

論 文

[2186] T 形 RC 橋脚における橋軸直角方向に地震力が作用したときの動的応答

横井克則^{*1}・島 弘^{*2}・水口裕之^{*3}

1. はじめに

橋梁の耐震設計において、複雑な形状をした上部工はもちろん、下部工の橋脚においても特別な場合においては動的解析をしなければならないことがある。その1つとして、T形橋脚（図-1）などの2質点系では、地震力が橋軸直角方向に作用した場合と、橋軸方向に作用したときとでは異なる応答を示すことが考えられる。これは、橋軸直角方向に地震力が作用すると、ある振動数において、橋脚上端にモーメントを発生させるロッキング振動が生じるためである。もし、このロッキング振動によってRC橋脚の上部に大きなモーメントが発生すれば、震度法では可能性のある主筋の段落としが、危険な状態になる可能性がある。しかし、このようなロッキング振動を生じるときのRC橋脚の非線形領域における耐震性は、これまでの静的水平加力実験や、1質点系の動的実験では評価できない。そこで本研究では、振動台を用いた動的載荷実験を行い、橋軸直角方向に地震力を受けるT形RC橋脚におけるロッキング振動によって生じる回転モーメントが橋脚の応答に与える影響について調べた。

2. 実験概要

2. 1 供試体

供試体は単一柱式T形RC橋脚の縮小模型である。橋脚の実物大実験は困難であるため、現実には縮小模型実験となる。今までに、RC橋脚の実験として種々の寸法の供試体が用いられているが、いずれの大きさにしても縮小実験による寸法効果を考慮しなければならない[1]。本実験では、模型の実物に対する縮尺率を1/20に想定して、相似則および寸法効果を考慮した。

材料的寸法効果としては、せん断、定着鉄筋の引抜き、主鉄筋の座屈などの挙動への寸法効果がある。このため、使用材料の寸法を縮尺率と同じく原寸の1/20として、実物の挙動を忠実に再現できるようにした。

供試体の断面形状および寸法を図-2に示す。主筋

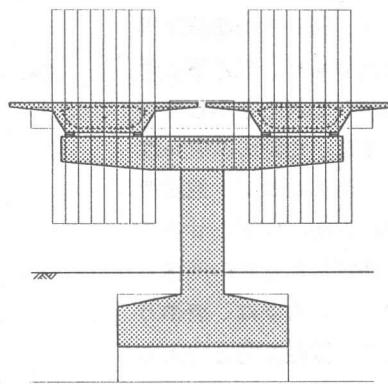


図-1 T形RC橋脚
(想定構造物と実験との対応)

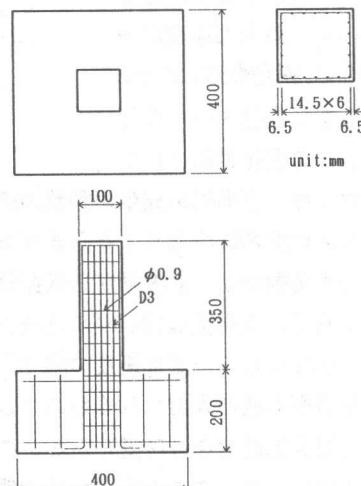


図-2 供試体寸法

*1 德島大学助手 工業短期大学部土木工学科、工修（正会員）

*2 德島大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*3 德島大学教授 工業短期大学部土木工学科、工博（正会員）

比およびせん断スパン比は、一般的な1.70%および4.6のものとした。せん断補強量については、過去に建設されている比較的少ないものを想定し、帶鉄筋比を0.049%とした。

鉄筋は、主鉄筋にD3の異形棒鋼(降伏強度=295MPa、引張強度=450MPa)、帶鉄筋に直径0.9mmの亜鉛引き鉄線を用いた。コンクリートとして、骨材最大寸法2.5mmのモルタルを用い、硬化後の強度は35MPaである。

重錘による軸応力についても寸法効果を考慮して0.8MPaとした。降伏曲げモーメントは1.4kN·mであり、せん断耐力と曲げ耐力との比は1.42の曲げ破壊型の供試体である。また、降伏変位(δ_y)は1.3mmである。

