

直接基礎のロッキング現象に関する基礎的実験

宇都宮大学 学生会員

○ 武田龍國

正会員 藤倉修一

非会員 楠木崇仁

フェロー会員

中島章典

正会員

Nguyen Minh Hai

1. はじめに

橋梁の基礎形式として従来から多く採用されているものに杭基礎と直接基礎がある。近年、杭基礎に関しては地震時保有耐力法による耐震設計法が普及してきているが、直接基礎の場合は基礎としての非線形応答がフーチングの浮き上がりを生じさせてしまうことから耐震設計への導入が容易ではなく、普及しているとは言えないのが現状である。

従来の設計では直接基礎の基礎地盤の浮き上がりは橋脚の転倒を防ぐため極力避けられてきた。しかしながら、これまでの研究でロッキング振動による直接基礎の浮き上がりには免震効果があることが指摘されている¹⁾。また、現行の道路橋示方書では直接基礎のレベル1地震時に対する安定性照査を規定により行った場合はレベル2地震時に対する照査は行わなくてよいこととされているが、これは直接基礎が一般的に良質な地盤に支持されていることから地盤の支持力に対する余裕があるため、基礎の浮き上がりによってエネルギー吸収が期待され、基礎のロッキング現象による免震効果を考慮しているためである²⁾。

しかし、このような基礎ロッキング現象による免震効果に関する研究はいくつかなされてきたが、基礎ロッキング現象そのものに着目し、メカニズムを解明した研究は少ない。したがって本研究では橋梁を対象として、直接基礎のロッキング振動に着目し、どのようにして基礎ロッキング現象が生じるのかを明らかにすることを目的とし、橋梁模型を用いて振動台実験を行った。

2. 試験体及び実験概要

本実験では、図-1に示す一基の下部構造とそれが支持する上部構造部分からなる構造体の模型を振動台の上に置き、強制振動実験を行った。試験体はフーチングを想定した厚さ12mmの鋼板に橋脚である高さ488mmの長方形の鋼棒が溶接してある。また、上部構造重量を変えるために、橋脚上部には、厚さ7mmの鋼板を溶接し、その板の上に重り鋼板を取り付けた。上部構造重量は表-1に示す4種類とし、上鋼板と重りの重量を加えた値である。また、試験体底面と振動台の間には地盤を模したゴム板を敷いた。

強制振動実験では、最大加振加速度（加振加速度）を固定して、振動数を徐々に増加させて正弦波を与える振動数漸増振動実験と振動数を固定して正弦波を与える振動数固定振動実験の二種類を行った。また、加振は一方向のみの一軸加振とした。試験体の計測項目は重り鋼板の上端部における加振方向の加速度（天端加速度）とフーチング両端の浮上り変位である。

3. 実験結果及び考察

(1) 振動数漸増振動実験

まずw3試験体に対して、加振加速度を0.3Gに固定して、振動数を2Hzから5Hzまで漸増させた正弦波により強制振動実験を行った。この時の試験体のフーチングの浮上り変位の時刻歴応答を図-2に示す。ここで、浮上りが負、沈み込みが正である。図-2に示すように23秒までは、浮上り変位はほぼ一定の1.5mm程度であるが、それ以降、急激に増加し最大値は約17mmであった。これは、加振振動数が

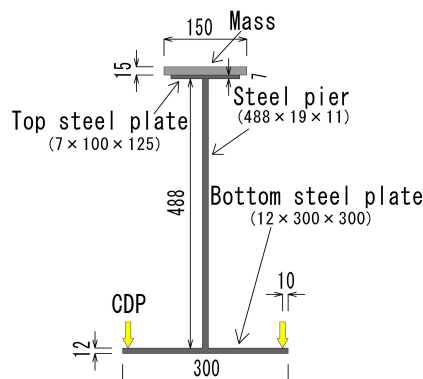


図-1 試験体概要図 (mm)

表-2 正弦波の加振加速度とロッキング振動数

表-1 上部構造の重量

上部構造	重量 (N)
w1	37.9
w2	53.6
w3	69.2
w4	85.0

加振 加速度 (G)	基礎ロッキング 振動数 (Hz)
0.1	4.0
0.2	3.4
0.3	2.9

2Hz から 5Hz の間のある振動数に達するとフーチングの浮上り変位が急激に増加し、基礎ロッキング現象を起こしていることが分かる。また、天端加速度の時刻歴応答を見ると同じ時刻で急激に増加していた。

