

円形断面鋼製橋脚を持つ連続高架橋模型の 2方向加振実験による終局挙動のFE解析

名古屋工業大学 正員 海老澤健正, 同 フェロー 後藤 芳顯
同 フェロー 小畑 誠, 瀧上工業株式会社 正員 奥村 徹
同済大学 Jiangzhong Li, Yan Xu

1. はじめに: 連続高架橋のレベル2地震動に対する耐震設計では、通常、橋脚の損傷のみが許容されているため、従来の研究では橋脚単体の終局挙動に関するものがほとんどである。しかし、実際の連続高架橋では、橋脚一支承(ゴム支承)ー上部構造の相互作用が生じる。ここでは、これらの連成挙動をなるべく実状に即した形で再現した2径間連続高架橋模型($s=1/6.7$)を用いた水平2方向同時加振実験結果¹⁾に基づき、その終局挙動がFE解析でどの程度正確に予測できるかについて検討した。橋脚は円形断面鋼製橋脚を対象とする。橋脚のFEモデルは、すでに単柱橋脚を対象とした静的繰り返し実験²⁾、振動台加振実験³⁾により解析精度が確認されている繰り返し構成則に三曲面モデル⁴⁾を導入した非線形シェル要素で離散化する。なお、高架橋における橋脚の終局挙動については、過去に多く検討された連成効果のない単柱の加振実験($s=1/8$)³⁾による挙動との比較も行う。

2. 実験概要: 連続高架橋および単柱の加振実験のセットアップは正方形断面橋脚を用いた加振実験⁵⁾と同様であり、いずれの実験でも橋脚以外の構成要素は加振時に損傷しないように諸元を決定している。表-1に円形断面鋼製橋脚の諸元を示す。入力地震動としては、日本海中部地震津軽大橋観測波(Tsugaru波)の加速度振幅を拡大するとともに、時間軸を相似則から $1/\sqrt{s}$ 倍とした水平2方向成分を用いた。

3. FEモデル: 解析には非線形汎用コードABAQUSを用いる。鋼製橋脚の鋼管部およびダイヤフラムは厚肉シェル要素(S4R)で離散化した。板厚ならびに鋼管直径については実測値を用い、残留応力については無視した。鋼材の材料構成則である三曲面モデルのパラメータは鋼材1軸引張試験をもとに決定した。減衰は橋脚弾性加振実験より求め、剛性比例型の粘性減衰として導入した。さらに、橋脚基部の固定度を表す回転バネ剛性は、FEモデルの1次固有周期が弾性加振実験と一致するように決定した。また、鋼製橋脚以外のモデル化については正方形断面橋脚の加振実験⁵⁾と同一である。

4. 実験と解析の比較: 連続高架橋加振実験(Tsugaru 270%LG+TR)での中央橋脚P2の橋脚頂部水平変位成分と等価水平復元力合力⁶⁾を実大橋脚に換算し、その時刻歴応答を図-1に示す。また、比較として、等価水平復元力合力はPushover解析より定められた最大復元力を限界値⁶⁾として無次元化を行っている。まず、連続高架橋加振実験では、実験、解析ともに各橋脚の応答変位は上部構造を介して連結されていることによりほぼ同一であるが、表-1に示すように軸力比の大きい中央橋脚P2がはじめに復元力限界値への到達、それに続いて端部橋脚P1が到達している。この限界値に到達後、実験、解析ともに変位が増大していくことから、Pushover解析により定められる水平復元力の限界値が工学的にも

表-1 橋脚パラメータ

橋脚	連続高架橋 加振実験			単柱 加振 実験
	P1	P2	P3	
P/P_y	0.078	0.120	0.080	0.084
$\bar{\lambda}$	0.456	0.456	0.456	0.523
R_f	0.127	0.127	0.129	0.099

表-2 限界点到達時刻 (単位:s)

橋脚	連続高架橋 加振実験			単柱 加振 実験
	P1	P2	P3	
実験	37.8	35.4	37.8	17.5
解析	35.4	33.1	35.4	17.5

