

I - B163

Pushover解析を用いた等価1自由度モデル による免震鋼製橋脚の応答値推定法*

名古屋大学大学院 フェロー 宇佐美 勉†
三菱重工株式会社 正会員 金田一 智章†

1. 緒言

鋼製橋脚と免震支承を組み合わせた免震鋼製橋脚の弾塑性地震応答解析では、一般に2自由度系にモデル化をして解析が行われている。この解析手法は、免震支承と鋼製橋脚の各々に対し、復元力を精度良く表現できるモデルが必要であり、あまり簡便な手法であるとは言えない。これに対し、免震鋼製橋脚に対する等価な1自由度モデルを用いることができれば解析を容易に行うことができる。等価1自由度モデルの作成に関する研究は、文献[1]により多層鋼製ラーメン橋脚を対象に、Pushover解析を用いて行われている。そこで、本研究では、Pushover解析を用いて、免震鋼製橋脚の等価1自由度モデルを構築する。そして、このモデルを用いて弾塑性地震応答解析を行い、ハイブリッド地震応答実験と比較し、等価1自由度モデルによる免震鋼製橋脚の応答値推定法の妥当性を検証する。

2. 等価1自由度モデルによる応答値推定の概要

ここでは、文献[1]の方法を参考に、Pushover解析に基づく等価1自由度モデル作成と、これを用いた橋梁の応答値推定の流れについて述べる。

- ① 免震鋼製橋脚に対してPushover解析を行い、上部構造における $V-\delta_U$ 関係(図1(B))および $\beta-\delta_{\max,U}$ (図1(C))関係を求める。ここで、 β は橋脚頂部変位 δ_P と上部構造変位 δ_U の比(δ_P/δ_U)である。Pushover解析は、上部構造重量に相当する鉛直力 P を加え、荷重係数を λ_f として、上部構造の水平力を λ_f 、橋脚頂部の水平力を $\lambda_f \cdot M_P/M_U$ として、鉛直力 P を一定に保ちながら λ_f を徐々に増加させ、終局状態に至るまで弾塑性有限変位解析を行う。
- ② Pushover解析より得られた $V-\delta_U$ 関係をトリリニアに近似する。図2において、A点は免震支承(鉛プラグ入り積層ゴム支承：LRB)、B点は鋼製橋脚の降伏点である。
- ③ 以下に示すESDOF(等価1自由度系)への変換式を用いて $V-\delta_U$ 関係をESDOFの $H^*-\delta^*$ 関係に変換する。さらに、ESDOFの質量 M^* 、減衰係数 C^* を算出する。この時を用いる形状ベクトル $\{\phi\}$ の要素 β の値は、免震支承の初期剛性と橋脚の弾性剛性より算出される β_0 とする。

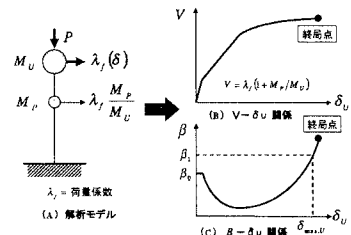


図1 Pushover解析モデル

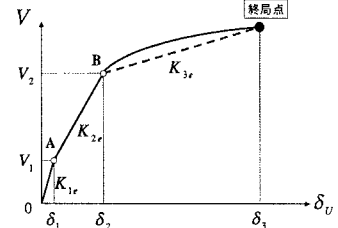


図2 骨格曲線(トリリニア型)

- ④ 等価1自由度モデル(履歴法則：移動硬化型、図3参照)を用いて弾塑性地震応答解析を行い、上部構造の最大応答変位 $\delta_{\max,U}$ を求める。
- ⑤ $\delta_{\max,U}$ と①で求めた $\beta-\delta_{\max,U}$ 関係より、新たに形状ベクトル $\{\phi\}$ の β の値 β_1 を求める(図1(C)参照)。
- ⑥ $\delta_{\max,U}$ に β_1 を掛けることにより橋脚の最大応答変位 $\delta_{\max,P}$ を算出する。
- ⑦ $\delta_{\max,P}$ より橋脚の残留変位 $\delta_{R,P}$ を推定する。推定方法として、ハイブリッド地震応答実験より求められた $\delta_{\max,P}$ と $\delta_{R,P}$ の相関式を用いる。

$$\frac{\delta_{R,P}}{\delta_y} = 3.37 \tan \left\{ 0.0879 \left(\frac{\delta_{\max,P}}{\delta_y} - 1 \right) \right\} \geq 0.0 \quad (6)$$

以上の方法により、免震鋼製橋脚の応答値を推定する。

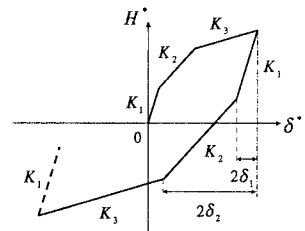


図3 履歴法則(移動硬化型)

* Key Words : pushover analysis, steel bridge pier, seismic isolator, equivalent single degree of freedom model

† 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 TEL : 052-789-4617 FAX : 052-789-5461

〒733-8553 広島市西区観音新町4丁目6番22号 TEL : 082-294-3245

3. 解析条件

Pushover 解析には、汎用構造解析プログラム ABAQUS を使用した。鋼製橋脚にはり要素を用い、免震支承 (LRB) には SPRING 要素を用いた。ここで、LRB の復元力特性は、バイリニア型とする (1 次剛性: K_1 , 2 次剛性 K_2 , 降伏荷重: H_d)。本研究では、柱フランジの平均ひずみが $\epsilon/\epsilon_y=20$ に達した時、また LRB のせん断ひずみが 250% に達した時を終局点としている。解析に用いた鋼製橋脚の諸量を表 1 に、LRB の諸量を表 2 に示す。入力地震動は、兵庫県南部地震の JR 鷹取駅観測地震動 (JRT) とその修正地震動である Level2 TypeII 地震動 (TypeII G.T.II) を用いた。