(2) 基礎ロッキング実験

上述の振動数漸増振動実験において見られた基礎のロッキング現象がどの振動数で生じるかを調べるために加振加速度0.3G一定のもと、w3試験体に対して振動数を固定して正弦波で加振する振動数固定振動実験を行った。加振振動数は振動数漸増振動実験結果をもとに、基礎ロッキング現象が生じていたおおよその振動数から0.1Hz毎に振動数を変化させて実験を行った。加振振動数と最大浮上り変位の関係および最大天端加速度の関係をそれぞれ図-3、図-4に示す。図-3から振動数を2.8Hzから2.9Hzに変えた時に最大浮上り変位は2mmから15mmへと急激に増大していることが分かる。このように、正弦波の加振振動数を徐々に増加させた場合に急激に浮上り変位が増大した時の振動数を、ここでは基礎ロッキング振動数と定義する。

さらに正弦波の加振加速度が0.1G及び0.2Gの場合についても同様の振動数固定振動実験を行い、基礎ロッキング振動数を求めた。表-2は加振加速度による基礎ロッキング振動数の変化について示した表である。上部構造の重量が一定の場合、正弦波の加振加速度が増加すると基礎ロッキング振動数は減少することが分かる。また、同様の振動数固定振動実験をw1, w2, w4についても行った。図-5は基礎ロッキング振動数と加振加速度の関係を上部構造の重量ごとにプロットしたものである。図-5から、加振加速度が一定の場合、上部構造の重量が増加すると基礎ロッキング振動数は減少することが分かる。

(3) 加速度応答倍率

振動数漸増振動実験より、基礎ロッキング現象はある振動数で構造物の変位や加速度応答が大きくなる現象であり、

Key Words: 直接基礎, ロッキング振動, 免震効果

〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科 Tel.028-689-6227

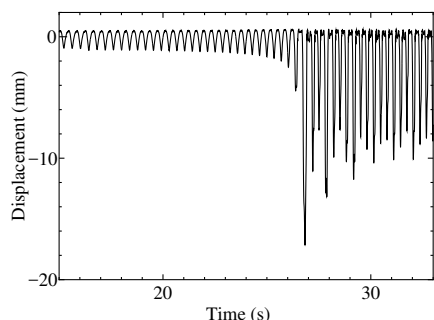


図-2 浮上り変位の時刻歴応答

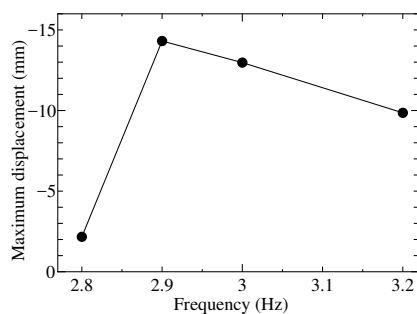


図-3 最大浮上り変位と加振振動数の関係

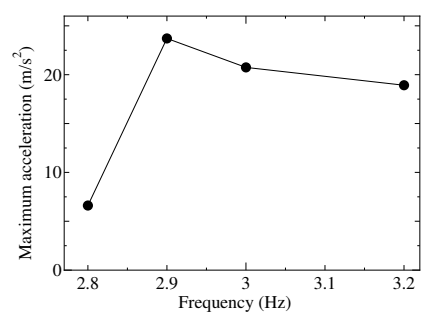


図-4 最大天端加速度と加振振動数の関係

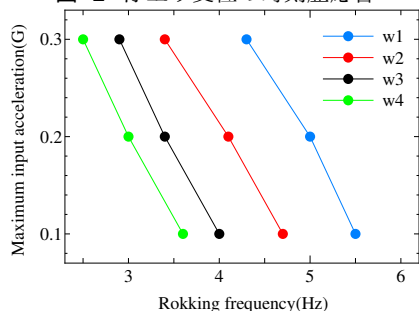


図-5 上部構造重量を変えた場合の加振加速度と基礎ロッキング振動数の関係

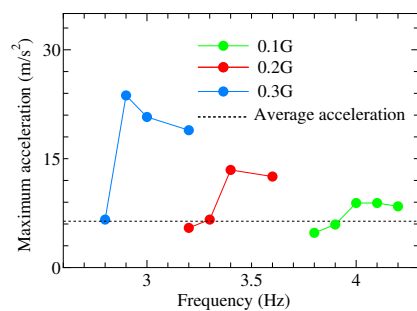


図-6 加振加速度を変えた場合の最大天端加速度と加振振動数の関係 (m3)