2.2 載荷方法および測定項目

橋軸直角方向に入力を想

定した載荷方法を、図-3に示す。図-1の細線は実験治具であり、想定構造物と実験との対応を示している。また、重錘の設置角度を90°回転させて、地震波を橋軸方向に作用させることを想定したときの応答と比較した。実験は、橋軸方向入力、橋軸直角方向入力で1体ずつ行った。

振動台への入力波は、図-4で示すように、正弦波を用いて、最大加速度が一定の間に、振動数が1.5Hzから20Hzまで変化するものとした。この変化量について

は、ロッキング振動の発生振動数の検証を行うために非常に小さくする必要がある。そこで本実験では、高振動から低振動になるにつれて、変化量は1Hzから0.1Hzまで直線的に小さくし、一定加速度の間で周期の異なる47個の波が入力されるものとした。さらに最大加速度を3段階とした。この最大加速度は、これまでに行った動的載荷実験結果[2]をもとにして、供試体の損傷度が曲げひび割れ発生(3m/s²)、主鉄筋降伏(5m/s²)、コンクリート剥離(6m/s²)の3種類となるような大きさとした。

測定項目として、変位については、振動台変位(1点)と、図-3のように取り付けた摺動型変位計を用いて、フーチングと供試体天端との相対変位(2点)および重錘の両端の鉛直方向の変位

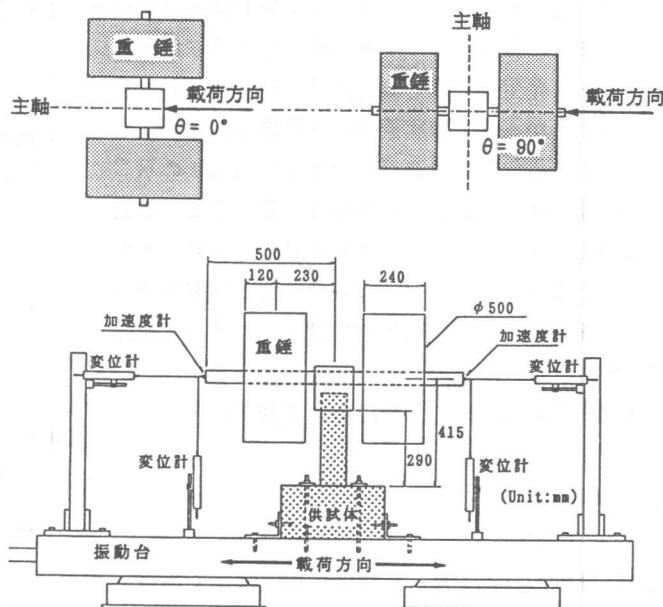


図-3 載荷装置

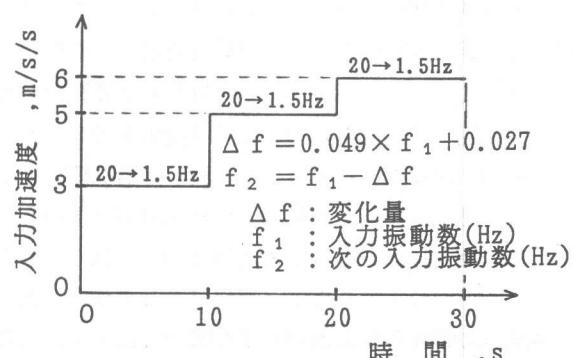


図-4 振動台への入力波

(2点)を求めた。加速度については、振動台加速度(1点)と、重錐の両端に取り付けた小型加速度変換器によって、載荷方向の水平応答加速度(2点)と重錐の両端の鉛直方向加速度(2点)を測定した。これらのデータは、デジタル型動ひずみ測定器を用いて1/200秒間隔で測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況

各加速度における破壊状況は、橋軸方向に入力したものも橋軸直角方向に入力したものとではよく似ており、入力加速度が 3 m/s^2 で曲げひび割れ発生程度、 5 m/s^2 で主鉄筋降伏程度、 6 m/s^2 でコンクリートが剥離し破壊した。表-1に、各入力加速度における最大応答水平変位および破壊状況を示す。すなわち、入力方向に関わらず、同じ最大入力加速度のときに破壊した。

