

不等橋脚を有する連続免震橋梁の非線形応答の推定式の精度向上についての検討

開発コンサルタント (株) 正会員 ○謝 嬋娟
同 上 正会員 山下幹夫

1. まえがき

道路橋示方書では、免震橋の地震時保有水平耐力法において非線形応答の線形推定が行われている。これは、橋脚と支承の塑性化による弾性地震力の低減を個別に考慮し、各橋脚ごとの塑性化度合を同一の許容塑性率より評価するものである。不等橋脚を有する免震橋は、各橋脚ごとの塑性化度合や、橋脚の許容塑性率と応答塑性率が大きく異なる場合があるので、構造全体系のエネルギーに着目して各橋脚の塑性化度合をその橋脚の応答塑性率より評価した非線形応答の推定方法が考えられる。ここでは、不等橋脚を有する免震橋の地震時応答特性についての考察、非線形応答の推定式の精度向上への提案及びその検証結果を報告する。

2. 不等橋脚を有する免震橋の地震時応答

検討は、橋脚高の最小値を 8m として、最大値の高さ比を 3 種類(4 倍, 2 倍, 1.5 倍)設定した 5 径間連続鋼箱桁橋を対象とした(図 1)。

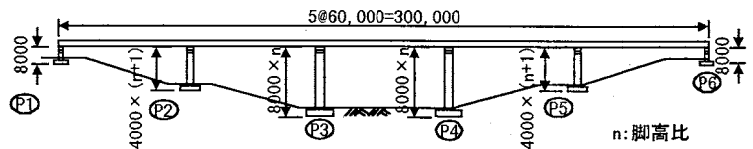


図 1 対象橋梁

橋脚は張出式の鉄筋コンクリート橋脚で、地盤は

I 種地盤、基礎形式は直接基礎と設定した。表 1 には地震時保有水平耐力法による免震設計の結果を示す。

応答スペクトル法により求めた一次モードの主要な応答値への寄与率を表 2 に示した。表より、脚高比が小さくなると、一次振動モードの地震時応答への寄与率が大きくなる傾向が見られた。

表 1 地震時保有水平耐力法による免震設計結果 (高減衰積層ゴム支承、 517° II、2 基/脚)

モデル	脚高比が 4 倍の橋梁			脚高比が 2 倍の橋梁			脚高比が 1.5 倍の橋梁			
	橋脚	P_1, P_6	P_2, P_5	P_3, P_4	P_1, P_6	P_2, P_5	P_3, P_4	P_1, P_6	P_2, P_5	P_3, P_4
諸元	有効形状(cm ²)	63×103	100×100	100×100	63×103	100×100	100×100	63×103	100×100	100×100
	ゴム厚 te(cm)	2.1×6	2.8×4	2.8×4	2.0×5	2.5×3	2.5×3	2.3×4	2.3×4	2.4×3
	橋脚の許容塑性率 μ_m	8.06	3.59	2.60	10.19	4.59	3.38	10.19	5.12	3.74
	橋脚の応答塑性率 μ_R	1.42	1.43	1.55	1.47	1.57	1.45	1.47	1.44	1.55
その他		T=1.77(2.8T ₀), k _{hem} =0.40(下限)			T=1.48(2.4T ₀), k _{hem} =0.40(下限)			T=1.41(2.6T ₀), k _{hem} =0.40(下限)		

表 2 脚高比による一次モードの主要な応答値への寄与

脚高比の倍率	P1 と P6		P2 と P5		P3 と P4	
	脚基部曲げ(tf.m)	支承変位(cm)	脚基部曲げ(tf.m)	支承変位(cm)	脚基部曲げ(tf.m)	支承変位(cm)
4	1424(0.81)	28.7(1.00)	6263(0.52)	21.7(0.87)	10670(0.41)	18.2(0.61)
2	1498(0.83)	23.6(1.00)	4066(0.89)	18.2(0.98)	5487(0.78)	16.7(0.95)
1.5	1559(0.84)	22.6(1.00)	3457(0.92)	18.9(0.99)	4072(0.89)	17.5(0.99)

() の値は、一次モードの値と前 20 次モードの重ね合わせた値の比率である。

なお、非線形直接積分法を用いる動的解析により得られた脚高比による塑性化度合を表 3 に示した。表より、橋脚同士の塑性化度合の均等率は、支承より低く、脚高比の増大に従って減少することがわかった。

