

I-7

多目的最適化手法を用いた鋼・コンクリート桁接合部の
設計の多様性とその評価について室蘭工業大学 学生員 杉村朋之、室蘭工業大学 正員 杉本博之
片山ストラテック㈱ 正員 夏秋義広

1. まえがき

複合斜張橋の接合部の形式の選定および設計にあたっては、多くの要素を考えた上で決定しなければならない。考慮すべき主な設計要素としては、構造的（鋼板とコンクリート間との応力の連続性確保、応力集中の回避）、施工性（最小寸法制限）、経済性（最小コスト）が挙げられるが、これらは異なった設計要因を内包しており、同時に考慮した場合の総合的な評価は困難と考えられる。本研究は複数の設計要求を考慮した場合の工学的判断の一方法として、多目的最適化手法¹⁾を用いた設計評価を試みたものである。

以下に、その方法を説明し、数値計算で得られた幾つかの接合部設計例を示す。

2. 複合斜張橋の接合部および多目的最適化問題への定式化²⁾

本研究の対象とした接合部は、鋼橋技術研究会・複合構造接合部研究部会にて試設計された大型クラスの複合斜張橋の接合部³⁾（桁高2.6m、幅員20m、部分接合・後面プレート方式）である。接合部縦断面および解析モデルを図-1に示す。解析において、スタッドは格点バネ要素（スタッド1本当りのズレ定数は $1.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$ ）にモデル化し、鋼とコンクリート間の付着および摩擦は安全側になることから、これらは無視している。PC鋼棒によるプレストレスは、1セル当り50tfを導入している。

本研究での接合部の評価項目には、まえがきに挙げた設計要素を数値的に表わす指標として、格点バネ反力の変動係数、中詰めコンクリート図中の④-④ライン上の要素応力（ σ_x ）の変動係数、セル面積の最小化およびスタッド本数の最小化とした。これらを多目的最適化問題の目的関数として定式化し、それぞれの目的関数を最小化する計算結果より、種々の観点から接合部の工学的な評価を試みた。

最適設計における設計変数には、接合部のセル高さDおよび長さL、支圧板の厚さts、橋軸方向のスタッドピッチ p_x （橋軸直角方向のピッチは17.5cmで固定）とした。制約条件には、図の網掛け部分の中詰めコンクリート主応力、支圧板せん断応力、スタッド1本に作用するせん断力の最大値 $Q_{\max}$ および式(9)に示す引張応力を考慮した。なお、接合部に作用する平面解析用荷重P(kgf)はセルの高さの変化に応じて次式にて算出している。

$$P = \frac{D_0}{2} \left(\frac{N}{A} - \frac{M_x \cdot Y}{I_x} - \frac{M_y \cdot X}{I_y} \right) \quad (1)$$

ここで、 D_0 ：接合部セル高さ(cm)、N、 M_x 、 M_y ：接合部断面力（ $N = -8900 \times 10^3 \text{ kgf}$ 、 $M_x = 4700 \times 10^5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ 、 $M_y = 35900 \times 10^5 \text{ kgf} \cdot \text{cm}$ ）、X、Y：桁横断面の図心から着目セル中心までの距離(cm)、A：桁横断面積(cm^2)、 I_x 、 I_y ：桁の面内および面外断面2次モーメント(cm^4)である。

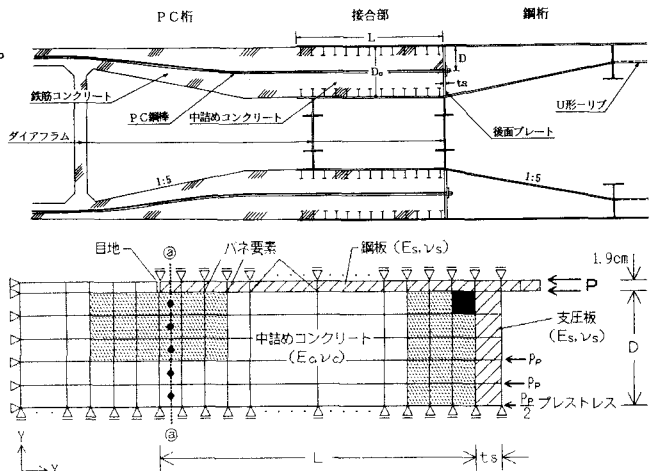


図-1 接合部縦断面とFEM解析モデル

On the Design of Steel-Concrete Girder Joints in Hybrid Cable-Stayed Bridges by Multicriteria Design Method, by Tomoyuki SUGIMURA, Hiroyuki SUGIMOTO, Yoshihiro NATSUAKI

