

1. まえがき

わが国では、現行の設計基準を越えるような連動地震の発生が懸念されている。そこで、さまざまなレベルの地震動に対し、橋脚がどの程度の余裕性能を保有しているか、また、どの程度被災するかを把握しておくことは減災上極めて重要で、日頃の維持管理や復旧・復興などのクライシスマネジメントに欠かせない。

ここでは、鋼製橋脚を弾塑性有限変位解析し、その結果に基づいて想定以上の地震動に対する被災状況が推測できる方法を検討する。橋脚がどの程度余裕をもって設計されているか、あるいは、想定以上の地震動のもとで橋脚が被るリスクについて検討する。

2. 鋼製橋脚の耐震性能評価法

2.1 鋼製橋脚が保有する余裕度の評価方法

現行の道路橋示方書V耐震設計編に則り、橋脚が保有する耐震性能の余裕度を地震時保有水平耐力照査の観点から評価する。まず、設計された橋脚が保有する地震時水平耐力に作用する地震力が一致した場合を考える。この場合の水平震度を k_{hc}^* とおけば、示方書に示されている照査式は

$$k_{hc}^* W = P_a \quad (1)$$

$$k_{hc}^* = c_s c_i k_{hc0}^* \quad (2)$$

のように書き改められる。ここに、 k_{hc0}^* ：水平震度の標準値で、地震動の強さが橋脚の固有な地震時保有水平耐力に一致するとした場合の値である。

上述の水平震度の標準値 k_{hc0}^* と示方書で定められた設計水平震度の標準値 k_{hc0} との比を安全性の評価尺度、すなわち、余裕度 R とすれば、

$$R = \frac{k_{hc0}^*}{k_{hc0}} \quad (3)$$

で与えられる。ちなみに、余裕度が $R \geq 1$ であればその橋脚は耐震基準を満たし、 $R < 1$ であれば満足していない。それゆえ、余裕度 R によって、任意の地震動強度に対し、橋脚が耐震性能上、どの程度過不足な状態にあるかが分かる。

2.2 想定以上の地震動に対する耐震性能評価法

橋脚に想定以上の地震動が作用したときの耐震性能を評価する方法を述べる。たとえば、想定以上の地震動の下で橋脚が水平方向に δ_x だけ変位したとする。この点に対応す

る水平強度 H_x は、地震時保有水平耐力 $H_{\max}$ から $x\%$ 強度が低下した値である。エネルギー一定則に基づいて、橋脚の弾塑性応答によって蓄積されたエネルギーに等しい弾性応答時のエネルギー量を求めれば、弾性応答に対応する水平力 H_E が算出できる。これを等価重量 W で除して等価水平震度 k_{hc}' とし、それに重力加速度を乗ずれば、等価水平加速度 a (gal) が

$$k_{hc}' = \frac{H_E}{W} \quad (4)$$

$$\alpha = 980 k_{hc}' = 980 \frac{H_E}{W} \quad (5)$$

から求められる。それゆえ、想定以上の地震加速度 α が橋脚に作用したとき、橋脚の水平荷重—水平変位曲線上で応答変位による被災状況が推測できる。ちなみに、本法は、単一柱の耐震性能で被災度を評価している点で、橋梁系の最悪な被災シナリオを想定していることになる。

3. 鋼製橋脚の耐震性能と被害分析

3.1 余裕度による評価

縦補剛材間板パネルの幅厚比パラメータが $R_p = 0.2 \sim 0.8$ の範囲で、繰返し荷重下での数値解析を行った。履歴曲線から描かれる橋脚の包絡線は図-1 のようである。なお、解析モデルや手法、材料特性、繰返し荷重による詳細な分析などは文献 1) を参照されたい。

得られた橋脚の特性をもとに道示Vの規定に則って耐震性能を照査し、2.1 で示した評価指標で橋脚が保有する余裕度を算出した。耐震照査の各種条件、耐震

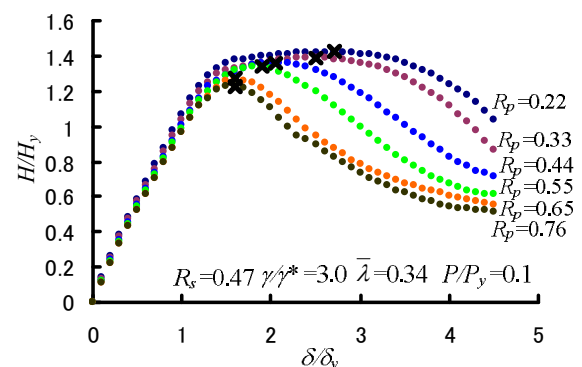


図-1 橋脚の水平強度—水平変位の関係

照査結果および余裕度評価を表-1 に示す。

表-1 によれば、幅厚比パラメータが $R_p=0.33$ より小さい橋脚は耐震基準を満たし、設計地震力に対してある程度の余裕度を有している。耐震基準を満足する $R_p=0.22$ の場合、余裕度は $R=1.20$ で、設計に用いられる地震加速度の 1.2 倍以上の加速度が作用しないかぎり、橋脚は損傷しない。