3.2 ロッキング振動振動数の検証

図-5は、橋軸直角方向に地震波を入力したときの振動数と重錐の回転の角加速度との関係、いわゆる加速度共振変位振動曲線を示したものである。角加速度は、2点で測定した鉛直方向の加速度の差を2点間の距離1mで除して求めた。この図から、低振動数および高振動数のときに1つずつのピークが確認できる。ロッキング振動が発生した場合は、図-6で示すように、重錐の位置よりも下方にある点を中心回転する1次(低振動数時)の固有振動と重錐よりも上方にある点を中心回転する2次(高振動数時)の固有振動が存在する[3]ことから、このそれぞれのピーク時にロッキング振動が発生していると考えられる。これらの固有振動数は、減衰を無視したときの計算値よりも小さくなっている。

図-7は橋軸方向に入力したときの振動数と加速度比(水平方向の応答加速度/振動台加速度)との関係を示し、図-8は橋軸直角方向に入力したものでの振動数と加速度比との関係を示した。この結果、橋軸方向に入力したものでは共振を示すピークが1つであるのに対して、橋軸直角方向に入力したものは、低振動数および高振動数のときに2つのピークが認められた。これは、ロッキング振動

表-1 最大応答変位および破壊状況

入力加速度	橋軸方向	橋軸直角方向	破壊状況
3 m/s^2	$2.6 \delta y$	$2.3 \delta y$	曲げひび割れ発生
5 m/s^2	$4.6 \delta y$	$4.6 \delta y$	主鉄筋降伏
6 m/s^2	破壊	$9.0 \delta y$	コンクリート剥離

($\delta y = 1.3 \text{ mm}$)

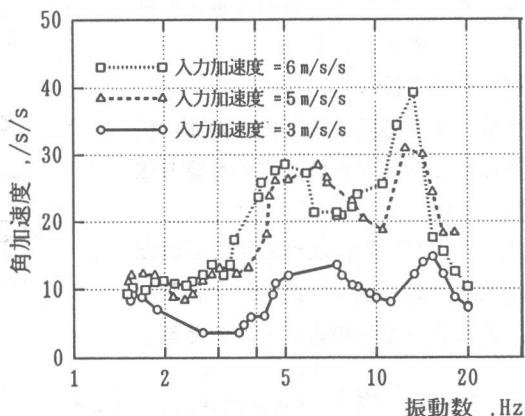


図-5 ロッキング振動周波数の検証

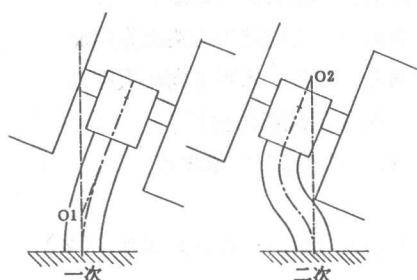


図-6 ロッキング振動の振動形

が回転と水平方向の連成振動であることの結果である。また、図-7と図-8で共振振動数が異なっているのも、連成振動による水平振動への回転振動の影響と考えられる。

図-7で、入力加速度が大きくなるにつれて加速度比が低下している。線形振動において減衰定数が大きくなると変位応答の倍率が小さくなるが、本実験のように非線形振動時でも最大変位が大きくなることによる履歴減衰の増大により、同様な結果を示している。

また、図-5、図-7、図-8で入力加速度が大きくなるにつれて低振動の方向にピークが低下していくのは、損傷の進行により変形が大きくなり、供試体のみかけ剛性が低下するためであると考えられる。

