

図-3 (a)、(b)、(c) に強度の低いコンクリートを用いた柱の軸筋の歪分布を載荷速度ごとに示した。(a)、(b)、(c) は、各々帯筋本数が 2、3、5 本の柱に関する実測結果である。図より、載荷速度が大きくなるに従って測点 M-2、3 周辺の歪が他に比べて大きくなり、上に凸の歪分布を示すことが分かる。また、帯筋本数が少ない柱ほど大きな載荷速度での M-2、3 周辺の歪の増加が顕著であり、帯筋が 5 本の柱では 2、3 本に比べて載荷速度の増大に対応して比例的に全測定点の歪が増加している。

このように、強度の低いコンクリートを用いた柱では、帯筋本数が多い柱ほど軸方向の全域にほぼ均等に歪が発生し、安定した荷重分担性状を示している。ただし、載荷速度が  $v = 6 \text{ m/sec}$  では、いずれの



(a) 低コンクリート強度



(b) 高コンクリート強度

図-2 載荷速度と重錘衝撃力の関係

柱も局部的に大きな軸圧縮力を受けている。なお、強度の高いコンクリートを用いた柱で同様な比較を行った結果、帯筋本数の違いによる軸筋の歪分布性状には大差がなかった。すなわち、帯筋本数が軸方向の応力分担性状に与える影響はコンクリート強度が低い柱でより顕著に出現している。

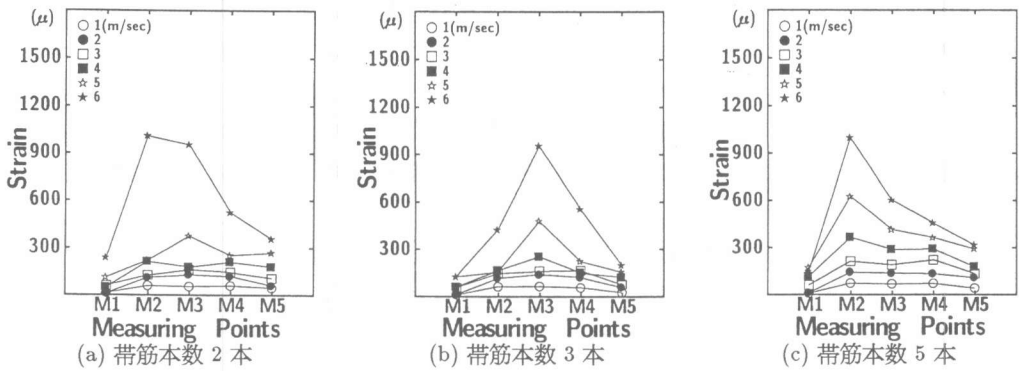


図-3 荷重速度と軸筋の歪分布性状の関係

### 3.4 荷重速度と帯筋の歪の関係

図-4 (a), (b) に荷重速度と最上段の帯筋の歪の関係をコンクリート強度ごとに示した。これらの図から、帯筋の本数やコンクリート強度に関わらず、 $v = 3 \text{ m/sec}$  荷重から最上段の帯筋の歪は増加し始め、 $v = 4 \sim 5 \text{ m/sec}$  荷重でほぼ降伏点に達していることが分かる。これは、柱頭部の損傷の程度に与える帯筋の本数やコンクリート強度の影響が顕著でないことを示しており、柱頭部の損傷が局所的であることを示している。

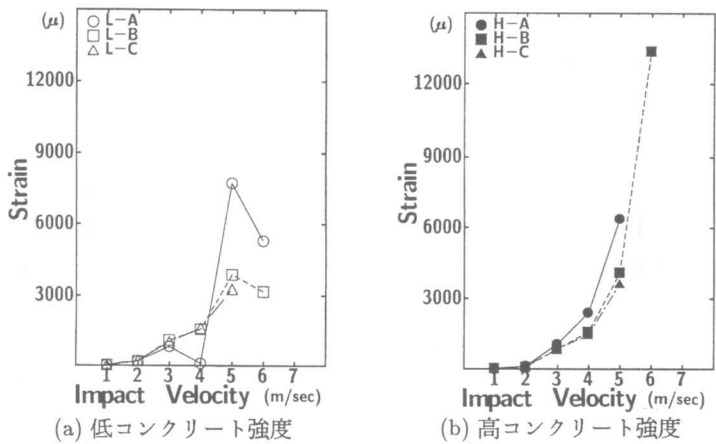


図-4 荷重速度と最上段帯筋歪の関係

図-5 (a), (b) は荷重速度と柱の中央部に配置した帯筋の歪の関係をコンクリート強度ごとに示したものである。コンクリート強度が低い柱では  $v = 3 \text{ m/sec}$  荷重から歪が増加する傾向にあり、コンクリート強度が高い柱では  $v = 4 \text{ m/sec}$

