

# 論文 ロッキング振動による T 型 RC 橋脚の破壊性状に及ぼす鉄筋量の影響

山本 洋平\*1・水口 裕之\*2・横井 克則\*3・島 弘\*4

要旨：過去の著者らの研究で明らかになったロッキング振動が発生する高さの橋脚を対象として、段落し位置、主鉄筋比、帯鉄筋比などの鉄筋量を変化させた橋脚模型を用いて動的載荷実験を行った。この結果、段落しをした場合、載荷方向によって橋脚の破壊した位置が異なった。これはロッキング振動による回転モーメントの影響であることを示した。しかし上部でまたロッキング振動による回転モーメントが大きくなる主鉄筋比および帯鉄筋比を確認した。

キーワード：T 型 RC 橋脚、ロッキング振動、段落し、鉄筋比、回転モーメント

## 1. はじめに

RC 橋脚の耐震性に関する研究は、現在までに行われている。しかしその多くは、ジャッキを用いた静的および準動的載荷実験で行われており、振動台を用いた動的載荷実験はあまり行われていない。静的載荷実験では、橋脚柱頭部がジャッキで固定されているために、実際の地震時における複雑な挙動を模擬できない。また、図-1 に示すような T 型 RC 橋脚などの 1 質点 2 自由度系の構造物では、地震力が橋軸直角方向に作用したとき、ある振動数でロッキング振動が生じる。過去の研究において著者らは、このロッキング振動によって橋脚柱頭部に回転モーメントが発生することで主鉄筋の段落しが危険である可能性があることを示した<sup>[1]</sup>。また、橋脚高さを変化させて実験を行ったが、橋脚の条件による検討はなされていなかった。

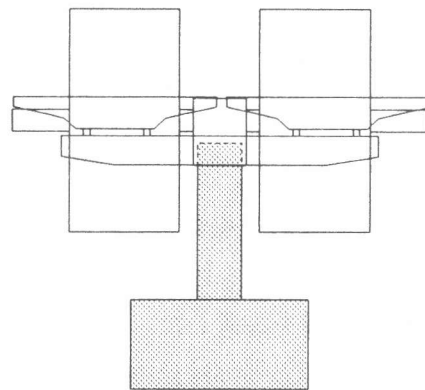


図-1 T 型 RC 橋脚 (1 質点 2 自由度系)

そこで本研究は、著者らが明らかにしたロッキング振動が発生しやすい高さの橋脚<sup>[2]</sup>を対象にして、段落し位置、主鉄筋比および帯鉄筋比を変化させた橋脚模型を作成して、地震力によってロッキング振動による回転モーメントが橋脚の破壊にどのような影響を及ぼすかを調査した。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

供試体は単一柱式 T 型 RC 橋脚模型とし、模型の縮尺率は相似則および寸法効果を考慮に入れ、実構造物の 1/10 とした。供試体の設計には土木学会標準示方書を参考にした。主鉄筋には D3 異形棒鋼、帯鉄筋には直径 0.9mm 垂鉛引き鉄線、コンクリートは最大骨材寸法 2.5mm のモルタル

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

\*2 徳島大学教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

\*3 高知工業高等専門学校助手 土木工学科, 工修 (正会員)

\*4 徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

を用いた。またせん断スパン比 4.39、軸力は 0.80MPa とした。

供試体の種類として、段落しを行った供試体は主鉄筋比を 1.70% とし、供試体 No.7, 8 は橋脚下端から 145mm、供試体 No.9, 10 はさらに有効高さを足した 239mm で段落しを行った。段落しをせず主鉄筋比を変化させたものは、1.41%、1.70%、1.98%、2.26% の 4 種類の供試体を作成した。また、主鉄筋比を 1.70% とし帯鉄筋間隔を 10mm、20mm、30mm の 3 種類とした供試体を作成した。表-1 に供試体の諸条件、また図-2 に供試体の形状の一例を示す。

表-1 供試体の諸条件

供試体 No.	主鉄筋比(%)	帯鉄筋間隔(mm)	帯鉄筋比(%)	段落し	載荷方向	
1	1.41	30	0.087	なし	橋軸直角	
2	1.70				橋軸	
3					橋軸直角	
4	1.98				橋軸直角	
5	2.26	20	0.195	なし	橋軸	
6						145mm
7	1.70				橋軸直角	
8						239mm
9					橋軸	
10						
11					10	0.783

