

外ケーブルプレストレス補強設計の システム化に関する研究

鄭 勝仁¹・中村秀明²・宮本文穂³

¹学生員 修士(工学) 山口大学大学院 理工学研究科博士後期課程(〒755-8611宇部市常盤台2丁目16-1)

²正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科(〒755-8611宇部市常盤台2丁目16-1)

³正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科(〒755-8611宇部市常盤台2丁目16-1)

外ケーブルプレストレス技術は、橋梁構造の広範囲に渡り適用可能な技術と言える。近年、我が国において、本技術は既設鋼桁橋の効果的な補強技術の一つとして注目されており、各研究機関で種々の研究が行われている。このことより、今後、鋼橋に対して本技術を適用した補強設計事例の増加が予想される。本論文では、合成鋼桁橋に対する本補強技術を用いた技術的検討作業の合理化を目的に、CAE (Computer Aided Engineering) 的なエンジニアリングシステムとして構築した補強設計支援システム“DSSEPT : Design-Strengthening Support System for Composite Plate Girder Bridge using the External Prestressing Technique”について述べている。

Key Words : composite plate girder, design-strengthening, prestressing technique, external tendon, design support system, user-heuristics

1. はじめに

外ケーブルプレストレス技術は、古くからコンクリート構造だけでなく鋼構造においても優れた役割を果たすことが知られている¹⁾。我が国では1950年代後半の最小鋼重設計に基づき、外ケーブルプレストレス技術を適用した単径間合成鋼桁橋の架設実績²⁾を皮切りに、その後暫くは経済設計の観点から研究・開発が活発になされた。その結果、経済性、施工性および緊張材の性能が不足する点などを鑑みると、必ずしも良い成績が得られなかったことから、1960年代中頃にはその勢いも急速に下火となった。しかしながら、橋梁構造物の様々な補修・補強問題が現実化する今日、本技術に関する関心が再燃している。例えば、最近の施工実績として、既設高架橋主桁の曲げ補強³⁾や床版打換え時の補助工法⁴⁾としてなど、実践的に適用されている事例が既に数例見られる。

一方、著者らは、合成鋼桁橋を対象とした恒久的な補強対策の観点から、外ケーブルプレストレス補強技術に着目し、本補強技術により補強されたプレストレス合成鋼桁の力学的性能評価を、解析的、実験的に試みてきた⁵⁾。その結果、外ケーブルプレストレスにより、合成鋼桁の曲げ耐力(降伏、終局)の向上やたわみ制御を効率よく実現可能にす

るなど、種々の補強効果が明らかとなった。

外ケーブルプレストレス技術を適用して、既設鋼桁橋の補強設計を実施する場合、設計技術者は、緊張材と桁との定着構造および偏向構造などの詳細設計の前に、補強効果と主要な補強設計項目である『緊張材の配置形式・形状』、『導入プレストレス力および使用緊張材断面量』といった補強設計パラメータとの関係を、解析的な検討作業を通じてまずは十分に把握しておく必要がある。しかしながら、この検討作業は、比較的広範囲におよぶ設計空間から設計適合値を選び出す作業となることから、設計技術者が納得の行く設計適合値を得るためには、必然的に多大な労力を強いられることが予想される。

そこで、このような複雑性を伴う補強設計作業に対し、今日、その性能が飛躍的に向上したコンピュータ技術を積極的に活用することで、エンジニアリング作業の効率化を図ることは、本補強工法の技術的な検討作業においても有益なことと思われる。

このことから、本研究ではこのような補強設計作業に従事する設計技術者を支援する目的で、CAE (Computer Aided Engineering) 的な合理化手法を利用した外ケーブルプレストレス補強設計支援システム DSSEPT (Design-Strengthening Support System for Composite Plate Girder Bridge using the External Prestressing Technique) を構築し、補強設計作業にお

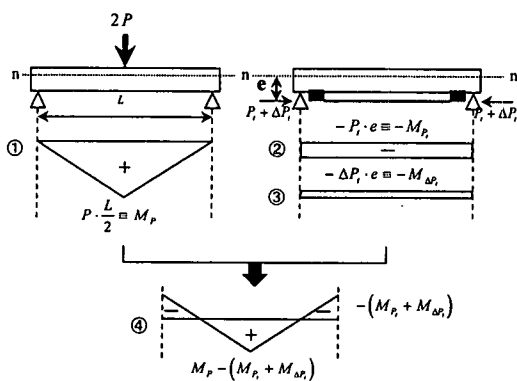


図-1 補強機構 (曲げに対する様子)

ける技術的検討プロセスの能率化および省力化を提案している。

次節以降では、外ケーブルプレストレス補強技術の基本事項を端的に整理した後、DSSEPT について解説し、本システムの有効性について述べている。

2. 外ケーブルプレストレス補強技術

まず、本補強技術における補強機構、施工事例および補強設計上の留意点について述べる。

(1) 補強機構

図-1 は、梁を用いた外ケーブルプレストレスによる曲げ補強の概念図である。

今、スパン L の梁のクリティカル断面 (critical-section) には、設計荷重 P による曲げモーメント M_p が生じている (図中①)。一方、梁の下縁に沿って緊張材を直線配置し緊張力 P_p を与えると、 P_p は e だけ偏心して桁に作用するため、梁には負の曲げモーメント $-M_p$ が生じる (図中②)。さらに、 P による増加緊張力 ΔP_p により $-M_{\Delta p}$ の負曲げモーメントが加わる (図中③)。これより、外ケーブルプレストレスを受ける梁のクリティカル断面の曲げモーメントは、当初の M_p から $-(M_p + M_{\Delta p})$ が軽減される (図中④)。このことにより、梁は曲げ補強されるものと考えられる。なお、梁には P_p および ΔP_p の作用に伴う曲げモーメントと同時に、軸力 (圧縮) が作用するが、ここではその説明を省略している。

(2) 施工例

現在、我が国では、最近の設計活荷重の改定にともない、輪荷重に対する上部構造の耐荷力向上対策

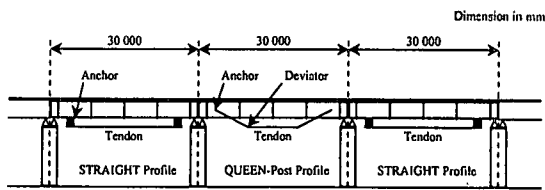


図-2 施工事例 (道路高架橋への適用) ³⁾

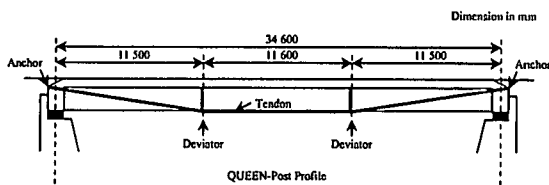


図-3 施工事例 (一般道路橋への適用) ⁶⁾

が進行しつつある。外ケーブルプレストレス技術は、力学的性能および施工性に優れた特徴を示す補強技術と考えられることから、国内で、鋼構造およびコンクリート構造を問わず、適用実績が増加する傾向にある。

図-2は、高架橋で適用された事例である³⁾。本事例は、3径間鋼切断式合成鉄桁橋 (3主桁) に試験施工されており、緊張材の配置形式には直線形式 (2径間) と QUEEN-Post 形式 (1径間) が採用されている。

次に図-3は、一般的な道路橋へ適用された事例である⁶⁾。本事例は、単純合成鉄桁橋 (3主桁) への適用であり、緊張材の配置形式には QUEEN-Post 形式が採用されている。また、本事例は大幅な耐荷力向上を目的とした補強工事であったことから、床版上縁増厚工法との組み合わせ施工が実施されている。

(3) 補強設計上の留意点

前項で例示したように、上部構造への外ケーブルプレストレス技術の適用は、補強効果および施工性等において成績も良く、したがって、今後も適用実績が増加する傾向にあると思われる。さらに本技術を既設構造へ適用する場合には、多くが供用中の橋梁に対して、施工を実施することが予想されることから、交通解放下での施工が可能である本工法は、近年の橋梁を取り巻く交通環境を考慮すると、在来工法と比べ、極めて有利な補強工法の一つと考えられている。

しかしながら、その反面、最適もしくはそれに準じた質の高い効果的な外ケーブルプレストレス補強を実現するためには、例えば、導入プレストレス力、緊張材の配置形態および緊張材特性 (機械的特性、引張剛度 etc.) などに対する補強設計パラメータの

策定段階で、極めて複雑な技術的検討プロセスを要する。すなわち、基本的な補強機構は2.(1)で述べた通りであるが、その機構を利用して補強目標を満たすには、種々の設計条件を考慮した上で、夥しい数の緊張材の配置形式・形状の中から、最適と思われるものを選択し、その配置形態で合目的なプレストレス力を決定しなくてはならない。また、プレストレス力および緊張材の配置形態は、緊張材断面量の設計にも影響を与える。