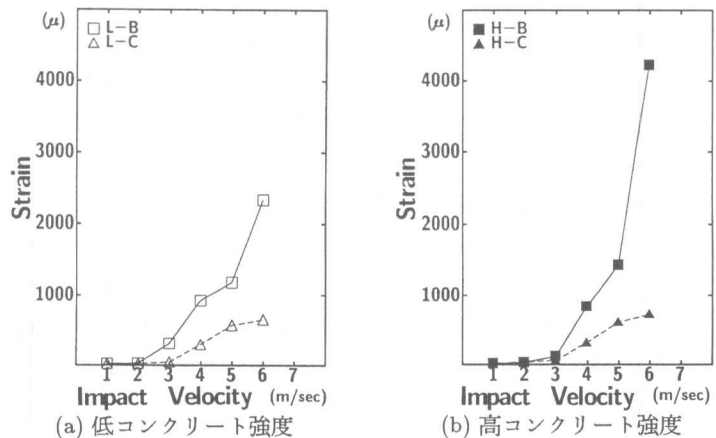


図-5 荷重速度と中央部帯筋歪の関係

載荷から歪が急増している。しかし、それ以後の載荷速度における歪はBタイプの  $v = 6 \text{ m/sec}$  載荷を除いてコンクリート強度にほとんど影響されていない。また、帯筋が3本と5本の場合について比較すると、5本の柱の歪は3本の柱の歪の半分以下と小さく、柱の中央部での帯筋の歪は帯筋本数に大きく影響されていることが分かる。

### 3.5 ひびわれ性状

図-6に全試験体の実験終了後のひびわれ性状を柱の前面および上面について示した。強度の低いコンクリートを用いた柱の帯筋本数でひびわれ性状を比較すると、繰返し載荷の-A、-B、-Cシリーズでは同じ最大載荷速度にも関わらず帯筋本数の多い柱ほど損傷が軽微になる傾向にある。この傾向は特に上面のひびわれ性状で明瞭に示されている。しかし、-A1、-B1、-C1では載荷速度が同一であり、帯筋本数によるひびわれ性状の差は顕著ではない。

一方、-A2、-B2、-C2ではL-C2のみが  $v = 6.8 \text{ m/sec}$  の単一載荷のため他と比べて損傷が軽微であるが、帯筋本数の差はひびわれ性状に顕著な影響を与えていない。ひびわれの発生状況を見るといずれの試験体も柱の軸心に沿って柱上部から下部へ直線的に進展するひびわれと柱の端面に向かって進展する斜めひびわれおよび柱頭部で水平、鉛直方向に発生するひびわれから成っている。

