

I - 9

軸方向衝撃力を受ける帯鉄筋柱の耐衝撃挙動

室蘭工業大学 正員 松岡 健一
 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 大山 高輝

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。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。しかし、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6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は各々帯筋が2本、3本、5本であることを示している。衝撃荷重の載荷は、重錘の載荷速度を $v = 1 \text{ m/sec}$ から 1 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。

重錘は重量が 200 kgf で直径が 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。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パを設け、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 $D16$ で帯筋は $D10$ である。

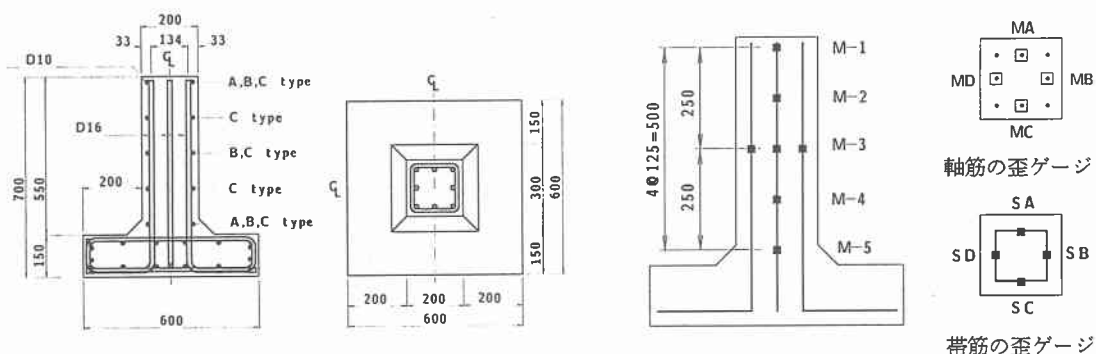
本実験での計測項目は容量 1000 G の歪ゲージ型加速度変換器による重錘加速度応答および軸筋、帯筋に添付した歪ゲージによる歪応答である。また、実験終了後に柱試験体前面、上面のひびわれをスケッチし、ひびわれ性状を検討した。

表-1 試験体一覧

試験体名	載荷速度 (m/sec)	コンクリート 強度	帯筋本数
L-A	1～6	低	2
H-A	1～6.8	高	2
L-B	1～6	低	3
H-B	1～6.8	高	3
L-C	1～6	低	5
H-C	1～6	高	5

表-2 コンクリートの力学特性

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



(a) 試験体形状寸法および配筋位置

(b) 歪ゲージ取付位置

図-1 試験体の形状寸法等

3. 実験結果および考察

3.1 耐衝撃性

表-1 に各柱の最大載荷速度を示した。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。

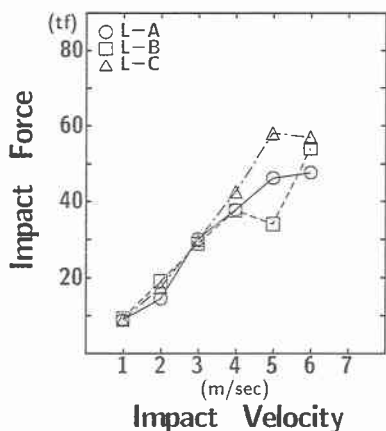
表-1 に示す最大載荷速度を基に各柱の耐衝撃性を比較する。コンクリート強度で比較すると、帯筋 5 本の柱を除いて強度の高い柱の最大載荷速度が大きい。一方、帯筋の本数で比較すると、コンクリート強度が低い柱では帯筋の本数に関わらず $v = 6 \text{ m/sec}$ 載荷で破壊しているのに対して、強度の高い柱では帯筋数が 5 本のものが最も載荷速度が低い。これより、最大載荷速度に与える影響は帯筋の本数よりもコンクリート強度の方が大きいことが分かる。なお、本実験では上述したように目視で破壊を定義しているため破壊の定義が必ずしも定量的ではない。従って、後述する損傷の程度を合わせて考慮すると、H-C も $v = 6.8 \text{ m/sec}$ 載荷は可能であったものと思われ、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。