このように、外ケーブルプレストレス技術を適用した補強設計において、緊張材の配置形式・形状、導入プレストレス力および緊張材断面量といった補強設計パラメータは、相互に関連性を有している。したがって、それらを種々の技術的検討作業なくして一意に決定するのは困難と言える。

3. 補強設計プロセスの提案とシステム化

本節では、本研究で提案している支援システムの基本的なシステム化の考え方について述べる。

(1) 構造工学における対話型求解システム手法

最近のコンピュータ技術の急速な進歩に伴い、各種工学分野では、特定領域の問題解決および意志決定プロセスに、コンピュータ技術の援用を提案した事例が数多く見られるようになった。これは、近年のシステム開発環境が、ハードおよびソフト的に一段と整備、充実され、かつ低廉化へとシフトしたことで、これまで SE (System-Engineer) が主流であったシステム構築が、DE (Domain-Expert) においても比較的容易かつ独自の可能になったためであると言える。さらにこのことは、対象領域に応じた DS (Domain-System) が一層身近なものになり、システムユーザの理解を支援する visual-aid された情報の活用が、様々な分野において、さらに進んだ段階で実現しつつあることを予感させる。

土木工学の分野では、これまで数理計画法に基づくシステム最適化手法の応用研究が数多く行われてきた。特に、橋梁分野においては、最適化手法を設計・施工に応用した多くの研究^{7), 8)}が見られ、現在では、橋梁設計への最適化手法の応用は実用段階の域に到達しつつある^{9), 10)}。しかしその一方で、数理計画法による最適化問題の定式化は困難を要し、さらに求解の結果、実行可能性の高い解が必ずしも得られないと言った指摘もある。このように数理計画法のみによる最適化手法には、合理的な計画・設

計を支援する手法として、土木技術者に浸透しているとは言い難い側面が見られる。

このような問題に善処するための一手法として、最適設計システムにユーザインターフェースを巧みに利用した対話型計画法 (以下、対話型求解システム) の概念が提唱されている¹¹⁾。この対話型求解システムは、数理計画法で必須となる綿密な定式化に基づいた求解手法とは異なり、全設計空間からユーザ本意に求解を行い得るための手法と理解される。したがって、獲得解は実行可能性の有る解集合から得られるものの、最適性に関しては手法論上明確に言及できないと言える。このことから、この対話型求解システムは準最適化手法の一つとして位置付けられるものと思われる。

この対話型求解システムでは、特に、比較的容易なシステム操作により、盲目的なプロセスを通じてユーザに解候補を提示するのではなく、ユーザ自身がその解候補の算出根拠を明らかに理解できることが一義的に望まれる。この要求事項に対しては、コンピュータ援用システム (CAS) で重要視されるユーザインターフェース機能が具体的に担っており、例えば、エキスパート・システム (Exp.S) ではその創成当初から、システム仕様の一つとして視覚的なユーザインターフェース機能を組み込んでいるものが多い。なお、橋梁分野での Exp.S には、計画¹²⁾、設計¹³⁾、施工¹⁴⁾ および維持・管理¹⁵⁾ の各業務支援を目的に、幾つかのシステムが研究・開発されている。また、岩松らは、Exp.S を利用して、特に、求解を計算機の自動算出に求めるのではなく、「対話的なシステム操作を通して実施し得る橋梁の比較設計」の概念に力点を置いたシステム設計手法¹⁶⁾を報告している。一方、Exp.S に分類されない対話型求解システムとして、香月は、遺伝的アルゴリズム (GA) を応用した対話型の最適設計支援システム¹⁷⁾を提案している。このシステムでは、評価関数および制約条件を設計技術者が設計プロセスを通じて逐次認識するとして前提に基づきながら、設計プロセスを通じて得られる仮の設計値に対して、GA を援用しかつ対話的に設計技術者の要求に答え、最終的に要求事項を最大限に満足させる設計解が得られるとしている。

(2) 本研究で提案するシステムの概念

前項から理解されるように、対話型求解システムに見られるような対話機能を活かす方をシステム仕様とした場合、システムオペレーションにある種の論理的な展開が期待できると言える。例えば、人

の思考手続きを考えた場合、外的情報を手がかりに思考を進展させ、結果的に独自求解に至るといったヒューリスティクス (heuristics) は、まさに論理的思考を前提にしなければ到底生起し得ない高度な知的情報処理プロセスであろう。また、この種の知的情報処理を円滑に進めるには、visual-aid された情報表現に工夫を凝らすことも重要となる。

本研究で構築を試みた補強設計支援システムでは、上述したような対話型求解システムとしての機能性を備えさせるために、独自の工夫を施している。すなわち、本研究では、既設合成桁の外ケーブル補強設計を実施するために、第1節に記した3つの補強設計パラメータに着目し、補強対象の応力状態からそれらの補強設計パラメータについて、ある程度有力な解候補を提示可能な補強設計支援システムを提案している。具体的には、本支援システムではトリアル&エラー (T&E) を基本にした求解作業を、ユーザが納得の行くまで実行できるシステム仕様を前提にしているので、補強設計プロセスでは T&E に立脚した求解履歴を視覚的に参照しながら、ヒューリスティックな検討が能率的に可能なシステム仕様の実現を目指している。なお、ヒューリスティクスはユーザが成功事例を多数保有している場合にのみ、最適解に到達する可能性が高い手法と言えることから、ユーザの特性に求解状況が左右されるのは論を待たない。

このことから本研究では、対話型求解システムの仕様を基本として、ユーザのヒューリスティクスを補強設計プロセスに活用したES (Engineering-system) 手法を提案している。このことにより、これまでに得た知識を含む技術的検討プロセスをアルゴリズム化およびコーディングすることで、パソコン上にCAE的なESの構築が可能になると考える。

(3) 補強設計プロセスと技術的検討プロセス

a) 補強設計の全体的順序

図-4は、外ケーブルプレストレス補強設計を実施する際の、本研究で提案している補強設計プロセスの概要である。

まず、図中のSTEP-1では、補強目標を満足するため、緊張材の配置パラメータ (配置形式・形状)、導入プレストレス力および緊張材断面量を、主として解析的検討プロセスを通じて決定する。この場合の補強目標は、設計思想が許容応力度設計法に基づいていることから、設計外力による各構造部材の発生応力 ($\sigma_{all} = \sigma_L + \sigma_p + \sigma_{\Delta P}$); σ_L : 設計活荷重による応力, σ_p : 導入プレストレス力 P_i による応力, $\sigma_{\Delta P}$: 増加

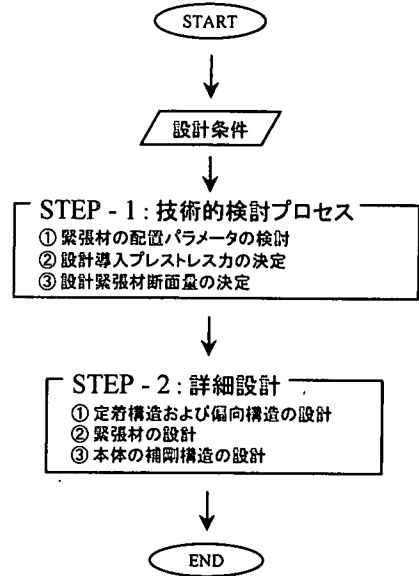


図-4 補強設計プロセス (案)

プレストレス力 ΔP_i による応力)が、許容応力度 (σ_a) 以下 ($\sigma_a > \sigma_{all}$) で、かつ、限りなくその値に近い応力状態 ($\sigma_a \approx \sigma_{all}$) を満足することであると考える。また、STEP-1の結果は、それよりも下流側にあるSTEP-2の設計条件に引き継がれる。

STEP-2では、STEP-1の結果を含む設計条件を満足するように、桁に設けられる緊張材の定着構造、偏向構造および緊張材本体の詳細設計が実施される。

なお、本研究ではこの内、STEP-1における技術的検討プロセスのシステム化を試みている。

b) 緊張材の配置パラメータ

緊張材の配置形式としては、「緊張材を偏向しない直線形式」、「偏向点を1箇所有するKING-Post形式」および「偏向点を多数有するマルチ偏向形式」のように、大別して3つのタイプがあると考えられる。一方、配置形状については、緊張材の定着位置および偏向点の設定位置により、種々の形状が原則的に考えられる。また、それぞれの配置形式において、配置形状は桁に対する補強効果に影響を与える。この補強効果に対する配置形状特性は、これまでの研究⁵⁾から、例えば、配置形式がQUEEN-Post形式の場合、緊張材の定着位置を合成断面中立軸近傍に設け、さらにコンクリート床版の引張応力に対する制約範囲内で最大の偏向部偏心を与える位置に偏向部を設けた配置形状が、基本的には望ましいと言える。また、増加プレストレス力については、桁断面外に緊張材を張り出す形態ほど補強に対して効果的であると言える、等々、傾向的に明らかとなってい

