

# 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

宮本文穂<sup>1</sup>・平田勝己<sup>2</sup>・鄭 勝仁<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 近畿日本鉄道(株)

<sup>3</sup>学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科博士前期課程 建設学専攻

本研究は、近年、世界的に関心が高まっている既存橋梁の補強問題に対する解決策の一つとしてプレストレッシングの応用が有効となると考え、種々の検討を行ったものである。まず、プレストレスト合成桁の弾塑性解析法として変形増分法を取り上げ、その有効性を実験結果を用いて検証する。次に、ケーブル配置、ケーブル材料などをパラメータとしたプレストレスト合成桁の性能評価を試みることによって、耐荷力向上およびたわみ制御を対象とする設計の考え方を提案する。さらに、補強設計の具体例として、実際の橋梁に対する本手法の適用結果を示し、性能評価を試みるものである。

**Key Words** : prestressed composite plate girder, external tendon, bridge strengthening, mechanical behavior, design concept

## 1. はじめに

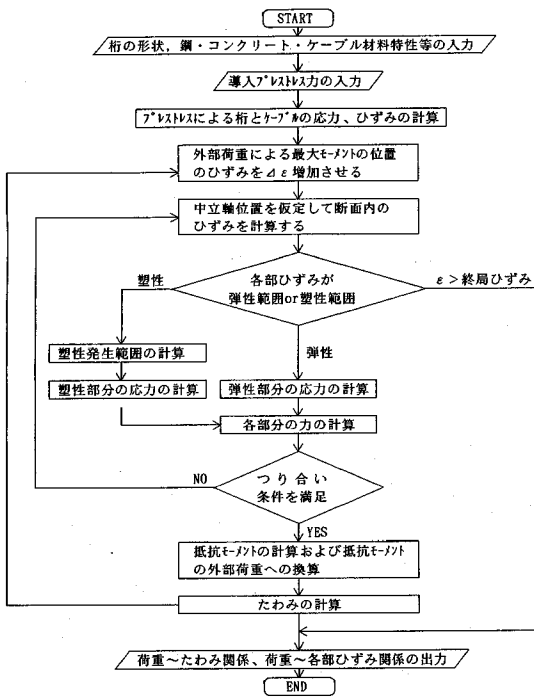
鋼の引張り、圧縮両強度はほぼ等しいため、コンクリートのように材料特性的観点からプレストレスを導入することの明確な利点を期待することは困難である。しかし、プレストレス導入を、活荷重や死荷重などの外力による応力の軽減に利用するならば、プレストレスト鋼(合成)構造には様々な有用性が考えられる。その有用性は、主として既存構造物の補強および新設構造物の設計、架設における材料選択の自由度拡大とその経済性の向上の2点に集約されるものと考えられる。このように、プレストレスト鋼(合成)構造は、他の鋼構造と比較して多くの利点を有するため<sup>1),2)</sup>、種々の利用が考えられる。

近年、世界的に関心が高まっているのが既存橋梁の維持・管理、補修・補強であり、現実に超過荷重の通過や経年劣化により、耐荷力低下を生じている既存橋梁の存在が社会問題になってきている。これらの橋梁は、通行車両の大型化、交通量の増大によって、架設当時の設計荷重を実際の荷重が上回り、疲労損傷の顕在化により早急な補強が必要となっている。また、道路橋設計活荷重の改訂により、耐荷力不足となる橋梁への対応策が今後問題となることが予測される。このような問題に対する解決策の一つとしてプレストレッシングの応用が有効となると考えられる。一方、材料面では、高強度鋼材の開発、高耐食性、高強度、高弾性などの優れた材料特性を有する連続繊維補強プラスチック(FRP)筋などの開

発が盛んに行われている。これらの材料をうまく取り入れていけば、プレストレスト鋼(合成)構造は既存橋梁の補強のみならず、新形式の橋梁開発など多くの可能性を秘めていると考えられる。

本研究では、プレストレスト合成構造を対象として、主に既存橋梁の補強に着目した種々の検討を試みる。

合成構造に対するプレストレッシングには、鋼部材の曲げ復元力を利用する方法とケーブルを用いる方法がある。前者では、“Prelex”や“曲げモーメントの再分配”のような方法が適用され、後者では主として外ケーブルによる導入力を介して部材内の応力状態がコントロールされる<sup>1)</sup>。これまで外ケーブルを利用する方法は、橋梁を例にとると、西ドイツの Büchenauer 橋を始め、欧米を中心に適用されてきているが<sup>3)-5)</sup>、これらの適用例は、ほとんどが新設橋梁に対するプレストレスの利用であり、特に国内では1950年代の終わり頃にプレストレスト合成桁橋数橋の架設例がある以外<sup>6)</sup>、プレストレスト合成構造に関する研究はほとんど見られない。この理由として、構造の合理化等に比べてプレストレスを導入することによる定着部等の細部構造設計の複雑化、施工手順の多様化、プレストレスト鋼材の腐食保護の問題、さらには、コンクリートにプレストレスを導入することにより得られるような明らかな利点が存在しないなどが挙げられる。しかし、近年の設計、施工技術の進歩や新材料の開発、あるいは上述のような補修、補強を必要とする橋梁の増加等を考えると、プレストレスト合成構造をあ



図—1 変形増分法の解析フロー

らためて取り上げる利点が十分に存在すると考えられる。

本論文では、プレストレスト合成構造の基本的な力学挙動を明らかにするために、補強工法を念頭においた種々のケーブル配置形状およびケーブル材料等をパラメータとした単純支持構造のプレストレスト合成桁を対象とした静的挙動解析法を検討するとともに、大型供試体による解析結果の確認実験を行う。また、既存橋梁の補強を目的としたパラメータを変化させてプレストレスト合成桁（以下、PS合成桁）の基本性能である降伏耐力、終局耐力および曲げ剛性についての性能評価を試みる。これらの解析結果をもとにプレストレスト導入による耐荷力向上を目的とした補強工法の手順を提案する。さらに、補強設計の具体例として実際の橋梁に対する本手法の適用結果を示し、性能評価を試みるものである。