3.2 載荷速度と重錘衝撃力の関係

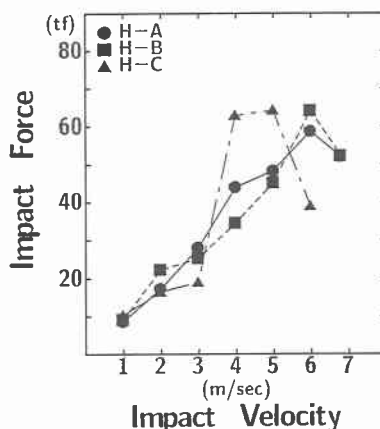
図-2 (a)、(b) にコンクリート強度毎に載荷速度と重錘衝撃力の関係を示した。(a) 図より、コンクリート強度が低い柱では、 $v = 4 \text{ m/sec}$ 載荷までは帯筋の本数に関わらずいずれも同程度の衝撃力を示し、載荷速度の増加に対応して重錘衝撃力が線形的に増加していることが分かる。しかし、 $v = 5 \text{ m/sec}$ 載荷以後は L-B を除いて、重錘衝撃力はほぼ一定となっている。図より衝撃力は全般的に帯筋の本数が最も多い L-C で大きい傾向にある。

(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、 $v = 4 \text{ m/sec}$ 以降はほぼ同程度が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いる。

コンクリート強度で比較すると、衝撃力は両者でほぼ同等であることが分かる。すなわち、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と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。



(a) 低コンクリート強度



(b) 高コンクリート強度

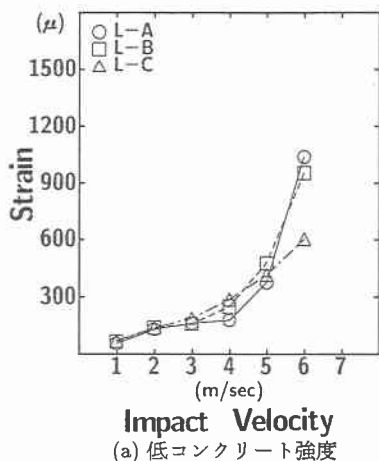
図-2 載荷速度と重錘衝撃力の関係

3.3 載荷速度と軸筋中央部歪の関係

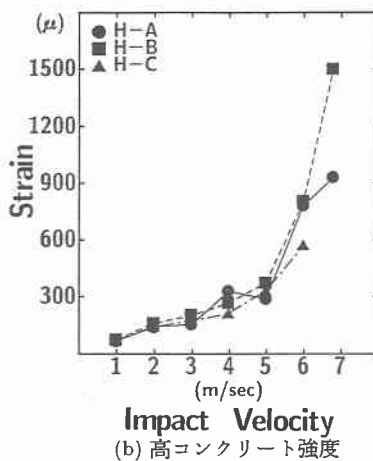
図-3 (a)、(b) に、コンクリート強度ごとに各柱の載荷速度と軸筋中央部歪 (測点 M-3) の関係を示す。(a) 図より、コンクリート強度が低い柱では、 $v = 4$ m/sec 載荷までは全ての柱で同様に線形的に歪が増大し、 $v = 5$ m/sec で若干増加し、 $v = 6$ m/sec では歪が急増していることが分かる。これは、重錘衝撃力が一定あるいは減少する載荷速度で柱頭部の損傷が大きくなり、軸筋が大きな軸圧縮力を負担するためと考えられる。また、帯筋が 2 本と 3 本では同程度の歪レベルであるが、 $v = 6$ m/sec 載荷では帯筋 5 本の柱の歪は他の柱の 60 % 程度と小さくなっている。これは帯筋の横拘束効果によって柱の軸方向の応力分担性状が均等化されたためと考えられる。

(b) 図より、コンクリート強度が高い柱では、 $v = 5$ m/sec 載荷までは線形的に歪が増加し、以後の載荷速度で歪が急増していることが分かる。すなわち、軸筋中央部の歪が急増する載荷速度は強度の高いコンクリートを用いた柱で大きく、この載荷速度は強度の高いコンクリートを用いた柱の柱頭部の損傷が激しくなる載荷速度に対応している。また、帯筋が 5 本の柱では発生する歪が他の柱よりも小さい。

コンクリート強度で歪を比較すると、 $v = 4$ m/sec 載荷まではほぼ同じ歪レベルであるが、 $v = 5 \sim 6$ m/sec での歪は強度の高いコンクリートを用いた柱の方が小さいことが分かる。この様に、コンクリート強度が高い場合には軸方向応力の分担は均等化される傾向にある。またこのような傾向は帯筋の本数が多い場合にも示される。