## 2.2 載荷方法

図-3 のように振動台上に供試体のフーチング部を固定し、躯体天端部に重錘を設置した。したがって供試体の天端部は自由端となる。載荷方向はフーチング基部を載荷点として、橋軸方向および橋軸直角方向の 2 方向とした。

また入力波は、最大加速度を一定として振動数が 2~20Hz まで変化するものとし振動数の増加量は、

0.1Hz~0.5Hz の範囲で振動数に比例させて大きくした。さらに最大加速度は 1.0m/s<sup>2</sup>、1.5 m/s<sup>2</sup>、

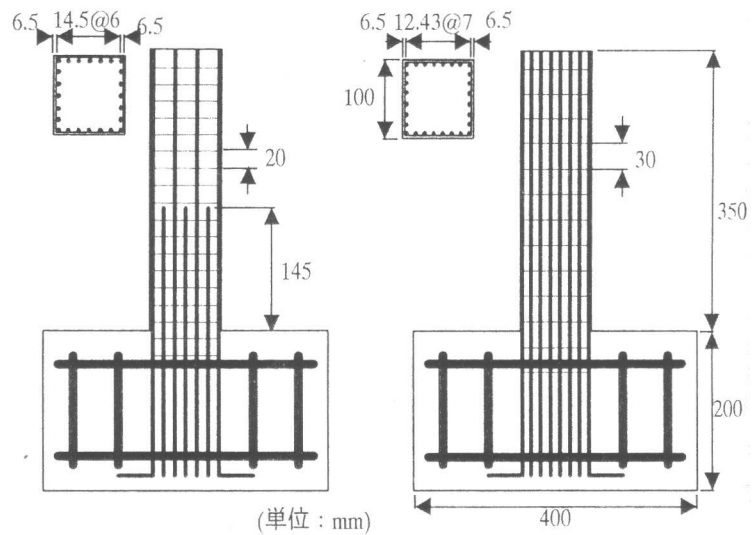


図-2 供試体

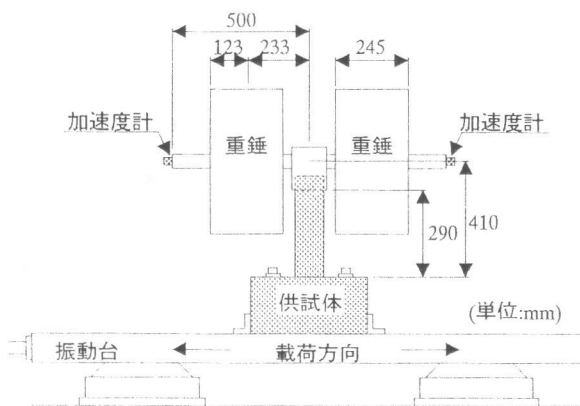


図-3 載荷装置

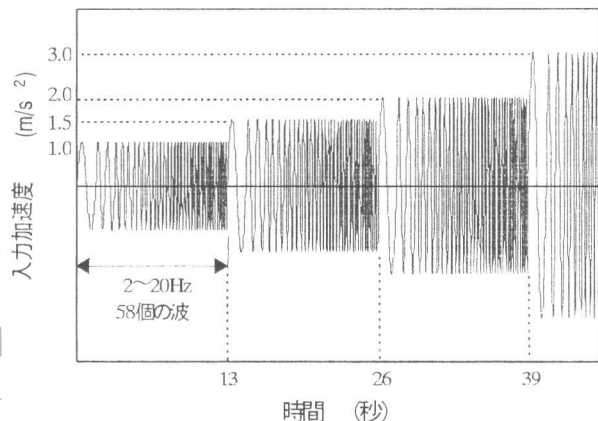


図-4 入力加速度

2.0 m/s<sup>2</sup>, 3.0 m/s<sup>2</sup>, 3.5 m/s<sup>2</sup>, 4.5 m/s<sup>2</sup>, 5.0 m/s<sup>2</sup>, 6.0 m/s<sup>2</sup>, 6.5 m/s<sup>2</sup>, 7.5 m/s<sup>2</sup>の10段階とした。図-4に入力波の一例を示す。計測項目は、加速度については重錘の両端の水平方向加速度および鉛直方向加速度、振動台の載荷方向加速度とし、変位については橋軸方向に載荷した供試体のみとし、振動台の載荷方向変位とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 供試体の破壊状況