接合部の多目的最適化問題の定式化を以下に示す。

○目的関数

接合部セル面積 (cm²) : $f_1 = D \times L \rightarrow \min$ (2) 格点バネ反力変動係数 (%) : $f_2 = CVD \rightarrow \min$ (3)

コンクリート応力変動係数 (%) : $f_3 = CVC \rightarrow \min$ (4) スタッド本数 (本) : $f_4 = L / p_x \rightarrow \min$ (5)

○制約条件

最大スタッドせん断力 : $g^{(1)} = Q_{\max} - Q_a \leq 0$ (6) 引張応力 :

コンクリート主 応力 : $g^{(2)}_i = \sigma_i - \sigma_a \leq 0$ (7) $g^{(4)} = \frac{N}{A} + \frac{M_x \cdot Y}{I_x} + \frac{M_y \cdot X}{I_y} - \sigma_t \leq 0$ (9)

支圧板せん断応力 : $g^{(3)}_j = \tau_j - \tau_a \leq 0$ (8)

ここで、各許容値は $Q_a = 2904 \text{ kgf/本}$ 、 $\sigma_a = 140 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\tau_a = 1200 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_t = 30 \text{ kgf/cm}^2$ とした。

○設計変数と上下限値

接合部セル高さ (cm) : $15.0 \leq D \leq 50.0$ (10) 接合部セル長さ (cm) : $30.0 \leq L \leq 300.0$ (11)

支圧板の厚さ (cm) : $1.0 \leq t_s \leq 5.0$ (12) スタッドピッチ (cm) : $11.0 \leq p_x \leq 60.0$ (13)

3. 満足度パラメータ¹⁾に対する設計

本問題におけるペイオフテーブル¹⁾を計算した結果、参考点は表-1のように設定された。ここでは、各目的関数の満足度パラメータを種々設定した計算を行ない、その結果から接合部の特性について検討する。

満足度パラメータとは、0～1の実数値で設定され、それぞれの目的関数の希求水準に対する達成度を表すパラメータである。満足度パラメータが0に設定された目的関数は、一般に希求水準が達成されることはなく、1に近いほどその目的関数の達成度は高くなる。本研究では、満足度パラメータの組合せを表-2のように①～⑧の8通り設定して最適化計算を行なった。①～④は、それぞれの目的関数の満足度パラメータの値を単独で設定したケースであり、⑤～⑧は複数の目的関数の満足度パラメータの値を同時に設定したケースを表す。このようにして得られた結果はパレート解と呼ばれ、すべて制約条件を満足する実現可能な解の集合である。これらの結果を整理し、セル面積 ($D \times L$, cm²)、CVD、CVC、セル高さD、セル長さL、スタッドの荷重分担率と各満足度パラメータ (と)との関係を示したのが図-2～7である。

図-2は、セル面積ととの関係を示している。セル面積を重視している①⑤は当然セル面積が減少しているが、その他のケースではセル面積は増加つまり犠牲にされている。特に応力・力の平滑化を重視している⑥⑧ではかなり増加することが示されている。図-3は、CVD ととの関係を示す。CVCのみを重視した③をのぞいてスタッドのせん断力の平滑化は改善されている。②⑥⑦⑧は CVDを重視しており当然改善しているが、④⑤のようにスタッド本数を重視した場合でも CVDは改善されることがわかる。図-4は、CVC ととの関係を示している。CVC を重視した③⑥⑧以外では、CVC を改善させることはできないことがわかる。図-5は、セル高さとの関係を示している。セル面積のみの①、

表-1 参考点

	理想点	希求水準	最悪点
セル面積	2597.8	2597.8	7466.5
CVD	19.8	19.8	109.2
CVC	2.8	2.8	7.5
スタッド本数	5.1	5.1	27.3

CVC のみの③を重視したケースでセル高さは小さくなっている。CVD あるいはスタッド本数を重視する②④⑤⑥⑦⑧ではセル高さは大きくなっている。断面の急変を避けるためには、セル高さDの値は少なくしたいが、CVD の改善のためには、Dの値は大きい方がよいことを示している。図-6は、セル長さとの関係を示している。CVC を重視する③⑥⑧のケースでLの値が大きくなっている。接合部のコンパクト化のためにはセル長さLは短い方がよいが、CVC の改善のためにはLは長い方がよいことを示している。図-7は、スタッドの荷重分担率との関係を示している。分担率は、設計の結果として表われる量であるが、文献3)では一例として30～40%という数字が示されている。本研究による結果では、セル