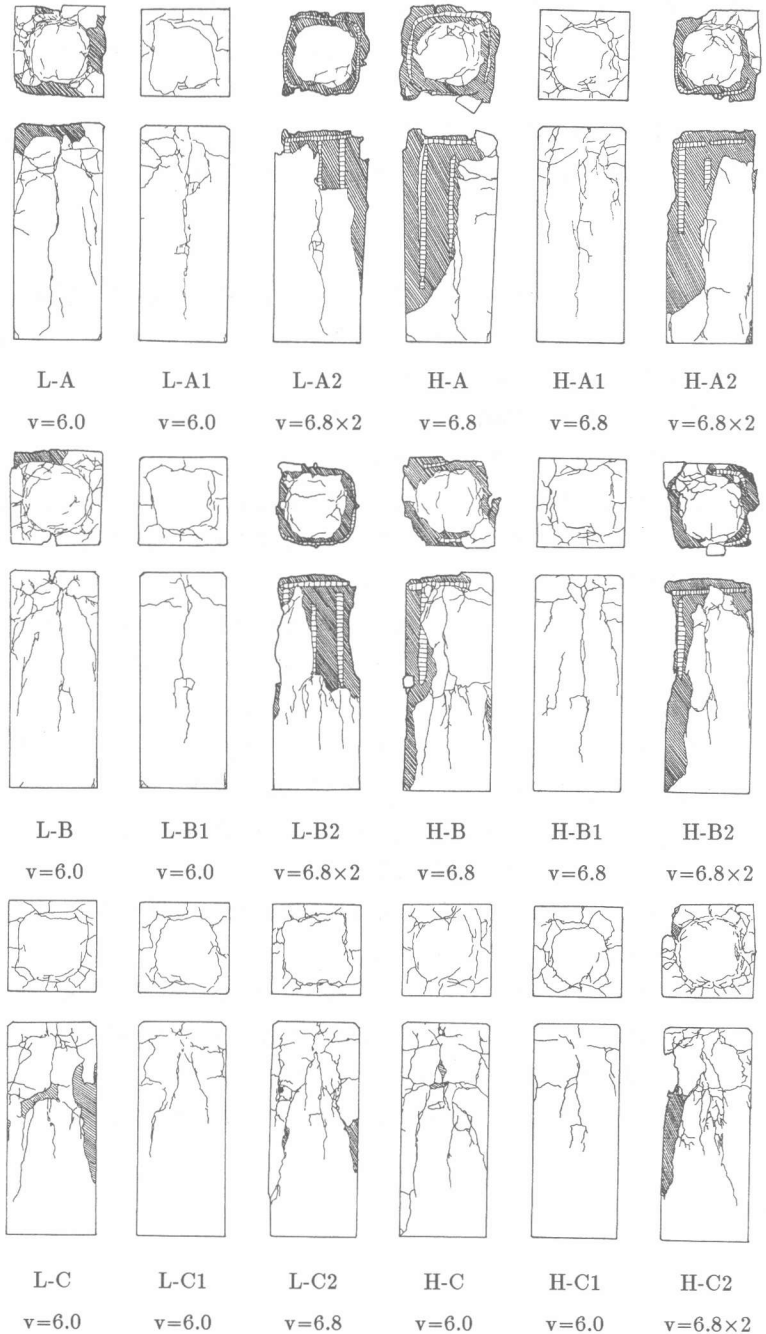


図-6 ひびわれ性状

一方、強度の高いコンクリートを用いた柱では、-C、-C1 は他の柱と最大載荷速度が異なるため同一に論ずることはできないが、最大載荷速度の等しい試験体と比較すると、帯筋の本数が多い柱ほど損傷が軽微であることが分かる。なお、上面の損傷の程度と前面の損傷の程度は対応しており、発生するひびわれの性状はコンクリートの強度に関わらずほぼ同様である。載荷速度が同じく帯筋が 5 本(-C および -C1) の柱でコンクリート強度の影響を比較すると、強度の大きな柱では柱端面での損傷が軽微であり、損傷を軽微にするにはコンクリート強度が高い方が良く考えられる。

また、同じ最大載荷速度で繰り返し載荷と単一載荷を行った試験体の損傷程度を比較すると、いずれの試験体も繰り返し載荷の方が損傷が激しく、特に高強度で帯筋本数の少ないもの程損傷が激しいようである。本実験では載荷面に大きな損傷が生じ、そこからひびわれが大きく進展している。そのため、載荷方法がひびわれ性状に大きな影響を与えたものと考えられる。

#### 4. まとめ

帯筋の本数およびコンクリートの強度を変えて RC 柱を製作し、重錘の自由落下衝撃実験を行って耐衝撃挙動を検討した。また、載荷方法の耐衝撃性およびひびわれ性状に与える影響もあわせて検討した。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(耐衝撃性)に与える影響は、帯筋の本数よりもコンクリート強度の方が顕著であり、強度が大きい柱の方が最大載荷速度が大きい。
- (2) 載荷速度が比較的小さい領域での重錘衝撃力は、コンクリート強度が高く帯筋本数が多い柱で大きくなる傾向にある。そのため、比較的小さな載荷速度で重錘衝撃力は上限値を示し、以後の載荷速度では重錘衝撃力がほぼ一定かあるいは減少する。
- (3) 軸筋の軸方向歪分布は、帯筋が 5 本で強度の低いコンクリートを用いた柱でより広域的に均等化され、荷重分担を軸方向に均一化させるには帯筋の本数が多い方が良い。ただし、コンクリートの強度が高い柱ではこの傾向は顕著には表れていない。
- (4) 柱上部の帯筋の歪はコンクリートの強度や帯筋の本数には顕著に影響されない。しかし、柱中央部に配置された帯筋の歪は帯筋本数の影響を顕著に受け、5 本の柱の歪は 3 本の柱の半分以下と小さい。また、コンクリートの強度は載荷速度が低い場合には中央部の帯筋の歪の発生状況に影響を与えるが、載荷速度が大きくなると顕著な影響を与えない。
- (5) コンクリートの強度と帯筋の本数は柱の損傷状態に影響を与え、強度が高いほど、帯筋の本数が多いほど損傷が軽微になる傾向にある。
- (6) 載荷方法は柱の耐衝撃性とひびわれ性状に大きな影響を与え、単一載荷の方が繰り返し載荷に比べて最大載荷速度が大きく、同一載荷速度で比較すると損傷が軽微になる傾向にある。

最後に、本研究を行うに当たり室蘭工業大学建設システム工学科の大学院生大山高輝君を始めとする構造力学研究室の皆様にご支援頂いたことを記して感謝の意を表します。