なお、以下で述べる弾塑性挙動解析およびその検証実験に関しては、著者らの文献<sup>8)</sup>において詳細を述べており、ここではこれらの概要を示すものとする。

## 2. プレストレスト合成桁の弾塑性挙動解析<sup>3)</sup>

### (1) 解析フローおよび基本仮定

本節では、各種のケーブル配置形状、ケーブル材料を有するPS合成桁に適用可能な弾塑性挙動解析法の一つである変形増分法の定式化を行う。変形増分法のフロー

を図—1に示す<sup>3)</sup>。なお、変形増分法に用いる仮定は次の通りである：①平面保持が成り立つ、②微小変形理論を適用し得る、③鋼桁には残留応力は存在しない、④鋼桁には破壊まで座屈は発生しない、⑤せん断力による変形は考慮しない、⑥ケーブルのひずみはケーブルの伸びとケーブル位置での鋼桁の伸びが等しいとして求める、⑦コンクリートの非線形性は2次放物線で仮定する<sup>7)</sup>。なお、以下の説明では便宜上、まず鋼桁下フランジで降伏が生じ、コンクリート床版上縁が圧縮終局ひずみに達することによって破壊に至るとするが、実際には各ひずみ増分ステップごとに桁断面内各位置でのひずみをチェックし、降伏あるいは終局の判定を行うものとする。

### (2) 変形増分法の定式化

#### a) 合成桁断面各位置のひずみ

図—2にPS合成桁の桁中央断面におけるひずみおよび応力の状態を示す。変形増分法では、荷重の代わりに下フランジ下縁のひずみ $\epsilon_{s1}$ を一定の増分で増加させるので、各位置のひずみを $\epsilon_{s1}$ で表すとそれぞれ次式のようなになる（各記号は図—2参照）。

$$\begin{aligned} \epsilon_{s2} &= \frac{y_{s1} - t_{f1}}{y_{s1}} \epsilon_{s1}, & \epsilon_{s3} &= \frac{y_{s2} - t_{f2}}{y_{s1}} \epsilon_{s1}, \\ \epsilon_{s4} &= \frac{y_{s2}}{y_{s1}} \epsilon_{s1}, & \epsilon_{c1} &= \frac{y_{s2} + H_h}{y_{s1}} \epsilon_{s1}, \\ \epsilon_{c2} &= \frac{y_{s2} + H_h + t_c}{y_{s1}} \epsilon_{s1} \end{aligned} \quad (1)$$

#### b) ケーブルひずみ

ケーブルひずみ $\epsilon_t$ については、ケーブルは鋼桁と桁端定着部で固定され、クイーンポスト配置<sup>8)</sup>ではケーブル折り曲げ部でサドルと接しているが、サドルとケーブル間には摩擦力が働かないとし、また、ケーブルと合成桁のせん断変形を無視するので、ケーブルひずみ $\epsilon_t$ は鋼桁全域にわたって均一に分布する。そこで、式(2)に示すケーブル位置での鋼桁の総伸び量 $\delta_s$ と、ケーブルの総伸び量 $\delta_t$ が等しいとする変形の適合条件からケーブルひずみ $\epsilon_t$ を算定する。

$$\delta_s = \delta_t \quad (2)$$

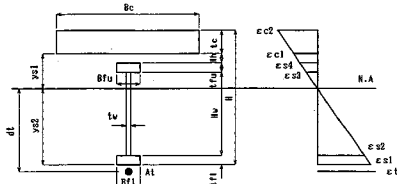
ケーブルの長さを $l$ とするとケーブル総伸び量 $\delta_t$ は次式で表される。

$$\delta_t = l \epsilon_t \quad (3)$$

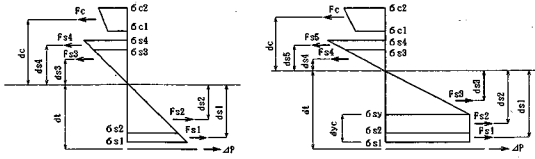
図—3に示すような直線配置の場合、ケーブル位置での鋼桁のひずみを桁の全長にわたり積分したものがケーブル位置での桁の伸び $\delta_s$ となり次式で表すことができる。

$$\delta_s = 2 \int_0^{a'} \frac{x}{a'} (\epsilon_s + \epsilon_{sH}) dx + b' (\epsilon_s + \epsilon_{sH}) - L \epsilon_{sH} \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_s$ ：荷重載荷点におけるケーブル位置での鋼



(a) 断面形状 (b) 断面のひずみ分布



(c) 弾性応力 (d) 弾塑性応力

図-2 プレストレスト合成桁断面のひずみ分布および応力状態

桁ひずみ,  $\epsilon_{sH}$ : プレストレス力のケーブル定着位置での偏心によるモーメントにより鋼桁に生じるひずみ,  $L$ : 合成桁のスパン長.

また,  $\epsilon_{sL}$  をひずみの増分後の  $\epsilon_{s1}$  によるケーブル位置でのひずみとすると次式が得られる.

$$\epsilon_{sL} = \frac{e'}{y_{s1}} \epsilon_{s1} \quad (5)$$

一方,  $\epsilon_{sH}$  は次式で表すことができる.

$$\epsilon_{sH} = \frac{E_t A_t d_t^2}{E_s I_v} \epsilon_t \equiv C_1 \epsilon_t \quad (6)$$

ここで,  $E_s, E_t$ : 合成桁およびケーブルのヤング係数,  $A_t$ : ケーブルの断面積,  $I_v$ : 合成桁の換算断面二次モーメント.

