

振動台実験による円形断面鋼製橋脚の安全性照査法に関する検討

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 学生会員 長田 直也

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 現状のレベル 2 地震動に対する鋼製橋脚の安全性の照査では、橋軸方向と橋軸直角方向のそれぞれに地震波の 1 方向成分を単独に入力した非線形動的応答解析により変位やひずみなどの応答値を算定し、あらかじめ設定された限界値以内になることがチェックされる¹⁾。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。そこで、著者らは 2 方向地震動下での鋼製橋脚の安全性照査法として、橋脚頂部における水平 2 方向の復元力と橋軸および橋軸直角の水平 2 軸まわりの復元曲げモーメントの相関関係により表現した限界曲線を提示している²⁾。本研究では、限界曲線の妥当性を、従来の数値解析による検証に加えて、より実現現象の再現性の高い鋼製橋脚模型供試体を用いた振動台実験結果に基づき検証を行う。

2. 鋼製橋脚における終局限界と安定基準 図 1 に示すような一定鉛直軸力 P 下において橋脚頂部に水平復元力 2 成分と水平 2 軸まわりのモーメント 2 成分が作用する場合を考える。慣性力を含めた作用外力下でつり合い状態にある橋脚に任意の変位増分 $(\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y)$ を頂部に与えたときに生じる復元力増分を $(\Delta F_x, \Delta F_y, \Delta M_x, \Delta M_y)$ とした場合の仕事の 2 次増分は以下の式で表される。

$$2\Delta^2 W = \Delta F_x \Delta u_x + \Delta F_y \Delta u_y + \Delta M_x \Delta \theta_x + \Delta M_y \Delta \theta_y \quad (1)$$

非弾性構造の安定基準はこの $\Delta^2 W$ を用いて安定: $\Delta^2 W > 0$ 、臨界: $\Delta^2 W = 0$ 、不安定: $\Delta^2 W < 0$ で表されるが、橋脚の終局限界としては道路橋示方書の限界状態と整合するように初めて $\Delta^2 W \leq 0$ となる場合と規定する²⁾。

3. 鋼製橋脚の限界曲線 図 1 に示す一定鉛直軸力 P 下の鋼製橋脚の水平 2 方向復元力 F_x, F_y および水平 2 軸まわりの復元モーメント M_x, M_y の限界曲線²⁾ は、鉛直軸力 P 作用下での各復元力の限界値 $\bar{F}_{xu}^P, \bar{F}_{yu}^P$ を用いて以下のように表される。

$$\left| \frac{F_x^{eq}}{\bar{F}_{xu}^P} \right|^\beta + \left| \frac{F_y^{eq}}{\bar{F}_{yu}^P} \right|^\beta = 1 \quad (2)$$

ここで、等価水平復元力 F_x^{eq}, F_y^{eq} は有効高さ h_x^{ef}, h_y^{ef} を用いて復元モーメントの影響を式(3a,b)により換算して考慮したものである。

$$F_x^{eq} = F_x + M_y / h_y^{ef}, \quad F_y^{eq} = F_y - M_x / h_x^{ef} \quad (3a,b)$$

なお、各復元力の限界値 $\bar{F}_{xu}^P, \bar{F}_{yu}^P$ は各方向への Pushover 解析により式(1)による安定基準を用いて同定を行う。また、有効高さ h_x^{ef}, h_y^{ef} は、橋脚頂部に回転角を与えた単調載荷解析に基づき同様に求めた復元モーメントの限界値 $\bar{M}_{xu}^P, \bar{M}_{yu}^P$ を式(4a,b)へ適用して算出する。

$$h_x^{ef} = \bar{M}_{yu}^P / \bar{F}_{xu}^P, \quad h_y^{ef} = -\bar{M}_{xu}^P / \bar{F}_{yu}^P \quad (4a,b)$$

4. 実験概要 対象とする振動台実験は 2010 年に中国同濟大学にて実施した円形断面鋼製橋脚の振動台実験である。図 2(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、実橋脚に対する相似比を 1/8 スケールとし、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に載荷時間を $1/\sqrt{8}$ 倍に調整した上で、1 方向載荷実験では日本海中部地震 Tsugaru 実測波 LG 成分を 300% に増幅した入力動を用い、2 方向載荷実験では同実測波 LG および TR