3. 非線形応答の推定式の精度向上への提案

上記検討に示されたように、不等橋脚を有する免震橋は各橋脚の塑性化度合が異なるものであるため、その非線形応答を推定するには構造全体系に着目すべきである。図 2 は、各橋脚を 2 質点系にモデル化した全体系の非線形応答と線形応答の入力エネルギーの分布を示したものである。

表 3 脚高比による塑性化度合

(517° II の 3 波の応答値の平均値)

脚高比	橋脚	橋脚の塑性率	支承の塑性率
		$\mu = \delta / \delta_y$	$\mu_s = u_s / u_y$
脚高比が 4 倍	P1 と P6	0.26	7.29
	P2 と P5	0.66	8.37
	P3 と P4	0.97	11.44
	均等率	$\mu_{min} / \mu_{max} = 0.27$	$\mu_{s,min} / \mu_{s,max} = 0.64$
脚高比が 2 倍	P1 と P6	0.62	9.45
	P2 と P5	0.93	10.33
	P3 と P4	0.83	10.56
	均等率	$\mu_{min} / \mu_{max} = 0.67$	$\mu_{s,min} / \mu_{s,max} = 0.90$
脚高比が 1.5 倍	P1 と P6	0.69	10.00
	P2 と P5	0.85	10.44
	P3 と P4	0.92	10.59
	均等率	$\mu_{min} / \mu_{max} = 0.75$	$\mu_{s,min} / \mu_{s,max} = 0.94$

キーワード： 免震設計, 不等橋脚, 地震時応答特性, 等価水平震度, 非線形応答の推定

連絡先： 〒170 東京都豊島区南大塚三丁目 20-6 TEL03-3985-5702 Fax03-3985-5825

また、表2に示したように、本検討対象橋梁は、特に脚高比の大きい場合を除く、一次モードが支配する傾向になり、従って、モード座標系では1自由度系と考えられ、エネルギー一定則が適用するものとした。エネルギー一定則によれば、非線形応答と線形応答の入力エネルギーが等しいので、基本式を下記のように書くことができる。

$$\frac{P_E^2}{2k_r} = \sum P_{Yi}^2 \left[\frac{1}{2k_{ri}} + \frac{(k_{Bi}-k_{2i})(k_{1i}-k_{Bi})}{2k_{Bi}^2(k_{1i}-k_{2i})} + \frac{(\mu_{Ri}-1)}{k_{Pi}} \right]$$

ここに、橋脚の塑性化割合が、受けた地震力より橋脚に生じる塑性変形量より表されるべきと考え、従来のように許容塑性率 μ_{mi} を用いず、応答塑性率 μ_{Ri} を用いて評価することとした(μ_{mi} と μ_{Ri} は大きく異なる(表1))。

上記式に、 $P_{Yi} = \eta_i P_Y$ (η_i : 慣性力の分担率) を代入すると、次の弾性地震力の低減式が得られる。

$$k_{hem}/k_{hc} = P_Y/P_E = 1/\sqrt{\left[\sum \eta_i^2 \left(\frac{1}{k_{ri}} + \frac{(k_{Bi}-k_{2i})(k_{1i}-k_{Bi})}{k_{Bi}^2(k_{1i}-k_{2i})} + \frac{2(\mu_{Ri}-1)}{k_{Pi}} \right) \right]} k_r$$

また、免震装置の非線形を等価線形モデルによりモデル化する場合、上記式を次のように書き換えることができる。

$$k_{hem}/k_{hcm} = 1/\sqrt{1 + [2 \sum (\mu_{Ri}-1) k_{ri}^2 / k_{Pi}] / \sum k_{ri}}$$

$$k_{hcm} = C_E \cdot k_{hc}$$

なお、反力分散率を用いる場合の非線形応答の線形推定式は、下記のように書くこともできる。

$$k_{hem}/k_{hc} = 1/\sqrt{1 + [2 \sum (\mu_{Ri}-1) k_{ri}^2 / k_{Pi}] / \sum k_{ri}}$$

4. 動的解析結果との比較

提案式と地震時保有水平耐力法(下限値を無視)及び動的解析により算出した結果の比較を図3に示す。図3から、提案したバイリニア型と等価線形型のいずれの推定式とも、非線形応答を比較的によく推定できるが、等価線形型の推定式を用いる場合は、応答が若干に大きく評価されている。また、脚高比が大きくなると、提案した式は、動的解析結果との近似が難しくなる傾向にあるが、必要な精度の近似算定ができることが示された。

