

振動台を用いた鋼製橋脚の2方向加振実験とFEM解析

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○長田 直也
 名古屋工業大学大学院 正会員 海老澤健正

名古屋工業大学大学院 フェロー会員 後藤 芳顯
 中国・同濟大学 Wensheng Lu, Xilin Lu

1. はじめに

現行のレベル2地震動に対する鋼製橋脚の耐震安全照査法¹⁾では、水平1方向地震動成分をそれぞれ独立に入力し照査を行っている。しかし、実際の地震動は3方向成分が相互に影響しており、より確実な安全性照査のためには、少なくとも影響の大きい水平2方向地震動成分の連成を考慮することが必要である。一方、数値解析による終局挙動予測の妥当性を評価するためには実験データとの比較が必須であり、すでに擬似的実験による検証はおこなわれている²⁾。しかしながら、実現現象の再現性と言う観点からすれば振動台実験による検証がより望ましいのは言うまでもない。そこで本研究では、鋼製橋脚の約1/10スケールの供試体を用いた振動台実験結果に基づき、2方向のL2地震動を受ける鋼製橋脚の動的応答解析の精度検証を行う。

2. 実験概要

解析対象とする振動台実験は2009年に中国同濟大学にて実施した水平2方向地震動下での矩形断面鋼製橋脚の振動台実験である。図1(a)に示す供試体は、表1のように橋脚パラメータを設定し、実橋脚の1/10スケールとして相似則に基づき上載質量の慣性力による発生応力が実橋脚と同一となる条件から各諸元を決定している。また入力地震動は、固有周期の相似比と一致するよう載荷時間を $1/\sqrt{10}$ 倍に調整した上で、兵庫県南部地震JRT実測波のNS及びEW成分を同時入力している。

3. 解析方法

解析モデルでは、図1(b)に示すように供試体の橋脚部をシェル要素、上載質量を集中質量要素および回転慣性要素によって表現し、両者を剛体要素にて接合している。材料構成則には鋼材の繰り返し載荷挙動をよく表現する三曲面モデル^{3,4)}を適用し、汎用構造解析ソフトABAQUSのユーザーサブルーチンとして組み込む。表2に三曲面モデルのパラメータを示す。また、粘性減衰は弾性加振での自由振動波形から定めた減衰定数0.213%を質量比例減衰として与え、曲げ1次の固有周期が実験と一致するよう基部に回転ばね要素を配置する。

4. 解析結果

図2に水平変位時刻歴応答を実験結果と解析結果について比較して示す。これを見るとNS方向変位に関して両者はよく一致するものの、EW方向変位は実験結果に較べて解析結果は残留変位が大きい。この誤差は、主に1~2秒付近での大きな入力地震加速度により供試体に塑性

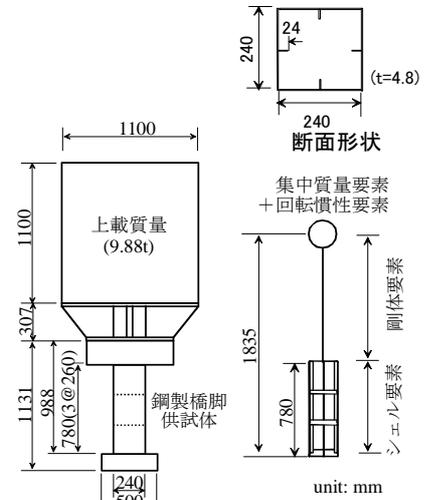


図1 解析対象供試体 (a) 実験供試体 (b) 解析モデル

表1 供試体諸元

R_R	$\bar{\lambda}_s$	γ/γ^*	R_S	a/b	t_r/t	$\bar{\lambda}$	P/P_y
0.44	0.46	1.03	0.27	1.08	1.00	0.42	0.083

表2 三曲面モデルのパラメータ

E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_{yp}	f_b/σ_y	β	ρ	κ
199.3	0.3	274.5	496.9	0.00596	0.65	100	2	3