式(5)および式(6)を用いて  $\epsilon_s$  を表すと次式のようなになる.

$$\epsilon_s = \epsilon_{sL} - \epsilon_{sH} = \epsilon_{sL} - C_1 \epsilon_t \quad (7)$$

式(7)を式(4)に代入して整理すると次式が得られる.

$$\delta_s = (a' + b') \epsilon_{sL} - L \cdot C_1 \epsilon_t \quad (8)$$

式(2)に式(3)および式(8)を代入して直線配置の場合のケーブルひずみが次式で得られる.

$$\epsilon_t = \frac{(a' + b') \epsilon_{sL}}{l + LC_1} \quad (9)$$

一方, 図-4に示すようなクイーンポスト配置の場合, ケーブル位置での鋼桁のひずみは桁のスパン方向, 高さ方向のいずれにも変化するので, ①  $0 \leq x < a$  の領域, ②  $a \leq x < a'$  の領域, および③荷重によるモーメント一定の領域に分けて考える.

ここで,  $\epsilon_{sH}$  はプレストレス力のケーブル定着位置での偏心によるモーメントにより鋼桁に生じるひずみ,  $\epsilon_{sV}$  はケーブル折り曲げ位置でのプレストレス力の鉛直成分により鋼桁に生じるひずみ,  $\epsilon_{sHO}$  はケーブル定着位

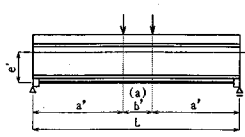


図-3 ケーブルを直線配置した桁

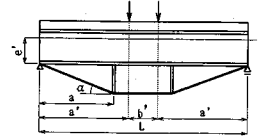


図-4 ケーブルをクイーンポスト形式で配置した桁

置での鋼桁のひずみとすると,  $\epsilon_{sH}, \epsilon_{sV}, \epsilon_{sHO}$  はそれぞれ次式のように得られる.

$$\begin{aligned} \epsilon_{sH} &= \frac{E_t \cdot A_t \cdot e' \cdot \cos \alpha \cdot d_t}{E_s I_v} \epsilon_t \equiv C_1 \epsilon_t \\ \epsilon_{sV} &= \frac{E_t \cdot A_t \cdot a \cdot \sin \alpha \cdot d_t}{E_s I_v} \epsilon_t \equiv C_2 \epsilon_t \\ \epsilon_{sHO} &= \frac{E_t \cdot A_t \cdot e' \cdot \cos \alpha \cdot e'}{E_s I_v} \epsilon_t \equiv C_3 \epsilon_t \end{aligned} \quad (10)$$

①  $0 \leq x < a$  の領域

この領域ではケーブル位置での  $\epsilon_{sL}$  および  $\epsilon_{sV}$  はパン方向, 高さ方向ともに変化する. また,  $\epsilon_{sH}$  は高さ方向のみに変化する. よって, この領域におけるケーブル位置での鋼桁の伸びは次式で表すことができる.

$$\begin{aligned} \int_0^a \epsilon_s dx &= \int_0^a \frac{x}{a'} \frac{x}{a} \epsilon_{sL} dx - \int_0^a \frac{x^2}{a^2} \epsilon_{sV} dx \\ &\quad - \int_0^a \left( \frac{x}{a} \epsilon_{sH} + \epsilon_{sHO} \right) dx \end{aligned} \quad (11)$$

②  $a \leq x < a'$  の領域

この領域ではケーブル位置での  $\epsilon_{sL}$  は合成桁のスパン方向に変化する. また,  $\epsilon_{sH}$  および  $\epsilon_{sV}$  は一定である. よって, この領域におけるケーブル位置での鋼桁の伸びは次式で表すことができる.

$$\int_a^{a'} \epsilon_s dx = \int_a^{a'} \frac{x}{a} \epsilon_{sL} dx - \int_a^{a'} (\epsilon_{sH} + \epsilon_{sV}) dx \quad (12)$$

③ 荷重によるモーメント一定の領域

この領域ではケーブル位置での  $\epsilon_{sL}, \epsilon_{sH}$  および  $\epsilon_{sV}$  は全て一定であるので鋼桁の伸びは次式で表すことができる.

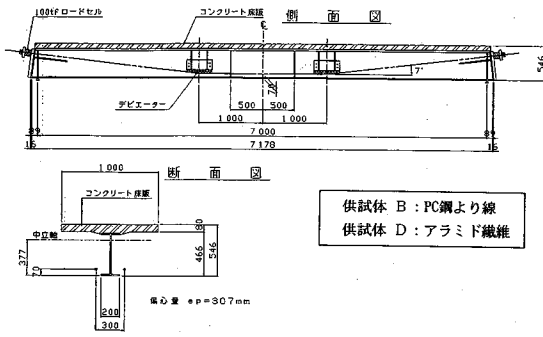
$$\int \epsilon_s dx = b' (\epsilon_{sL} - \epsilon_{sH}) \quad (13)$$

以上より, 式(2)に式(3)および式(10)~式(13)を代入して, ケーブルをクイーンポスト配置した場合のケーブルひずみ  $\epsilon_t$  が次式のように得られる.

$$\epsilon_t = \frac{\left( a' - \frac{a^2}{3a'} + b' \right) \epsilon_{sL}}{l + (2a' - a + b') C_1 + \left( 2a' - \frac{4a}{3} + b' \right) C_2 + 2a C_3} \quad (14)$$

c) 応力および内力

以上の関係式から得られる断面内各位置でのひずみに対し, 各材料の応力~ひずみ関係を用いてひずみの増加



図—5 供試体の概要 (断面内配置の場合)

による断面内の応力を計算する。各々の応力に断面積を乗じることによって、フランジ、ウェブ、ケーブル等各部分の内力が得られる<sup>8)</sup>。

#### d) 中立軸

PS合成桁の断面に作用する力のつり合い条件から、下フランジ下縁から中立軸までの距離  $y_{s1}$  が次式を満足するように求められる。

$$F_T - F_C = 0 \quad (15)$$

ここで、 $F_T$ : 断面に作用する引張力の合計

$F_C$ : 断面に作用する圧縮力の合計

#### e) 外部荷重およびたわみ

算定された中立軸に対して、すべての内力のモーメントを合計すると、内力による抵抗モーメントが得られ、この内力による抵抗モーメントと外部荷重によるモーメントを等しくすると、外部荷重が求められる。また、プレレスト合成桁の弾塑性たわみは、弾塑性領域での曲率分布図を用いて一般的な共役ばり法を適用して求められる<sup>8)</sup>。

