

2 方向地震動を受ける円形断面鋼製橋脚の動的照査法の提案

株式会社日建設シビル 正会員 ○村木 正幸 名古屋工業大学大学院 フェロー会員 後藤 芳顕

1. はじめに：円形断面鋼製橋脚柱の耐震安全性をより確実に保証するために水平2方向地震動成分の連成を考慮した照査法について検討を行う．ここでは道路橋示方書の1方向地震動に対する照査法¹⁾と整合性を保つように、非弾性系での安定論の概念を用いて、2方向載荷での終局限界を極限点挙動で安定から不安定に移行する境界として定義する．そして照査法としては、3次元はりモデルを用いた複合非線形動的解析により得られる水平2方向変位成分を限界値に対して照査する変位照査法の他に、あらたに、水平2方向復元力成分を用いる復元力照査法についても検討する．

2. 2方向載荷における終局状態の定義と検討方法：2方向載荷での終局限界を極限点挙動で初めて不安定となる点として定義する．橋脚頂部に任意の2方向水平変位増分 $(\Delta u_x, \Delta u_y)$ を与えた場合に生じる水平復元力増分を $(\Delta H_x, \Delta H_y)$ とすると、仕事の2次増分 $\Delta^2 W$ は $2\Delta^2 W = (\Delta H_x \cdot \Delta u_x + \Delta H_y \cdot \Delta u_y)$ と定義される．非弾性構造の安定基準は $\Delta^2 W$ を用いて(安定： $\Delta^2 W > 0$ ，不安定： $\Delta^2 W < 0$)表され、終局限界は安定から不安定に移行する過程で、初めて $\Delta^2 W = 0$ を満足する点として定義することができる．現行の実務における終局状態の判定は設計地震動に対して変位やひずみなどの応答値を複合非線形動的解析により計算し、あらかじめ設定した限界値に対して照査する手法が用いられていることから、本研究でも照査対象の物理量として水平2方向変位成分と水平2方向復元力成分に注目してその限界値の設定方法について検討する．現象学的な考察より、水平変位や水平復元力の最大値がある限界を超えるとその後不安定状態が生じると考え、以下に限界値を定義する．

(1)変位の限界値＝不安定化前最大変位 $u_{\Sigma m} = \left(\sqrt{u_x^2 + u_y^2} \right)_{\max}$ (不安定状態 $\Delta^2 W < 0$ が初めて生じた場合のそれ以前における水平変位の最大値)

(2)水平復元力の限界値＝不安定化前最大復元力 $H_{\Sigma m} = \left(\sqrt{H_x^2 + H_y^2} \right)_{\max}$ (不安定状態 $\Delta^2 W < 0$ が初めて生じた場合のそれ以前における復元力の最大値)

3. Pushover 解析による限界曲線：2. では橋脚の終局限界を2成分の水平復元力や水平変位による限界値で表すことを検討した．これらの限界値は厳密に言えば終局限界に至るまでの塑性履歴に影響を受けるが、この影響が十分小さい場合、Pushover 解析で得られる限界値は方向性のない円形断面橋脚においては限界値を半径とする円形の限界曲線で表される．ここでは、シェル要素による2種類の橋脚モデル(図-1、表-1)を対象に Pushover 解析で求めた限界曲線と各種水平2方向地震動下の動的応答解析による限界値を比較することにより荷重履歴が限界値に与える影響を検討する．

4. 地震応答解析による載荷履歴が限界値に与える影響の検討：各種直下型ならびに海溝型の実測地震波の水平2方向成分ならびにこれらに一定の拡大ならびに低減係数を乗じて作成した成分を用いて図-1の2種類の橋脚モデルに対して各種2方向地震波入力による複合非線形動的解析を行う．橋脚モデルの幾何学定数と諸元を表-1に示す．解析結果から2.の定義による限界値と、Pushover 解析により得られた限界曲線との比較を図-2に示す．ここで無次元化に用い