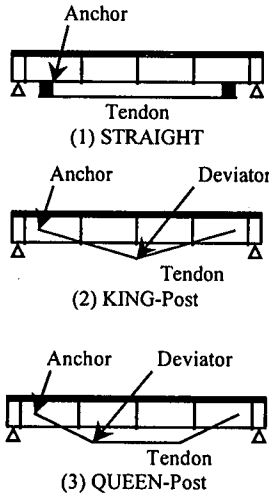


図-5 DSSEPT で扱う緊張材の配置形式

表-1 配置3形式の特徴比較 (相対比較)

	直線形式	KING-Post 形式	QUEEN-Post 形式
補強効果	Good	Better	Best
施工性	Best	Better	Good
経済性	Best	Better	Good

る。また、施工性との関係から配置形式・形状が限定される場合もある。

本研究では、以上のような緊張材の配置パラメータに関する特徴点を踏まえた上で、実施工性の高い配置形式として、図-5 に示す『直線形式』『KING-Post 形式』『QUEEN-Post 形式』の3形式を取り上げている。また、配置形状特性および施工条件を考慮可能なアルゴリズムの採用により、自由度の高い技術的検討を可能にしている。このアルゴリズムは、上述した補強効果と配置パラメータ特性の関係から図-6 に示す緊張材の配置パラメータ決定ルールを構築し、補強設計プロセスにおける配置形状の初期値としてユーザへ提示することに役立てている。さらに、その後はユーザの必要に応じた配置形状パラメータの任意策定が、応力計算等の履歴情報（インターフェース表示）を基にしたユーザのヒューリスティクスにより行える仕様としている。

ここで、配置3形式の特徴を、補強効果、施工性、経済性の点において相対比較したものを表-1に示す。<補強効果>については、桁間での支持部を多く有するほど、効果的に補強が行われると考えられる。一方<施工性>は、基本的に緊張材の定着箇所および偏向箇所が少ないほど、部品点数や施工箇所が少なくてすむため、施工性が高いと思われる。さらに<経済性>については、一般に<経済性>∝<施工性>の関係にあると考えられる。

c) 導入プレストレスカと緊張材断面量

補強目標を満足するために、前項で選択した配置

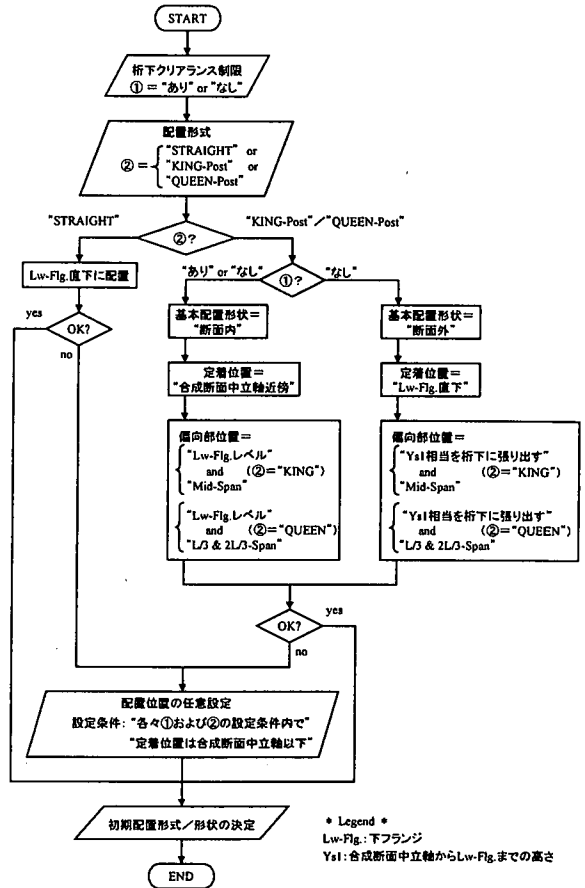


図-6 配置パラメータ決定ルール

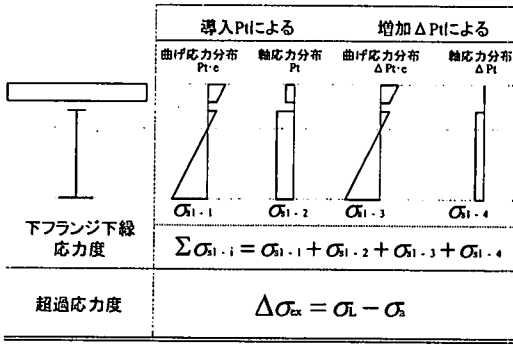
パラメータにおける導入プレストレスカ P_i を決定する。 P_i は緊張材を偏心配置することでコンクリート床版に引張応力を発生させる。ここでは、コンクリートに設定した許容応力度により、 P_i に上限値を規定している。またその際、緊張材断面量 A_s に適切な数値を設定しなければ、 P_i を十分に導入できない。

このトレードオフ問題については、以下の考え方により P_i および A_s を取得している。

直線形式で外ケーブルプレストレス補強を実施する場合、補強対象桁のクリティカル断面の下フランジに発生している超過応力 $\Delta\sigma_{ex} (= \sigma_L - \sigma_a > 0)$ と、 P_i および ΔP_i による付加応力は、次式のような釣合い関係にある (図-7参照)。

$$\Delta\sigma_{ex} = (P_i + \Delta P_i) \left(\frac{1}{A_{vs}} + \frac{e}{W_{s1}} \right) \quad (1)$$

ここで、 A_{vs} 、 W_{s1} はそれぞれ合成断面積および



$$\therefore \Delta \sigma_{ex} = |\Sigma \sigma_{i-1}|$$

図-7 $\Delta \sigma_{ex}$ と P_i および ΔP_i による垂直応力との関係

その断面係数（下縁）を表す。

また、この時の緊張材に生じている張力 T と P_i および ΔP_i の関係は、設計思想が許容応力度設計法に準拠しているので、次式のように定義する。

$$T = \sigma_{ia} \cdot A_i = P_i + \Delta P_i \quad (2)$$

ここで、 σ_{ia} は緊張材の許容応力度を表す。

式(1)および式(2)から $P_i + \Delta P_i$ を消去し、 A_i について式を整理すると次式が得られる。

$$A_i = \frac{\Delta \sigma_{ex}}{\sigma_{ia} \left(\frac{1}{A_{is}} + \frac{e}{W_{s1}} \right)} \quad (3)$$

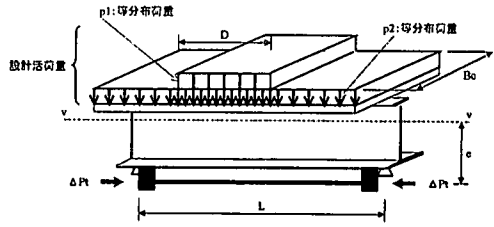
一方、 ΔP_i は、図-8のモデルから余力法で得られる弾性方程式を解き、次式により求められる（付録参照）。

$$\Delta P_i = \frac{-\frac{e}{24E_s I_{vs}} \left[L^2 \{ L(q_1 + q_2) - 6R_{x0} \} - q_1(L-D)(L^2 + DL + D^2) \right]}{\left(\frac{e^2}{E_s I_{vs}} + \frac{1}{E_s A_{is}} + \frac{1}{E_s A_i} \right) \cdot L} \quad (4)$$

$$R_{x0} = \frac{1}{2} (q_1 \cdot D + q_2 \cdot L)$$

式(4)から、 ΔP_i は A_i のみの関数で与えられることが分かる。これより、 ΔP_i は式(3)の A_i を式(4)に代入することで求められる。さらに、式(3)および式(4)で求められた A_i および ΔP_i を式(2)に代入し整理すると、 P_i が求められる。

このように、ここではクリティカル断面の下フランジの釣合い応力関係から、補強設計パラメータと



L : スパン, B_c : 主載荷重載荷幅 ($\leq 5.5m$)

p_1, p_2 : 等分布荷重 [kgf/m^2], $q_1 = p_1 \cdot B_c, q_2 = p_2 \cdot B_c$

D : p_1 の載荷長 (B 活荷重=10m, A 活荷重=6m)