破壊状況は目視およびビデオで行った。橋軸直角方向に載荷した。鉄筋比を変化させた供試体および段落しをした供試体の各々の破壊状況が発生したときの入力加速度を表-2に示す。

表-2 破壊状況

	No.1	No.3	No.4	No.5	No.6	No.8	No.10	No.11
ひび割れ発生 (m/s <sup>2</sup> )	3.0	3.0	4.5	4.5	3.5	3.0	3.0	3.0
かぶり剥離 (m/s <sup>2</sup> )	6.5	6.5	7.5	6.5	6.5	3.5	3.5	6.0

段落しをしない供試体は、どれも橋脚下端から2.5cm程度の場所で曲げひび割れを生じ、4cm程度の高さでかぶりコンクリートが剥離した。帯鉄筋比を変化させた供試体は、損傷したときの入力加速度に大きな差は見られなかった。次に主鉄筋比を変化させた供試体については、供試体No.5はNo.4よりも小さい加速度でかぶりが剥離した。段落しをした供試体は橋軸直角方向に載荷した場合、その位置に関わらず供試体は段落し位置の約2cm上で曲げひび割れを生じた。また段落し位置でのかぶりコンクリートの剥離の範囲が広く、損傷が大きかった。また下側で段落しをした供試体No.7, No.8は載荷方向に関わらず同じ入力加速度でひび割れを生じ、損傷した。従って、載荷方向に関わらず、下側での段落しはかなり危険であるといえる。しかし上側で段落しをしたものは、載荷方向で損傷の位置が異なり、橋軸方向に載荷した供試体No.9は、段落し的位置で破壊せず、橋脚下端で曲げ破壊に至った。

#### 3.2 ロッキング振動発生振動数<sup>[3]</sup>の検証

橋軸直角方向に載荷したときの段落しをした供試体における入力加速度が3.0m/s<sup>2</sup>(曲げひび割れ発生)のときのロッキング振動発生振動数の検証を図-5に示す。

図-5より、段落しをした供試体No.8, No.10はロッキング振動が顕著に現れており、2次より1次振動の角加速度が大きいのがわかる。このため、低振動時の回転モーメントの影響が大きく、曲げひび割れが発生していると考えられる。また、このときのロッキング振動発生振動数の実験値および計算値を表-3に示す。計算値は、橋軸方向に載荷した供試体の曲げ剛性EIを用いた。1次振動のときの実験値と計算値はほぼ一致しているが、2次振動では実験値の方が小さくなっている。これは、段落しをしているために供試

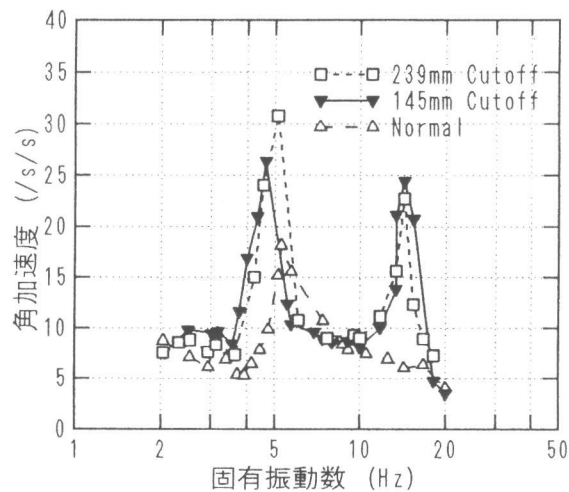


図-5 ロッキング振動発生振動数

体の破壊の進行が早く、それに伴う剛性の低下が早いいため、高振動モードにおけるロッキング振動のピークを追いきれないためと考えられる。また、供試体 No.6 は2次の固有振動が現れていないが、これは20Hz以上の振動数でロッキング振動が発生していると考えられる。

表-3 ロッキング振動発生振動数

	供試体 No.6		供試体 No.8		供試体 No.10	
	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$	$f_1$	$f_2$
実験値(Hz)	5.3	—	4.7	14.3	5.1	13.3
計算値(Hz)	5.3	20.8	5.2	20.4	4.4	17.3