た H_u^p 、 u_u^p はPushover 解析による水平復元力の最大値とその時の水平変位である．図-2には、終局限界

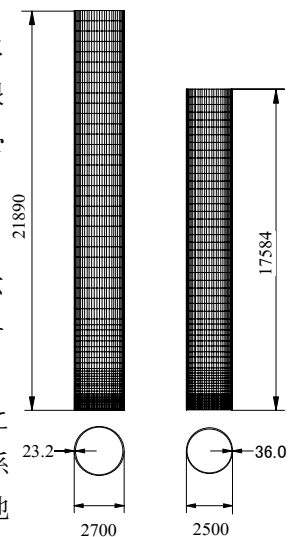


図-1. 解析モデル

表-1 橋脚モデルの幾何学定数と諸元

供試体	鋼種	H (mm)	D=2R (mm)	t (mm)	R _t	$\bar{\lambda}$	P/P _y	H ₀ (kN)	u ₀ (mm)
No1	SS400	21890	1350	23.2	0.110	0.500	0.10	1250	0.122
No2	SM490	17584	1250	36.0	0.087	0.506	0.12	2674	0.111

キーワード 2方向地震動、安定基準、有限要素解析

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 TEL052-732-2111

状態に達しなかった場合($\Delta^2 W > 0$)については、全応答解析での最大の応答値を白抜き記入している。図-2 から水平復元力成分で表した限界値は、Pushover 解析による限界曲線の近傍に分布するとともに、終局限界に到達しない場合は限界曲線内部に分布する。これより、Pushover 解析による限界曲線は任意の2方向地震動を受ける鋼製橋脚の限界値を精度の良く表す妥当なものであることがわかる。一方、水平変位成分の限界値は塑性履歴の影響が大きく、限界曲線の内外に大きくばらついている。水平復

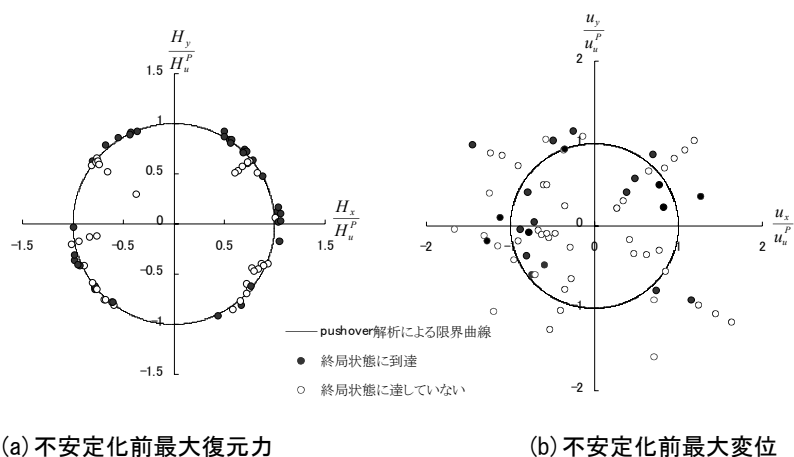


図-2 地震応答解析における各種限界値と限界曲線

元力の限界曲線付近での橋脚の挙動を調べるために、復元力の限界値、終局限界値に到達しない場合は復元力の最大値と全解析過程中に生じた最大応答変位 $u_{\Sigma m}^{all}/u_u^P$ との関係を図-3 に示す。

図-3 から、 $H_{\Sigma m}/H_u^P$, $H_{\Sigma m}^{all}/H_u^P$ が増加して限界曲線の位置に相当する1近傍になると、終局限界に到達し $u_{\Sigma m}^{all}/u_u^P$ も急激に増大する。これは、工学的な現象面での橋脚の終局限界状態とも合致する。