E_s, E_i : 鋼材および緊張材の弾性係数

I_{vs}, A_{vs} : 合成断面 (鋼桁換算) の断面 2 次モーメントおよび断面積

A_i : 緊張材断面積 [m^2, cm^2], e : 偏心距離

図-8 活荷重による ΔP_i の算出モデル

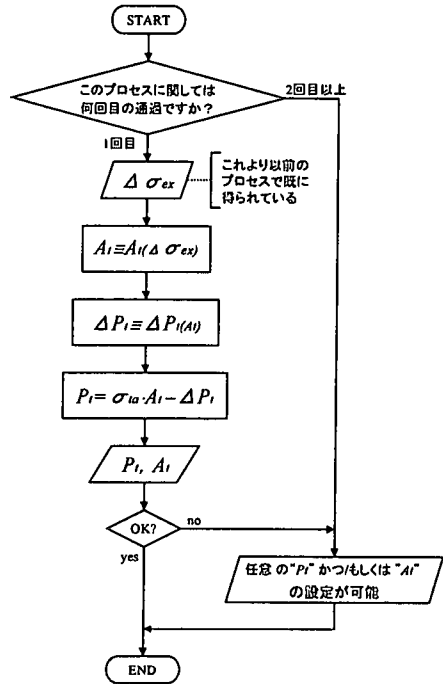


図-9 初期導入 PS 力・緊張材断面積決定ルール

しての P_i および A_i を算出している。ただし、この考え方は、他の部位の応力状態やたわみ制限等を考慮しておらず、求められた値が設計適合値として十分な値であるとは必ずしも言えない。この点については、DSSEPT内でユーザが P_i および A_i の状態を適宜修正/変更した繰返し応力計算を実施することで、システムユーザのヒューリスティクスにより、補強設計に適合した P_i および A_i を取得するアルゴリズムを構築している (図-9参照)。

なお、KING-PostおよびQUEEN-Post形式における P_i および A_i の選出プロセスについても、同様なアルゴリズムに従っている。

(4) 技術的検討プロセスのシステム化

a) 構築コンセプト

技術的検討プロセスのシステム化に際しては、『設計技術者の行う技術的検討プロセスが円滑に運び、さらに設計解が盲目的なプロセスを経た後に得られるのではなく、ユーザである設計技術者の判断がシステムオペレーション時に反映される』などを、構築コンセプトに掲げている。さらに、ユーザの理解度および操作性の向上等に役立たせるために、視覚的表現をシステム全般に取り入れている。

このコンセプトのもと、3.(3)で述べた技術的検討プロセスの考え方からなるシステムエンジンを中心に、補強設計支援システムDSSEPTを構築した。

なお、構築ツールはVisual BASICを用いた。

b) システムの概要

以下に、DSSEPTの基本構成を述べる。

- ① DSSEPTの主要な構成は、技術的検討プロセスにおける補強対象のモデリングとその修正/変更を行う Preprocessor-Component, 数値解析を行う Solver-Component, 補強設計パラメータと解析結果等の表示を行う Postprocessor-Component の3つの主要 Component からなる。
- ② 緊張材の配置形式・形状に関する配置パラメータの初期値は、補強効果に対するパラメータ解析結果の傾向に基づいて考案したアルゴリズム(図-6 参照)により自動的に決定されるが、その後はユーザである設計技術者の判断により、任意な設定が可能となっている。
- ③ 導入プレストレス力 P_i および緊張材断面量 A_i の選定プロセスは、補強目標および設計条件を満たす P_i 、 A_i の組み合わせの中から、最大の P_i および最小の A_i がそれぞれ得られるアルゴリズムを構築している(図-9 参照)。ただし、 P_i および A_i はユーザにより適宜システム内で変更可能であり、その都度応力計算を実行し、断面応力状態を確認した上で P_i および A_i を選定する仕様としている。
- ④ GUI (Graphical User Interface) 環境を採用したことで、ユーザフレンドリーなシステムが構成されている。例えば、補強設計パラメータを変更して繰り返し実行する応力計算は、計算結果を直ちに一覧形式で表示するため、システムオペレーションがスムーズに運ぶ。

4. 構築した補強設計支援システムの構成

図-10に、本研究で構築した補強設計支援システムの処理手順を示す。以下では本手順について解説する。

(1) モデル化

補強対象のモデル化のため、対象モデルの構造寸法データ(スパン長、断面サイズ)、構造材料データ(鋼材、コンクリート、緊張材)、設計活荷重データ(BまたはA活荷重)および桁下クリアランスに対する制限の有無などを入力する。入力作業は、数値入力あるいは項目毎に設けた入力値リストから選択形式により行う。必要項目の入力が全て終了すると、モデル断面図を出力画面に表示する。これにより入力データの確認を行う(図-10中①、②参照。なお、入力部のユーザインターフェースは、図-12中①を参照されたい。)

(2) 補強前の応力照査と弾塑性挙動解析

対象モデルに対し、設計活荷重載荷による応力およびたわみ照査を行う。これにより、クリティカル断面の下フランジの発生応力状態を対象にした超過応力率(発生応力/許容応力度)を自動計算する。超過応力率は、その後、ユーザにより入力される補強目標倍率の参考値として利用される。一方、変形増分法⁵⁾により、対象モデルの弾塑性挙動解析を行う。得られた解析データは、その後の補強効果の比較確認に役立つ(図-10中③、④参照)。

(3) 配置パラメータおよび P_i 、 A_i 検討プロセス

対象モデルの補強設計前プロセスが完了すると、補強設計パラメータ(配置パラメータ、 P_i 、 A_i)の検討プロセスに入る。

本プロセスでは、まず、ユーザによる緊張材の配置形式の選択を行う。その際、3種類の配置形式の中から、任意の形式選択が可能である。つぎに、選択した配置形式において、配置パラメータを選定する。選定には、アルゴリズム(3.(3)b)参照)により自動的に得られる配置パラメータ(初期値)の採用だけでなく、初期値を参考にした選定、あるいはユーザの判断を反映させた独自の選定が可能である(図-10中⑤参照)。

配置パラメータの選定後に行う P_i 、 A_i の検討プロセスでは、アルゴリズム(3.(3)c)参照)により初期値として P_i 、 A_i を算出した後、その値を参考にしながら“補強モデルの応力およびたわみ照査← P_i 、

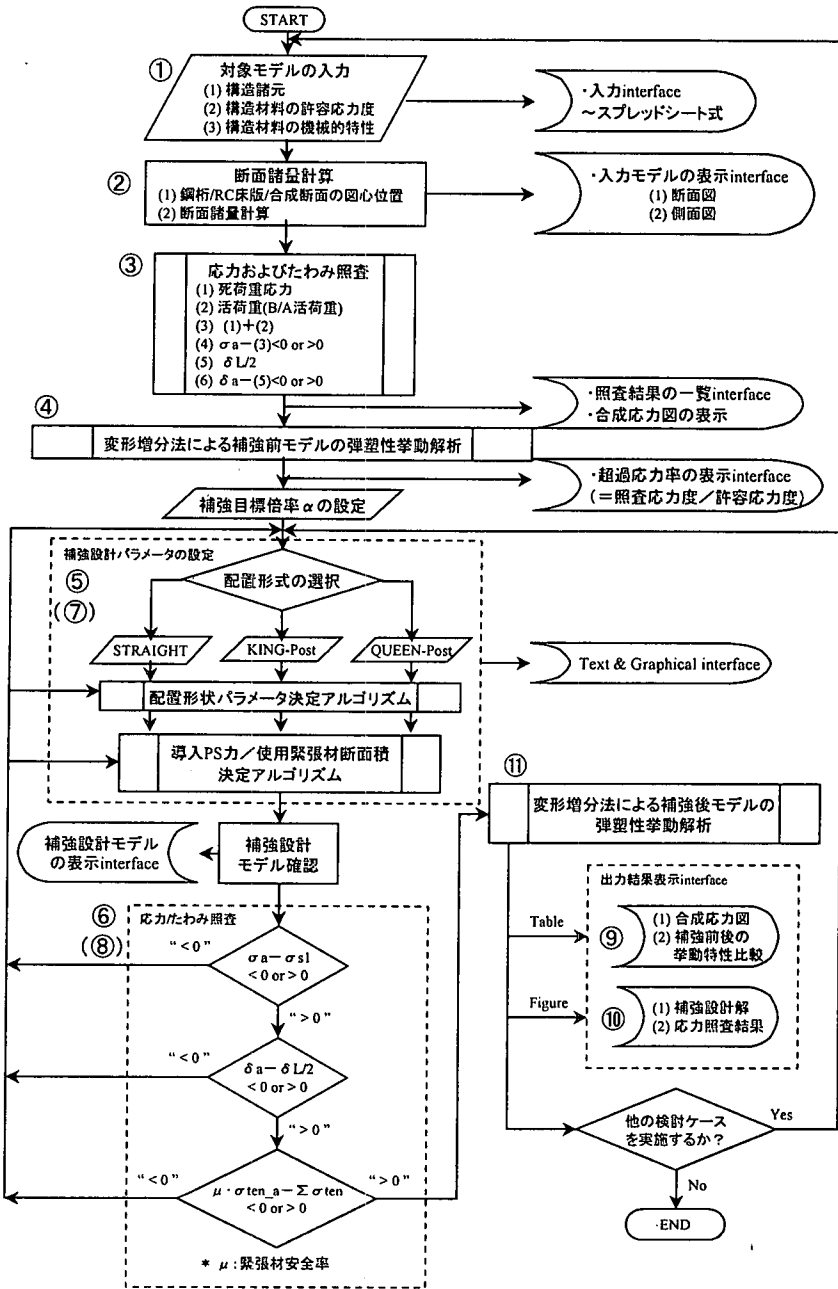


図-10 構築した補強設計支援システムの処理手順

A_i の再検討”といった反復プロセスを通じて、 P_i , A_i を選定する。その際、出力画面に表示した応力およびたわみ照査結果を、 P_i , A_i の再検討時に常時参照したヒューリスティクスによる検討作業を進める(図-10中⑤参照)。また、緊張材を含む内的不静定構造物の構造解析を余力法により行い、不静定力である増加プレストレスカ ΔP_i を算出している。