(a) 低コンクリート強度



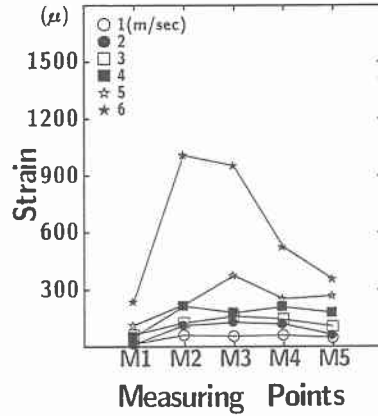
(b) 高コンクリート強度

図-3 載荷速度と軸筋中央部歪の関係

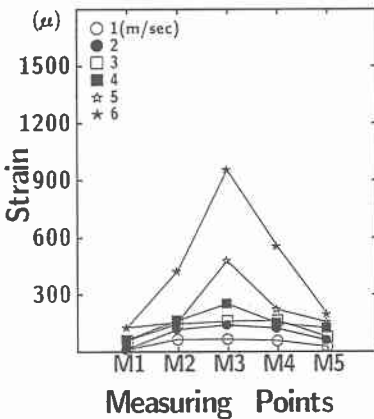
3.4 載荷速度と軸筋の歪分布性状の関係

図-4 (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 3、5 本の柱では、2 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。

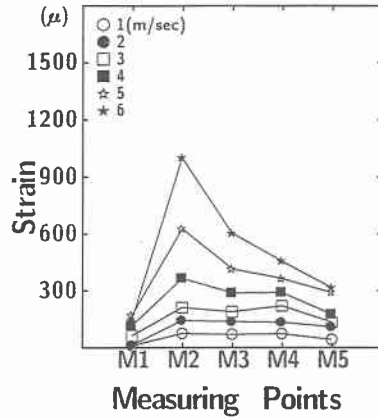
このように、強度の低いコンクリートを用いた柱では、帯筋本数が多い柱ほど軸方向の全域にほぼ均等に歪が発生し、安定した荷重分担性状を示している。ただし、載荷速度が $v = 6 \text{ m/sec}$ では、いずれの柱も局部的に大きな軸圧縮力を受けている。なお、強度の高いコンクリートを用いた柱で同様な比較を行った結果、帯筋本数の違いによる軸筋の歪分布性状には大差がなかった。すなわち、帯筋本数が軸方向の応力分担性状に与える影響はコンクリート強度が低い柱でより顕著に出現しているようである。



(a) 帯筋本数 2 本



(b) 帯筋本数 3 本



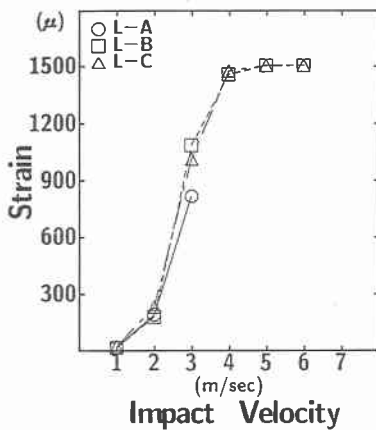
(c) 帯筋本数 5 本

図-4 載荷速度と軸筋の歪分布性状の関係

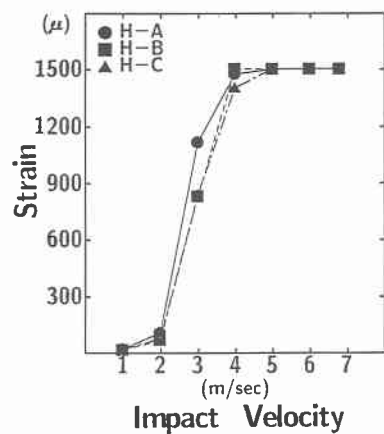
3.5 載荷速度と帯筋の歪の関係

図-5 (a) ~ (d) に載荷速度と帯筋の歪の関係を示した。(a)、(b) 図は最上段の帯筋の歪をコンクリート強度ごとに示したものである。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、 $v = 3 \text{ m/sec}$ 載荷から最上段の帯筋の歪は急増し、 $v = 4 \text{ m/sec}$ 載荷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。

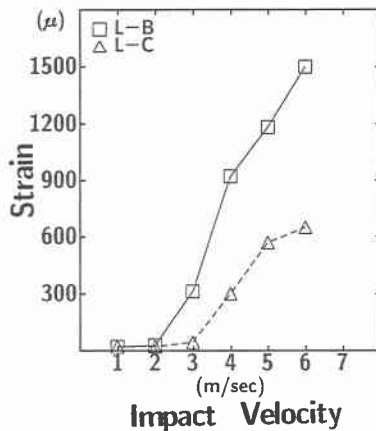
(c)、(d) 図は柱の中央部に配置した帯筋の歪をコンクリート強度ごとに示したものである。コンクリート強度が低い柱では $v = 3 \text{ m/sec}$ 載荷から歪が増加する傾向にあり、コンクリート強度が高い柱では $v = 4 \text{ m/sec}$ 載荷から歪が急増している。しかし、それ以後の載荷速度における歪はコンクリート強度にほとんど影響されていない。また、帯筋が 3 本と 5 本の場合について比較すると、5 本の柱の歪は 3 本の半分以下と小さく、柱の中央部での帯筋の歪は帯筋本数に大きく影響されていることが分かる。



