

レベル2地震時の杭基礎の降伏をも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

著者らは、実験計画法¹⁾を用いて橋梁システムの桁と橋台および橋脚の相対変位、橋脚の塑性率の推定式を導入し、時刻歴応答解析の回数を最小限にとどめて終局状態の性能制約のもとで支承の高さ、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い、その成果を発表してきた²⁾。しかし、この研究では杭の降伏に関する制約条件を考慮していなかったため、いかなる許容塑性値に対しても杭基礎は最小値で決定されていた。そこで本研究では、これまでの研究を発展させ、杭基礎の降伏に関する制約条件をも考慮した最適化アルゴリズムについて研究を行い、計算例によりそのアルゴリズムの信頼性を明らかにするものである。

2. 橋梁システムの性能規定型最適耐震設計法

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} 、杭基礎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、橋軸直角方向相対変位、橋脚の最大塑性率および杭の降伏に関する制約条件を考慮している。目的関数として、初期建設費を最小とするものとする。 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。

$$K_h \in \{2212657(kN/m), 2762476, 2950210\}, \quad H_p \in \{2000(mm), 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000\}$$

$$A_s \in \{198.6(mm^2), 286.5, 387.1, 506.7, 642.4, 794.2, 956.6, 1140.0\}, \quad B_p \in \{3000(mm), 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000\}$$

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。3 種類の杭基礎の建設費、ばねの特性値を表-1 に示す。

杭基礎の降伏に関する制約条件³⁾として、橋脚の終局水平耐力に大きな余裕があると考えられる場合には、式(1)~(3)を満足する範囲で杭基礎の降伏が許される。一方、橋脚の終局水平耐力に十分な余裕がない場合には、杭基礎の降伏は許されない。なお、本研究では橋脚の破壊形態は曲げ破壊型であると仮定している。

$$\mu_{Fr} = \left\{ 1 + \left(k_{hcf} / k_{hyf} \right)^2 \right\} / 2 \leq 4.0 \quad (1), \quad \delta_{F0} \leq 0.4(m) \quad (2), \quad \phi_{F0} \leq 0.02(rad) \quad (3)$$

ここに、 μ_{Fr} :橋脚基礎の応答塑性率、 k_{hcf} :地震時保有水平耐力法による照査に用いる橋脚基礎の設計水平震度、 k_{hyf} :基礎が降伏に達する時の水平震度、 δ_{F0}, ϕ_{F0} :橋脚基礎の変形による上部構造の慣性力の作用位置における応答変位に相当する慣性力を作用させた場合の基礎の水平変位

杭基礎の降伏に関する制約条件の照査は、上で述べたごとく橋脚の終局水平耐力を考慮して行う必要があり、杭基礎の設計変数は橋脚の設計変数の値に依存した従属変数と考えられる。しかし、最適化過程において橋脚の設計変数が変化する毎に橋脚の終局水平耐力を計算し、杭基礎の降伏の制約条件を満足する経済的な杭基礎を決定することは困難である。そこで本研究では、最適化問題を単純化するため、まず橋脚の設計変数と杭基礎の設計変数は互いに独立であると仮定し、杭基礎の降伏に関する制約条件を考慮しない場合について最適解を決定した。この場合、動的挙動の推定法として実験計画法を用い、最適化手法として分枝限定法を用いている。次に、最適解の橋脚断面に対する終局水平耐力を用いて杭基礎の降伏に関する制約条件を照査し、違反した場合には、杭基礎に関する設計変数 K_h の最小値を 1 ランク上位の値に変更し、再度最適化を行うことを繰り返すこととした。

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 TEL082-545-6653

3. 最適設計例および考察

設計例として図-1に示す5本主桁を有する5径間連続鋼I桁橋梁システムについて、許容塑性率を2.0と設定し、提案した最適設計アルゴリズムにより各設計変数の最適解を決定した例を示す。最適化ケースとして、杭基礎の設計変数の最小値を2212657kN/mとした場合(CASE A)、杭基礎の設計変数の最小値を2762476kN/mとした場合(CASE B)、杭基礎の設計変数を2762476kN/mに固定した場合(CASE C)の3ケースについて最適化を行い、得られた最適解の比較を表-2に示す。

CASE A の場合の杭基礎の最適解は最小値の2212657kN/mとなっている。この場合の杭基礎の降伏の制約条件の照査では、橋軸方向に対して杭基礎は降伏するが橋脚の終局水平耐力に大きな余裕があり、式(1)~(3)の制約を満足している。しかし、橋軸直角方向に対して杭基礎は降伏し、かつ橋脚の終局水平耐力には十分な余裕がないため杭基礎の降伏に関する制約条件は満足しない結果となった。

CASE B の杭基礎は、最も建設費が高い杭径1.0m、杭本数12本の杭基礎(2950210kN/m)を選択している。杭基礎は、橋軸方向および橋軸直角方向に対して降伏するが、橋軸方向および橋軸直角方向の橋脚の終局水平耐力に大きな余裕があり、式(1)~(3)の制約を満足している。最適解において、橋台支承の橋軸方向相対水平変位、橋脚支承の橋軸直角方向相対水平変位および塑性率の制約条件が同時に支配的な制約条件となっている。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、5%程度の誤差で実験計画法により精度良く推定することができた。解析値の最大違反度は、橋脚支承の橋軸直角方向相対水平変位において許容値に対して5.2%の違反であり十分な精度で最適解が得られているといえる。

