

地震時の性能制約を考慮した橋梁システムの最小建設費設計

(株)長大 正会員 田中 賢太
福井工業大学 正会員 谷脇 一弘

1. まえがき

橋梁構造物の性能規定型耐震設計を行う際には、設計対象とする橋梁システムの非線形性を考慮した動的応答解析を行い、各構造要素の動的挙動が設定した性能限界を超えていないことを確認する必要があるが、設計において要求される耐震性能を満足するように橋梁システム全体の中で各構造要素の非線形剛性を力学的な観点から最適に配分することは不可能に近い。そこで、本研究では、実験計画法¹⁾を用いて、桁と下部構造の相対変位、塑性率の推定を行う方法について研究を行い、橋軸方向および橋軸直角方向の支承の相対変位、橋脚の塑性率に関する制約条件のもとで、支承高、橋脚の橋軸方向および橋軸直角方向の幅、鉄筋の断面積、杭の直径および杭本数の最適解を決定することができる最適設計システムの開発を行ったものである。

2. 橋梁システムの性能規定型最適耐震設計法

本研究では、実験計画法を用いて性能規定型最適耐震設計を行っている。設計変数として、橋台の支承の高さ B_{h1} 、橋脚の支承の高さ B_{h2} 、杭の水平ばねの特性値 K_h 、橋脚断面の橋軸方向の幅 H_p 、鉄筋の断面積 A_s 、橋脚断面の橋軸直角方向の幅 B_p を考慮し、制約条件として桁と下部構造の橋軸方向相対変位 g_{h1}, g_{h2} 、橋軸直角方向相対変位 g_{r1}, g_{r2} 、橋脚の最大塑性率 g_μ を考慮している。目的関数として、支承の建設費用 $COST_B(B_{h1}, B_{h2})$ 、杭基礎の建設費用 $COST_F(K_h)$ 、橋脚の建設費用 $COST_P(H_p, A_s, B_p)$ の和として表現される総建設費 $COST(B_{h1}, B_{h2}, K_h, H_p, A_s, B_p)$ を最小とするものとする。以上を考慮して最適設計問題は式(1)、(2)のように表すことができる。

$$\text{Find } B_{h1}, B_{h2}, K_h, H_p, A_s, B_p \quad \text{which minimize} \\ COST(B_{h1}, B_{h2}, K_h, H_p, A_s, B_p) = COST_B(B_{h1}, B_{h2}) + COST_F(K_h) + COST_P(H_p, A_s, B_p) \quad (1)$$

subject to

$$g_{h1} = \delta_{h1} - \delta_{a1} \leq 0, \quad g_{h2} = \delta_{h2} - \delta_{a2} \leq 0, \quad g_{r1} = \delta_{r1} - \delta_{a1} \leq 0, \quad g_{r2} = \delta_{r2} - \delta_{a2} \leq 0, \quad g_\mu = \mu - \mu_a \leq 0 \quad (2)$$

ここに、 δ_{a1} 、 δ_{a2} は橋台および橋脚の支承の許容水変位であり、それぞれ支承の高さ B_{h1} 、 B_{h2} の 2.5 倍として与えられる。橋脚の最大塑性率 μ の計算は、橋脚基部の計算された曲率を初降伏曲率で除した値であり、本研究では橋軸方向の塑性率を考慮している。許容塑性率 μ_a は設計者が設定するパラメータであり、本研究では、この値を種々変化させた場合の最適解の比較を行っている。

上式において、 B_{h1} 、 B_{h2} は連続変数、その他の変数は離散変数として取り扱うべき変数である。本研究では、離散値として表される設計変数 K_h, H_p, A_s, B_p は、それぞれ下記の集合より選択するものとした。

$$K_h \in \{2514665(kN/m), 2762477, 3352886\}, \quad H_p \in \{2000(mm), 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800\}$$

$$A_s \in \{1986(mm^2), 2865, 3871, 5067, 6424, 7942, 9566, 1140\}, \quad B_p \in \{300(mm), 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650\}$$

支承の建設費の計算は、橋台の支承の幅を 70cm、橋脚の支承の幅を 80cm とし、ゴムの単価を 45 円/cm³ として建設費を計算している。杭基礎は、杭径 1.0m の杭本数 9 本、杭径 1.2m の杭本数 9 本、杭径 1.0m の杭本数 12 本の場合の 3 種類を考慮している。

式(1)、(2)で表される最適化問題の解法として、数理計画法およびヒューリスティックな解法があるが、連続変数および離散変数の混合変数を含んだ最適化問題に対して解の信頼性が高い分枝限定法を用いて最適解を決定した。なお、分枝限定法における最適化手法としてラグランジュ双対法²⁾を用いている。本研究で用いた最適設計アルゴリズムを図-1 に示す。

キーワード 性能規定、最適設計、耐震設計、実験計画法、分枝限定法

連絡先 〒730-0051 広島県広島市中区大手町二丁目 8 番 4 号 (株)長大 西日本構造事業部 TEL 082-545-6653

3. 最適設計例および考察

本研究では、設計例として図-2 に示す 5 径間連続鋼 I 桁橋梁システムについて、橋脚の許容塑性値を 2.0, 3.0, 4.0 と仮定した場合の最適解の比較を行った。地震波として道路橋示方書³⁾に規定されているタイプの種地盤の加速度波形 - 2 を用い橋軸方向および橋軸直角方向に加震した。図-3 に示すように橋脚の鉄筋配置は橋軸方向に二段配置、橋軸直角方向には一段配置とし、鉄筋の間隔を 125mm とし橋軸方向および橋軸直角方向に断面の幅が変化するに従い、鉄筋の本数も変化するものとした。杭基礎は、上で述べた 3 種類について線形水平ばね定数 K_h および回転ばね定数 K_θ を算定した。地震応答解析モデルにおいて、支承ばねおよび杭ばねは弾性ばね、桁は剛部材、橋台は弾性変形と仮定し、橋脚は武田モデルを用いて非線形時刻歴応答解析を行った。

