

実験計画法およびHNNを用いた動的挙動の推定法に関する考察

(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

橋梁システムの性能規定型の最適耐震設計を行う際には、精度よく動的挙動を推定することが重要な問題となる。そこで、著者の一人は実験計画法を用いて橋梁システムの桁の水平変位、および桁と橋脚の相対変位を推定し、その感度を求め最適化を行う方法を提案した¹⁾。ところで、実際の設計では、各変数は離散値をとる場合が多く、実験計画法において水準間隔が不等間隔となる場合が大半である。そこで本研究では、水準値が不等間隔の場合の直交多項式を用いた実験計画法による推定結果について、ホログラフィックニューラルネットワーク (HNN) による推定結果との比較を行うことにより検討を行ったものである。

2. 実験計画法および HNN を用いた推定法

(1) 不等間隔の場合の直交多項式を用いた実験計画法による推定法²⁾

x_1 から x_n の n 個の水準値が不等間隔の場合の直交多項式による推定式は、 x_i から水準の平均値 $\bar{x}$ を引いた値 z_i 、 $z = x - \bar{x}$ とすると、2 次の項までを考慮した場合には次式で与えられる。

$$y = b_0 + b_1 z + b_2 (-M_2^2 - M_3 z + M_2 z^2) \quad (1) \quad \text{ここに、} M_i = \frac{1}{n} (z_1^i + z_2^i + \cdots + z_n^i) \quad n \text{ は水準の数}$$

上式の各係数 b_i の推定値 $\hat{b}_i$ は次式で与えられる。

$$\hat{b}_0 = \frac{1}{rn} \sum_{i=1}^n T_i \quad (2) \quad \text{ここに、} r \text{ は水準を用いた実験の反復数、} T_i \text{ は水準 } x_i \text{ での実験データの合計である。}$$

$$\hat{b}_i = \frac{1}{rS} \sum_{j=1}^n W_j T_j \quad (i=1,2) \quad (3) \quad \text{ここに、} S = \sum_{j=1}^n W_j^2, \quad W_k \text{ は式(1)の } b_i \text{ の係数 } f_i(z) \text{ の } z = z_k \text{ とおいた値である。}$$

(2) HNN による推定法³⁾

HNN では、入出力の実数データを複素平面に写像し、入出力を伝達マトリックスを用いて線形結合で表現し、教師データとの誤差を最小とするような伝達マトリックスを決定する方法である。入出力の実数教師データはシグモイド関数を用いて次のように複素平面に写像することができる。

$$\text{入力教師データ } S_k^j \text{ の写像: } f(S_k^j) = \lambda_k^j e^{i\theta_k^j} \quad \text{出力教師データ } T_k^l \text{ の写像: } g(T_k^l) = \gamma_k^l e^{i\phi_k^l}$$

ここに、 λ_k^j および γ_k^l は入力および出力教師データ値に対応する位相角度域に出現する確率を示し、本研究では全て 1.0 とした。入出力値に対する位相角度 θ_k^j, ϕ_k^l はシグモイド関数を用いて次式により得られる。

$$\theta_k^j = \frac{2\pi}{(1 + e^{-c_k(S_k^j - \mu_S)/\sigma_S})} \quad (4)$$

$$\phi_k^l = \frac{2\pi}{(1 + e^{-c_k(T_k^l - \mu_T)/\sigma_T})} \quad (5)$$

ここに、 μ_S および μ_T は入力教師データおよび出力教師データの平均値、 σ_S および σ_T は入力教師データおよび出力教師データの標準偏差、 c_k はシグモイド関数の傾きを調整するパラメータで本研究では 1.0 とした。

複素平面に写像された入力教師データ $\mathbf{T}_S$ および伝達マトリックス $\mathbf{X}$ を用いて応答値 $\mathbf{R}$ を線形結合 $\mathbf{R} = \mathbf{T}_S \cdot \mathbf{X}$ より計算する。伝達マトリックス $\mathbf{X}$ の各要素は応答 $\mathbf{R}$ と複素平面に写像された出力教師データ $\mathbf{T}_T$ との 2 乗誤差 $\mathbf{Er}$ を最小にするように最急勾配法により決定される。

HNN では、複素数のデータを取り扱うことにより 2 次項や共役項を作成して擬似的に内部入力数を増やし複素空間により密に分布させることにより精度を自動的に向上させることができる特長を有している。

3. 動的挙動の推定例

本研究では図-1 に示す 5 径間連続鋼 I 桁橋梁システムについて、実験計画法および HNN を用いて桁の水平変位、桁と橋脚の相対変位、実際の設計で必要となる橋脚の塑性率 (応答曲率/初降伏曲率) の推定を行った。

キーワード 最適耐震設計, 動的挙動, 実験計画法, ホログラフィックニューラルネットワーク

連絡先 〒550-0013 大阪府大阪市西区新町二丁目 20 番 6 号 (株)長大 西日本構造事業部 TEL 06-6541-5795

地震波として道路橋示方書に規定されているタイプⅡのⅡ種地盤の加速度波形Ⅱ・Ⅱ-2 を用い橋軸方向のみ加振した。橋脚の長方形断面は橋軸直角方向は5mで固定とし、橋軸方向には変化できるものと仮定した。鉄筋の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として橋軸方向の断面の幅が変化するに従い、鉄筋の本数も変化し得るものとした。解析において、支承バネおよび杭バネは弾性バネ、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応答解析を行った。本研究では、今後、橋軸直角方向の地震をも取り扱うことを考慮し、最大13個の変数まで取り扱える直交表 $L_{27}(3^{13})$ を用いることとし、橋台の支承ばね定数 $Kb1$ 、橋脚の支承ばね定数 $Kb2$ 、杭の特性値、橋脚断面の幅 H 、橋脚の鉄筋断面積 As を因子1~5にそれぞれ割り当て、27ケースについて実験を行っている。直交表で用いる3つの水準値を表-1に示す。推定ケースとして表-2に示す11ケースに着目し、それぞれの場合について解析結果と推定結果の比較を行った。

