鋼プレートガーター橋の水平補剛材一段最適取り付け位置の一提案

中央大学大学院　学生会員　○丸山　大伍
中央大学　正会員　佐藤　尚次
国土交通省　四国地方整備局　正会員　笠井　良真

1.はじめに

鋼プレートガーダー腹板の座屈設計は定型化されており、その限界状態にかかわる近年の研究も、フランジ・補剛材に囲まれたパネルの座屈にかかわるものに集約されている。最適水平補剛材設計位置の設定を含めた腹板全体のシステム評価は40年ほど前にほぼ議論が終わった状態であるが、近年のシミュレーションの進歩・信頼性の観点の進展の状況のもとでは、パネル相互の信頼性の比較、組み合わせ応力状態の別による要求性能の対比にもさらに異なった視点からの議論が可能になりつつある。そこで本稿では、ランダムな荷重に対する信頼性解析を行い、水平補剛材位置のもつ意味について考察し、併せて最適取り付け位置の提案を行う。

2.解析の概要

2.1 弾性域に限定した弾性限界

構造の弾性限界として上下どちらか一方のパネルが局部座屈したときと定義する。限界状態関数は**図1**のβをパラメータとする**式(1)**、**(2)**とする。

$$\left(\frac{b}{100\ t}\right)^4\left[\left(\frac{\sigma}{3650\ /\ \beta^2}\right)^2+\left(\frac{\tau}{810\ /\ \beta^2+610\ (b/a)^2}\right)^2\right]\le 1 \quad (1)$$

$$\left(\frac{b}{100\ t}\right)^4\left[\left(\frac{(1-2\beta)\sigma}{3650\ /(1-\beta)^2}\right)^2+\left(\frac{\tau}{810\ /(1-\beta)^2+610\ (b/a)^2}\right)^2\right]\le 1 \quad (2)$$

2.2 塑性域まで考慮した終局限界状態

現行の設計法(β=0.2)では**式(1)**、**(2)**の関係から下のパネルを先行させて座屈させる設計となっている。この理由は文献[2]によると下のパネルが座屈によって塑性化した後の斜張力が重要な役割を果していると考えられる。斜張力による応力再分配が機能することにより終局耐力が増加すると一般的には考えられている。本稿では下のパネルが先行して塑性化する範囲(β=0.20～0.35)に限って行うものとする。なお、βがこれを越えると、上パネルの座屈の先行があり得て、斜張力場の機能は期待できないので**式(1)**、**(2)**を終局限界と考える。ここで下のパネルが塑性化した後の上のパネルの限界状態関数は**式(3)**になる。

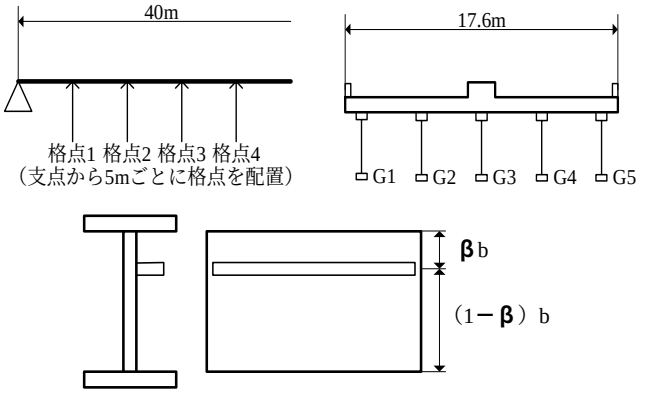

図1　解析モデル

表1　弾性域に限定したときの破壊確率

	G3			
	格点1	格点2	格点3	格点4
現行β	0.2			
現行P_f	5.39E-02	0.309	0.173	0.145
最適β	0.4	0.37	0.37	0.36
最適P_f	9.00E-06	1.00E-05	5.00E-06	2.00E-06

$$\left(\frac{b}{100\ t}\right)^4\left[\left(\frac{\sigma_1+2(1+\beta-\sqrt{2\beta})\Delta\sigma}{3650\ /\ \beta^2}\right)^2+\left(\frac{\tau_1+(1/\beta)\Delta\tau}{810\ /\ \beta^2+610\ (b/a)^2}\right)^2\right]\le 1 \quad (3)$$

σ_1,τ_1：下のパネルが塑性化したときの曲げ応力、せん断応力

$\Delta\sigma,\Delta\tau_1$：塑性後に上のパネルに働く曲げ応力、せん断応力の増分

3.解析手法

本稿では活荷重シミュレーションを行い、破壊確率の算定を行う。データには高速道路で実測された交通流データを用い解析を行う。信頼性評価にはモンテカルロシミュレーション（以下MCSと記す）を用い、乱数を発生させ車両の載荷シミュレーションを繰り返すことにより破壊確率を求める。さらに損傷に対して危険な部分空間を自動的に設定し、その空間内で効率的にサンプルを発生させ、計算の効率化を図るためマルコフチェインモンテカルロシミュレーション（以下MCMCと記す）でも評価を行う。