このような P_i , A_i の検討プロセスを一通り終了した後、再び、配置形式あるいは配置パラメータの選定プロセスまで戻った補強設計プロセスの再試行を可能としている(図-10中⑤、⑥参照)

このような処理手順により、設計技術者の判断に基づいた、フレキシブルな補強設計パラメータの検討を可能にしている(なお、配置パラメータおよび

P_i , A_i 決定プロセス部のユーザインターフェースについては、図-12中⑤-1, ⑤-2, ⑦-1, ⑦-2を参照されたい。)

(4) 補強モデルの弾塑性挙動解析

補強設計パラメータの確定したモデルに対し、上述した(2)項同様に、変形増分法による弾塑性挙動解析を行っている(図-10中⑩参照)。

(5) 結果表示

補強設計パラメータの確定したモデルの各種検討データ(補強設計パラメータ, 応力照査データなど)を一覧形式でまとめている(図-10中⑨, ⑩参照。なお、結果表示部のユーザインターフェースについては、図-12中⑨, ⑩を参照されたい。)

以上のように構成されたDSSEPTを活用することで、外ケーブルプレストレス補強設計における技術的検討プロセスが、能率のおよび省力的に実行可能になるものと思われる。

5. システムの有効性

本システムは、外ケーブルプレストレス補強設計時における技術的検討プロセスの合理化を目的としたものである。このことから、本システムの評価について、本節では、例題を通して得た技術的検討プロセスの展開から、その有効性を評価している。

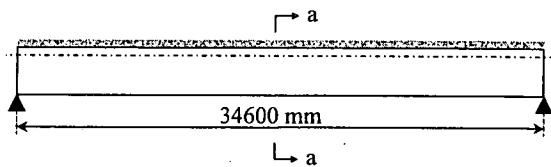
(1) 補強対象モデル

本例題では設計荷重が TL-14 で設計されたスパン 34.6m の単純活荷重合成鉄桁橋(二等橋, 3主桁)の中桁を補強設計対象として、システムオペレーションを行った。なお、対象モデルの諸元を、図-11および表-2に示す。

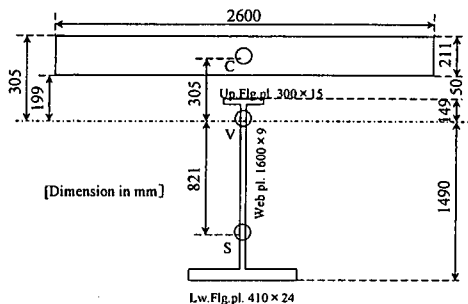
(2) 補強対象モデル

図-12に、ここで試行した技術的検討プロセスの推移をユーザインターフェース(UI)を用いて示す。まず、同図中①の入力UIでは、本対象モデルに関するデータを入力する。その際、B活荷重に対する補強設計をここでは行うことから、照査荷重はB活荷重のチェックboxをチェックする。②で桁の中立軸高さ等の断面諸量を確認した後、③, ④のそれぞれで、補強前モデルの応力照査および曲げ挙動特性を把握する。

次に、補強設計パラメータの策定に入る。ここでは初めに、緊張材が直線形式の場合を試行している。本システムにおける試行の推移は⑤-1~⑧-1のようになる。直線形式では原則として、補強設計パラメータが緊張材の定着偏心距離 e , 導入プレストレ



(1) 側面図



(2) a-a 断面

図-11 補強対象モデルの一般図

表-2 補強対象モデルの概略諸元

構造形式	単純活荷重合成鉄桁
設計荷重	TL-14 (二等橋)
スパン長	34.6 m
主鋼材	SM520
コンクリート強度	360 kgf/cm ²

ス力 P_i および緊張材断面容量 A_i となる。パラメータの策定結果を表-3に示すが、この場合は、緊張材の経済断面を念頭に置いたヒューリスティクスによる設計適合解を見つけることができなかった。つまり、その理由としては下フランジの超過応力に対抗させるための導入プレストレス力が上フランジに対しては、超過応力を引き起こす働きをすることが、主たる要因によると考えられる。

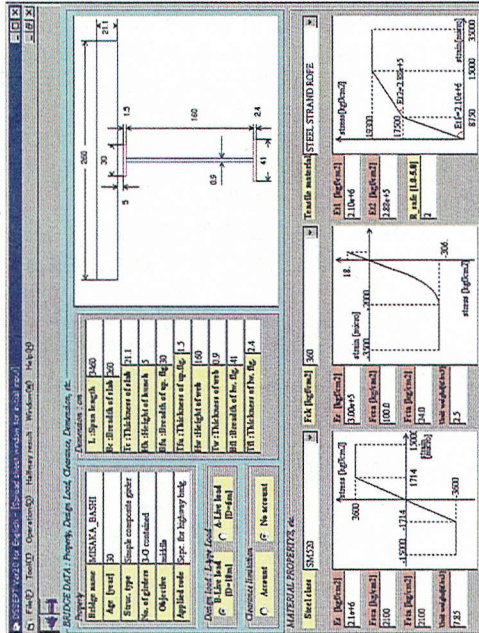
このことから直線形式での補強設計パラメータの策定を断念し、次に QUEEN-Post 形式による同様な策定に移る。

QUEEN-Post 形式では、基本的に直線形式と同様な試行の推移となる(図-12中⑤-2~⑧-2参照)。この場合のヒューリスティクスによる試行結果を表-4に示す。

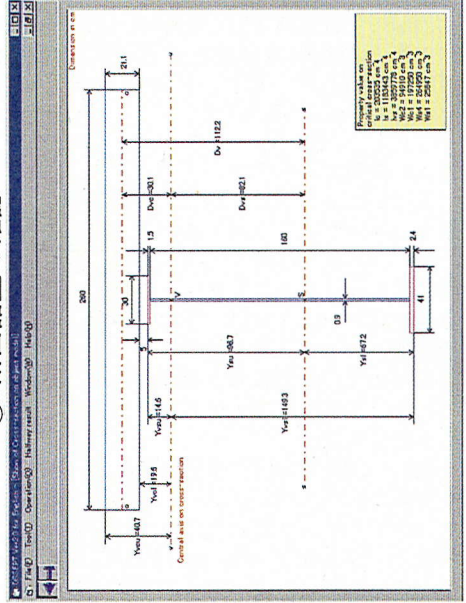
まず、同表より配置形状パラメータにデフォルト値(定着部を中立軸上とし、偏向部を下フランジレベルかつ L/3 ピッチ)を採用した場合、試行-1の P_i および A_i (上述した算出アルゴリズムにより求まる値)との組み合わせでは、上フランジが応力超過となるため、この際の補強設計パラメータは論外値と判断される。

