

荷重組合せ問題における Turkstra 則効果のモンテカルロ法による確認

中央大学 学生会員 太田 浩輔

中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

性能設計の導入に際し信頼性手法の活用は有効な手段である。その中でも荷重組合せが問題といえる。この問題では通常、極値の組合せで行うことによる過剰評価を避けるために Turkstra 則が用いられる。しかし荷重作用継続時間の大きく異なる荷重間ではこのモデルを用いることの効果は明らかでない。鋼製橋脚への活荷重、地震荷重等の荷重組合せ問題に対する信頼性を評価した既往の研究¹⁾では荷重組合せをモンテカルロ法で行っている。本研究ではその手法を継続し Turkstra 則の有効性の有無を確認していく。

2. 対象モデルの設定

選定した構造物は阪神高速道路で多く見られる三径間連続桁の中間橋脚を簡略化し図-1のようにモデル化した。設定した構造モデルの各諸元は表-1にまとめて示す。また板厚は許容応力度設計法で設計するものとし、表-2に示す。計算を簡単にするために、断面形状は補剛材を有しない正方形断面とした。各部材には、SM50Y材を用いるものとした。

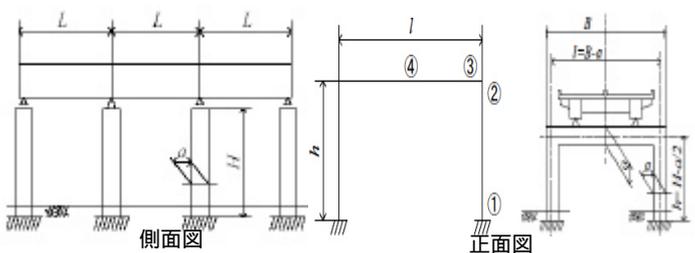


図-1 構造物のモデル化

表-1 構造モデルの各諸

(単位 :m)	
支間長 L	40.00
橋脚全高 H	10.00
橋脚全幅 B	20.00
橋脚高さ h	9.14
橋脚幅 l	18.28
梁柱幅 a	1.72

表-2 板厚算出結果

(単位 mm)	
柱基部 t1	22
柱上部 t2	31
梁隅角部 t3	28
梁中央部 t4	21

3. 実荷重のモデル化

本研究では、死荷重、活荷重、地震荷重の3種類の荷重を考える。各荷重の特性をうまくとらえた B-C 荷重モデルを用いて各実荷重のモデル化を行う。

(1)死荷重

死荷重として上部工死荷重反力は設計値の5%増し、橋脚自重は設計値の10%増しにした値を用いる。

(2)活荷重

上部構造を4車線道路とし阪神高速道路公団の交通実態調査²⁾に基づきシミュレーションを行い、無載荷時間(6時間)を除く通常渋滞時(6時間)および通常走行時(12時間)の活荷重反力の頻度分布をそれぞれ作る。通常渋滞時は対数正規分布、通常走行時は Weibull 分布を採

用した。さらに両分布を1:2の比率で足し合わせたものを活荷重反力の分布関数とする。Weibull 分布がよく適合した。活荷重の分布関数を以下に示す。

Weibull 分布

$$F_x(x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x - 111}{611.038206} \right)^{1.612} \right\}$$

(x>111.0 単位 kN)

基本時間区間 $T_L=6$ (時間)、発生率 $p=0.75$ の Mixed type の B-C 荷重でモデル化する。

(3)地震荷重

地震荷重については阪神高速道路公団の HDL 委員会が作成した応答加速度のモデルを用いる²⁾。ただし地震動として、再現期間が平均2年以上のものを対象としマグニチュード M が5以上、第2種地盤、構造物の減衰定数 $h=5\%$ 、固有周期 $T_n=0.5$ 秒の構造物について求めている。この頻度分布の特性には Weibull 分布がよく適合しているとされている。地震荷重の分布を以下に示す。