4. ハイブリッド実験結果との比較

表 3 解析と実験の比較

橋脚	免震支承	地震動	$\delta_{\max,U}$ (mm)			$\delta_{\max,P}/\delta_y$			$\delta_{R,P}/\delta_y$		
			ESDOF①	Exp.②	①/②	ESDOF③	Exp.④	③/④	ESDOF⑤	Exp.⑥	⑤/⑥
S35-35	Case1	JRT	617	535	1.12	0.976	1.22	0.800	0.000	0.051	0.000
		TypeII G.T.II	496	487	1.02	0.855	1.13	0.757	0.000	0.020	0.000
	Case2	JRT	740	714	1.04	3.89	3.13	1.24	0.874	0.389	2.25
		TypeII G.T.II	623	530	1.17	2.08	1.92	1.09	0.322	0.117	2.75
S35-45	Case2	JRT	734	749	0.980	3.41	3.41	1.20	0.936	0.640	1.46
		TypeII G.T.II	543	586	0.927	1.90	2.12	0.896	0.267	0.184	1.45

表 3 に、鋼製橋脚と LRB の組み合わせおよび、等価 1 自由度モデルによる弾塑性地震応答解析結果とハイブリッド地震応答実験結果^[3]を比較したものを示す。ここで、ESDOF = 解析結果、Exp. = ハイブリッド実験結果である。

(1) 上部構造の最大応答変位

図 4 に上部構造の最大応答変位 $\delta_{\max,U}$ について比較したものを示す。これを見ると、解析結果と実験結果は、 $\pm 10\%$ 程度の誤差で一致している。鋼製橋脚として 2 体、LRB 2 体、そして 2 地震動と限られた結果ではあるが、上部構造の最大応答変位を精度良く推定でき、等価 1 自由度モデルの妥当性が検証された。

(2) 橋脚頂部の最大応答変位

図 5 に橋脚頂部の最大応答変位 $\delta_{\max,P}$ について比較したものを示す。上部構造変位に比べ、多少のばらつきが見られるが、比較的精度良く一致している。従って、免震鋼製橋脚に対する応答値の本推定法は、有効な手段であると言える。

(3) 橋脚頂部の残留変位

図 6 に橋脚の残留変位 $\delta_{R,P}$ について比較したものを示す。残留変位は上部構造の最大応答変位と橋脚の最大応答変位に比べるとその誤差が大きい。また、解析結果は実験結果に比べ安全側に評価している。これらの結果より、 $\delta_{R,P}$ をより精度良く推定するためには、さらなる検討が必要である。

5. 結論

以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) Pushover 解析を用いた等価 1 自由度モデルによる橋梁の応答値推定法により、上部構造の最大応答変位 $\delta_{\max,U}$ および橋脚頂部の最大応答変位 $\delta_{\max,P}$ を比較的精度良く推定できる。
- (2) 橋脚頂部の残留変位 $\delta_{R,P}$ については、実験結果と解析結果の誤差が大きい。また、推定された残留変位は安全側に評価される。

参考文献

- [1] 宇佐美勉, 鄭沂, 葛漢彬: Pushover 解析と等価 1 自由度モデルによる鋼製ラーメン橋脚の耐震照査法, 第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.49-56, 1998.11.
- [2] Krawinkler, H. and Seneviratna, G.D.P.K: Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation, Engineering, pp.452-464, 1998.
- [3] 金田一智章, 宇佐美勉, 中島大輔: 免震支承を導入した鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験, 土木学会論文集に投稿中。

表 1 鋼製橋脚のパラメータ

橋脚	R_f	λ	γ/γ^*	λ_s	P/P_y
S35-35	0.332	0.355	3.74	0.179	0.172
S35-45	0.334	0.454	3.83	0.178	0.140

表 2 LRB のパラメータ

Isolator	H_d (tf)	K_1 (tf/cm)	K_2 (tf/cm)	K_{Be} (tf/cm)
Case1	3.42	5.47	0.81	1.13
Case2	1.26	5.51	1.93	2.11

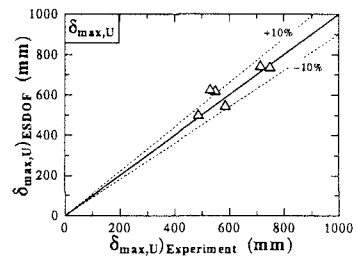


図 4 上部構造の最大応答変位

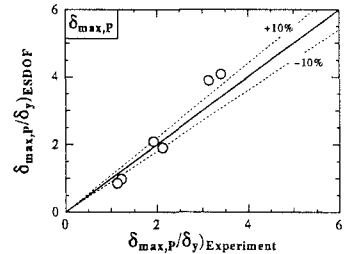


図 5 橋脚頂部の最大応答変位

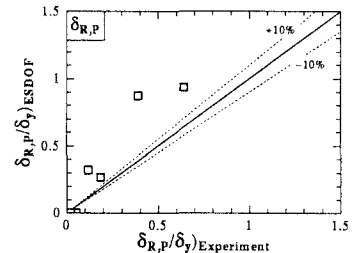


図 6 橋脚頂部の残留変位