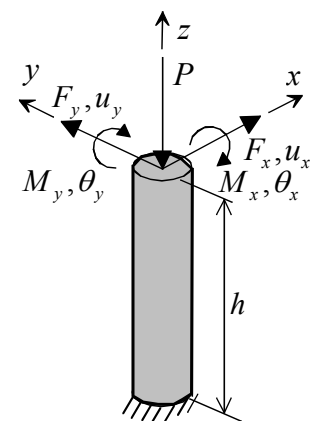
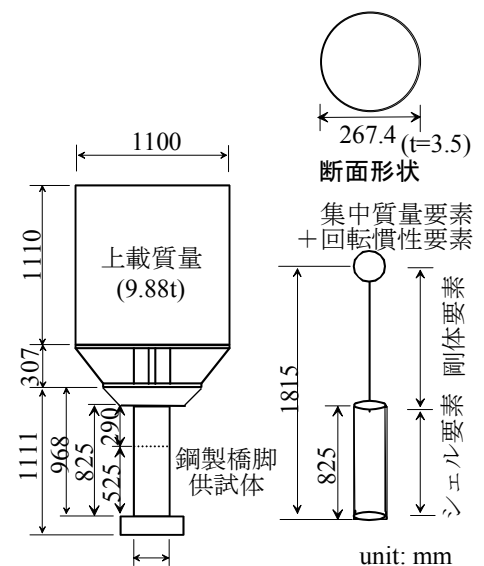


図 1 橋脚頂部における変位と作用復元力



(a) 供試体 (b) 解析モデル
図 2 実験供試体

表 1 供試体諸元

R_t	$\bar{\lambda}$	P/P_y
0.072	0.42	0.083

表 2 三曲面モデルのパラメータ

鋼種	E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ε_{yp}^0	f_b/σ_y	β	ρ	κ
STK400	233	0.3	399.9	498.2	0.007	0.38	150	2	2

キーワード：2 方向地震動，復元力，耐震安全照査法，振動台実験，動的応答解析

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

成分をそれぞれ 225%に増幅して同時入力している。

5. 解析方法 振動台実験との比較および実験供試体橋脚の限界値を算出するために数値解析を実施する。解析には鋼材の繰返し構成則として三曲面モデルを USER SUBROUTINE 機能に組み込んだ ABAQUS を用いる。解析モデルは図 2(b)に示すように橋脚部に 4 節点シェル要素(S4R)，それより上には 3 次元チモシェンコはり要素(B31)を用い，上載質量部は変形しないものとして剛性を非常に高くしている。また，供試体基部には線形の回転ばね要素を配置し，本加振前の弾性加振での曲げ 1 次の固有周期が実験結果と一致するようにばね剛性を調整している。鋼材の三曲面モデルで用いる材料パラメータの値を表 2 に示す。なお，減衰は弾性加振での自由振動波形から定めた曲げ 1 次および曲げ 2 次モードにおける減衰定数に基づき Rayleigh 減衰として与えている。

6. 実験結果および数値解析との比較 1 方向載荷実験における橋脚頂部の水平変位成分と等価水平復元力成分の時刻歴応答を数値解析結果と比較して図 3，図 4 に示す。実験での橋脚頂部に作用する水平復元力成分と復元モーメント成分は水平 2 軸に関する並進加速度成分と回転加速度成分から慣性力成分として求めている。また，これらの図では，Pushover 解析での水平変位および水平力の限界値 $\bar{u}_{xu}$ ， $\bar{u}_{yu}$ ， $\bar{F}_{xu}$ ， $\bar{F}_{yu}$ により基準化している。実験，解析ともに図 5 に示すように基部の局部座屈により倒壊に至った，図 3，図 4 に示すように解析による変位，等価復元力の時刻歴応答はいずれも精度良く実験結果を再現している。ただし，図 3(a)，(b)の比較からわかるように解析において不安定に到達し変位が増大する 18 秒以降では解析が実験と較べて変位を若干大きく評価しており，変位に較べ復元力の方がより精度良く予測できると考えられる。

7. 限界曲線の検証 式(2)で表される限界曲線の妥当性を実験と解析により検証する。動的応答解析における限界値は，式(1)で示した安定基準に基づき，不安定状態 $\Delta^2 W < 0$ が初めて生じる時刻以前における次の無次元化復元力合力の最大値 $F_{\Sigma m}^{eq}/F_{\Sigma u}^p$ として下式により同定する²⁾。

$$F_{\Sigma}^{eq}/F_{\Sigma u}^p = \sqrt{F_x^{eq2} + F_y^{eq2}} / \sqrt{F_{xu}^{p2} + F_{yu}^{p2}} \quad (5)$$

