

水平2方向地震動を考慮した鋼製橋脚の耐震安全性照査のための復元力表示の限界曲面

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 芳顕

1. はじめに: 現在, 鋼製橋脚の耐震安全性は地震動の1方向成分を橋軸および橋軸直角方向に独立に入力することで照査されているが¹⁾, 水平2方向地震動の連成を考慮した動的な耐震安全性照査に用いる復元力で表示した限界曲面^{2),3)}が提示されている. 本限界曲面では単独の橋脚頂部に加わる水平2方向力成分のみで表されているので, ここでは, 実際の連続高架橋では比較的影響が大きいと考えられる橋脚頂部における水平2軸まわりの復元モーメント成分を含めた計4成分の復元力を用いた限界曲面に拡張する. また, 鉛直荷重によるいわゆる $P-\Delta$ 効果の影響について検討を行い, 変断面橋脚における橋脚上部の曲げ剛性低下による水平変位量の増加の影響などについても確認する.

2. 復元力成分を用いた限界曲線: 一定の鉛直荷重が作用する単一橋脚に対する復元力の応答値を用いた照査法^{2),3)}では, 図1に示す橋脚頂部に作用する復元力の水平2方向成分 F_x, F_y について, 2方向地震動下の動的応答解析による応答値が限界曲線式(1)に対し上回らない, すなわち式(1)の左辺の値が1未満となることを確認することにより安全性照査が行われる.

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

ここで, $\bar{F}_{xu}^P, \bar{F}_{yu}^P$ は一定鉛直荷重 P 下における各軸方向への Pushover 解析における最大復元力である限界値であり, α, β は F_x, F_y の異なったケースで Pushover 解析(荷重比一定に保つ)から求められる限界値に基づき同定されるパラメータである.

復元モーメントによる影響を考慮するためこれを拡張し, 式(1)の左辺として復元力指標 f を導入し $f=1$ において限界曲面を表すことを考える. ここで復元力指標 f は, 各軸方向あるいは各軸まわりの Pushover 解析によりピーク点として求められる復元力, 復元モーメントの限界値 $\bar{F}_{xu}^P, \bar{F}_{yu}^P, \bar{M}_{xu}^P, \bar{M}_{yu}^P$ により無次元化した復元力, 復元モーメントおよびパラメータ α, β の

関数として表される.

$$f = f \left(\frac{F_x}{\bar{F}_{xu}^P}, \frac{F_y}{\bar{F}_{yu}^P}, \frac{M_x}{\bar{M}_{xu}^P}, \frac{M_y}{\bar{M}_{yu}^P}; \alpha, \beta \right) \quad (2)$$

本研究では, 式(2)において適切な関数形を各種 Pushover 解析より得られる限界値に基づき検討する.

3. 解析モデル: 図2, 表1に示す2種類の鋼製橋脚を対象とする. 橋脚 A, B はそれぞれ連続高架橋の可動支承, 固定支承橋脚を念頭に, 道路橋示方書に基づきレベル1地震動に対し設計を行ったものである. モデル化においては, 橋脚基部における局部座屈を精度よく表現できるよう基部から2枚目の補剛パネルまでをシェル要素, それより上の部分をはり要素とし, 鋼材はSM490として材料構成則に三曲面モデルを用いている.

4. 復元力・復元モーメント4成分による限界曲面: まず, 相関性が高いと考えられる, 図3(a)に示すような同一軸まわりの曲げモーメントが生じる水平復元力 F_x と復元モーメント M_y の限界値の相関関係について検討する. 図4(a)は F_x と M_y の比率を変化させた Pushover 解析による限界値を $F_x/\bar{F}_{xu}^P - M_y/\bar{M}_{yu}^P$ 平面上に示したものであるが, 限界値はほぼ一直線上に並び, F_x と M_y, F_y と M_x が以下の換算水平復元力 F'_x, F'_y を用いて1つの変数として表されることを示している.