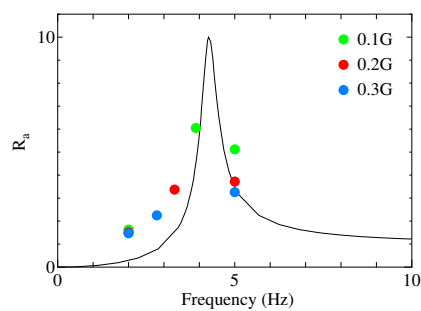


図-7 加速度応答倍率の実験値と共振曲線の比較

強制振動における構造物の共振現象に近い。しかしながら、共振振動数は一般に1自由度系で考えれば、質量とそれを支える剛性で決まるため、本実験で得られたように加振加速度には依存しない。そこで、この現象を明らかにするために基礎ロッキング振動数の前後における振動数での天端加速度応答を調べた。図-6はw3試験体を用いて、加振加速度を0.1G、0.2G、0.3Gと変えた場合の最大天端加速度と加振振動数の関係を示す。加振加速度が0.1G、0.2G、0.3Gでは、それぞれ、4.0Hz、3.4Hz、2.9Hzの加振振動数において大きく天端加速度が増大していて、基礎ロッキング現象を表していることが分かる。また、基礎ロッキング振動数直前の振動数における天端加速度はほぼ同じ値であり、平均値は6.4m/s²であった。このことより、いずれの加振加速度のケースにおいても天端加速度がある一定の値を超えると基礎ロッキングが起こっていることが分かる。

次に加振加速度の大きさに応じて異なる加振振動数で基礎ロッキング現象が生じることを考察するために加速度共振曲線を求めた。1自由度系において一定振幅の正弦波外力が作用する場合の構造物の加速度は次のように表される。

$$\ddot{x} = -p_0 \frac{\omega^2/\omega_0^2}{\sqrt{(1-\omega^2/\omega_0^2)^2 + 4h^2(\omega^2/\omega_0^2)}} \cos(\omega t - \phi) \\ = -p_0 R_a \cos(\omega t - \phi) \quad (1)$$

$$\omega_0: \sqrt{\frac{k}{m}} \quad k: \text{橋脚の剛性 (N/m)} \\ m: \text{上部構造の質量 (kg)} \quad p_0: \text{最大加振加速度 (m/s}^2\text{)} \\ \omega: \text{円振動数 (rad)} \quad h: \text{減衰定数} \\ R_a: \text{加速度応答倍率}$$

ここで上式(1)に用いる橋脚の剛性 k を求めるために、強制振動実験で使用した試験体を用いて静的载荷試験を行った。静的载荷試験では、重り鋼板にワイヤーを水平に取り付けて水平荷重を与え、その荷重値と载荷位置における試験体の水平変位を測定し、荷重-水平変位関係を求めた。この荷重-水平変位関係から基礎ロッキング振動数直前の振動数における上部構造の慣性力に対応する上部構造水平変位を算出し、橋脚の剛性 k を求めた結果、 $k=5.07\text{kN/m}$ となつ

た。この剛性 k と試験体の上部構造の質量 m (ここではw3のケース)を用いて、式(1)より求めた加速度共振曲線を図-7に示す。なお式(1)は円振動数で表現されているが、図-7の横軸は振動数で表しており、また、減衰乗数 $h=0.05$ と仮定している。

図-7には、図-6における基礎ロッキング直前の振動数での天端加速度より求めた加速度応答倍率をプロットしている。また、基礎ロッキング振動数を避けて行われた実験、つまり、2.0Hzおよび5.0Hzにおける実験結果も合わせて示している。なお、加速度応答倍率 R_a は天端加速度を加振加速度で除した値である。図-7より、実験結果の加速度応答倍率は加速度共振曲線よりも若干大きい値となったが、全体としては共振曲線と同じ傾向であった。これにより加振振動数によって加速度応答倍率が異なり、応答倍率と加振加速度を乗じた天端加速度がある値を超えた時に基礎ロッキング現象が起こったことが明らかになった。

4. まとめ

1. 振動数漸増振動実験から、ある加振振動数で急激に浮上り変位が増大する基礎ロッキング現象が起こることが分かった。
2. 振動数固定振動実験から、基礎ロッキング振動数は上部構造重量または加振加速度が増加すれば減少する結果となった。
3. 加速度共振曲線から、加振振動数によって加速度応答倍率が異なり、応答倍率と加振加速度を乗じた天端加速度がある値を超えた時に基礎ロッキング現象が起こることが明らかになった。

謝辞：本実験の実施にあたっては、(株)ビービーエムの配野英朗氏からはご支援を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 川島一彦, 細入圭介: 直接基礎のロッキング振動が橋脚の非線形地震応答に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.703, pp.97-111, 2002.4.
- 2) 福井ら: 直接基礎の耐震設計法に関する検討, 第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.409-414, 2000.12.