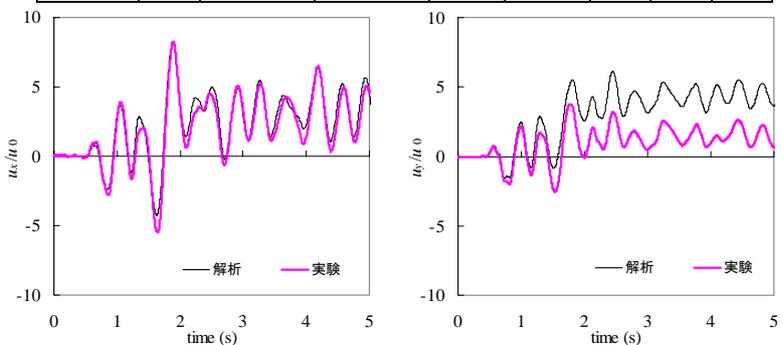


図2 水平変位時刻歴応答曲線 (a) NS方向 (b) EW方向

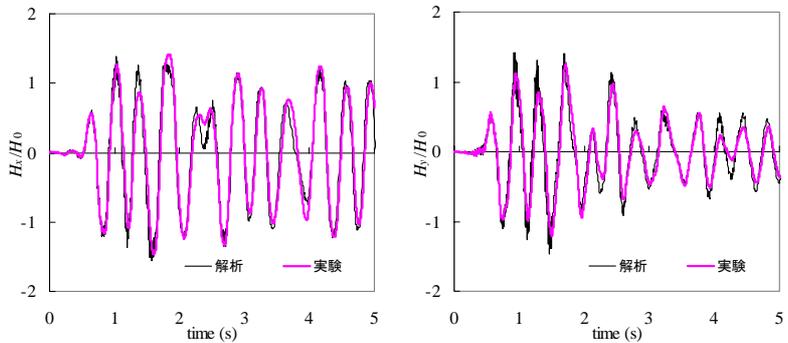


図3 水平荷重時刻歴応答曲線 (a) NS方向 (b) EW方向

キーワード：2方向地震動，動的応答解析，振動台実験

連絡先：〒466-8555 愛知県名古屋市中昭和区御所町 名古屋工業大学 TEL 052-735-5021 FAX 052-735-5563

変形が生じる領域において、解析の変位が実験に較べて大きくなっていることに起因すると考えられる。一方、その後の2秒以降の応答については振動中心がずれてはいるものの実験結果と解析結果の差異は小さい。また、図3に示すように水平荷重の時刻歴応答についてはNS方向、EW方向ともに解析結果は実験結果をよく再現している。

5. 解析モデルの検討

EW方向変位に差異が生じた要因を検討するため、材料構成則、粘性減衰、基部固定度を変化させた解析を実施しその影響を確認する。

(a) 材料構成則： 材料構成則に関する検討として2つのケースを検討する。1つは、材料強度のばらつきを考慮して降伏強度及び引張強度をともに1.1倍としたケース、もう1つは強度を変化させずに構成則を移動硬化則としたケースの解析を実施した。その結果いずれのケースも、図4(a)に示すように実験結果との差異が生じ始める2秒までの応答変位は4.の解析とほぼ同様であり材料構成則による影響は小さい。

(b) 粘性減衰： 粘性減衰の影響として、減衰定数を4.の解析の約10倍に相当する2%としたケースと、減衰定数は変化させずレーリー減衰により粘性減衰を導入したケースについて検討を行った。これについても、図4(b)に示すように4.の解析との応答の差は小さく粘性減衰による影響は小さいと考えられる。

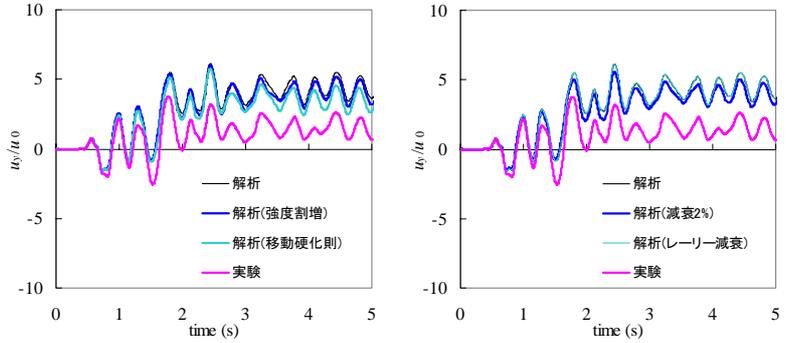
(c) 基部固定度： 図5に示すように橋脚供試体アンカー部の挙動の影響を考慮するため、供試体と振動台を締結するボルト位置に鉛直方向ばね要素を配置してより実際に近いモデル化を行う。