### 3. 解析結果の検証実験

#### (1) 検証実験の概要

検証実験に用いた供試体は、ケーブルをクイーンポスト形式で配置したプレレスト合成桁が4体 (断面内配置2体、断面外配置2体)<sup>9)</sup>、ケーブルを取り付けない基準桁が1体の計5体とした。今回の実験に使用した供試体は、実橋の合成桁橋を模擬したものであり、鋼桁とコンクリート床版との断面構成比が実橋に近いものとなるように配慮している。その結果、桁の弾性領域における中立軸位置は鋼桁上フランジのやや下側に位置しており、一般的な合成桁橋の主桁断面とほぼ対応した断面となっている。鋼桁は市販のH型鋼 (SS400) を使用し<sup>8)</sup>、ケーブル材としてPC鋼より線およびアラミド繊維 (組み紐状) の2種類を用いた。ケーブル折り曲げ位置はケーブルがなめらかに偏向するように、厚さ

表—1 供試体の種類

供試体	ケーブル配置形状	ケーブルの種類	導入プレストレス力 (2本合計, tf)
A	ケーブル無し	—	—
B	クイーンポスト, 断面内配	PC鋼より線	70.0
C	クイーンポスト, 断面外配	PC鋼より線	17.0
D	クイーンポスト, 断面内配	77ミッド繊維組み紐状	70.0
E	クイーンポスト, 断面外配	77ミッド繊維組み紐状	17.0

表—2 コンクリート材料試験結果

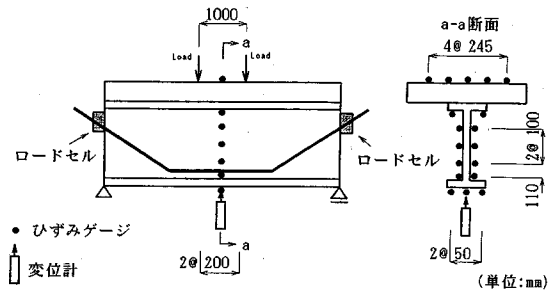
供試体	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
A, B	386	$2.60 \times 10^6$
C, D	364	$2.70 \times 10^6$
E	341	$2.40 \times 10^6$

表—3 材料試験結果より得られたケーブル材料特性

ケーブル材	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏点応力度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )
PC鋼より線 (T21.8)	312.9*	$\sigma_{ty}=175$	$\sigma_{tu}=193$	$E_t=19460$
77ミッド繊維組み紐状	127(1本)*	—	$\sigma_{tfu}=162$	$E_{tf}=5982$

\*解析に用いたケーブル断面積はPC鋼より線が625.8mm<sup>2</sup>、

77ミッド繊維組み紐状が1016mm<sup>2</sup>である。



図—6 測定位置

50 mm の鋼板を円弧切削し、その上に塩化ビニール管を取り付けた形式とした。供試体の概要および種類を図—5 および表—1 に示す。なお、材料試験により得られたコンクリート圧縮強度を表—2 に、ケーブルの材料特性を表—3 にそれぞれ示す。導入プレストレス力はコンクリート床版上縁の引張応力が  $20 \text{ kgf/cm}^2$  となるように目標値を設定した。ケーブルによるプレストレス力の導入は、供試体を載荷装置に設置し、試験開始直前の状態で桁の面外方向に曲げモーメントが生じないように、ジャッキ2台を用いて行った。また緊張力の確認は、ケーブル両端に設置したロードセルによる。荷重は図—6 に示すような2点集中載荷とし、ケーブル緊張後ただちに載荷を開始した。載荷は、主桁の横倒れを防止するために鋼桁上フランジの水平変位を拘束して行った。検証実験での測定項目は、① スパン中央変位、② スパン中央ひずみ分布、③ 導入プレストレス力およびケーブル

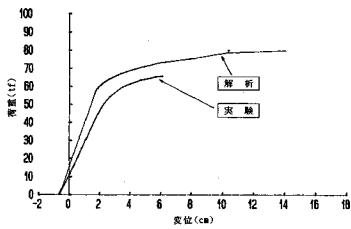


図-7 荷重～スパン中央変位関係  
(供試体 B, 断面内配置,  
PC 鋼より線)

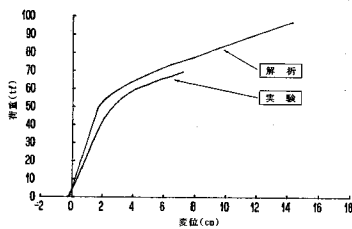


図-8 荷重～スパン中央変位関係  
(供試体 C, 断面外配置,  
PC 鋼より線)

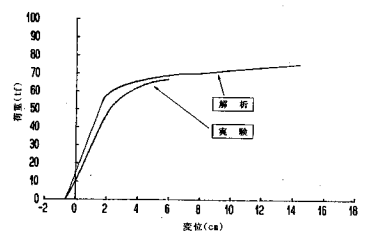


図-9 荷重～スパン中央変位関係  
(供試体 D, 断面内配置,  
アラミド繊維)

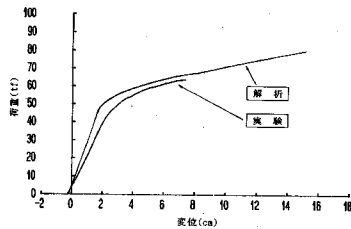


図-10 荷重～スパン中央変位関係  
(供試体 E, 断面外配置,  
アラミド繊維)

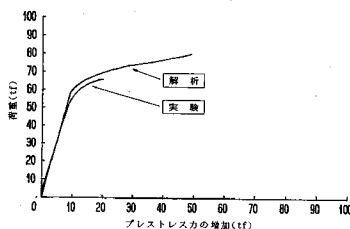


図-11 荷重～ケーブル張力の増加関係  
(供試体 B, 断面内配置,  
PC 鋼より線)

