

## 鋼製橋脚の現行の耐震照査法の妥当性と 水平 2 方向地震動同時入力下での安全性に関する検討

鳥取県庁 正員 松本 英樹  
名古屋工業大学 フェロー 後藤 芳顕, 同 正員 海老澤健正

**1. はじめに:** 現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>におけるレベル 2 地震動に対する鋼製橋脚の耐震安全性照査は, 水平 1 方向設計地震動下での M-φ モデルを導入したはり要素による非線形動的解析の応答値が許容値曲率以内に収まることを橋軸と橋軸直角方向に関し独立にチェックすることでなされる. この許容値には漸増型静的両振り繰返し試験での包絡線のピーク点に対応する変位や曲率が用いられるが, これらは地震動のようなランダムな繰返し荷重下では載荷履歴の影響を受けやすく, 任意の地震動が作用した場合の許容値の精度は必ずしも明らかではない. また, 橋軸方向と橋軸直角方向の水平 1 方向地震動入力に対してそれぞれ独立に照査することが規定されているが, 実地震動下では水平 2 方向地震動の連成の影響で耐震性能が低下し十分な安全性が確保できない可能性もある. 本研究では, 現行の道示の耐震設計法に基づき設計された無充填円形断面, 正方形断面鋼製橋脚を対象に, 構成則に三曲面モデル<sup>2)</sup>を導入した精緻なシェル要素でモデル化し, 各種地震動下の終局挙動特性を複合非線形動的解析で詳細に検討することで, 現行設計法の妥当性と水平 2 方向地震動が同時に作用した場合の安全性について考察する.

**2. 解析モデル:** 橋脚モデルは H24 道示に基づく最適設計で設定した. 通常的设计では橋脚は橋軸方向と橋軸直角方向の載荷点高さ  $h$  は異なるモデルとするが, ここでは, 図-1 のように上載質量  $M$  を 1 質点の集中質量要素に簡略化し, 固定支承を想定し橋脚頂部と剛結とする. また, 橋脚柱は M-φ 非線形履歴モデルを導入したはり要素, フーチングは集中質量要素と回転慣性要素, 地盤ばねは並進, 回転, 並進-回転の連成を考慮した集約ばね要素<sup>3)</sup>でそれぞれ表現する. 設計条件として  $M, h$  を与え, 設計変数を連続変数である橋脚柱の断面寸法  $(D, t), (b, t, h_r, t_r)$  と離散的に決定するフーチング(幅, 厚さおよび杭の径の異なる 4 種類から選択)とし, 橋脚柱の鋼重最小化を行った. なお, 鋼種は SM490, 地盤は 2 種地盤とする. 橋脚柱は円形・正方形各断面について 3 種類の設計条件  $M, h$  の下で決定した断面諸元を表-1 に示す. いずれの橋脚もレベル 2(タイプ II)地震動に対する照査が断面決定の支配要因となっている.

これらの橋脚に対するシェル要素によるモデル化では, 図-1 の橋脚柱の梁要素の部分をシェル要素に変更し, ダイアフラムは  $2D$  (円形断面),  $b$  (円形断面)ごとに設ける. 鋼材の材料構成則には三曲面モデル(降伏点 315.5MPa, 引張強度 584.1MPa(真応力))を適用し, ABAQUS により解析を行う.

**3. 検討方法:** 上記の M-φ モデル, シェルモデルに対し, 水平 1 方向の設計地震動(レベル 2 タイプ II)および各種観測地震動の振幅に様々な一定の拡大倍率を乗じた水平 1 方向および 2 方向同時入力地震動を用いて動的応答解析を行い, 基部回転を除去した橋脚柱の純粋の横方向変位ならびに横方向復元力の応答値を算出する. シェルモデルでの動的解析による終局状態への到達は, 安定基準<sup>4)</sup>により判定する. すなわち, 橋脚全体系の各集中質量点での変位, 回転角の増分と対応する復元力, 復元モーメントの増分から求められる仕事 2 次増分  $\Delta^2W$  が,  $\Delta^2W > 0$  で安定,  $\Delta^2W < 0$  で不安定と判定する.  $\Delta^2W = 0$  は臨界点で, 水平 1 方向地震動下では道示の許容限界点とほぼ整合し, Pushover 解析でのピーク点と近似的に一致する. 以上のようにして各種橋脚のシェルモデルの動解で算定