Weibull 分布

$$F_E^*(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - 41.28}{34.24} \right)^{0.913} \right]$$

(x>41.28 単位 Gal)

発生率 $\lambda=0.5$ (1/年)である Limiting spike type の B-C 荷重でモデル化する。

4. 荷重効果の組合せ

本研究ではすべての荷重を組合せた(D+L+E)時を考える。各荷重による荷重効果を着目点ごとに組合せる作業を行う。荷重効果として曲げモーメントと軸力のみを考えることにした。まず実荷重の確率分布からモンテカルロシミュレーション法で実荷重のサンプル値を発生させ、それを荷重効果に変換し、抽出した値から順に並べて時系列とする。つまり B-C 荷重モデルを作成する。これを50年間分、各荷重について行う。次に各荷重についての荷重効果を組合せるのだが本研究では、Turkstra 則効果の確認のために以下の3種類を行った。

(1)Turkstra 則

ある荷重(主荷重)が任意の時間で最大値をとる時間で荷重組合せの値も最大値をとるという考え方である。経験的な近似則である。主荷重を地震荷重とする。

(2)極値同士の組合せ

各荷重効果の時系列で最大の値をそれぞれ抽出し、足

キーワード：構造信頼性、荷重組合せ、Turkstra 則

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

し合わせる。つまり極値同士の足し合わせである。

(3) 厳密解(随時組合せ)

各荷重の荷重効果を各時間で足し合わせ、その値の最大値を採用する方法。

5. Turkstra 則の問題点

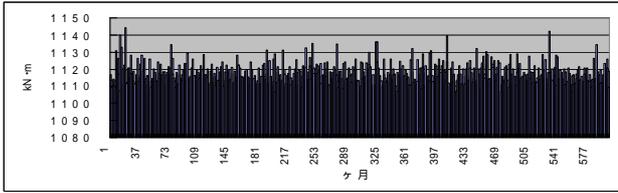


図-2 活荷重発生例

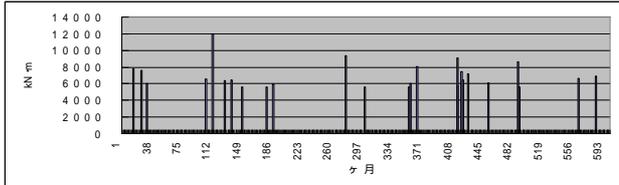


図-3 地震荷重発生例

図-2、3 を見ると容易に思いつく Turkstra 則の問題点がある。Turkstra 則は地震荷重が最大値をとる時、それに対応する値がどうであれ組合せた値も最大であるとしている。しかし2番目以下の値で組合せたとき、組合せの最大値をとる可能性もある。Turkstra 則はそれを無視している。つまり破壊確率は過小評価になると考えられる。本研究では過小評価の有無、あるいはその程度を確認する。

6. 限界状態の設定⁵⁾

限界状態として終局限界状態の横倒れ座屈、局部座屈を考慮した。照査式は以下に示す。(1)が横倒れ座屈、(2)が局部座屈を考慮した照査式となっている。

$$\frac{P}{P_{cu}} + \frac{M}{M_{cu} \left(1 - \frac{nP}{P_{cr}}\right)} \leq 1 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{P}{P_{cul}} + \frac{M}{M_{cul} \left(1 - \frac{nP}{P_{cr}}\right)} \leq 1 \dots \dots \dots (2)$$

：安全率 1.7, P: 軸方向力(kN), M: 作用する曲げモーメント(kN・m), P_{cu}: 断面の圧縮耐力(kN), P_{cul}: 局部座屈を考慮した圧縮耐力(kN), M_{cu}: それぞれ照査する断面の圧縮側の終局曲げモーメント(kN・m), M_{cul}: それぞれ照査する断面の圧縮側の終局曲げモーメント(kN・m), P_{cr}: オイラー座屈荷重(kN)