CASE C の場合には、CASE B で得られた最適解の信頼性を検討するため、杭基礎のCASE B より安価な設計変数(2762476kN/m)に固定している。橋台支承および橋脚支承の高さの最適解はCASE B の場合と同様にそれぞれ橋軸方向相対水平変位および橋軸直角方向相対水平変位の制約条件により決定されている。橋脚の断面はCASE B と同一の値であるが、橋台および橋脚の支承の高さはより高くなっており建設費はCASE B より4.67%増加している。以上の検討結果より、提案した最適設計アルゴリズムにより得られたCASE B の最適解は信頼性の高い解であることが明らかとなった。

表-1 杭の特性値

杭径φ	杭本数	建設費(10 ³ 円)	水平ばね K _h (kN/m)	橋軸方向回転 ばね K _{θt} (kNm/rad)	橋軸直角方向 回転ばね K _{θr} (kNm/rad)	連成ばね K _{ss} (kN/rad)	重量(kN)
1.0m	9	13,466	2212657	23604414	23604414	-3001351	3001.3
1.2m	9	16,544	2762476	38430822	38430822	-4437599	4321.8
1.0m	12	17,965	2950210	31472551	49511633	-4001802	4073.1

杭の建設費：65200円/cm³(杭径1.0m)、73800円/cm³(杭径1.2m)、
型枠：8000円/cm²、コンクリート：18500円/cm³

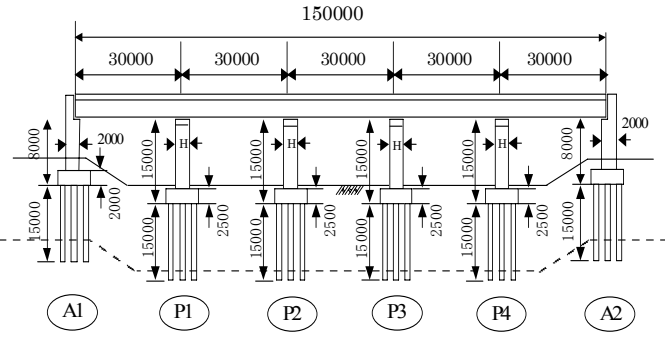


図-1 5本主桁を有する5径間連続鋼I桁橋梁システム

参考文献

- 1) 田口玄一：実験計画法 第3版，丸善（株），1976，
- 2) 田中・谷脇：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，土木学会第65回年次学術講演会，2010，pp. 413-414，
- 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

表-2 CASE A,B,C の最適解の比較

CASE	A	B	C
B _{h1} (cm) , (ばね値)	13.5(18155)	13.3(18363)	14.3(17142)
B _{h2} (cm) , (ばね値)	11.7(27322)	10.2(31274)	12.4(25779)
K _h (kN/m) (杭径，杭本数)	2212657 (φ=1.0m, n=9)	2950210 (φ=1.0m, n=12)	2762476 (φ=1.2m, n=9)
H _r (mm)	2800	2600	2600
A _s (mm ²)	794.2	956.6	956.6
B _r (mm)	4500	4500	4500
橋台支承橋軸方向相対 水平変位の違反度	推定式 1.003 解析値 1.000	推定式 1.000 解析値 0.973	推定式 1.007 解析値 0.989
橋脚支承橋軸方向相対 水平変位の違反度	推定式 0.763 解析値 0.769	推定式 0.875 解析値 0.822	推定式 0.865 解析値 0.830
橋台支承橋軸直角方向 相対水平変位の違反度	推定式 0.931 解析値 0.931	推定式 0.821 解析値 0.856	推定式 0.920 解析値 0.923
橋脚支承橋軸直角方向 相対水平変位の違反度	推定式 1.002 解析値 0.999	推定式 1.000 解析値 1.052	推定式 1.005 解析値 1.012
橋脚塑性率の違反度	推定式 0.984 解析値 1.021	推定式 0.981 解析値 0.961	推定式 0.950 解析値 0.932
橋軸方向杭基礎の降 伏の照査	杭基礎は降伏 P _u > 1.5K _{hc} W μ _{HC} =2.36 < 4.0 δ _{y,r} =0.033(m) < 0.4(m) δ _{y,θ} =0.012(rad) < 0.02(rad)	杭基礎は降伏 P _u > 1.5K _{hc} W μ _{HC} =1.61 < 4.0 δ _{y,r} =0.029(m) < 0.4(m) δ _{y,θ} =0.009(rad) < 0.02(rad)	杭基礎は降伏 P _u > 1.5K _{hc} W μ _{HC} =1.77 < 4.0 δ _{y,r} =0.033(m) < 0.4(m) δ _{y,θ} =0.011(rad) < 0.02(rad)
橋軸直角方向杭基礎 の降伏の照査	杭基礎は降伏 P _u < 1.5K _{hc} W μ _{HC} =3.57 < 4.0 δ _{y,r} =0.010(m) < 0.4(m) δ _{y,θ} =0.018(rad) < 0.02(rad)	杭基礎は降伏 P _u > 1.5K _{hc} W μ _{HC} =2.10 < 4.0 δ _{y,r} =0.040(m) < 0.4(m) δ _{y,θ} =0.014(rad) < 0.02(rad)	杭基礎は降伏 P _u > 1.5K _{hc} W μ _{HC} =2.10 < 4.0 δ _{y,r} =0.040(m) < 0.4(m) δ _{y,θ} =0.014(rad) < 0.02(rad)
建設費 (円)	182533651	191883491	200854339