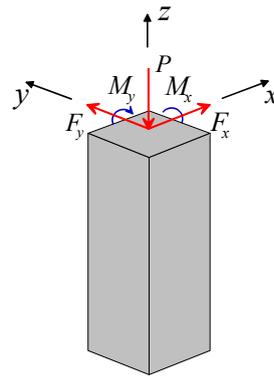


図1 橋脚頂部作用復元力

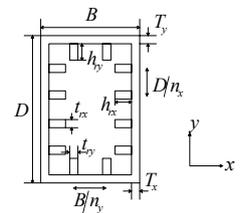


図2 鋼製橋脚断面

表1 鋼製橋脚諸元

橋脚	B (mm)	D (mm)	T_x (mm)	T_y (mm)	t_{rx} (mm)	t_{ry} (mm)	h_{rx} (mm)	h_{ry} (mm)	$R_{R,x}$	$R_{R,y}$	$R_{S,x}$	$R_{S,y}$	$\gamma_f/\gamma_{req,x}$	$\gamma_w/\gamma_{req,y}$
A	1444	2306	19	20	15	16	168	164	0.50	0.50	0.70	0.63	1.00	1.00
B	3156	2251	19	22	22	20	212	219	0.50	0.50	0.61	0.70	1.21	1.00

キーワード: 2方向地震動, 復元力, 耐震安全照査法

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 TEL 052-735-5021

$$\frac{F'_x}{F'_{xu}} = \frac{F_x}{F_{xu}} + \frac{M_y}{M_{yu}}, \quad \frac{F'_y}{F'_{yu}} = \frac{F_y}{F_{yu}} - \frac{M_x}{M_{xu}} \quad (3)$$

なお、換算水平復元力の物理的意味は図3に示すように式(4)で示す換算高さ h'_x , h'_y での曲げモーメントが等価となる復元力である。換算高さは実際の橋脚高さの 0.90~0.92 倍となっており、これは挙動を支配する局部座屈発生位置が橋脚基部より若干上であることとも整合する。

$$h'_x = \overline{M}_{yu}^P / \overline{F}_{xu}^P, \quad h'_y = -\overline{M}_{xu}^P / \overline{F}_{yu}^P \quad (4)$$

次に、式(3)での換算水平復元力を式(1)へ適用し、限界曲面式に用いる復元力指標 f を次のように定める。

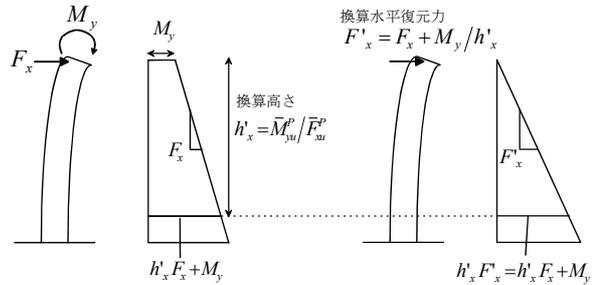
$$f = \left| \frac{F_x}{\overline{F}_{xu}^P} + \frac{M_y}{\overline{M}_{yu}^P} \right|^\alpha + \left| \frac{F_y}{\overline{F}_{yu}^P} + \frac{M_x}{\overline{M}_{xu}^P} \right|^\beta \quad (5)$$

なお、パラメータ α , β は各橋脚について 23 個の荷重比の異なったケースで Pushover 解析(荷重比一定に保つ)を実施して、終局限界点を求めこれを補間することで求めた。終局点は不安定状態 ($\Delta^2 W_p < 0$) が初めて生じる以前において次の無次元化合力が最大値をとる点である。

$$\frac{\sqrt{(F_x/\overline{F}_{xu}^P)^2 + (F_y/\overline{F}_{yu}^P)^2 + (M_x/\overline{M}_{xu}^P)^2 + (M_y/\overline{M}_{yu}^P)^2}}{\sqrt{(F'_{xu}/\overline{F}_{xu}^P)^2 + (F'_{yu}/\overline{F}_{yu}^P)^2 + (M'_{xu}/\overline{M}_{xu}^P)^2 + (M'_{yu}/\overline{M}_{yu}^P)^2}} \quad (6)$$