張力の増加量である (各測定位置は図-6 参照)。

表-4 実験結果および解析結果の一覧

供試体		導入プレストレス力 (tf)	降伏耐力 (tf)	終局耐力 (tf)
A:基準桁	実験値	—	29.8	48.8
	解析値	—	37.7	49.6
B:断面内配置 (PC鋼より線)	実験値	63.3	52.2	65.8
	解析値	63.3	56.2	76.9
C:断面外配置 (PC鋼より線)	実験値	11.3	39.4	69.5
	解析値	11.3	47.9	86.8
D:断面内配置 (アラミド繊維)	実験値	62.4	48.2	66.5
	解析値	62.4	54.8	71.4
E:断面外配置 (アラミド繊維)	実験値	12.9	46.0	63.7
	解析値	12.9	46.1	77.1

## (2) 実験結果および解析結果との比較

実験結果と解析結果を比較したものの一例を、図-7～図-11 および表-4 にそれぞれ示す。まず、表-4 に示した導入プレストレス力であるが、表-1 に示す各供試体の目標値と比べ 4～7 tf 程度小さい値となっている。これはプレストレス力を基準合成桁に導入する際に、コンクリート床版にひびわれを発生させないようにコンクリート床版上縁に貼付したひずみゲージの値を制御しながら導入プレストレス力を決定したためである。従って、図-7～図-11 および表-4 での解析結果は、実際に実験供試体に導入したプレストレス力を用いて計算したものである。なお、PS 合成桁の降伏は実験、解析とも全て最初に鋼桁下フランジ下縁で生じた。また、PS 合成桁の最終破壊は実験、解析ともに全てコンクリート床版の圧壊であった。

今回の実験では、ケーブルの偏心距離 (断面内配置, 断面外配置) およびケーブルの材料特性 (PC 鋼より線, アラミド繊維) をパラメータとして変化させた。解析結果から予測されるケーブルの偏心距離がプレストレス合成桁に及ぼす効果として次のことが挙げられる: ① 合成桁の降伏耐力は断面内配置の方が断面外配置よりも大きくなる。すなわち、今回の実験では、供試体の降伏は全て下フランジの降伏となっている。そのため、桁の降伏耐力を向上させるためには導入プレストレス力により下フランジにあらかじめ多くの圧縮応力を与えて弾性範囲を広げておく必要があるが、偏心距離を小さく

した方が大きなプレストレス力を桁に導入することができる。よって、断面内配置のほうが断面外配置よりも桁の弾性範囲を広げ降伏耐力も大きくなる。② 合成桁の終局耐力は断面外配置の方が断面内配置よりも大きくなる。すなわち、偏心距離が大きくなるに伴い、プレストレス力の偏心によるモーメントも大きくなりプレストレス力がより効果的に作用する。また、不静定力であるケーブル張力の増加量も偏心距離が大きくなるにつれて大きくなる。この 2 点から断面外配置の方が断面内配置よりも大きな終局耐力となる。以上の二つの効果は、供試体 B (PC 鋼より線, 断面内配置) と供試体 C (PC 鋼より線, 断面外配置) を比較すると実験結果にもよく現れているといえる (図-7～図-11, 表-4 参照)。

次に、解析から予想されるケーブルの材料特性がプレストレス合成桁に及ぼす効果として、降伏耐力および終局耐力はともに弾性係数の大きな材料ほど大きくなる

ことが挙げられる。今回の実験供試体ではPC鋼より線の場合、鋼桁の降伏以前にケーブルが降伏したり鋼桁が降伏した後に破断しないように断面積が決定されている。アラミド繊維の場合も同様に桁が終局状態になってもケーブルは破断しないように断面積が決定されている。このためケーブルの弾性係数のみが桁の各耐力に影響をおよぼす因子となる。すなわち、ケーブルの弾性係数が大きくなるとケーブル張力の増加量も多くなり、その結果、合成桁の降伏耐力や終局耐力も大きくなる。このことは、供試体B(PC鋼より線、断面内配置)と供試体D(アラミド繊維、断面内配置)を比較した場合の降伏耐力や供試体C(PC鋼より線、断面外配置)と供試体E(アラミド繊維、断面外配置)を比較した場合の終局耐力によく現れている(図-7~図-11, 表-4参照)。

最後に、全体的な実験結果と解析結果の比較として以下のことが挙げられる：①各供試体は荷重～スパン中央変位関係において全体的に両者はほぼ一致した挙動を示すが、初期の直線勾配は実験値が解析値より小さくなっている。この理由として、床版コンクリートの有効幅がスパン中央と支点付近で異なること等が考えられる。②降伏耐力や終局耐力等に多少の相違はみられるが、降伏耐力は断面外配置よりも断面内配置のほうが大きくなることや、弾性係数の小さなケーブルのほうが各耐力が小さくなることなど実験結果と解析結果の傾向はよく一致しているといえる。③ケーブル張力の増加は、終局耐力の相違による最終的な増加量の差はみられるが全体的には実験結果と解析結果はよく一致しているといえる。このことは、ケーブルひずみをケーブルの伸びとケーブル位置での鋼桁の伸びが等しいとして求めるという解析仮定の妥当性を示しているといえる。

#### 4. プレストレスト合成桁の性能評価と補強設計

##### (1) パラメータ解析によるプレストレスト合成桁の性能評価

前章において、PS合成桁の弾塑性挙動解析手法として適用を試みた変形増分法の妥当性が実験により検証された。その結果、合成桁にケーブルを配置してプレストレスト力を導入することにより桁の降伏耐力および終局耐力が向上し、ケーブル配置前の合成桁(基準桁)に比べ優れた性能を有することが分かった。このことは、外ケーブルを用いてプレストレスト力を導入することにより既存合成桁橋の補強が可能であることを示している。なお、本論文では示していないが、降伏耐力、終局耐力の他に、PS合成桁の破壊形式、ケーブル張力の増加特性、断面内ひずみ分布等についても解析と実験ではほぼ良好な一致が得られている<sup>10)</sup>。