表-2 計算ケース

	満足度パラメータの組合せ							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
セル面積	○				○			
CVD		○				○	○	○
CVC			○			○		○
スタッド本数				○	○		○	○

面積あるいはスタッド本数を重視した①④⑤⑦⑧のケースでこの範囲の値を示しており、文献の数値はセル面積、スタッド本数を重視したものと考えられる。

4. 代表的な設計の比較

ここでは、文献3)で示されている試設計モデルと前節で得られた多数のパレート解（実現可能な設計）から、その内6つの代表的な設計を取上げ比較、検討を行う。取上げた設計例を表-3にまとめ、それらに対する接合部の寸法と応力状態を表したものを図-8～11に示す。図は全て同じ縮尺で描かれている。基準設計（1）（図-8）は、文献3)で示されている試設計でセルの長さがセルの高さの3倍の設計である。基準設計（2）（図-10）はセルの長さがセルの高さの2倍の設計である。設計A（図-9）は、すべての目的関数に関する満足度パラメータを0にした設計結果であり、本研究の標準となる設計結果である。各目的関数、寸法とも比較的中庸の値が取られている。基準設計（1）を一回り小さくしたような断面寸法

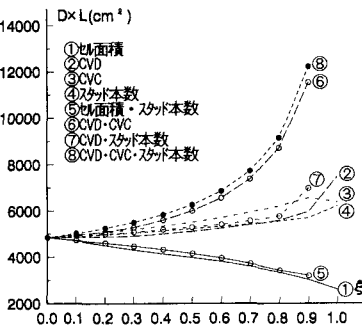


図-2 セル面積と満足度パラメータ

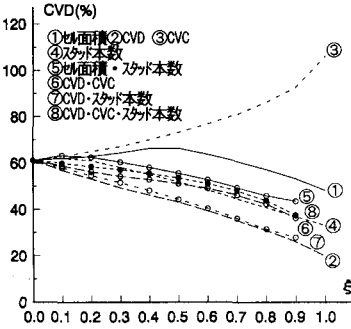


図-3 CVDと満足度パラメータ

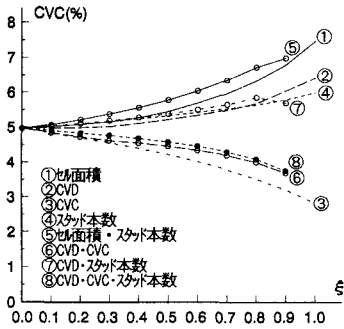


図-4 CVCと満足度パラメータ

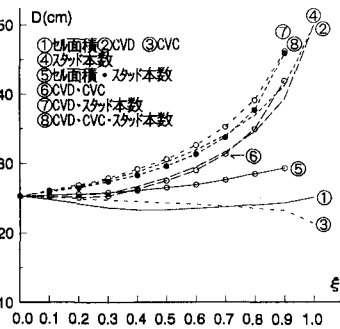


図-5 セル高さと満足度パラメータ

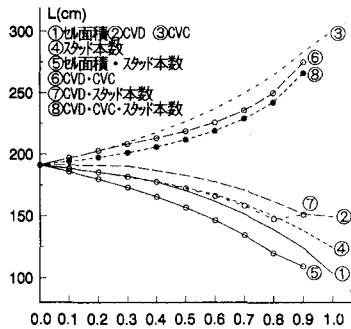


図-6 セル長さと満足度パラメータ

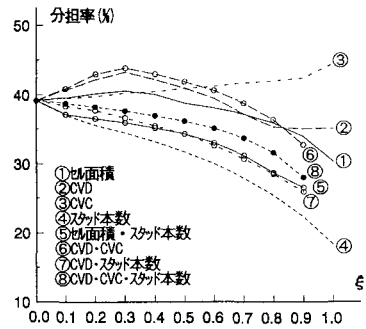


図-7 分担率と満足度パラメータ

表-3 代表的な設計の計算結果

	満足度パラメータ				目的関数				設計変数				分担率 (%)
	ξ_A	ξ_D	ξ_C	ξ_P	面積 (cm ²)	CVD (%)	CVC (%)	スタッド 本数	D (cm)	L (cm)	ts (cm)	P x (cm)	
基準設計(1)	—	—	—	—	8010.0	44.5	4.3	13.0	35.6	225.0	2.50	17.5	33.9
基準設計(2)	—	—	—	—	5340.0	34.6	5.8	8.8	35.6	150.0	2.50	17.0	30.3
設計A	0.0	0.0	0.0	0.0	4838.9	61.0	5.0	15.3	25.3	191.4	3.48	12.5	39.2
設計B	0.0	0.7	0.7	0.7	7713.5	48.0	4.3	12.1	33.7	228.6	2.84	18.9	33.7
設計C	0.0	0.7	0.0	0.7	5558.0	36.1	5.6	9.1	35.2	157.9	2.61	17.4	30.7
設計D	0.8	0.0	0.0	0.8	3415.4	45.9	6.7	8.8	28.5	119.9	5.00	13.7	28.7