7. 信頼性評価

対象とする橋脚に先程、設定した実荷重モデルを作用させ、各荷重組合せをし、モンテカルロシミュレーション法を行い信頼性解析により着目点ごと、各限界状態の破壊確率を算出し安全性評価を行う。モンテカルロシミュレーション法の繰返し回数は100万回とし、

表-3 横倒れ座屈の解析結果

Turkstra	extreme combination	real time combination
1.000E-06	1.423E-03	1.000E-06
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00
0.000E+00	0.000E+00	0.000E+00

表-4 局部座屈の解析結果

Turkstra	extreme combination	real time combination
1.000E+00	1.000E+00	1.000E+00
1.900E-04	1.309E-02	2.760E-04
3.702E-02	6.788E-01	3.776E-02
0.000E+00	1.000E+00	1.000E+00

各限界状態関数は先程示した2パターンとする。すべてのパターンの破壊確率を算出し比較することで Turkstra 則の有効性を確認する。シミュレーション結果である破壊確率をそれぞれ表-3,4 に示す。限界状態が横倒れ座屈と場合を表-3 に、局部座屈の場合を表-4 に示す。ちなみに ~ は各着目点を表している。

結果を見ると、全体的に極値同士の組合せは大きな値を取った。Turkstra 則と厳密解を比較すると、オーダーは合っているものの、局部座屈、断面のとき Turkstra 則の過小評価がみえる。

8. Turkstra 則効果の検討

信頼性評価で得た結果を基に Turkstra 則効果の検討を行うのだが、検討に有効な結果を用いて検討することにした。横倒れ座屈の、局部座屈の、を用いる。図-4 に示す。図-4 より、明らかに既往の研究¹⁾で

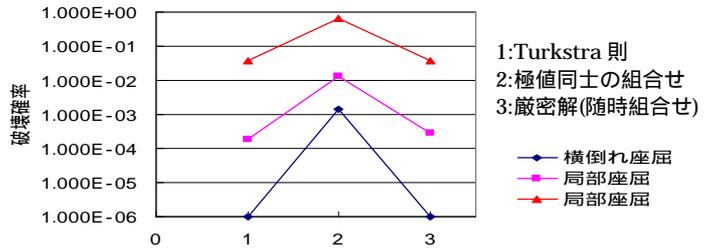


図-4 検討する結果

行っていた荷重組合せである極値を取った組合せでは破壊確率は他の方法に比べて大きいもので3オーダー近く大きい値となった。これは明らかに過大評価された値であり、実際に構造物にかかる一番過酷な条件というものではない。また予想通り Turkstra 則の過小評価は確認できたが、ほとんど図-4 より厳密解と比較すると差がない。よって本研究の例題をとおして、地震荷重が主荷重の場合、Turkstra 則は有効であった。しかし地震荷重が主荷重でない場合など、さらなる検討が必要である。

9. まとめと今後について

- (1) 極値同士の組合せは予想通り過大評価となった。
- (2) 本研究の例題では Turkstra 則と厳密解との差がほとんどないことから、Turkstra 則の有効性を示せた。しかし、他の荷重が主荷重のときに有効かは疑問である。
- (3) Turkstra 則を一般化するために Turkstra 則の特徴を把握することが望まれる。
- (4) 本研究の場合、多くのパターンを計算するのでモンテカルロシミュレーション法の効率化が課題となる。

参考文献：

- 1) 菊池 武志、複数の限界状態を有する鋼製橋脚の信頼設計評価、関東支部技術研究発表会、2003年3月
- 2) 阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター、阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究、阪神高速道路公団設計荷重(HDL)委員会報告書、1986年12月
- 3) 白木渡・山本宏・松原孝介、鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性評価、構造工学論文集 Vol.43A, 1997年3月
- 4) 土木学会構造工学委員会・構造設計国際標準研究小委員会、活動成果報告書・国際標準に基づく構造物の設計法、2000年8月
- 5) 土木学会、鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物、1987年11月