### 3.3 供試体に作用するモーメント

ロッキング振動が発生したときに、躯体に作用するモーメントの分布を図-7に示す。橋軸直角方向に地震力が作用したとき、水平方向の慣性力による曲げモーメント( $M_h$ )に、ロッキング振動によって生じる回転慣性力による回転モーメント( $M_r$ )が加わり、躯体上部にもモーメントが作用する。ここで、躯体上部で曲げモーメントに対して最も危険なのは、張出し部の下端である。このモーメントを  $M_t$  とし、主鉄筋比 1.98%の供試体 No.4 のモーメントの履歴を図-7に示す。  $M_t$  が躯体下端に作用するモーメント( $M_o$ )と比較して大きくなるところがある。またこのとき、  $M_t$  と  $M_o$  の履歴にずれがある。すなわち、

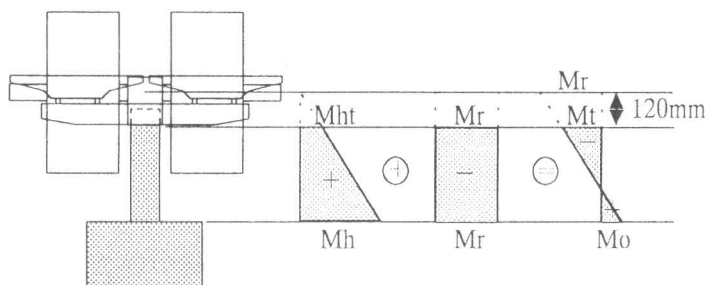


図-6 モーメントの分布

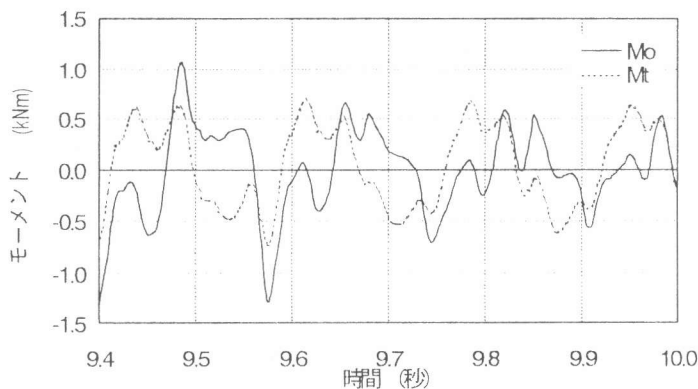


図-7 モーメント (主鉄筋比 1.98%)

このときロッキング振動の発生によって躯体の張出し下端部での回転モーメントが大きいために  $M_t$  がおおきくなり、そこで損傷する可能性がある。また主筋比 1.70%のものについても同様の履歴を示した。しかし、他の2体は  $M_t$  が  $M_o$  よりも小さく、ロッキング振動による回転モーメントの影響は小さい。

橋軸直角方向に载荷した供試体における、ひび割れ発生時の  $M_t$  の最大値( $M_{tmax}$ )と降伏曲げモーメント( $M_y$ )との比較を表-4に示す。これより、段落しをした供試体 No.7, No.9 は  $M_{tmax}/M_y$  が 0.6~0.8 と大きく躯体上部での損傷の危険あることがわかる。他の供試体は 0.3~0.4 であるが、

表-4  $M_t/M_y$  (ひび割れ発生時)

	No.3	No.4	No.5	No.6	No.8	No.10	No.11
$M_t \max$ (kNm)	0.75	1.30	0.69	0.70	1.03	1.36	0.75
$M_y$ (kNm)	1.64	1.81	2.13	1.64			
$M_{tmax}/M_y$	0.46	0.72	0.32	0.43	0.63	0.83	0.46

供試体 No.3 は 0.72 と高い値となっているため、ロッキング振動の影響が大きい。

また図-8(a)~(c)に、 $M_{tmax}/My$  と入力加速度との関係を供試体の諸条件別に示す。

図-8(a)に帯鉄筋間隔を変化させた供試体での  $M_{tmax}/My$  と入力加速度との関係を示す。帯鉄筋間隔が 30mm (0.087%)の供試体 No.3 が他の供試体と比較して  $M_{tmax}/My$  の増加が大きい。すなわち、ロッキング振動による回転モーメントの影響が大きい。また、帯鉄筋間隔が 10mm(0.783%), 20mm(0.195%) の供試体 No.6, No.11 ではほとんど同じであるので、今回の実験においては帯鉄筋間隔が 0.195%以上であれば安全であるといえる。