4.解析結果

4.1 弾性限界に限定したときの破壊確率

活荷重シミュレーションを行い、MCSで破壊確率の算定を行った。**表1**に結果の一部としてG3桁の結果を示す。

キーワード：腹板、水平補剛材、座屈設計、信頼性評価、活荷重シミュレーション
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

表 2 塑性後の挙動まで考慮した支点付近の破壊確率

（σ=1500、τ=1000）

β	MCSでのP_f	MCMCでのP_f	σ_1	τ_1
0.2	2.15E-07	2.60E-07	1000	500
0.25	6.79E-07	7.50E-07	900	700
0.3	4.31E-05	9.59E-06	1300	600
0.35	7.48E-06	9.80E-06	1200	750

（応力の単位：kgf/cm^2）

表 3 塑性後の挙動まで考慮した中央付近の破壊確率

（σ=6000、τ=600）

β	MCSでのP_f	MCMCでのP_f	σ_1	τ_1
0.2	＜1.00E-07	1.10E-08	1800	250
0.25	＜1.00E-07	6.99E-08	2300	350
0.3	1.06E-06	5.40E-07	3500	300
0.35	＜1.00E-07	2.59E-08	4400	400

.（応力の単位：kgf/cm^2）

4.2 塑性後の挙動まで考慮した破壊確率

これは「初期座屈が発生している」という条件のもとに、そこでの発生応力に対して**式(3)**を適用していくことになる。**4.1** と同様の活荷重シミュレーションの方法でこれを求めることをはじめ考えたが、基本的にP_fが小さい現象にあるのでこの条件付確率を求めるのは困難である。そこで、改めて想定断面に対して実際の荷重よりも大きめの値が生じるように(σ、τ)の「仮想確率分布」を与えて、別途にシミュレーションを行い「初期座屈が発生したケースの中で、さらに終局限界まで行く割合」を求め、これを近似的に「条件付確率」として利用することとして、**4.1** の結果との積をとることでP_fを求めることとした。解析においては橋梁の支点付近の応力(σが小、τが大)と中央付近の応力(σが大、τが小)の 2 パターンについて行った。そしてMCS,MCMCを用いて破壊確率を算定する。その際にσ_1,τ_1はある確定値として与え、$\Delta\sigma$、$\Delta\tau$を乱数として扱っていくこととする。また解析はβを 0.20～0.35 の内、0.05 刻みで変化させた。**表 2、3** にその結果を示す。

4.3 修復コストを考慮した期待損失額の算定

土木構造物の設計においては半破壊および全破壊における修復コストを考慮した期待損失額の最小化を図る必要性がある。本稿では期待損失額を**式(4)**で定義する。半破壊時コストと全破壊時コストの比率は**表 4** に示す 3 ケースとする。**式(4)**をもとにβごとの期待損失額を算定し、コスト面で有利な取り付け位置について探索を行う。**表 5,6** にその結果を示す。

表 4 半破壊コストと全破壊コストの比率

	半破壊コスト	全破壊コスト
ケース1	1	5
ケース2	1	10
ケース3	1	20

表 5 橋梁支点付近を想定した期待損失額

β	期待損失額 ケース1	期待損失額 ケース2	期待損失額 ケース3
0.2	5.39E-02	5.39E-02	5.39E-02
0.25	3.91E-03	3.91E-03	3.92E-03
0.3	6.00E-04	8.16E-04	1.25E-03
0.35	8.04E-05	1.18E-04	1.93E-04

表 6 橋梁中央付近を想定した期待損失額

β	期待損失額 ケース1	期待損失額 ケース2	期待損失額 ケース3
0.2	1.45E-01	1.45E-01	1.45E-01
0.25	4.31E-03	4.31E-03	4.31E-03
0.3	1.58E-04	1.63E-04	1.73E-04
0.35	5.50E-06	6.00E-06	7.00E-06

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i = \sum_{i=1}^{n} p_{fi} \times c_{fi} \quad (4)$$

5.おわりに

本稿は「初期弾性座屈に限定した破壊確率の最小化」、「後座屈挙動下における破壊確率の最小化」、「半破壊および全破壊の修復コストを考慮した期待損失額の最小化」の三つの最小化について信頼性解析を行うことで最適な設計パラメータの提示を行った。

β を現行通りの 0.20 付近に設定した場合、終局限界状態となる確率は最小化することができるが、期待損失額は半破壊時コストが効くためにコスト増となってしまう。β を 0.35～0.45 の範囲まで下げた場合、終局限界状態となる確率は β=0.20 時よりも大きくなり、期待損失額は半破壊確率が減少するためにコスト減となることがわかった。

この結果から、道路橋示方書では β=0.20 付近にすることと指定されてはいるが、2 種類の限界状態各々に対する最適化で得られるパレート解を考慮すると設置位置を既存より下げるという方針は十分検討するに値する。よって今後は 2 目的最適化におけるパレート解の分析から最適 β の検討を行っていく。

＜参考文献＞
1） 社団法人　日本道路協会：「道路橋示方書・同解説 Ⅰ共通編　Ⅱ鋼橋編」
2） 小松定夫：「鋼構造の補剛設計」森北出版
3） 土木学会：「座屈設計ガイドライン」