3方向地震動を受ける正方形断面鋼製橋脚の限界状態に関する考察

ショーボンド建設(株) 正会員 〇太田 翔 名古屋工業大学大学院 フェロー会員 後藤 芳顯 名古屋工業大学大学院 正会員 海老澤健正

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,近年では、シナリオ型の3 次元地震動の推定も可能であり、3方向地震動の連成効果を考慮した合理的な耐震安全性の照査が求められ ている.本研究では、2方向地震動下での鋼製橋脚の安全性照査法²⁾を拡張・発展させ、3方向地震動下での 連続直線高架橋の橋脚の直接的な照査を目的として、橋脚頂部の3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を考慮した限界曲面を提示する.なお、支承に偏心のない一般的な橋脚 では、鉛直軸まわりのねじりモーメントの影響が小さいと考え、ここでは考慮していない.

2. 鋼製橋脚における終局限界と安定基準: 連続高架橋の橋脚頂部に上部構造から力3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図1に示すような任意の変位増分 $(\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z, \Delta \theta_x, \Delta \theta_y)$ を 頂部に与えたときに生じる復元力増分を $(\Delta F_x, \Delta F_y, \Delta F_z, \Delta M_x, \Delta M_y)$ とした場合の仕事 の2次増分は以下の式で表される.

 $2\Delta^2 W = \Delta F_x \Delta u_x + \Delta F_y \Delta u_y + \Delta F_z \Delta u_z + \Delta M_x \Delta \theta_x + \Delta M_y \Delta \theta_y$ (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 $\Delta^2 W \le 0$ となる場合と規定する²).

3. 力の3成分と2軸曲げを受ける限界曲面: 一定鉛直軸力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),3)} は,鉛直復元力 F_z 作用下での各復元力の限界値 \overline{F}_{xu}^P , \overline{F}_{yu}^P を用 いて以下のように表される.

$$\left|F_{x}'/\bar{F}_{xu}^{P}\right|^{\beta} + \left|F_{y}'/\bar{F}_{yu}^{P}\right|^{\beta} = 1$$
(2)

ここで,等価水平復元力 F_x, F_y は等価高さ h'_x, h'_y 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 であり,正方形断面では $h_x'=h_y'=h'$ となる.

$$F'_{x} = F_{x} + M_{y} / \dot{h}_{x}$$
, $F'_{y} = F_{y} - M_{x} / \dot{h}_{y}$ (3a,b)

式(2)において仮に鉛直復元力 F_z を変数と考えると、 F_z を考慮した限界曲面となるが、適用範囲は軸力比 0.3 以下に限定される.また F_z の影響を陽な形として表されないため実務設計に用いるには適当ではない.そこで、 \overline{F}_{xu}^{P} 、 \overline{F}_{yu}^{P} に対する F_z の影響を以下の形式で分離する.

$$\overline{F}_{xu}^{P} / \overline{F}_{xu}^{P0} = \overline{F}_{yu}^{P} / \overline{F}_{yu}^{P0} = \zeta(F_z / \overline{F}_{zu}^{P0})$$

ここに、 $\bar{F}_{xu}^{P0}, \bar{F}_{yu}^{P0}, \bar{F}_{zu}^{P0}$ は他の復元力成分が0時の各復元力の 限界値であり、正方形断面では $\zeta(F_z/\bar{F}_{zu}^{P0})$ は式(4)に示すよう にx方向、y方向とも同一の関数になる.そして、試行錯誤 的検討により $\zeta(F_z/\bar{F}_{zu}^{P0})$ の関数形を式(5)のように定める. $\zeta(F_z/\bar{F}_{zu}^{P0})=1-\left|F_z/\bar{F}_{zu}^{P0}\right|^{2}$ (5)

キーワード:3方向地震動,復元力,耐震安全照査法

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

図1 橋脚頂部における 変位と作用復元カ



表1 予測式における係数

		\overline{a}	\overline{b}	\bar{c}	\overline{d}	\overline{e}	C_1	<i>C</i> ₂
(4)	h'_1/h	-1.7715	1.6675	0.6156	0.0660	-0.6741	0.123	0.851
」の	h'_2/h	-0.0014	0.1904	0.0145	0.0103	4.0E-0	0.540	0.223
う	β_1	0.0019	-0.0020	0.0005	-0.0003	0.0011	40.888	-39.145
調	$F_{z1}/\overline{F}_{zu}^{P0}$	-0.0279	-0.1101	0.0631	-0.0050	-0.0665	43.198	-39.764
	β_2	-0.0023	-0.0019	-0.0028	-0.0008	-0.0032	39.780	-40.194
	$F_{z2}/\overline{F}_{zu}^{P0}$	0.0059	0.0035	0.0011	0.0030	0.0094	40.835	-39.214
(5)	γ	-0.0046	0.0040	0.0003	9.3E-0	0.0083	40.437	-39.591

-062

式(4),式(5)を式(2)に代入して整理すると,力の3成分と曲 げの2成分による限界曲面式(6)が得られる.

$$\left(\left|F_{x}'/\overline{F}_{xu}^{P0}\right|^{\beta} + \left|F_{y}'/\overline{F}_{yu}^{P0}\right|^{\beta}\right)^{1/\beta} + \left|F_{z}'/\overline{F}_{zu}^{P0}\right|^{\gamma} = 1$$
(6)

4. 限界曲線形状の設定のための予測式: 等価高さ h'や指数 β,γ をシェル要素による Pushover 解析で算定される限界 値に基づき同定し,限界曲面形状を決定する.既往の研究^{2),3)} では h',β は鉛直復元力の影響を陰な形で考慮していたが,こ こでは図2 に示すような鉛直復元力に対する変動特性を踏 まえ,式(7)に示す鉛直復元力の陽な関数として表す.