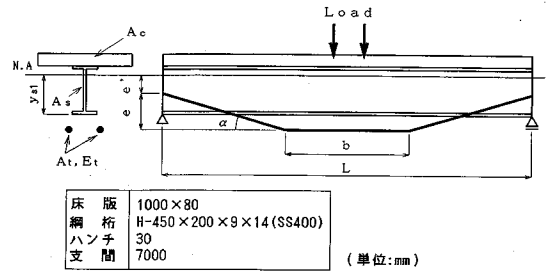


図-12 パラメータ解析に用いる解析モデルの記号および断面諸元

ここでは、以下に示す既存橋梁の補強を目的としたPS合成桁の力学挙動に影響を及ぼすパラメータを選択し、パラメータ解析によって、PS合成桁の降伏耐力、終局耐力および曲げ剛性の向上に関する性能評価を試みる。パラメータ解析に用いる解析モデルの記号および基準合成桁の断面諸元を図-12に示す。

- ①  $\frac{b}{L}$  : ケーブル水平部の長さとし、スパン長の比、
- ②  $\frac{e'}{y_{s1}}$  : ケーブル定着位置での偏心距離と下フランジ下縁から合成桁中立軸位置までの距離の比、
- ③  $\frac{e}{y_{s1}}$  : ケーブル定着位置からケーブル水平部までの距離と下フランジ下縁から合成桁の中立軸位置までの距離の比、
- ④  $\frac{E_t}{E_s}$  : ケーブルヤング係数と鋼材ヤング係数の比、
- ⑤  $\frac{A_t}{A_s}$  : ケーブル断面積と合成桁断面積の比、
- ⑥  $\frac{A_c}{A_s}$  : コンクリート床版断面積と鋼桁断面積の比。

ここで、無次元化パラメータ①、②および③は、ケーブルの配置形状に関するものである。また、無次元化パラメータ④および⑤はケーブル材料に関するものである。なお、ここで考慮するケーブル材料は、主としてFRPを対象とするものとし、その応力～ひずみ関係は破断まで直線的な変化をすると仮定する<sup>10)</sup>。無次元化パラメータ⑥は床版増厚に関するもので、ここでは床版幅を一定とし、厚さのみを変化させることとした。

以上のように設定した無次元化パラメータが、ケーブル配置前の合成桁(基準桁)の降伏耐力、終局耐力および曲げ剛性などの性能向上にどのような影響を及ぼすかの解析を行った結果の内、主としてケーブル配置形状に着目して考察を加える。ここで、降伏耐力は、PS合成桁のコンクリート床版上縁、鋼桁上フランジ上縁、鋼桁下フランジ下縁あるいはケーブルのいずれかが降伏ひずみに達した時点での荷重と定義する。また、終局耐力は、

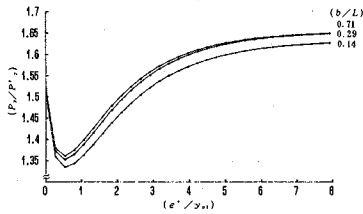


図-13 降伏耐力に及ぼす  $(b/L)$  および  $(e'/y_{s1})$  の影響

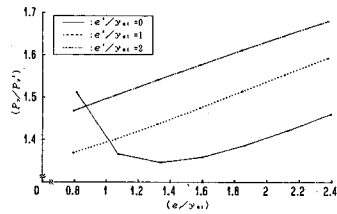


図-14 降伏耐力に及ぼす  $(e'/y_{s1})$  の影響

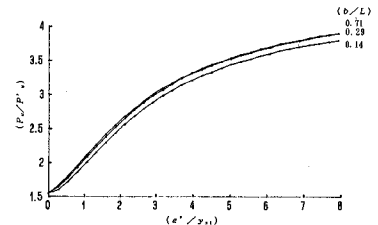


図-15 終局耐力に及ぼす  $(b/L)$  および  $(e'/y_{s1})$  の影響

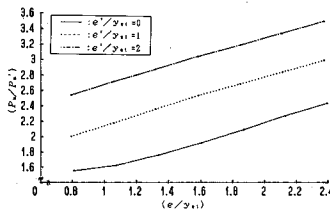


図-16 終局耐力に及ぼす  $(e'/y_{s1})$  および  $(b/L)$  の影響

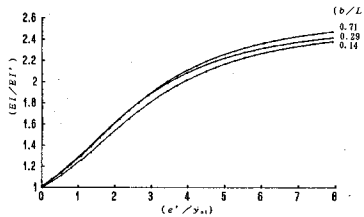


図-17 曲げ剛性に及ぼす  $(b/L)$  および  $(e'/y_{s1})$  の影響

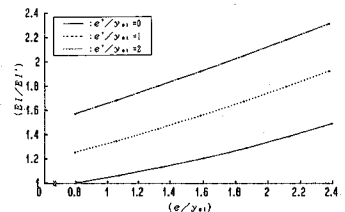


図-18 曲げ剛性に及ぼす  $(e'/y_{s1})$  および  $(b/L)$  の影響

PS 合成桁のコンクリート床版上縁，鋼桁上フランジ上縁，鋼桁下フランジ下縁あるいはケーブルのいずれかが終局限界ひずみに達した時点での荷重と定義する。さらに，PS 合成桁の曲げ剛性， $EI$  は，モーメント， $M_y$  と曲率， $\phi$  の比として次式のように定義する。

$$EI = \frac{M_y}{\phi} \quad (16)$$

性能評価のために用いる記号は次の通りである。

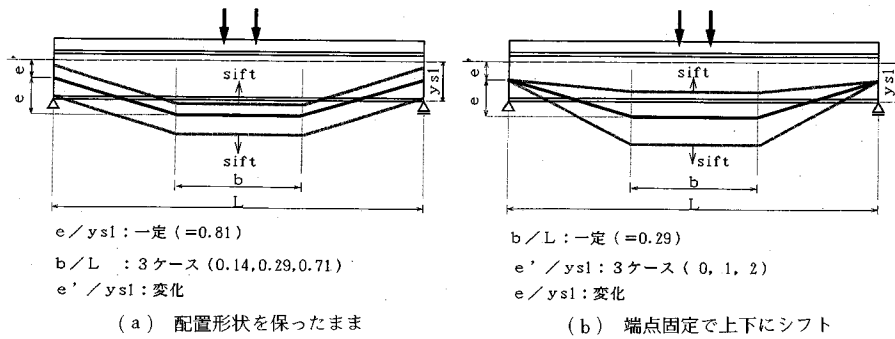
$P_y/P'_y$  : 降伏耐力の向上，ここで， $P_y$  : PS 合成桁の降伏耐力， $P'_y$  : 基準桁の降伏耐力，