図-8(b)に主鉄筋比を変化させたときの  $M_{tmax}/My$  と入力加速度との関係を示す。No.4 は  $M_{tmax}/My$  が増加し続け、入力加速度が  $6.5m/s^2$  でピークとなり、1.0 に近い、もしくはそれを越える値となるため躯体張出し下端部で損傷する可能性が高いと考えられる。また、主鉄筋比 1.70%の供試体 No.3 も  $M_{tmax}/My$  が増加し続けることより、この 2 種類の供試体は躯体上部で損傷する危険性が高いと考えられる。逆に、1.41%, 2.26%の供試体は躯体張出し下端部での損傷は小さいと考えられる。

図-8(c)に示した段落しをした供試体では、橋軸直角方向に載荷した供試体 No.8, No.10 では段落しの位置に関わらず、入力加速度が  $4.5m/s^2$  で  $M_{tmax}/My$  が低下している。このとき供試体はかぶりコンクリートが剥離している。すなわち躯体の耐力が低下していることになる。また橋軸方向に載荷した場合、供試体 No.7 は他の供試体より  $3.5m/s^2$  での  $M_{tmax}/My$  が小さくなっている。したがって入力加速度が  $3.5m/s^2$  で耐力が低下していることになる。ここで供試体 No.9 と段落しをしていない供試体 No.2 は、橋脚下端での曲げ破壊となっているため  $M_{tmax}/My$  がほぼ同じになった。これらのことより、上部で段落しをしたものは載荷方向によって破壊の違いがあることがわかる。

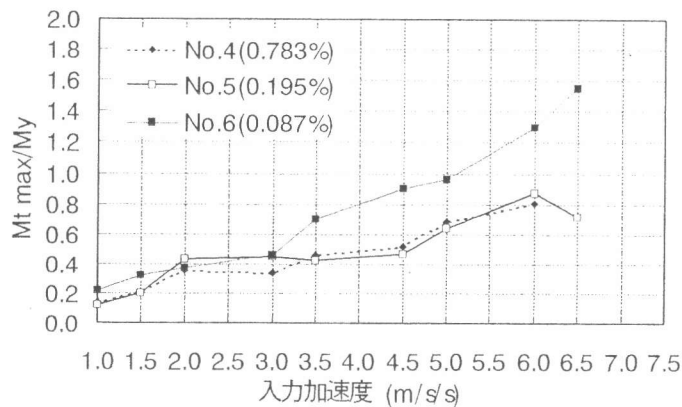


図-8(a) 帯鉄筋比別のモーメントの比較

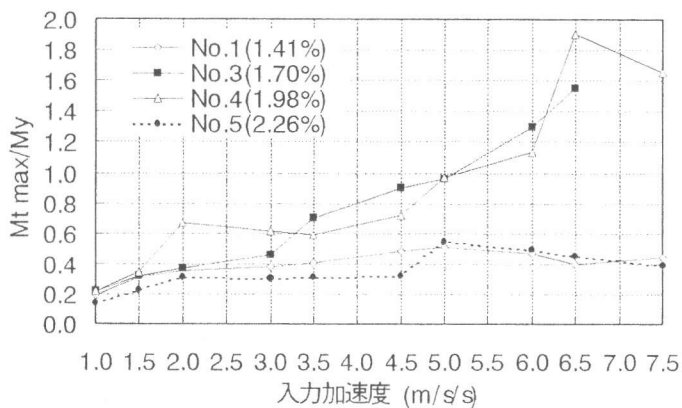


図-8(b) 主鉄筋比別のモーメントの比較

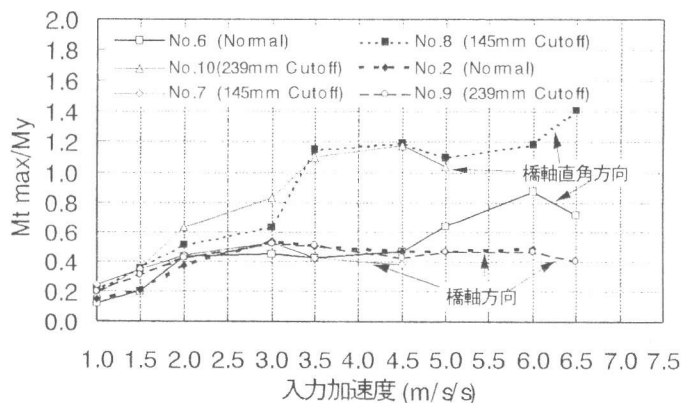


図-8(c) 段落しをしたときのモーメントの比較

また表-5に段落した供試体について、ひび割れ発生時の段落し位置での降伏曲げモーメントを  $My'$  として、 $Mt$  との比を示した。このときの  $Mt_{max}/My'$  と入力加速度との関係を図-9に示す。