3.3 ロッキング振動による回転モーメント

(1) 計算方法

ロッキング振動するときに軸体に生じる曲げモーメントの分布の計算方法を図-9に示す。

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)は、式(1)で求めることができる。

$$M_r = \frac{m l}{2} (\alpha_{r1} - \alpha_{r2}) \quad (1)$$

ここで、 m :重錘の片側の質量、 l :両側重錘の重心位置間の距離、 α_{r1} , α_{r2} :重錘の重心位置での鉛直方向加速度である。また、水平方向の慣性力による、軸体下端部の曲げモーメント(M_h)は、式(2)で求まる。

$$M_h = m \times (\alpha_{h1} + \alpha_{h2}) \times h \quad (2)$$

ここで、 α_{h1} , α_{h2} :水平方向加速度

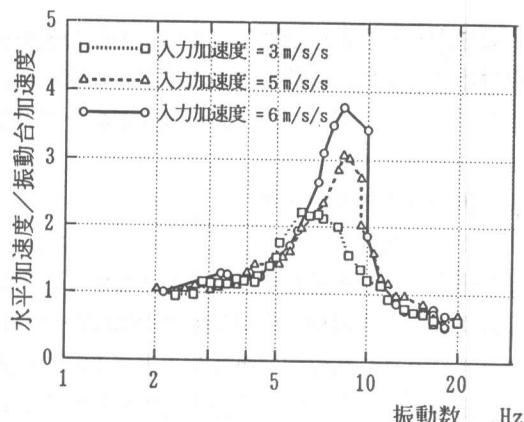


図-7 橋軸方向に入力したときの水平加速度比

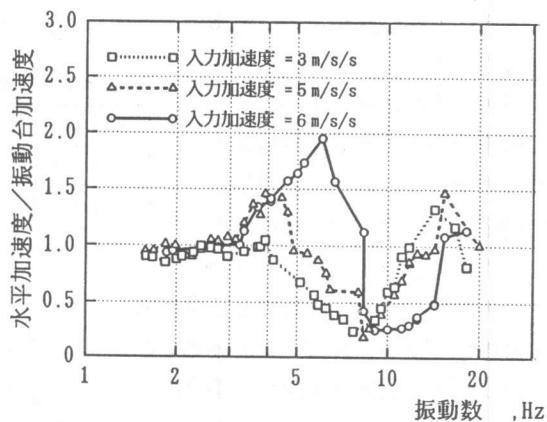


図-8 橋軸直角方向に入力したときの水平加速度比

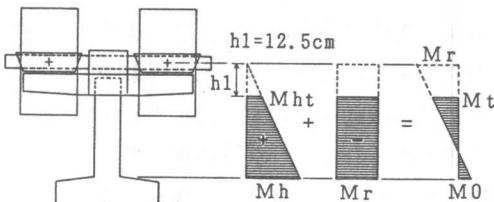


図-9 曲げモーメントの分布

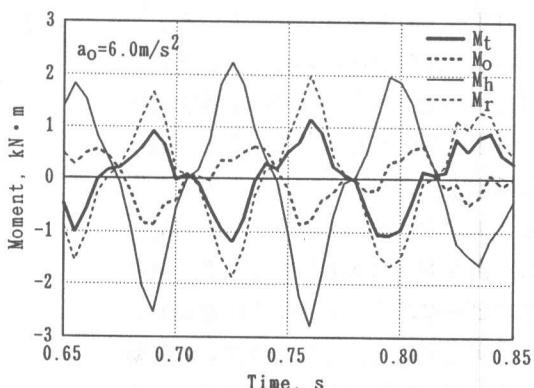


図-10 曲げモーメントの履歴曲線(13Hzの時)

度、 h ：軸体下端部と重錐の重心位置との鉛直距離である。よって、ロッキング振動が生じたときの軸体下端部でのモーメント (M_o) は、式(3)から求まる。

$$M_o = M_r + M_h \quad (3)$$

ここで、軸体上部で曲げモーメントに対して最も危険な断面は、張出しあり下端の位置である。本実験の場合、この位置を重錐固定具の下端と一致させており、重錐の重心高さから12.5cm下方のところである。この断面の水平方向の加速度だけによる曲げモーメントを M_{ht} とすると、この位置での曲げモーメント M_t は、 M_{ht} と M_r の和である。これらも、図-10の中に示した。