桁の水平変位、桁と橋脚の相対変位および橋脚基部の塑性率について、実験計画法、HNNと解析により得られた結果の比較をそれぞれ図-2, 3, 4に示す。桁の水平変位および桁と橋脚の相対変位に着目すると、実験計画法では最大8.6%、HNNでは6.9%の誤差により精度良く推定できている。塑性率の推定では、両手法ともに推定ケース5において15%程度の誤差が生じており、変位の推定よりやや劣った精度となっている。以上より両手法は最適化の観点から十分適用可能でほぼ同程度の推定精度を有していることが明らかとなった。

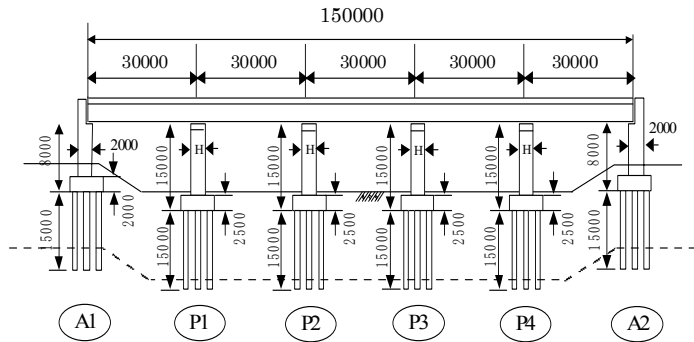


図-1 5 径間連続鋼 I 桁橋梁システム

表-1 パラメータの水準値

水準	橋台の支承ばね定数(KN/m)	橋脚の支承ばね定数(KN/m)	杭のばね定数		橋脚断面の幅H(mm)	橋脚の鉄筋断面積 $As(mm^2)$
			Kh(KN/m)	K θ (KNm/rad)		
1	7315	19267	1676443	13077020	2400	794.4
2	8360	24083	1841651	15548120	2600	956.6
3	9753	32111	2514665	29279320	2800	1140

表-2 各推定ケースで用いたパラメータの値

推定ケース	橋台の支承ばね定数 $Kb1$ (KN/m)	橋脚の支承ばね定数 $Kb2$ (KN/m)	杭のばね定数		橋脚断面の幅H(mm)	橋脚の鉄筋断面積 $As(mm^2)$
			Kh(KN/m)	K θ (KNm/rad)		
1	8360	24083	1841651	15548120	2600	956.6
2	9120	24083	1841651	15548120	2600	956.6
3	8360	26273	1841651	15548120	2600	956.6
4	8360	24083	1841651	15548120	2700	956.6
5	8360	24083	1841651	15548120	2600	1140
6	8360	24083	2514665	29279320	2600	956.6
7	7980	24083	1841651	15548120	2600	956.6
8	8360	21018	1841651	15548120	2600	956.6
9	8360	24083	1841651	15548120	2500	956.6
10	8360	24083	1841651	15548120	2600	794.4
11	8360	24083	1377425	13210690	2600	956.6

参考文献

1) 田中賢太, 大久保禎二: 大規模地震による損傷度および変位量を保証する橋梁システムの最適性能設計法, 構造工学論文集 Vol. 48A(2002年3月) pp. 277-288 など
2) 田口玄一: 実験計画法 第3版, 丸善(株), 1976
3) 荻原一郎, 施勤忠, 小机わかえ: 目的関数のニューラルネットワーク推定による衝撃最適設計法の開発, 日本機械学会論文集(A編), 63巻616号 pp. 2510-2517, 1997

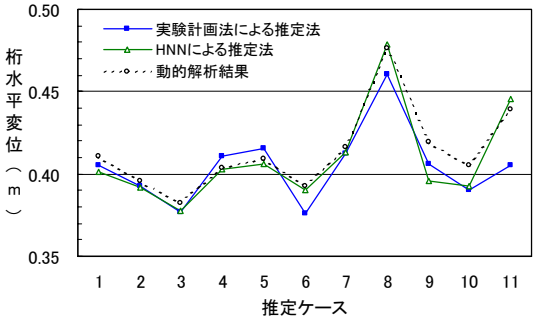


図-2 桁の水平変位の推定結果

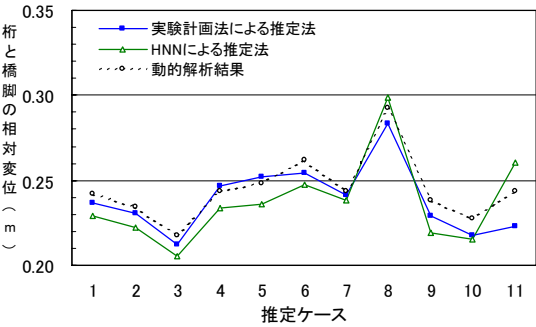


図-3 桁と橋脚の相対変位の推定結果

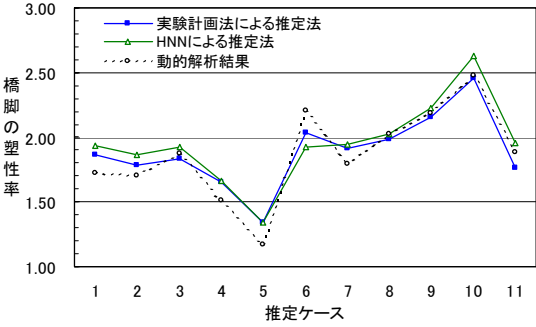


図-4 橋脚基部の塑性率の推定結果