START

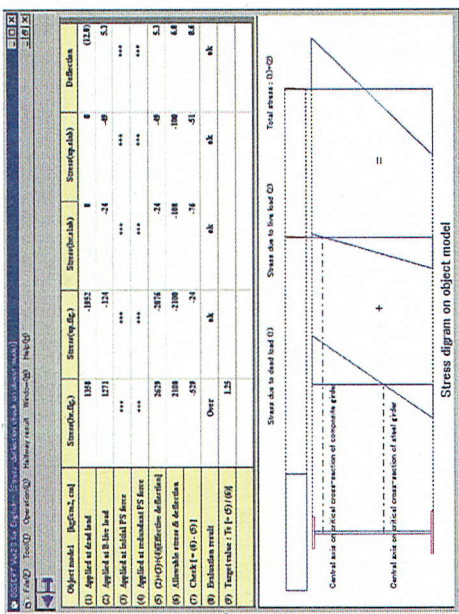
①: データ入力



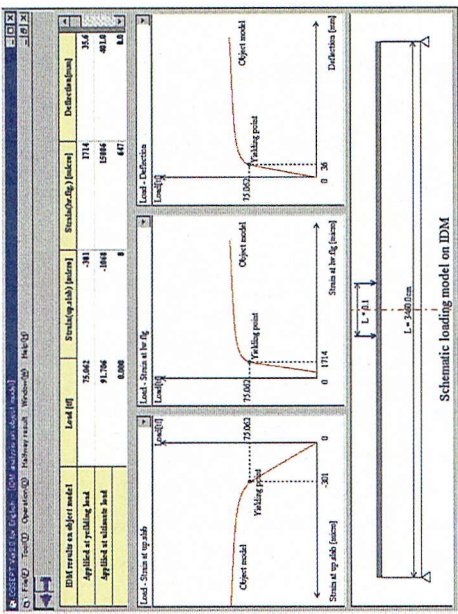
②: 断面諸量の確認



③: 応力照査(補強前)



④: 曲げ挙動解析(補強前)



For cont'd-1

図-12(その1) 技術的検討プロセスの推移

cont'd-1



⑤-1: 配置形式・形状決定

⑦-1: 補強設計パラメータの策定
<直線形式>

⑧-1: 応力照査(補強後2回目以降)

⑥-1: 応力照査(補強後第1回)

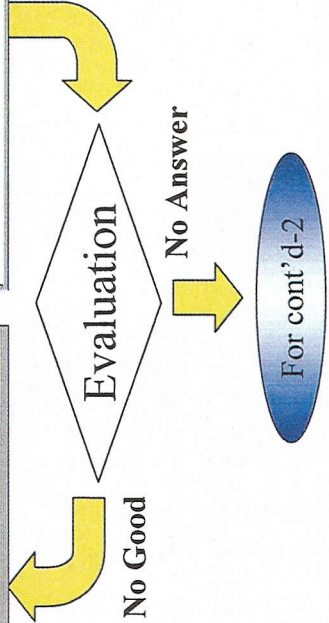
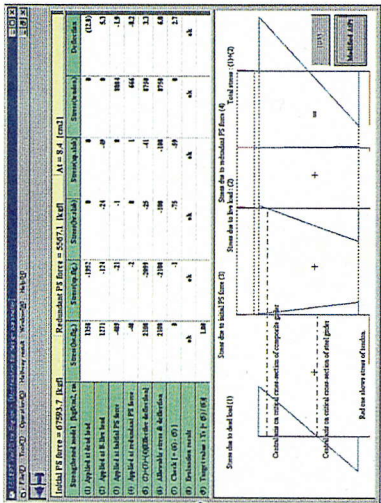
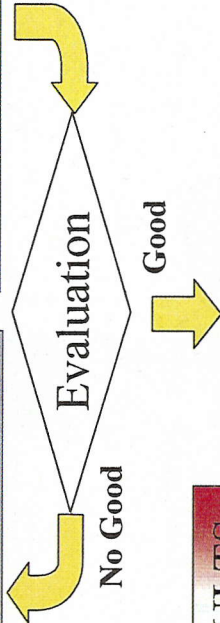
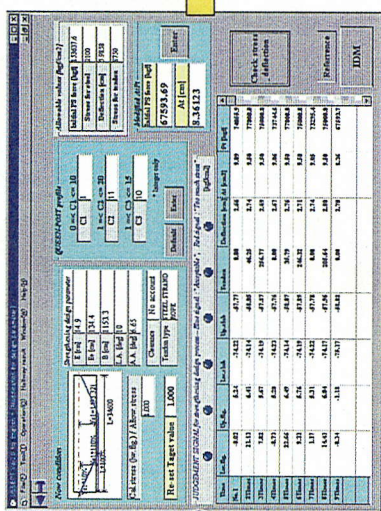


図-12(その2) 技術的検討プロセスの推移

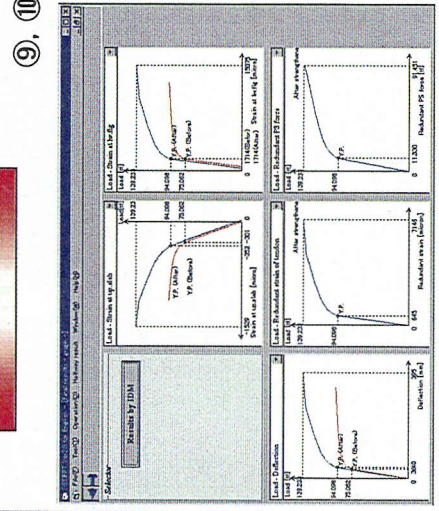
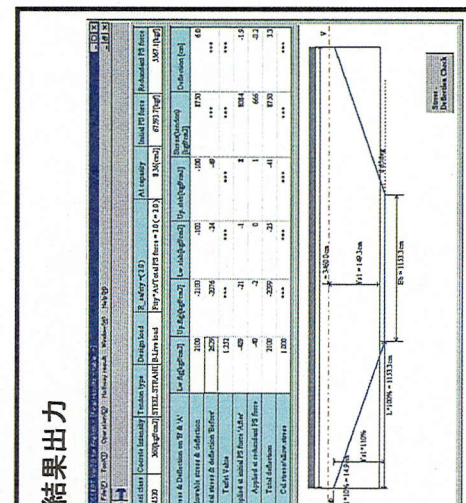
⑦-2: 補強設計パラメータの策定
 <QUEEN-Post形式>



⑧-2: 応力照査(補強後2回目以降)

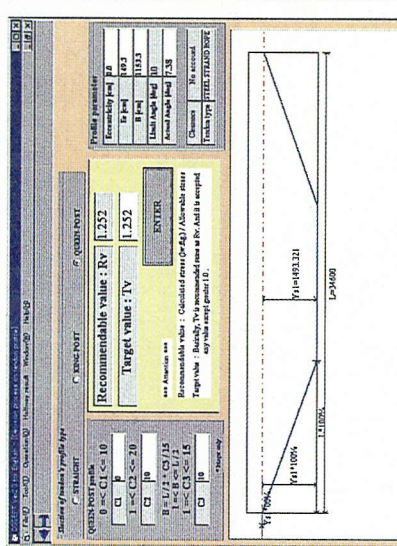


⑨、⑩: 結果出力



cont'd-2

⑤-2: 配置形式・形状再決定



⑥-2: 応力照査(補強後第1回目)

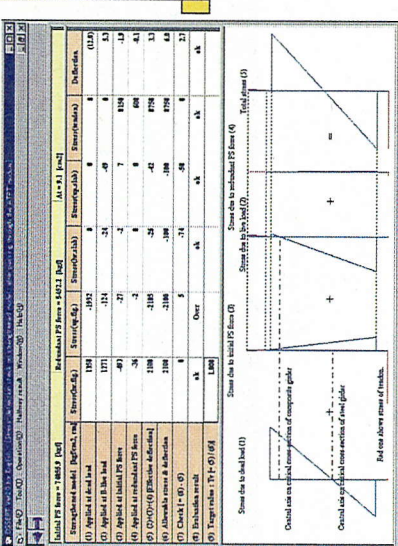


図-12(その3) 技術的検討プロセスの推移

表-3 直線形式における検討プロセス結果

試行	補強設計パラメータ			解の 評価	理由
	配置形状パラメータ	Pt [tf]	At [cm ²]		
1		64.2	8.05	no-good	応力超過 (Lw.flg.)
2		70.0	↓	no-good	応力超過 (Up.flg. 緊張材)
3		↓	10.0	no-good	応力超過 (Up.flg.)
4		67.0	↓	no-good	応力超過 (Up.flg.)
5		64.0	15.0	no-good	応力超過 (Up.flg.)