橋軸直角方向に载荷した供試体 No.8, No.10 はひび割れ発生時にすでに 1.0 程度、もしくはそれ以上の値となり、段落し位置で破壊することがわかる。これらのことより、主鉄筋比が大きいものでも段落しをすることで、主鉄筋比が小さくても段落しをしないものの方が、耐力があると考えられる。段落していないものは橋脚下端より 2cm 程度、段落したものは段落し位置よりも、2cm 程度上でひび割れが生じた。これは、剛性変化、動的荷重の影響によるものと考えられるが、詳細は今後検討する。また橋軸方向に载荷した場合は、1.0 を越えることはないが、0.8 程度の値となり、段落し位置での危険性が高い。しかし、供試体 No.9 については段落しの影響はなく、段落しをしていない供試体と同様、橋脚下端での曲げ破壊となったために、ロッキング振動が破壊に及ぼす影響は小さいと考えられる。

表-5 段落し位置でのモーメントの比較（ひび割れ発生時）

	No.8	No.10	No.7	No.9
$Mt_{max}$ (kNm)	1.03	1.36	0.87	0.85
$My'$ (kNm)	1.08			
$Mt_{max}/My'$	0.97	1.28	0.82	0.80

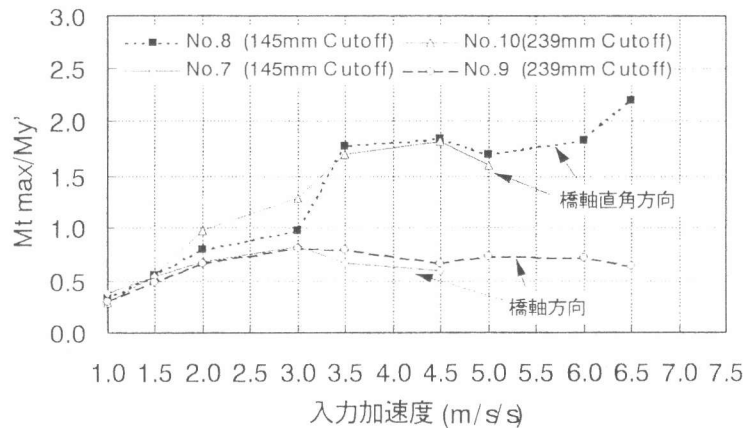


図-9 段落し部でのモーメントの比較

1.0 を越えることはないが、0.8 程度の値となり、段落し位置での危険性が高い。しかし、供試体 No.9 については段落しの影響はなく、段落しをしていない供試体と同様、橋脚下端での曲げ破壊となったために、ロッキング振動が破壊に及ぼす影響は小さいと考えられる。

#### 4. まとめ

今回の鉄筋量での動的载荷実験で、ロッキング振動による回転モーメントが、橋脚損傷に及ぼす影響として、以下のような結果が得られた。

(1)橋軸直角方向に载荷したとき供試体は、鉄筋量に関係なくロッキング振動が生じた。しかし、これによって生じる回転モーメントの大きさは、鉄筋量によって異なった。特に、段落しをしたものは、载荷方向によって破壊位置が異なったものもあり、ロッキング振動の影響であると考えられる。

(2)主鉄筋比が 1.70%、1.98%のもの、および帯鉄筋比 0.087%のものはロッキング振動による橋脚張出し下端部での回転モーメントは大きくなった。しかしそこでの破壊にまでは至らなかった。

#### 参考文献

- [1] 横井, 島, 水口: T型 RC 橋脚における橋軸直角方向における地震力が作用したときの動的応答, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.1101-1106, 1993.
- [2] 横井, 島, 水口: T型 RC 橋脚における橋軸直角方向の地震応答に及ぼす柱高さの影響, 土木学会第 48 回年次学術講演会概要集第 5 部, pp.552-553, 1993.
- [3] 小坪清真著: 土木振動学, 森北出版株式会社, pp.106-111, 1973.