各許容塑性率に対して得られた最適解、各制約条件の違反度および建設費を表-1 に示す。許容塑性率が 2.0 の場合には、塑性率を満足させるために橋脚の断面の幅および必要鉄筋量は大きくなり橋脚の建設費が増大するが、各支承を高くすることにより上部工が橋脚に及ぼす影響を極力削減し、橋脚と支承の建設費が最小となる解が選択されている。許容塑性率が 3.0 の場合は、2.0 の場合と比較して断面の幅、鉄筋量、支承高は小さくなり総建設費は 16%減少している。さらに許容塑性率を 4.0 と大きくした場合の建設費は 28%減少している。

最適解を得るために必要な水準値の更新回数に着目すると、許容塑性率 2.0 の場合には水準値を 1 回設定したのみであり、3.0 および 4.0 の場合には水準値を 2 回設定したのみで効率的に最適解が得られた。推定式と解析値による制約条件の違反度(応答値/許容値)は、許容塑性率 4.0 の場合の橋軸直角方向相対変位において約 10%の相違が見られるが、その他の場合は 5%以下と精度よく推定することができた。また解析値の違反度は最大でも許容塑性率 4.0 で 3%となっており、十分な精度で最適解が得られている。以上の考察により、本研究で述べた方法により橋梁システムの性能規定型最適耐震設計を能率的に行えることが明らかとなった。

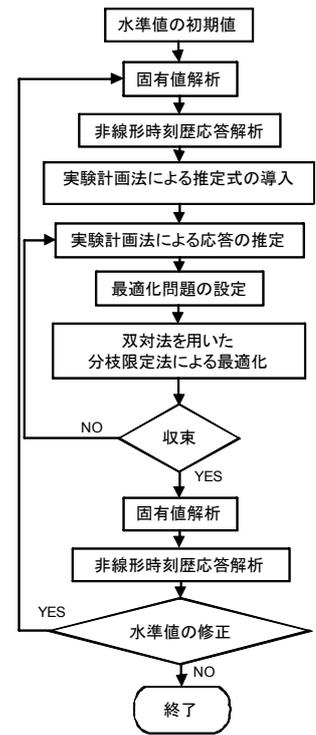


図-1 最適設計アルゴリズム

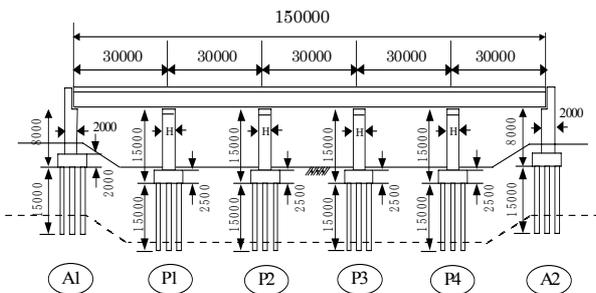


図-2 5径間連続鋼I桁橋梁システム

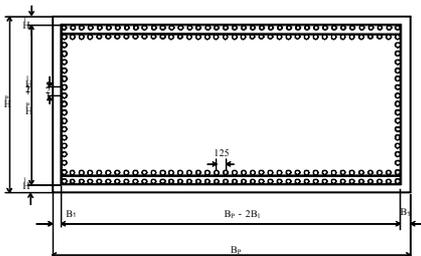


図-3 橋脚の断面

表-1 許容塑性率 2.0, 3.0 および 4.0 に対する最適解の比較

許容塑性率	2.0		3.0		4.0	
橋台部支承の高さ (cm), (ばね値)	15.30	(16012)	11.60	(21121)	8.97	(27310)
橋脚部支承の高さ (cm), (ばね値)	12.98	(24655)	9.91	(32291)	8.00	(40000)
杭のばね(KN/m)	2514665		2514665		2514665	
Hp (mm)	2600		2800		2700	
As (mm ²)	1140		642.4		387.1	
Bp (mm)	4000		3500		3000	
橋台支承 橋軸方向相対変位の違反度	推定式	1.004	推定式	0.999	推定式	0.999
	解析値	1.013	解析値	1.006	解析値	1.001
橋脚支承 橋軸方向相対変位の違反度	推定式	0.824	推定式	0.661	推定式	0.422
	解析値	0.834	解析値	0.669	解析値	0.446
橋台支承 橋軸直角方向相対変位の違反度	推定式	0.900	推定式	0.961	推定式	0.982
	解析値	0.910	解析値	0.961	解析値	0.930
橋脚支承 橋軸直角方向相対変位の違反度	推定式	1.001	推定式	0.999	推定式	0.921
	解析値	1.015	解析値	1.008	解析値	0.824
塑性率の違反度	推定式	0.997	推定式	1.005	推定式	0.981
	解析値	0.959	解析値	0.988	解析値	1.030
建設費(千円)	192859		161254		139550	

参考文献

- 1)田口玄一：実験計画法 第3版，丸善(株)，1976，
- 2)K.Taniwaki and S.Ohkubo: Optimal synthesis method for transmission tower truss structures subjected to static and seismic loads, Int. J. Struct. Multidisc. Optim. Vol.26, pp.441-454, 2004,
- 3)(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，平成14年3月