5. まとめ

不等橋脚を有する免震橋の地震時応答特性を踏まえ、構造全体系のエネルギーに着目して不等橋脚を有する免震橋の非線形応答の線形推定式を提案した。提案式は、脚高比が4倍、2倍と1.5倍のいずれのモデル橋に対しても主要非線形応答値を比較的良好に推定することができた。

なお、本研究は、(財)土木研究センター内に設置された耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会(座長:川島一彦東京工業大学教授)で検討されたものの一部である。

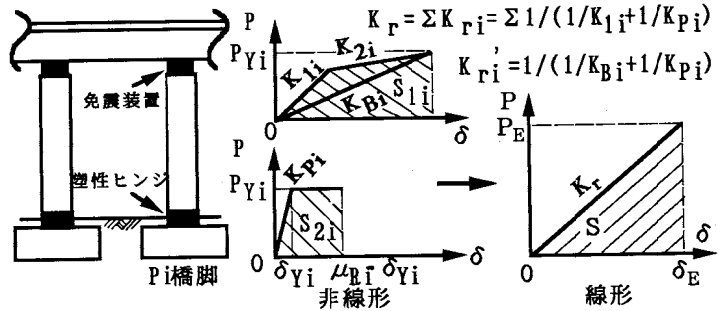
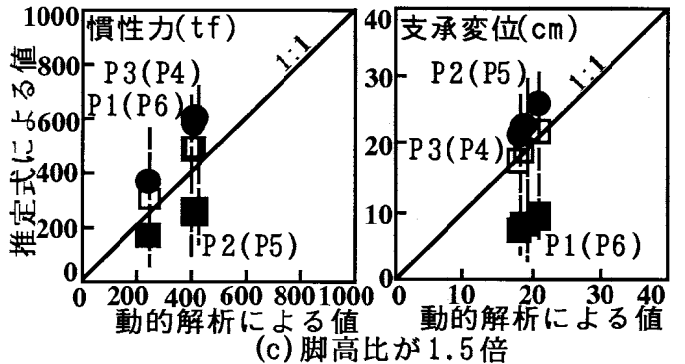
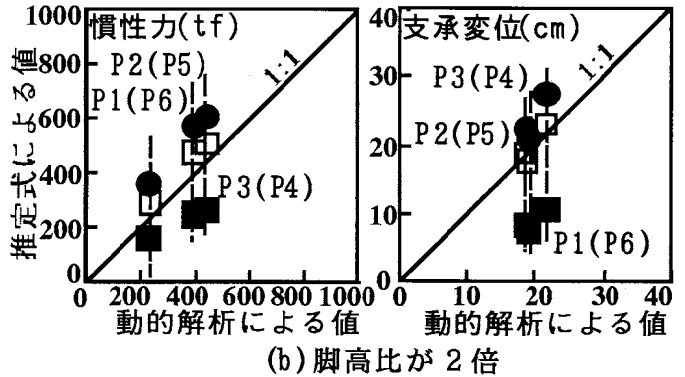
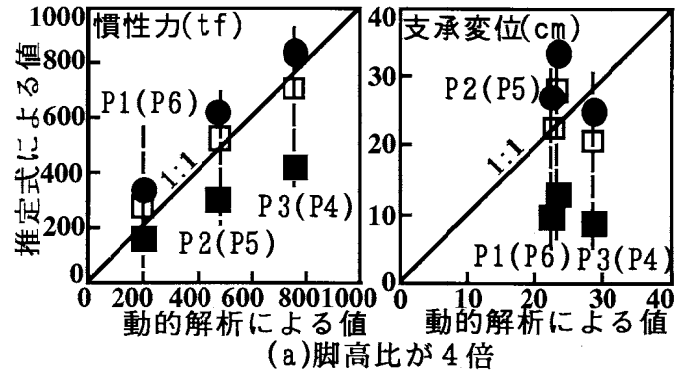


図2 免震支承を用いる場合の橋梁の非線形応答



■地震時保有水平耐力法(下限値無視) □提案式(バイリニア型) ●提案式(等価線形法)

図3 推定式と動的解析との比較