(2) 各モーメントの履歴曲線

図-5で示したロッキング振動が発生している振動数での、曲げモーメントの履歴曲線の1例を、図-10に2次(13Hz)のもの、図-11に1次(5Hz)のもので示した。図-10では M_h と M_r が同じ振動数で逆方向にモーメントが作用するので、 M_h がかなり大きいにも関わらず M_o は小さくなり、軸体下端部では損傷をあまり受けない。つまり、逆対称モーメントになっているのである。しかし図-11では、位相のずれや M_r と M_h が同じ振動数となることで、5Hzよりも振動数の大きい微震動も含まれており、4つの曲げモーメントが複雑な関係になっている。 M_r および M_h はそれぞれ複雑な振動をしているが、それらを足し合わせた軸体下端部のモーメントである M_o はなめらかな曲線となっており、外力とバ

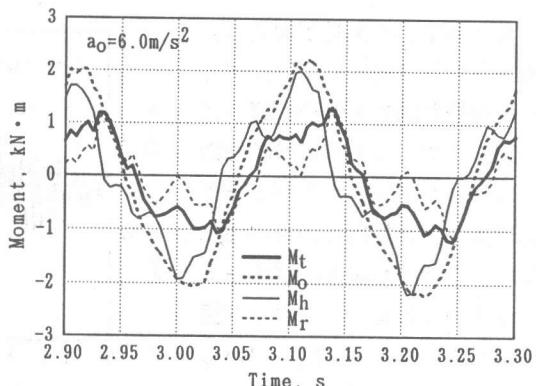


図-11 曲げモーメントの履歴曲線 (5Hzの時)

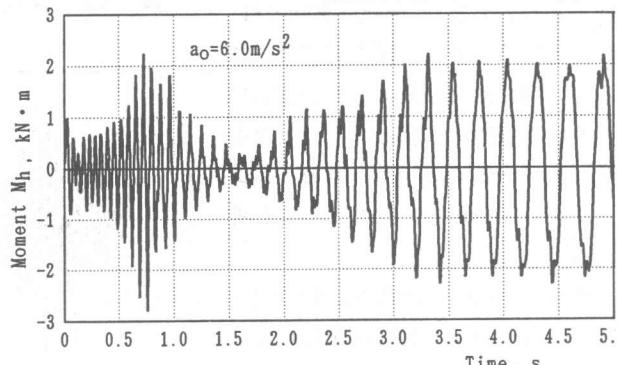


図-12 曲げモーメントの履歴曲線 (M_h)

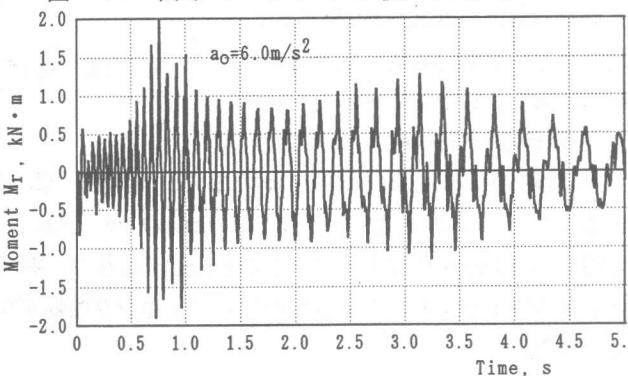


図-13 曲げモーメントの履歴曲線 (M_r)

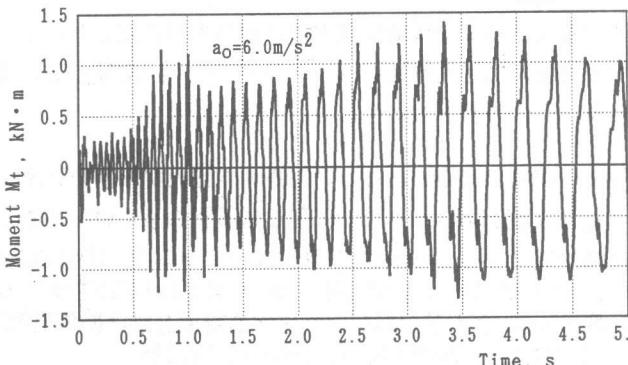


図-14 曲げモーメントの履歴曲線 (M_t)