つぎに、耐震基準を満足しない $R_p=0.65$ の場合、余裕度は $R=0.73$ で、要求性能の 0.73 倍の性能しかない。この場合、性能不足分 ($1-R=0.27$) を何らかの工法で補強しないかぎり、橋脚は既存不適格になる。

以上のように、耐震基準を満たしている橋脚の場合には、設計地震力に対して、どの程度性能に余裕があるかが余裕度 R によって測られる。一方、満たしていない場合には、どの程度の性能向上が補強時に必要かが定量的に分かる。

3.2 想定以上の地震動による被害分析

3.1 で得られた橋脚の包絡線から算定されるエネルギー吸収量に基づき、2.2 で示した評価指標から想定以上の地震動を受ける鋼製橋脚の被災度を分析する。ここでは、3.1 の耐震性能評価で明らかにされたタイプⅡ地震に対し、耐震基準を満足している $R_p=0.22$, 0.33 の 2 パターンと、耐震基準を満たしていない $R_p=0.65$ の 1 パターンについて考察する。

想定以上の地震によって、橋脚に 1,500gal の地震動が作用したとする。この場合の等価水平加速度と橋脚の包絡線の間を幅厚比パラメータごとに描けば、図-2 のようである。また、幅厚比パラメータごとの弾性応答水平力、等価水平震度、等価水平加速度をまとめれば、表-2 を得る。

$R_p=0.22$ の場合、橋脚に 1,500gal の地震加速度が作用すれば、橋脚頂部に 104mm の水平変位が生じ、その強度は最大荷重から 99%に低下した状態になる。橋脚に 1,500gal の地震加速度が作用しても、 $R_p=0.22$ の場合は最大荷重からほとんど強度の低下は認められない。一方、 $R_p=0.65$ の場合、148mm の水平変位が生じ、強度は最大荷重の 45%まで落ち込む。断面設計の違いで同じ作用地震動でも $R_p=0.22$, 0.33 の場合、その状態に陥る加速度が $R_p=0.65$ と比べてかなり大きく、かつ高強度を保った状態である。このように、想定以上の地震動が作用したときの橋脚の被害状態を提案手法を用いれば、定量的に評価できる。

表-1 耐震性能照査と余裕度評価

R_p	W (MN)	k_{hc}	$k_{hc} W$ (MN)	P_a (MN)	k_{hc0}	k_{hc0}^*	R	耐震 照査
0.22	7.98	0.682	5.44	< 6.54	1.5	1.802	1.20	○
0.33	5.81	0.707	4.11	< 4.62		1.686	1.12	○
0.44	4.51	0.822	3.71	> 3.64		1.475	0.98	×
0.55	3.78	0.891	3.37	> 2.99		1.331	0.89	×
0.65	3.27	1.019	3.33	> 2.43		1.094	0.73	×
0.76	2.91	1.061	3.09	> 2.09		1.017	0.68	×

レベル2地震動(タイプⅡ) 地域区分 A($c_s=1.0$) Ⅲ種地盤

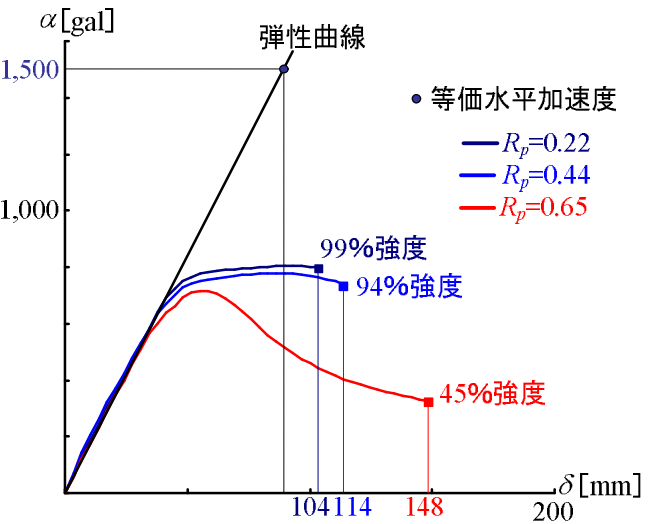


図-2 等価水平加速度と水平変位の関係

表-2 橋脚の地震時挙動 (1,500gal)

R_p	H_E (MN)	W (MN)	k_{hc}'	α (gal)	δ (mm)
0.22	11.9	7.78	1.53	1,500	104
0.33	8.89	5.81			114
0.65	5.01	3.27			148

4. あとがき

数値解析によって得られた橋脚の性能をもとに、橋脚の余裕度と想定以上の地震動が作用したときの被災度を検討した。その結果、余裕度によって、橋脚の耐震性能の過不足が定量的に評価できた。また、想定以上の地震動が作用したときの橋脚の被害状態を水平変位量と想定保有水平耐力からの強度の低下率によって定量的に表した。

参考文献

1) 木野村宏昭・堂垣正博：コンクリートが部分的に充填された鋼製橋脚の耐震性能，構造工学論文集，土木学会，Vol.58A，pp.290-298，2012.3.