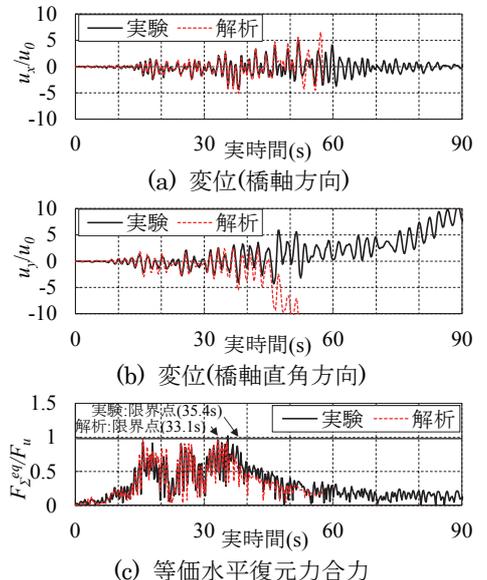


図-1 高架橋加振実験時刻歴応答(P2橋脚)

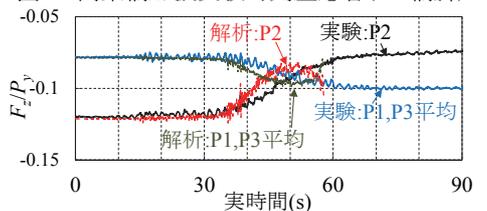


図-2 高架橋加振実験での鉛直軸力変動

キーワード 連続高架橋, 加振実験, FEM解析, 鋼製橋脚

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市長和区御器所町 名古屋工業大学 TEL052-735-5021 FAX052-735-5563

終局状態への到達を表すと考えられる。また、この限界値へ到達し橋脚が終局状態に至る 35 秒付近までは、解析の橋脚頂部変位は実験結果を良く再現する。しかし、終局状態から倒壊状態へ至る領域においては、解析結果による橋脚基部の局部座屈変形の進展が早く、橋脚頂部の振動中心の橋軸直角方向への変位が急増し 45 秒程度で倒壊に至るのに対し、実験での変位の増加は解析と較べて遅く、75 秒以降に増大し、さらに逆方向に倒壊する。

次に、各橋脚に作用する鉛直軸力の変動を図-2 に示す。これによると、実験、解析ともに加振に伴い初期軸力の大きい中央橋脚での座屈変形が両側の橋脚に先行することで、中央橋脚から両側の端部橋脚への軸力の再配分が生じている。解析では実験に較べ軸力の再配分が急速に進行するが、上で述べたように解析における中央橋脚の座屈変形の進展が早期に生じるためであると考えられる。

5. 単柱加振実験との比較： 単柱加振実験(Tsugaru 225%LG+TR)での橋脚頂部水平変位成分と等価水平復元力合力を図-3 に示す。単柱加振実験では、18 秒付近で限界値に到達し終局状態へ至った後も、倒壊が進行す 45 秒付近までは解析と実験とはよく一致している。これは、単柱供試体が静定構造であり応力の再配分がないことによると考えられる。高架橋では不静定構造であるため終局状態以降に生じる各橋脚の変形状態の誤差が橋脚間の荷重の再配分に大きく影響を与え(図-2)、さらに、地震応答にも大きな影響が生じると考えられる。