ランスをとっている挙動が伺える。

各モーメント (M_h , M_r , M_o , M_t , M_{ht}) の履歴曲線をそれぞれ図-12～図-16に示す。これらの履歴曲線から、もっともモーメントが大きくなるのは入力開始後約4秒後の M_o であり、このときが最大抵抗モーメントを示すのである。ロッキング振動が発生しているのは、図-14から入力開始後約0.8秒後と約3秒後の2回である。つまり、今回の実験では、最終的に破壊するのが入力方向に関わらず同じになったなったのは、ロッキング振動の影響のない、1自由度振動が卓越するところのモーメントによって破壊したためであると考えられる。

また、 M_r と M_t の低振動領域 (5 Hz) でロッキング振動を起こしている時間が、 M_t と少しずれている。これは、 M_t は M_{ht} と M_r の和であり、 M_{ht} のピークが M_r のピークよりも後ろにあるためであると考えられる。

(3) 降伏曲げモーメントとの比較

本実験で用いている供試体の降伏曲げモーメント (M_y) を計算すると、1.78 kN·mとなる。図-14によると、 M_t の最大モーメント (M_{tmax}) が 1.4 kN·m であるので比較すると ($M_{tmax}/M_y = 0.78$)、 M_t が降伏曲げモーメントの8割近くになり、非常に大きいことがわかる。もし、橋脚などの構造物で段落としがあるものは、ロッキング振動が生じたときに危険な状態になることが考えられる。

4. 結論

T形RC橋脚の橋軸直角方向に地震力が作用したとき、ロッキング振動が発生し、これによって橋脚上端にも曲げモーメントが生じる。本実験では、降伏曲げモーメントの8割程度の曲げモーメントが橋脚上端に生じた。

謝辞 実験の実施にあたり、徳島大学建設材料科学研究所卒論生山内昭弘氏（現：松尾橋梁株）のご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献 1) 村山、野田: RC構造物の縮小実験に関する基礎的研究、鹿島建設技術研究所年報、Vol. 30、pp. 31-40、1982。2) 秋、横井、水口、島: 2軸曲げを受けるT形RC橋脚の変形特性に及ぼす載荷角度の影響、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部、pp. 726-727、平成4年9月。3) 小坪清真: 土木振動学、森北出版、pp. 106-112、1973年。

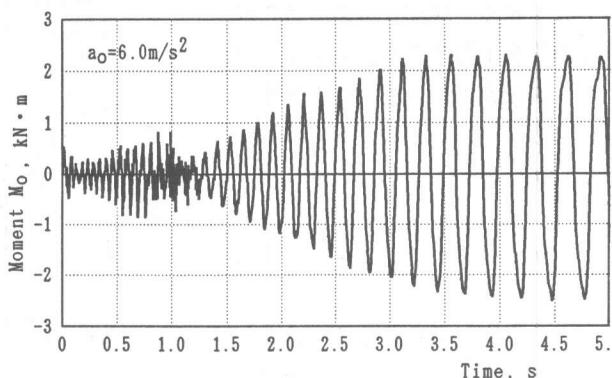


図-15 曲げモーメントの履歴曲線 (M_o)

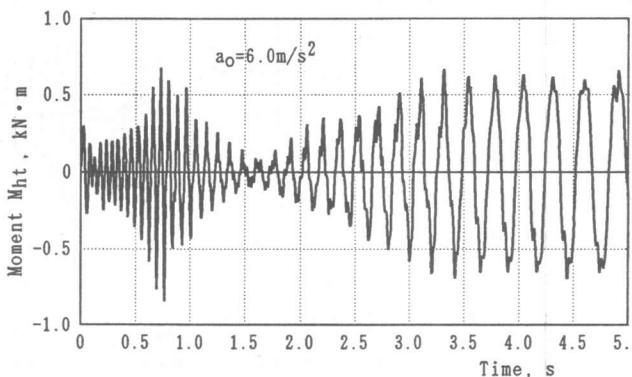


図-16 曲げモーメントの履歴曲線 (M_{ht})