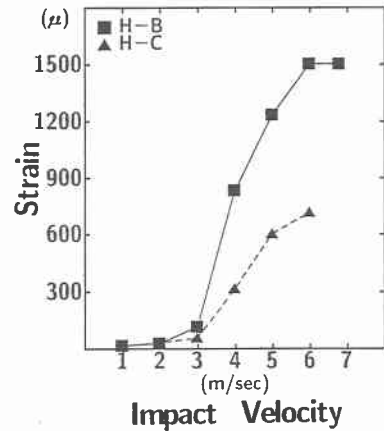
(a) 上段の帯筋の歪 (低コンクリート強度)



(b) 上段の帯筋の歪 (高コンクリート強度)



(c) 中央部帯筋の歪 (低コンクリート強度)



(d) 中央部帯筋の歪 (高コンクリート強度)

図-5 載荷速度と帯筋の歪の関係

3.6 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、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。ひびわれは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。

一方、強度の高いコンクリートを用いた柱で帯筋が2本、3本の柱は帯筋5本の柱に比べて最大載荷速度が大きいため、コンクリートが一部剥落するなど損傷が激しくなっている。なお、上面の損傷の程度と前面の損傷の程度が対応しており、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いと考えられる。

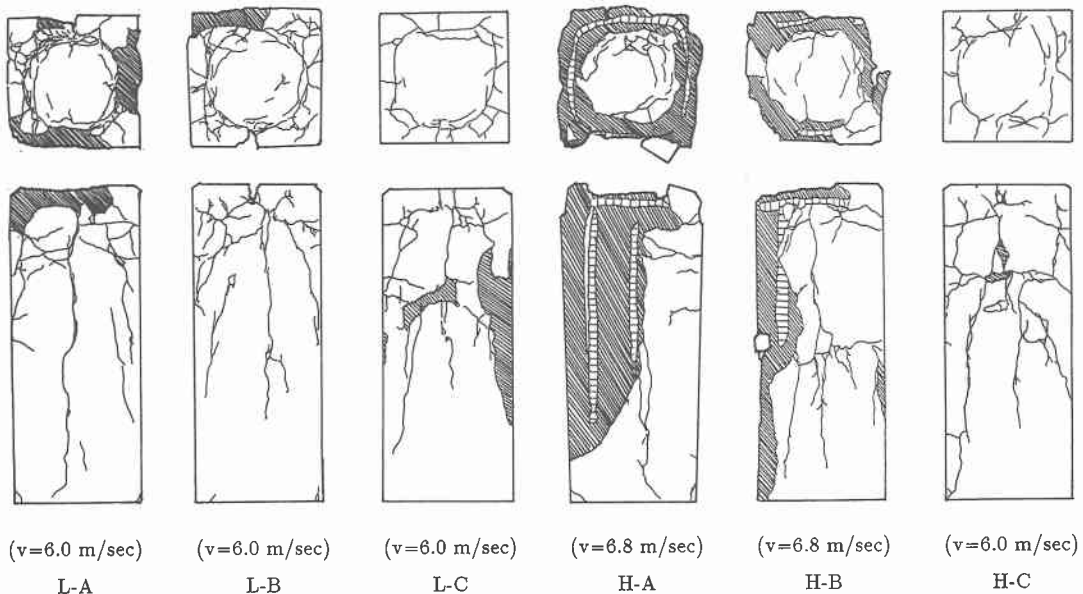


図-6 ひびわれ性状

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。本実験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を示し、以後の載荷速度では重錘衝撃力がほぼ一定あるいは減少する。
- (3) 軸筋中央部の歪は、大きな載荷速度ではコンクリート強度の影響を受けるため、コンクリート強度の高い柱の方が歪は小さい。また、帯筋が2本と3本では歪レベルに大差はないが、帯筋が5本では歪が小さくなる傾向にある。
- (4) 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。
- (5) 柱上部の帯筋の歪分布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受け、5本の柱では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。
- (6) 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。

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。