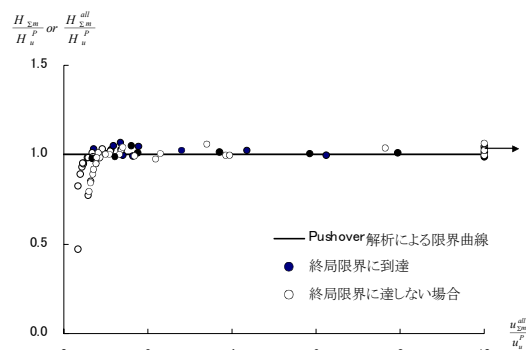


図-3 応答復元力の最大値と最大応答変位の関係

5. 水平復元力を用いた設計限界曲線と照査：3次元はりモデルを用いた複合非線形動的解析により耐震安全性を照査する手法についての枠組みを例示する。設計での限界曲線の内側では橋脚は限界状態に到達してはならない。しかし、図-2 の水平復元力の限界曲線では内側でも不安定状態を生じているケースがあることがわかる。そこで応答解析で得られた限界値が $\gamma_{bl} H_{\Sigma m}/H_u^P \geq 1$ を必ず満たすよう安全係数 $\gamma_{bl}=1.02$ を定義する。安全係数を用いることで、少なくとも今回のケースでは限界曲線の内側では不安定状態を生じない。

水平復元力の Pushover 解析による限界値 H_u^P については任意の円形断面橋脚に対して算定式を誘導しておく必要があるが、多数の橋脚に関する数値解より最小二乗法で表-2 の係数を定め、次式を誘導した 2)。

$$H_u^P/H_0 = \left\{ \frac{C_1}{R_t^a \lambda^b (1+P/P_y)^c} + C_2 \right\} (1-P/P_y)^{-1} \quad (1)$$

照査される橋脚の水平復元力の応答値ははり要素による複合非線形動的解析により算定されるため、シェル要素を

用いたより正確な応答値に較べ誤差が生じるので、安全係数 γ_a を考慮する必要がある。図-1 に示した橋脚モデルをシェル要素とはり要素でそれぞれモデル化した時の地震応答解析における復元力の応答値を表-3 に示す。シェル要素による解析で終局限界に到達したものは必ずはり要素の解析でも終局限界に到達する必要がある。限界値に到達したケースについて、はり要素による応答値 $H_{\Sigma m}^B$ が $\gamma_a \gamma_{bl} H_{\Sigma m}^B/H_u^P \geq \gamma_{bl} H_{\Sigma m}/H_u^P \geq 1$ を満足するように γ_a を決定する。表-3 より検討し、 $\gamma_a=1.07$ となる。限られたケースの検討ではあるが安全係数はいずれも1に近く本照査法の精度が良いことが確認される。

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)後藤芳顕ら：2方向繰り返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性，土木学会論文集，No780/I-780，pp.181-198，2005

表-2 予測式における未知定数

鋼種	a	b	c	C ₁	C ₂
SM490	0.575	0.339	3.090	0.123	0.814
SS400	0.139	0.064	0.591	1.060	-0.250

表-3 シェル要素とはり要素での応答値

橋脚	地震波	シェル要素		はり要素
		$\Delta^2 W < 0$	$\gamma_{bl} H_{\Sigma m}/H_u^P$ or $\gamma_{bl} H_{\Sigma m}^{all}/H_u^P$	$\gamma_{bl} H_{\Sigma m}^B/H_u^P$ or $\gamma_{bl} H_{\Sigma m}^{B,all}/H_u^P$
No1	JMA	○	1.01	1.04
	JRT	○	1.01	1.06
	HKB	○	1.08	1.07
	HKD086	○	1.05	1.11
	NIG019	○	1.02	1.10
	TCU084	○	1.02	1.14
	tsugaru	○	1.05	1.07
No2	JMA	○	1.05	0.97
	JRT	○	1.03	0.99
	HKB	○	1.06	0.99
	HKD086	○	1.03	1.04
	NIG019	○	1.05	1.04
	TCU084	×	1.09	1.09
	tsugaru	○	1.01	1.09