$P_u/P'_u$  : 終局耐力の向上，ここで， $P_u$  : PS 合成桁の終局耐力， $P'_u$  : 基準桁の終局耐力，

$EI/EI'$  : 曲げ剛性の向上，ここで， $EI$  : PS 合成桁の曲げ剛性， $EI'$  : 基準桁の曲げ剛性。

まず，降伏耐力に及ぼすケーブル配置形状の影響を図-13 および図-14 に示す。図-13 は無次元化パラメータ， $e'/y_{s1}$  を一定 ( $=0.81$ ) とし，3 種類の  $b/L$  について  $e'/y_{s1}$  を変化させたものである。図-14 は無次元化パラメータ， $b/L$  を一定 ( $=0.29$ ) とし，3 種類の  $e'/y_{s1}$  について  $e'/y_{s1}$  を変化させたものである (図-19 参照)。ここで，図-13 に示す  $e'/y_{s1}=0$  すなわち，中立軸位置にケーブルを定着した場合，基準桁に対する降伏耐力の向上は約 1.50 倍となっている。その後，偏心距離を大きくしていくと降伏耐力の向上は約 1.35 倍まで低下する傾向がみられる。さらに偏心距離を大きくすると再び降伏耐力の向上があらわれる。この理由として次のことが考えられる。すなわち，今回の解析では，PS 合成桁の降伏は全て最初に下フランジに発生しているので，降伏耐力の向上は，下フランジに荷重による応

力と逆向きの応力をどれほど導入できるかによって決まる。また，導入プレストレス力としてそれぞれの配置形状で導入可能な最大のもの (プレストレス導入時にコンクリート床版上縁の引張応力が  $20 \text{ kgf/cm}^2$  となる) を採用しているため，偏心距離の小さな配置のほうがより大きなプレストレスを導入できることになる。また，同時に，偏心距離が大きいくほどケーブル定着位置の偏心によるモーメントも大きくなり，効率よく荷重とは逆向きの応力を発生させることができる。つまり，降伏耐力が低下している範囲は導入プレストレス力が降伏耐力の向上を支配している領域であり，逆に，降伏耐力が向上している範囲は偏心距離が支配している領域であるといえる。また，偏心距離をさらに大きくしていくと降伏耐力の向上は 1.60 倍程度に達し，以後大きな変化はみられなくなる。しかしながら，実際的な  $e'/y_{s1}$  の値は 0~1.0 程度までと考えられ，この範囲内で降伏耐力をより向上させるためには偏心距離を小さくとり，大きな導入力を与えるのがよいと考えられる。なお，無次元化パラメータ  $b/L$  については 3 種類の変化を与えたが，各  $b/L$  に対する結果の間にほとんど差はなく，降伏耐力に及ぼす影響は小さいといえる。図-14 に示す  $e'/y_{s1}=0.81$  における降伏耐力の向上率は図-13 における  $e'/y_{s1}=0, 1.0$  および  $2.0$  の場合の向上率と同一のものである。そのため， $e'/y_{s1}=0$  の向上率が  $e'/y_{s1}=1.0$  および  $2.0$  の場合を上回っている。図-14 に示すように  $e'/y_{s1}$  の値を大きくしていくと  $e'/y_{s1}=0$  の場合に限って向上率が一旦低下し再び向上する結果となっている。この理由としては，図-13 の場合と同様のことが考えられる。すなわち， $e'/y_{s1}$  が小さいほど大きなプレスト



図—19 ケーブル配置形状変化の仕方

ス力が導入できるため、 $e/y_{s1}$ を増加させると向上率が一旦低下する。しかし、 $e/y_{s1}$ が大きいほどプレストレス力によるサドル部での上向きの力も大きくなるので導入プレストレス力の影響よりも上向きの力の影響が大きくなると再び向上率は上昇する。以上より、ケーブルを中立軸位置に定着した場合 ( $e'/y_{s1}=0$ の場合) は、 $e/y_{s1}$ を大きくするよりも断面内にケーブルを納める方が降伏耐力の向上には有効であるといえる。

終局耐力に及ぼすケーブルの配置形状の影響を図—15および図—16に示す(図—19参照)。各図のパラメータの設定は降伏耐力の場合と同様である。まず、図—15では、偏心距離の増加にともない終局耐力も向上する結果となっている ( $e/y_{s1}=0.81$ 一定)。このような降伏耐力向上の場合とは異なる傾向を示す理由として次のことが考えられる。偏心距離が大きくなるにつれて不静定力であるケーブル張力増加の割合も大きくなる。偏心距離が大きくなると導入できるプレストレス力は減少するが、このケーブル張力増加のために、変形が大きくなる終局耐力付近ではプレストレス力の差が小さくなり、偏心距離の効果の方が大きくなるため図—15に示すような結果となっている。また、今回の解析ではPS合成桁は全て床版の圧壊で破壊している。なお、無次元化パラメータ  $b/L$  については3種類の変化を与えたがそれぞれの差はほとんどなく、降伏耐力の場合と同様、終局耐力に及ぼす影響は小さいといえる。図—16についても図—15と同様のことがいえる。これは、定着位置からケーブル水平部までの桁高方向距離 ( $e$ ) が大きくなるとプレストレス力の増加量も大きくなるため、プレストレス導入時に生じる偏心距離と反比例関係にある導入量の差は終局耐力近傍では小さくなり  $e$  の効果の方が大きくなるためである。