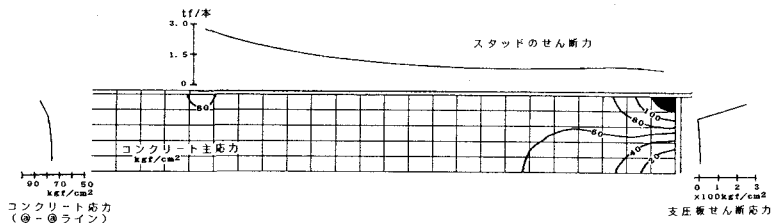


図-8 基準設計(1)の寸法と応力状態

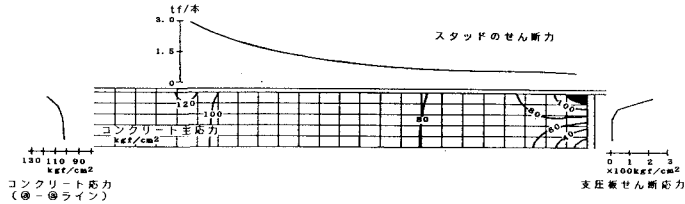


図-9 設計Aの寸法と応力状態

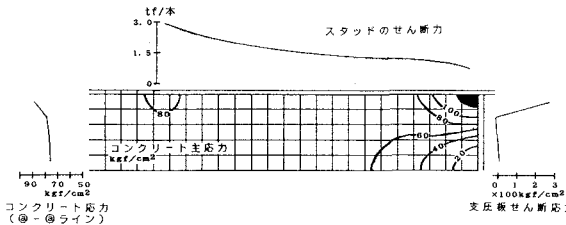


図-10 基準設計(2)の寸法と応力状態

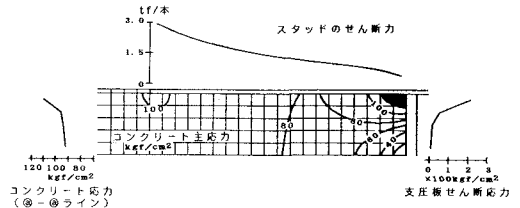


図-11 設計Dの寸法と応力状態

となっている。設計Bは、CVD、CVCおよびスタッド本数の満足度パラメータを0.7に設定して得られた結果で、寸法および目的関数値とも比較的基準設計(1)に近い設計であった。これは、基準設計(1)が応力・力の平滑化およびスタッド本数を重視した設計であると考えられる。設計Cは、CVDとスタッド本数の満足度パラメータを0.7に設定して得られた結果で、比較的基準設計(2)に近い設計であった。これは、基準設計(2)がスタッドのせん断力の平滑化およびスタッド本数を重視した設計であると考えられる。設計D(図-11)は、CVDとスタッド本数の満足度パラメータを0.8に設定して得られた結果で、基準設計(2)を一回り小さくしたような断面寸法となっており、かなりコンパクト化された設計となっている。

5. あとがき

複合斜張橋鋼・コンクリート接合部の設計に対して多目的最適化手法を用いた設計を試み、接合部特性の検討および代表的な設計について比較を行なった。本例のように、構造的、施工性、経済性などの複数の価値基準(目的関数)が考慮されるべき構造設計においては、目的関数間、あるいは種々のパラメータの間にトレードオフの関係があり、単なるパラメトリック解析では結果の評価も難しく、最適化手法の応用が積極的に考えられてしかるべきと思われる。また本手法による設計では、各目的関数に対する重点の置き方により多様な設計を抽出することができ、より自由度の高い設計の選択が可能になると考える。

参考文献

- 1) 亀廻井寿明・杉本博之・中山弘隆：構造最適設計のための改良型満足化トレードオフ法に関する研究、土木学会論文集、No.441/I-18、pp.177-126、1992。
- 2) 杉本博之・夏秋義広・杉村朋之：複合斜張橋の鋼・コンクリート桁接合部の多目的最適化手法による設計評価、構造工学論文集、Vol.39A、1993年。(掲載予定)
- 3) 鋼橋技術研究会・複合構造接合部研究部会：平成3年度研究報告書、1992。