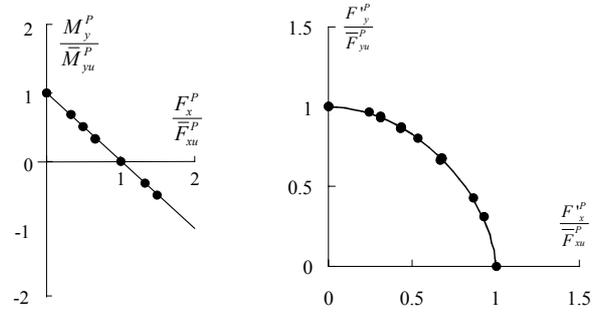
ここで、 $(F'_{xu}, F'_{yu}, M'_{xu}, M'_{yu})$ は復元力 (F_x, F_y, M_x, M_y) の作用方向における終局限界点である。図4(b)はこれらの限界値を $F'_x - F'_y$ 平面上に $f=1$ で表される限界曲面とともに示したものであるが、Pushover による限界値はほぼ限界曲面上に位置し誤差も 2.5% 以内に抑えられている。

5. $P-\Delta$ 効果による鉛直荷重の影響: 本研究では限界曲面式(2)における限界値 \overline{F}_{xu}^P , \overline{F}_{yu}^P , \overline{M}_{xu}^P , \overline{M}_{yu}^P およびパラメータ α , β は数十パターン of Pushover 解析により同定したが、実務設計においてはこれらの値はより簡便に求められなければならない。そこで、断面パラメータ R_r , $\bar{\lambda}_x$, a/b , $\bar{\lambda}$, P/P_y により限界値 \overline{F}_{xu}^P , \overline{F}_{yu}^P を簡易に求める予測式^{2),3)}が提案されている。これらの断面パラメータは局部座屈の生じる橋脚基部での断面における値を用いるが、変断面橋脚では橋脚基部に比べ橋脚上部側の曲げ剛性が低いため水平変位量が増加することによりいわゆる $P-\Delta$ 効果の影響が大きくなるものと考えられる。そこで $P-\Delta$ 効果による基部モーメントの影響について検討を行う。図5に示すようなモーメント M_y と鉛直荷重 P が作用する橋脚における基部反力 \tilde{M}_y は弾性はり理論により以下のよ



(a) F_x と M_y が作用する橋脚 (b) 換算水平復元力

図3 換算水平復元力と発生曲げモーメント



(a) $F_x - M_y$ 関係

(b) $F'_x - F'_y$ 関係

図4 Pushover 解析による限界値と限界曲面(橋脚 A)

うに表される。

$$\frac{M_y}{\overline{M}_y} = 1 - \frac{\pi^2}{8} \frac{P}{P_{cr}} \quad (7)$$

ここで、 P_{cr} は弾性座屈荷重であり、本研究で用いた橋脚では $P/P_{cr} = 0.0048$ となりその影響は非常に小さい。また、Pushover 解析により求められた限界値においても H_x と \tilde{H}_x , M_y と \tilde{M}_y との差異は 3% 程度であり橋脚基部で

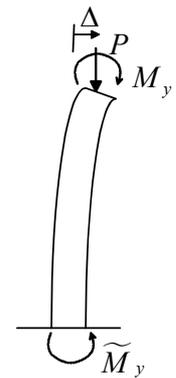


図5 $P-\Delta$ 効果

の塑性変形を考慮してもその影響は限定的であり、 P_{cr} の算出のための等価曲げ剛性も弾性剛性の 1/5.4 程度と考えられる。

6. まとめ: (1) 鋼製橋脚の安全性照査法として橋脚頂部の水平復元力と水平 2 軸まわりの復元モーメントによる限界曲面を用いた復元力照査法を提案した。

(2) 復元力照査法における $P-\Delta$ 効果による鉛直荷重の影響は小さく、変断面橋脚においても支配断面である橋脚基部での諸元に基づく限界曲線を用いても誤差は小さいものと考えられる。

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, 小山亮介, 藤井雄介, 小畑誠: 2 方向地震動を受ける矩形断面鋼製橋脚の動特性と耐震照査法における限界値, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.61-80, 2009.

3) 後藤芳顕, 村木正幸, 海老澤健正: 2 方向地震動を受ける円形断面鋼製橋脚の限界値と動的耐震照査法に関する考察, 構造工学論文集, Vol.55A, CD-ROM, 2009.