限界値 $F_{\Sigma m}^{eq}/F_{\Sigma u}^p$ を各ケースについて表 3 に示す。これによると $F_{\Sigma m}^{eq}/F_{\Sigma u}^p$ は 1 方向載荷では若干 1 を下回るものの，他はいずれの場合も 1 以上でその近傍に存在する。したがって，Pushover 解析の限界曲線により実験や動的応答解析での終局状態への到達を精度良く表せることがわかる。また，2 方向載荷において等価水平復元力成分の軌跡を，限界曲線と比較して図 6 に示す。図 4，図 6 を見ると，実験と解析では同定された初期不安定点および $F_{\Sigma m}^{eq}/F_{\Sigma u}^p$ の時刻が異なるものの，いずれのケースでも応答値が限界曲線に到達した後不安定になっており，限界曲線の妥当性が確認できる。

8. まとめ 鋼製橋脚の振動台実験結果により復元力成分を用いた限界曲線の妥当性の検証を行った。その結果，動的応答解析における復元力の解析精度は高く，また，実験，解析結果とも限界曲線への到達後に橋脚が不安定に至る現象が示されており，限界曲線の妥当性が確認された。

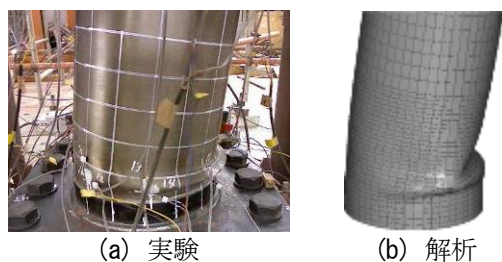


図 5 基部の局部変形(1 方向載荷)

表 3 復元力合力の限界値 $F_{\Sigma m}^{eq}/F_{\Sigma u}^p$

載荷方法	振動台実験	動的応答解析
1 方向	0.96	1.05
2 方向	1.02	1.03

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)後藤芳顕，海老澤健正，石川純平：2 方向水平力と 2 軸曲げを受ける鋼製橋脚の限界状態と連続高架橋の耐震安全性の検討，構造工学論文集，Vol.57A，pp.490-499，2011。

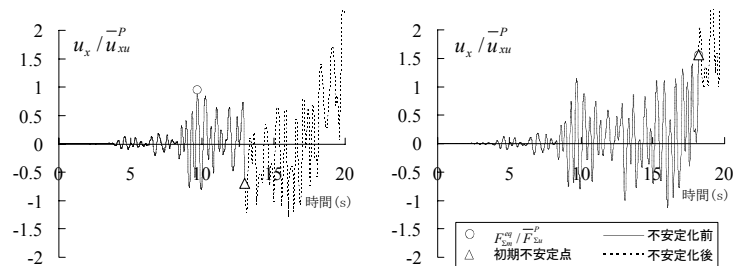


図 3 水平変位時刻歴応答(1 方向載荷)

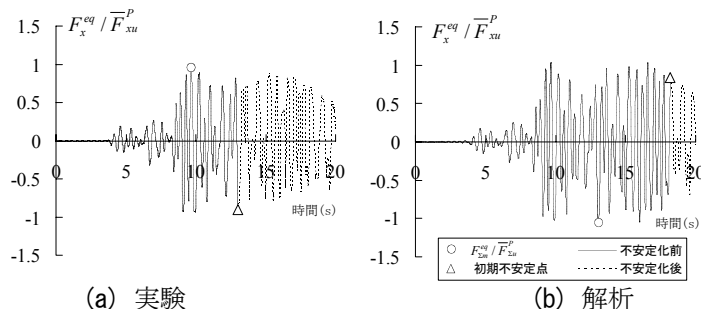


図 4 等価水平復元力時刻歴応答(1 方向載荷)

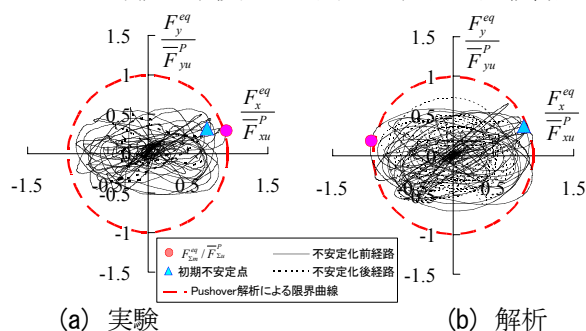


図 6 等価水平復元力トラジェクトリ(2 方向載荷)