$$\beta \left(F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} \right) = \begin{cases} \beta_{1} & \left(F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} \le F_{z1} / \bar{F}_{zu}^{P0} \right) \\ \left(\beta_{1} - \beta_{2} \right) \frac{\left(F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} - F_{z2} / \bar{F}_{zu}^{P0} \right)^{2}}{\left(F_{z1} / \bar{F}_{zu}^{P0} - F_{z2} / \bar{F}_{zu}^{P0} \right)^{2}} + \beta_{2} & \left(F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} > F_{z1} / \bar{F}_{zu}^{P0} \right) \\ h' \left(F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} \right) = \begin{cases} \frac{\left(\dot{h_{2}} - \dot{h_{1}} \right)}{0.3} F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} + \dot{h_{1}} & \left(F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} \le 0.30 \right) \\ h_{2} & \left(F_{z} / \bar{F}_{zu}^{P0} > 0.30 \right) \end{cases} \end{cases}$$
(7a,b)

そして,式(7a,b)中の係数 $h_1',h_2',\beta_1,F_{z1}/\overline{F}_{zu}^{P0},\beta_2,F_{z2}/\overline{F}_{zu}^{P0}$ および 指数 γ を,橋脚パラメータ $R_R,\overline{\lambda}_s,a/b,t_r/t,\overline{\lambda}$ により簡便に与え る以下の予測式 fを考える²⁾.

$$f = \frac{C_1}{R_R^{\bar{a}} \overline{\lambda_s^{\bar{b}}} \left(a/b \right)^{\bar{c}} \left(t_r/t \right)^{\bar{d}} \overline{\lambda}^{\bar{e}}} + C_2$$
(8)

表1には多数の橋脚²⁾による数値解から最小二乗法により定

復元力に対する変動特性を踏 陽な関数として表す. $(F_z/\bar{F}_{zu}^{P0} \le F_{z1}/\bar{F}_{zu}^{P0})$ $\overline{F}_{zu}^{P0})^2 + \beta_2 (F_z/\bar{F}_{zu}^{P0} > F_{z1}/\bar{F}_{zu}^{P0})$ (a) 集中質量モ図3 上 $<math>(F_{zu}^{P0} \le 0.30)$ $(F_{zu}^{P0} > 0.30)$ $\beta_1, F_{z1}/\bar{F}_{zu}^{P0}, \beta_2, F_{z2}/\bar{F}_{zu}^{P0}$ および $, a/b, t_r/t, \bar{\lambda}$ により簡便に与え 0.5



めた係数を示す. なお, \overline{F}_{xu}^{P0} , \overline{F}_{yu}^{P0} は文献 2)の予測式から, \overline{F}_{zu}^{P0} は降伏軸力とほぼ一致するとして求められる. 5. 動的応答解析による終局限界: 3 方向地震動下での動的応答解析による終局値との比較から限界曲面の 妥当性を検討する. 表 2 に示す諸元の橋脚に対し図 3 のような 2 種類の上部構造を考える. 1 つは上部構造 の質量を集中質量としたモデルであり, もう 1 つは 2 連の分布質量を持つ弾性単純梁を上部構造に持つモデ ルである. 両モデルとも軸力比が 0.15 となるように上部構造質量を設定する. 入力地震動には鉛直成分が卓 越する場合を含む 4 種類の実測波に一定の拡大・縮小倍率を乗じて作成したものを用い, 3 方向成分を同時 入力する. 動的応答解析における終局値は, 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として同定する²⁾.

$$F'_{\Sigma}/F^{P}_{\Sigma u} = \sqrt{F'^{2}_{x} + F'^{2}_{y} + F^{2}_{z}} / \sqrt{F^{P^{2}}_{xu} + F^{P^{2}}_{yu} + F^{P^{2}}_{zu}}$$
(9)

ここで、 $(F_{xu}^{p}, F_{yu}^{p}, F_{xu}^{p})$ は復元力の比を (F_{xu}, F_{yu}, F_{zu}) としたときの限界曲面上の点である.解析により特定され た終局値と限界曲面との比較を図5の $\sqrt{(F_{x}^{2} + F_{y}^{2})}/((F_{yu}^{po2} + F_{yu}^{po2})} - F_{z}/\bar{F}_{zu}^{p}$ 平面上に示す.図中では、不安定状態 $(\Delta^{2}W < 0)$ に到達しないケースについては全解析過程中に生じた式(7)の最大値を白抜きでの記号で示してい る.これによると、動的応答解析による終局値はほぼ限界曲面上に分布する一方、不安定状態に到達しなか った場合の復元力合力の最大値は主に限界曲面より内側に分布しており、限界曲面の妥当性が確認できる. 次に、上部構造のモデル化の違いを比較すると、集中質量モデルでの終局値は水平あるいは鉛直復元力のど ちらかが卓越する傾向があるが、単純梁モデルでは水平と鉛直復元力が連成している.これは、実橋梁の構 造に近い単純梁モデルでは上部構造の曲げ振動の影響により系の固有周期が長周期化し、鉛直地震動のみの 共振が起こりにくいためである.よって、比較的大きな鉛直成分を含む地震動に対しては、上部構造を含め た解析モデルにより応答値を算出して照査する必要があると考えられる.

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)後藤芳顯ら: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, No.65, Vol.1, pp.61-80,2009.3)海老澤健正ら: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,第64回土木学会年次学術講演会,I-30, pp.59-60,2009.