表-4 QUEEN-Post 形式における検討プロセス結果

試行	補強設計パラメータ			解の 評価	理由
	配置形状パラメータ	Pt [tf]	At [cm ²]		
1		74.0	9.09	no-good	応力超過 (Up.flg.)
2		73.7	9.06	no-good	応力超過 (Up.flg.)
3		73.3	9.05	no-good	応力超過 (Up.flg.)
4		67.9	8.37	GOOD	—

次に、この配置パラメータ（デフォルト値）では、上フランジの応力超過を防ぐ策として、導入プレストレス力 P_t の値を下げることはできない。すなわち、 P_t を下げるということは、同時に下フランジに応力超過を認めることに等しくなる。そこで、定着部を中立軸より下に設定した試行-2 および試行-3 に移る。

試行-2 および試行-3 における配置形状パラメータの相関は、デフォルト配置に対して定着端偏心のみが変化しており、試行-2 では $e = y_{s1}/10$ を、試行-3 では $e = y_{s1}/2$ をそれぞれとする配置パラメータとなっている。

しかしながら、この両試行を試行-1 と比較すると、定着偏心距離 e の設定を変更しても、 P_t および A_t の値がほぼ同じ水準を保っていることから、試行-2 および試行-3 は、試行-1 が認められない理由

と同じ理由により、設計適合値として認められないと判断される。すなわちこの場合、補強設計パラメータ e は、ロバスト性の高い構造パラメータと考えられる。

次に、デフォルトの配置パラメータ（試行-1 の場合）に対して、偏向部の設定位置を移動させることで解を策定する。具体的には、偏向部を下フランジレベルよりも下に設ける場合（ピッチは不変）を検討する。その結果、表-4 に示すように、偏向部を下フランジレベルより $Ee = y_{s1}/10$ 下げる場合、 P_t および A_t のそれぞれが、67.9tf および 8.37cm² となり、設計適合解として採用できることが分かった。

以上行った一連の試行から結果的に分かったように、ここで取り扱った補強対象モデルは、鉸桁の上フランジが比較的小さいために、外ケーブルプレストレス補強を行う際には、設計活荷重満載下で、下フランジよりも上フランジがクリティカルになりやすいと推察される。

このように、本システムは複雑に関係する補強設計パラメータの相関を見極め、設計空間の範囲を定性的に理解するために行うヒューリスティックな試行を支援するのに、かなり効果的な機能性を有しているものと思われる。

6. まとめ

本研究では、既設合成鋼桁橋の外ケーブル補強設計作業を支援する目的で、CAE 的な合理化手法による補強設計支援システム DSSEPT を構築し、補強設計作業における技術的検討プロセスの合理化を試みた。

以下では、本研究で得られた知見を整理し、本論文のまとめとする。

(1)本研究では、補強設計問題における問題解決および意志決定プロセスに、コンピュータ技術の援用を試みるため、これまでに得た知識を含む技術的検討プロセスをアルゴリズム化した。さらにこのアルゴリズムをコーディングすることにより、外ケーブル補強設計プロセスの合理化を目的としたCAE的なES (Engineering-system) の構築をパソコン上に試み、その有効性を検証した。

(2)システムの構築コンセプトに、『技術的検討プロセスの円滑化。盲目的プロセスの回避。システムへのユーザ判断の反映。視覚的表現によるユーザフレンドリーな環境』などを挙げ、このコンセプトを基本にした独自のアルゴリズムから成るシステム構築を行った結果、本システムは、ユーザが補強設計パラメータの選定を、ユーザ自身のヒューリスティクスにより実行可能なシステムとなった。

(3)本システムの有効性を、例題を用いた試行から評価した。本システムでは繰り返しシステムで行った求解履歴を、いつでも参照できるような工夫を施している。このことにより、ユーザ自身のヒューリスティックな試行が一段と行いやすく、システムオペレーションを通じて、盲目的ではなくしっかりと補強設計パラメータの性質を踏まえながらの、解探索が可能となっている。

(4)本システムを利用して、ヒューリスティックな技術的検討の試行から、補強設計パラメータの性質および設計(解)空間の範囲が、ある程度理解可能となる。しかしながら、より高精度な補強設計を実施するためには、本研究で提案する技術的検

討プロセスの段階で、そのパラメータの性質および解空間を可能な限り定量的に把握することが望まれる。このことは今後の研究課題としたい。

付録 余力法による増加プレストレスカ ΔP_i の算出

外ケーブル緊張材を取り付けた桁は、内的不静定構造物となる。したがって、ここでは不静定力 ΔP_i (増加プレストレスカ)を余力と考え、単位荷重(単位余力: $\Delta P_i=1$)を静定基本系に作用させる構造モデルより得られる弾性方程式 $\delta_0 + \delta_1 \cdot \Delta P_i = 0$ (変位が0の釣合条件)から、 ΔP_i を算出している。ここで、 δ_0 および δ_1 は静定基本系に設計活荷重および単位荷重をそれぞれ載荷した時の変位であり、以下の一般的な一般式で表せる。

$$\delta_0 = \int \frac{M_0 \cdot M_1}{E_s I_w} dx \quad (\text{付-1})$$

$$\delta_1 = \int \frac{M_1^2}{E_s I_w} dx + \int \frac{N_1^2}{E_s A_w} dx + \int \frac{N_1^2}{E_t A} dx \quad (\text{付-2})$$

ここで、 M_0 : 設計活荷重モーメント、 M_1 : 単位荷重モーメント、 N_1 : 単位荷重軸力、 E_s, E_t : 鋼材および緊張材の弾性係数、 I_w, A_w : 合成断面の断面2次モーメントおよび断面積、 A : 緊張材断面積である。なお、ここではせん断力の影響を無視している。

よって、増加プレストレスカ ΔP_i は、式(付-1)および式(付-2)を次式に代入することで求められる。

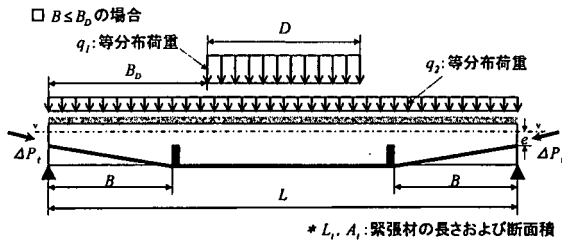
$$\therefore \Delta P_i = -\frac{\delta_0}{\delta_1} \quad (\text{付-3})$$

本論文では、緊張材の配置形式を、直線形式、KING-Post 形式、QUEEN-Post 形式の3タイプを取り扱っている。このことから、 ΔP_i は各配置形式のそれぞれに対して求める必要がある。

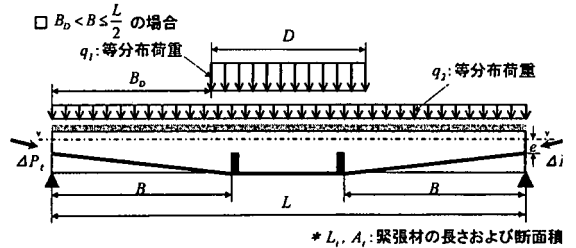
各配置形式ごとの δ_0 、 δ_1 および ΔP_i を求め整理すると以下ようになる。なお、以下に示す式中の代数記号は、本文中の図-8、式(4)および付図-1を参照されたい。

(1) 直線形式の場合

$$\delta_0 = \frac{e}{24E_s I_w} [L^2 \{L(q_1 + q_2) - 6R_{a0}\} - q_1(L-D)(L^2 + DL + D^2)]$$



(1) $B \leq B_D$ の場合



(2) $B_D < B \leq \frac{L}{2}$ の場合

B : 桁端から最近偏向部までの距離, $B_D = \frac{L-D}{2}$

付図-1 等分布荷重 q_1 と偏向部位置の関係

$$\delta_1 = \left(\frac{e^2}{E_s I_{vs}} + \frac{1}{E_s A_{vs}} + \frac{1}{E_s A_i} \right) \cdot L$$

$$\therefore \Delta P_i = -\frac{\delta_0}{\delta_1} = -\frac{\frac{e}{24E_s I_{vs}} [L^2 \{L(q_1 + q_2) - 6R_{10}\} - q_1(L-D)(L^2 + DL + D^2)]}{\left(\frac{e^2}{E_s I_{vs}} + \frac{1}{E_s A_{vs}} + \frac{1}{E_s A_i} \right) \cdot L}$$

(\therefore 式 (4)) (付-4)

$$\therefore \Delta P_i = -\frac{\delta_0}{\delta_1}$$

$$= -\frac{2}{E_s I_{vs}} \left\{ \int_0^B M_0 \cdot M_1 dx + \int_{B_D}^B M_0 \cdot M_1 dx + \int_{B_D}^{\frac{L}{2}} M_0 \cdot M_1 dx \right\}$$

$$= \frac{1}{3E_s I_{vs}} \left\{ (e \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta)^2 L - (4B \cdot \sin^2 \theta + 6e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) B^2 \right\} + \frac{\cos^2 \theta}{E_s A_{vs}} \cdot L + \frac{L_1}{E_s A_i}$$

(付-5)

(2) QUEEN-Post 形式の場合

QUEEN-Post 形式の場合, ΔP_i を求めるには設計活荷重における等分布荷重 q_1 の載荷長 D と緊張材偏向部との位置関係により場合分けをする必要がある (付図-1 参照).