このばね要素は引張側と圧縮側で剛性が異なる非線形ばねとして設定する。図6は4.での解析による変位トラジェクトリを示したものであるが、解析による水平変位は実験結果と較べて第1象限(NW)方向へ大きくなっていることが分かる。そこで、基部非線形ばねを第1・3象限と第2・4象限の2つのグループに分け、それぞれの引張側剛性を k_1 、 k_2 と定める。なお、圧縮側剛性 k_c は、4.での解析と同様に曲げ1次モードの固有周期が一致するように定める。図7は $k_1 = 0.33k_c$ 、 $k_2 = 0.17k_c$ としたケースの解析における水平変位を示したものであるが、NS方向の解析精度を落とすことなく、EW方向の時刻歴応答が4.での解析に較べてより実験結果に接近している。ただしこの調整方法では特定方向の固定度のみが大幅に低下する状態となるため、現実的には発生しづらい事象である。今後、材料構成則のひずみ速度依存性等の他の要因に関する検討もと考えられる。

5. まとめ

鋼製橋脚の振動台実験結果により動的応答解析の解析精度の検証を行った。水平荷重の時刻歴応答については解析結果は実験結果をよく再現するものの、水平変位についてはNS方向に関して両者は精度良く一致するが、EW方向については実験結果に較べて解析結果は残留変位が大きいものとなった。この要因を検討するため材料構成則、粘性減衰、基部固定度を変化させた解析を実施しその影響を確認した。検討の結果、基部固定度の影響が大きく、固定度を調整することで応答を実験結果に近づけることが可能であることを確認した。

参考文献：1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002。2)土木学会：鋼・合成構造標準示方書Ⅳ耐震設計編，2008。3)後藤芳顕，王慶雲，高橋宣男，小畑誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.189-206，1998。4) Goto, Y., Jiang, K., and Obata, M. : Stability and ductility of thin-walled circular steel columns under cyclic bidirectional loading, *J. Struct. Engrg.*, Vol.132, No.10, ASCE, pp.1621-1631, 2006.



(a) 材料構成則 (b) 粘性減衰
図4 解析モデルによる水平応答変位(EW方向)への影響

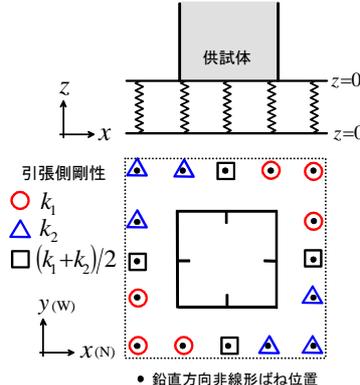


図5 橋脚基部鉛直方向ばね

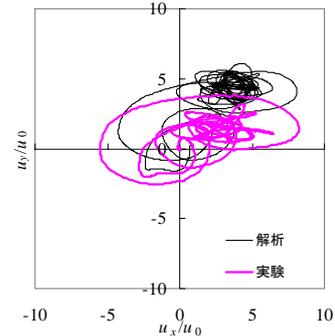
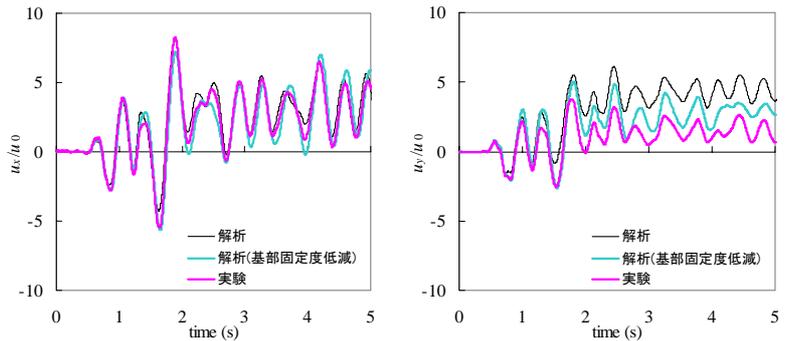


図6 変位トラジェクトリ



(a) NS方向 (b) EW方向
図7 水平応答変位への基部固定度の影響