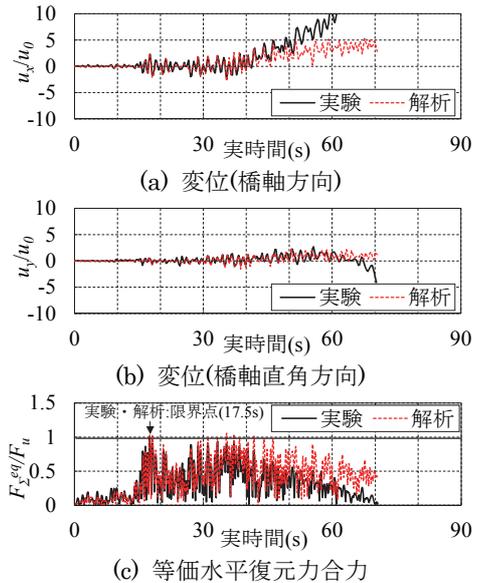


図-3 単柱加振実験時刻歴応答

つぎに、倒壊挙動の比較を行うため、局部座屈変形および等価水平復元力合力-吸収エネルギー関係を図-4、図-5 に示す。これを見ると、単柱加振実験では橋脚基部の局部座屈変形が一方に偏っているのに対し、高架橋加振実験では各橋脚が支承を介して上部構造に拘束されるので基部の局部座屈変形はほぼ軸対象な提灯座屈モードとなっている。このような軸対称な塑性変座屈モードが各橋脚に生じることで、倒壊に至るまでの橋脚 1 本当たりの吸収エネルギーは単柱加振実験と較べて 2 倍以上大きくなっている。

6. まとめ： 円形断面鋼製橋脚を対象とした連続高架橋の多方向加振実験を実施し、その終局挙動解析への FE モデル

の適用性の検討した。その結果、以下のことが判明した。

- ・復元力が限界値に到達するまでは FE モデルは橋脚の挙動を比較的精度よく解析できるが、終局状態から倒壊状態へ至る領域では精度が低下する。
- ・Pushover 解析による復元力限界値を用いて橋脚の終局状態への到達を判定できる。
- ・高架橋では上部構造、支承との連成効果により橋脚のエネルギー吸収能が向上するので、単柱に比べ、倒壊に対する抵抗性も高まる。

謝辞： 本研究は JSPS 科研費 23246084 の助成を受けたものです。

参考文献： 1) 後藤芳顕ら，第 17 性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp.431-438，2014. 2) 後藤芳顕ら，構造工学論文集，Vol.55A，pp.629-642，2009. 3) 後藤芳顕ら，土木学会論文集 A1，vol.69，No.1，pp.101-120，2013. 4) 後藤芳顕ら，土木学会論文集，No.591/I-43，pp.189-206，1998. 5) 鈴木俊洋ら，第 70 回年次学術講演会講演概要集，2015. 6) 後藤芳顕ら，構造工学論文集，vol.57A，pp.490-499.

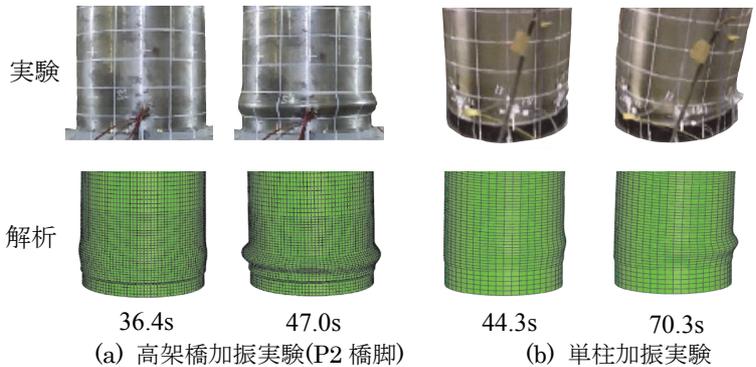


図-4 橋脚基部の局部座屈変形

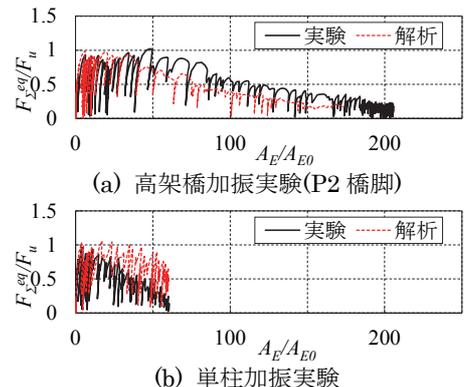


図-5 等価水平復元力合力-吸収エネルギー関係