a) $B \leq B_D$ のとき

$$\delta_0 = \frac{2}{E_s I_{vs}} \left\{ \int_0^B M_0 \cdot M_1 dx + \int_B^{B_D} M_0 \cdot M_1 dx + \int_{B_D}^{\frac{L}{2}} M_0 \cdot M_1 dx \right\}$$

$$\int_0^B M_0 \cdot M_1 dx = \left(\frac{q_2}{8} \cdot \sin \theta \right) \cdot B^4 - \frac{1}{6} (2R_{10} \cdot \sin \theta - e \cdot q_2 \cdot \cos \theta) \cdot B^3 - \left(\frac{e}{2} \cdot R_{10} \cdot \cos \theta \right) \cdot B^2$$

$$\int_B^{B_D} M_0 \cdot M_1 dx = \frac{e \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta}{12} (B^2 - B_D^2) \{ (2B-1)(2B_D-1) + 6R_{10} - 1 \}$$

$$\int_{B_D}^{\frac{L}{2}} M_0 \cdot M_1 dx = \frac{e \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta}{48} \{ (q_1 - q_2)(L^2 - 8B_D^2) - 6(R_{10} + q_1 \cdot B_D)(L^2 - 4B_D^2) + 12q_1 \cdot D \cdot B_D^2 \}$$

$$\delta_1 = \frac{1}{3E_s I_{vs}} \left\{ 3(e \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta)^2 L - (4B \cdot \sin^2 \theta + 6e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) B^2 \right\} + \frac{\cos^2 \theta}{E_s A_{vs}} \cdot L + \frac{L_1}{E_s A_i}$$

b) $B_D < B \leq \frac{L}{2}$ のとき

$$\delta_0 = \frac{2}{E_s I_{vs}} \left\{ \int_0^{B_D} M_0 \cdot M_1 dx + \int_{B_D}^B M_0 \cdot M_1 dx + \int_B^{\frac{L}{2}} M_0 \cdot M_1 dx \right\}$$

$$\int_0^{B_D} M_0 \cdot M_1 dx = \frac{B_D^2}{24} \{ 4(e \cdot q_2 \cdot B_D - 3e \cdot R_{10}) \cos \theta + B_D (3q_2 \cdot B_D - 8R_{10}) \sin \theta \}$$

$$\int_{B_D}^B M_0 \cdot M_1 dx = (B^2 - B_D^2) \left[\frac{(q_1 + q_2) \cdot \sin \theta}{8} (B^2 + B_D^2) - \frac{1}{2} \{ e(R_{10} + q_1 \cdot B_D) \cos \theta - \frac{q_1 \cdot B_D^2 \cdot \sin \theta}{2} \} \right]$$

$$+ (B - B_D) \left[\frac{e \cdot (q_1 + q_2) \cdot \sin \theta \cos \theta}{6} (R_{10} + q_1 \cdot B_D) (B^2 + B \cdot B_D + B_D^2) - \frac{e \cdot q_1 \cdot B_D^2 \cdot \cos \theta}{2} \right]$$

$$\int_B^{\frac{L}{2}} M_0 \cdot M_1 dx = \frac{\left(\frac{L}{2} - B \right) (e \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta)}{24} \left[4(q_1 + q_2) \left\{ \left(\frac{L}{2} + B \right)^2 - \frac{L \cdot B}{2} \right\} - 12 \{ R_{10} + q_1 \cdot B_D \} \left(\frac{L}{2} + B \right) + 12q_1 \cdot B_D^2 \right]$$

$$\delta_1 = \frac{1}{3E_s I_{vs}} \left\{ (e \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta)^2 L - (4B \cdot \sin^2 \theta + 6e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) B^2 \right\} + \frac{\cos^2 \theta}{E_s A_{vs}} \cdot L + \frac{L_1}{E_s A_i}$$

(\therefore a) の δ_1 と同じ)

$$\therefore \Delta P_i = -\frac{\delta_0}{\delta_1} \frac{-\frac{2}{E_s I_{vs}} \left\{ \int_b^{a_b} M_0 \cdot M_i dx + \int_{a_b}^a M_0 \cdot M_i dx + \int_b^L M_0 \cdot M_i dx \right\}}{\frac{1}{3E_s I_{vs}} \left\{ (e \cdot \cos \theta + B \cdot \sin \theta)^2 L - (4B \cdot \sin^2 \theta + 6e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta) B^2 \right\} + \frac{\cos^2 \theta}{E_s A_s} L + \frac{L}{E_s A_s}}$$

(付-6)

このように、QUEEN-Post 形式の場合は、設計活荷重における等分布荷重 P_1 の載荷長 D と緊張材偏角部との位置関係により ΔP_i の算定式が異なる。

(3) KING-Post 形式の場合

KING-Post 形式の場合、 ΔP_i は式 (付-6) 中の B を $B = \frac{L}{2}$ とおくことで求められる (付図-1(2)参照)。

参考文献

- 1) 文献調査委員会：プレストレスト (PS) 鋼構造，土木学会誌 6月号，pp.62-69，1965.6.
- 2) 今井 猛，岩本幸二，永井重光，伊藤 敏一，土倉隆：筏橋 (プレストレスト合成桁) の鋼桁仮組時におけるプレストレス導入および載荷実験，土木学会誌，43-10，pp.9-15，1958.10.
- 3) 例えば，八塚 博，山田金喜，渡辺泰行，柏木亮二，名取暢：既設鋼桁橋のプレストレス導入による補強，橋梁と基礎，pp.15-24，1996.3.
- 4) 西川和廣，神田昌幸，福地友博：合成げたの床版打換え工法に関する試験調査，第21回日本道路会議論文集，一般論文集(B)，1995.
- 5) 宮本文穂，平田勝己，鄭 勝仁：プレストレスト合成桁の弾塑性挙動解析と性能評価に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31，pp.65-76，1995.4.
- 6) 宮本文穂，玉田尋三，久保田安裕，山本晃久，梅田聡，駿河敏一：既設合成桁橋の機能向上と構造の合理化，橋梁と基礎，pp.25-32，1997.12.

- 7) 例えば，杉本博之，梶川康男，Vanderplaats,G.N.：振動感覚を考慮した歩道橋の最小重量設計，土木学会論文集，No.386/I-8，pp.105-114，1987.
- 8) 例えば，山田善一，古川浩平，江草 拓，井上幸一：斜張橋ケーブルの最適プレストレス決定に関する研究，土木学会論文集，No.356/I-3，pp.415-423，1985.
- 9) 構造工学委員会 構造システム最適化研究小委員会：構造システム最適化の現状と将来，土木学会論文集，No.450/I-20，pp.1-12，1992.7.
- 10) 構造工学委員会 AL(人工生命)技術の構造システム最適化への応用に関する研究小委員会：新しい構造システム最適化手法—人工生命技術の応用—，土木学会論文集，No.543/I-36，pp.1-18，1996.7.
- 11) 山田善一編：構造工学シリーズ1・構造システムの最適化—理論と応用—，土木学会，1988.
- 12) 例えば，白石成人，古田 均，中島裕之，山本信哉：橋梁計画設計のためのエキスパートシステム構築に関する基礎的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.34A，pp.667-675，1988.3.
- 13) 例えば，三上市蔵，田中成典，黒田 護：鋼道路橋の詳細設計業務を支援するためのファジールールベースエキスパートシステムの開発，構造工学論文集，土木学会，Vol.43A，pp.621-632，1997.3.
- 14) 例えば，小西日出幸，井上 勲，長谷川敏之，川上剛司：鋼橋の送り出し架設工法の安全管理システム，第53回年次学術講演会講演概要集，CS，土木学会，pp.172-173，1998.10.
- 15) 例えば，串田守可：橋梁診断における知識獲得手法とエキスパートシステムの開発に関する研究，山口大学博士論文，1998.3.
- 16) 岩松幸雄，早川裕史，原田隆郎：橋梁の比較設計支援エキスパートシステムに関する研究，土木学会論文集，No.453/VI-17，pp.51-57，1992.9.
- 17) 香月 智：GAによるトラス構造の対話型最適設計法に関する一考察，第5回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集，pp.33-38，1997.12.

(1998. 7. 13. 受付)

A STUDY ON DEVELOPING DESIGN-STRENGTHENING SUPPORT SYSTEM FOR COMPOSITE PLATE GIRDER BRIDGES USING THE EXTERNAL PRESTRESSING TECHNIQUE

Katsuji TEI, Hideaki NAKAMURA and Ayaho MIYAMOTO

The Prestressing technique with external tendons (EPS technique) have been regarded as widely applicable technique to bridge structure systems for both of the new construction and strengthening. It is recently noticed in Japan that the EPS technique is one of efficient methods for strengthening of existing bridges, then several attempts have been done on the strengthening application to not only concrete bridges, but also composite girder bridges. So the necessity of developing a computer aided design system based on CAE concept has been lately pointed out for the design-strengthening works using the EPS technique to existing composite girder bridges. In this paper, a Design-Strengthening Support System for Composite Plate Girder Bridge using the External Prestressing Technique, DSSEPT, newly developed in order to attempt to make rational design-strengthening work processes is described.