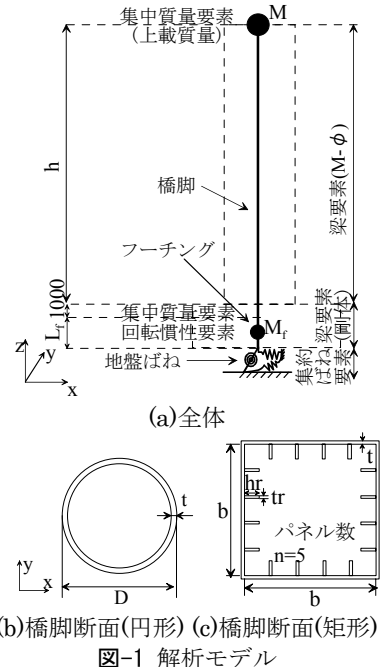


表-1 解析モデル諸元

(a) 円形断面橋脚								(b) 矩形断面橋脚										
橋脚	$M$ [ton]	$h$ [m]	$D$ [m]	$t$ [mm]	$R_t$	$\bar{\lambda}$	$P/P_y$	橋脚	$M$ [ton]	$h$ [m]	$b$ [m]	$t$ [mm]	$h_r$ [mm]	$t_r$ [mm]	$R_R$	$R_S$	$\bar{\lambda}$	$P/P_y$
No.1	1080	12	2.09	45.9	0.058	0.26	0.11	No.1	1080	12	2.16	22.4	232	21.2	0.40	0.70	0.22	0.12
No.2	1080	14	2.33	43.9	0.068	0.29	0.11	No.2	1080	14	2.46	21.1	256	23.4	0.49	0.70	0.24	0.11
No.3	1500	12	2.61	47.4	0.070	0.21	0.12	No.3	1500	12	2.31	25.1	272	25.1	0.38	0.70	0.20	0.14

キーワード 耐震照査法, 鋼製橋脚, FEM 解析

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

される不安定点に到達以前の横方向変位ならびに横方向復元力の応答値の最大値 $\hat{u}_{xm(shell)}^{all}$ ,  $\hat{F}_{xm(shell)}^{all}$ を同定し, これらを当該橋脚に対応する M- $\phi$ モデルの Pushover 解析において同定される道示の許容曲率到達時の横方向変位 $\hat{u}_{u(bean)}^P$ , 復元力 $\hat{F}_{u(bean)}^P$ ならびにシェルモデルの Pushover 解析でのピーク点の横方向変位 $\hat{u}_{u(shell)}^P$ , 復元力 $\hat{F}_{u(shell)}^P$ と比較する.

**4. 現行設計法の妥当性:** 解析結果の一例として円形 No.3 橋脚と正方形 No.1 橋脚に道示 II-II-1 設計地震動を種々の加振倍率を乗じて入力した際のシェルモデルでの最大応答変位, 最大復元力を図-2, 図-3 に示す. 図中には 3. で示した安定基準で不安定に到達する場合は黒塗りで, 到達せず安定の場合には白抜きでプロットしている. これによると円形断面橋脚では設計時の加振倍率(1.0)では安定で, 不安定となる最低の加振倍率は他のケースにおいても 1.4~1.8 であることから, 今回の検討範囲では道示で設計した円形断面橋脚は妥当な耐震性能を有している. 一方, 正方形断面橋脚では不安定となる最低の加振倍率は 0.8~1.2 と円形断面橋脚に比べ余裕度が小さい. 一方, 動解における最大応答変位・復元力がシェルモデルの Pushover 解析でのピーク点変位・復元力を超えると橋脚によらず不安定に到達しており, より精緻な照査を行う場合にはこれらを限界値として用いることが可能と考えられる. 道示の許容曲率時での限界変位, 限界復元力をシェル要素 Pushover 解析でのピーク点と比較すると, 図-2, 図-3 に示すように円形断面橋脚では両者の復元力はほぼ一致するのに対し, 変位についてはシェルモデルの限界値に比べ道示は半分程度となっている. 一方, 正方形断面橋脚での両者の限界変位の比は $\hat{u}_{u(bean)}^P/\hat{u}_{u(shell)}^P = 0.8\sim 1.2$  と小さく円形断面橋脚に較べ小さくなっている. なお, 復元力は $\hat{F}_{u(bean)}^P/\hat{F}_{u(shell)}^P \cong 1.2$  とやや道示の限界変位が大きくなっている.

M- $\phi$ モデルで算定される応答値の算定精度を検証するために, JRT NS 観測波に種々の拡大倍率を乗じて入力した場合の最大応答変位をシェルモデルと比較した(図-4). これによると, Pushover 解析のピーク点を越えると両モデルの最大応答変位の差異は大きくなるが, ピーク点変位をまでは両モデルはほぼ一致している.

**5. 水平 2 方向同時入力に対する安全性:** 水平 2 方向地震動の同時入力による影響を検討として, 図-5 にはシェルモデルでの JRT 観測波 NS 1 方向入力時と JRT NS+EW の 2 方向同時入力時の NS 方向の最大応答変位を示す. 今回の解析モデルでは NS 方向が EW 方向と較べて卓越する. 図-5 より, 水平 1 方向入力と較べ水平 2 方向同時入力では, 小さい加振倍率で不安定に至るとともに同一の加振倍率での最大応答変位が大きい. この傾向は応答値が Pushover 解析でのピーク点変位を越えると顕著となる. 以上から, 現行設計法に基づく橋脚の場合, 水平 2 方向地震動入力下では, 限界点を越えるとは急激に耐力が低下し応答変位が大きくなる可能性がある.

**6. まとめ:** 本研究では, H24 道示に基づき設計した円形断面および正方形断面の鋼製橋脚を対象に, シェル要素を用いた FE 解析と比較することで現行設計法の妥当性を確認した. その結果, 水平 1 方向入力に対しては正方形断面では余裕度が小さいものの円形断面橋脚では妥当な耐震性能を有していること, 水平 2 方向同時入力では水平 1 方向入力と較べ限界点を越えると耐力が低下し応答変位が大きくなる可能性があることが確認された.

**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.

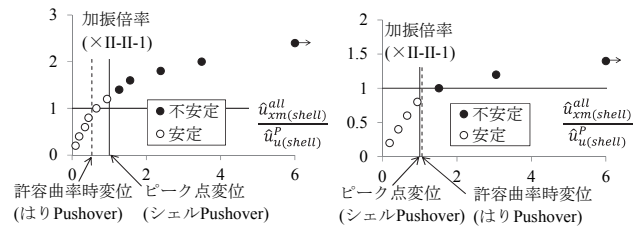


図-2 加振倍率-最大応答変位関係(II-II-1)

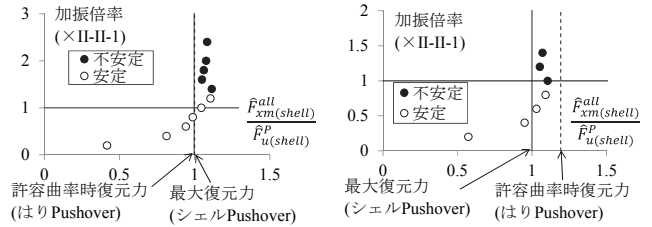


図-3 加振倍率-最大応答復元力関係(II-II-1)

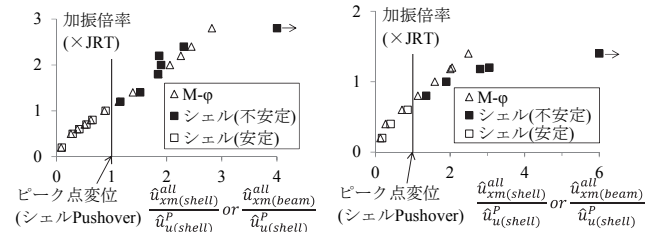


図-4 加振倍率-最大応答変位関係(JRT NS)

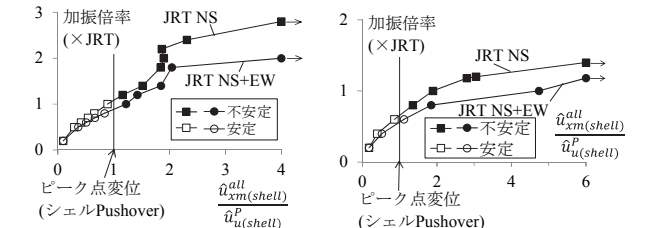


図-5 加振倍率-最大応答変位関係(JRT NS+EW)