曲げ剛性に及ぼすケーブルの配置形状の影響を図—17および図—18に示す(図—19参照)。今回の解析では、各ケーブル配置形状ごとに導入可能な最大プレストレス力を合成桁に作用させている。すなわち、 $e'/y_{s1}$  および

$e/y_{s1}$  の値が小さい場合ほど大きなプレストレスを導入していることになる。しかし、図—17および図—18から明らかなように  $e'/y_{s1}$  および  $e/y_{s1}$  の増加にともない曲げ剛性も増加している。このことから、曲げ剛性の向上に対する導入プレストレス力の影響はほとんどないといえる。逆に、ケーブル定着位置の偏心距離および定着位置からケーブル水平部までの距離を大きくすると曲げ剛性は向上する。また、無次元化パラメータ  $b/L$  について3種類の変化を与えたが図—13に示す降伏耐力や図—15に示す終局耐力の場合と同様、各  $b/L$  ごとの差があまりなく、ケーブル配置形状のPS合成桁の曲げ剛性に及ぼす影響は小さいといえる。特に、実際的な  $e'/y_{s1}$  の値である  $0 \sim 1.0$  の範囲では各  $b/L$  の間に顕著な差は生じていないので  $b/L$  の変化のみでPS合成桁の曲げ剛性の向上を期待するのは難しいといえる。

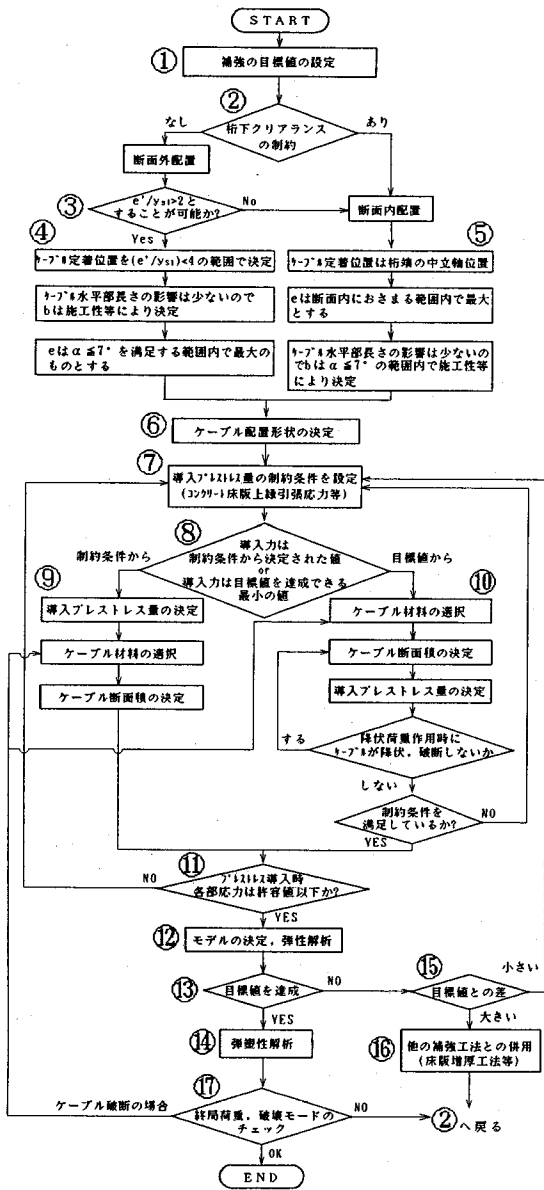
## (2) プレストレス導入による合成桁橋の補強設計

### a) プレストレス導入による補強設計の手順

ここでは、(1)で示したパラメータ解析結果に基づいて桁の降伏耐力の向上を目的とした既存橋梁の補強を行う場合の手順を示し、その具体例として実橋合成桁モデルに対して本手法の適用を試みる。

図—20に桁の降伏耐力の向上を補強の目的とした場合の設計手順を示す。なお、ケーブル配置形状はクイーンポスト形式とする。まず、補強の具体的な目標値(例えば、降伏耐力を1.5倍とする)を決定する(図—20中の①)。次に、桁下のクリアランスに関する制約の有無によって、ケーブルの配置を断面内配置とするか断面外配置とするかに決定する(図—20中の②)。すなわち、ケーブルの断面外配置が可能で、しかも  $e'/y_{s1} > 2$  の十分なケーブル定着位置の偏心距離 ( $e'$ ) が確保できる場合は、パラメータ解析結果から  $e'/y_{s1} < 4$  の範囲内で効果的な降伏耐力の向上が可能となる。ここで、ケーブル水平部の長さ ( $b$ ) の降伏耐力に及ぼす影響は偏心距離に比べ小さいので折曲げ部の施工性等を考えて決定する





図—20 既存橋梁に対する補強設計の手順

(図—20中の③, ④). 一方, 桁下クリアランスの制約がある場合, あるいは,  $e'/y_{s1} > 2$  が確保できない場合は, ケーブル定着位置を桁端中立軸位置とし, ケーブル偏心距離 ( $e$ ) を桁断面内におさまる範囲内で最大とする (図—20中の⑤). なお, ここでケーブルの折曲げ角度 ( $\alpha$ ) に  $\alpha \leq 7^\circ$  の制限を設けた. その理由は, FRP 筋をケーブル材として使用する場合, 曲げ加工などにより強度低下が生じることが明らかになっており<sup>11)</sup>, これを防止する目安として制限値  $\alpha \leq 7^\circ$  を設定した. 以上の手順によりケーブル配置形状が決定される (図—20中の⑥).

次の手順として, ケーブル材料, ケーブル断面積および導入プレストレス力の決定を行う. まず, 導入力の制約条件を決定する必要があるが, ここでは, 制約条件を満足する最大限のプレストレス力を導入する場合と, 補強の目標値を達成できる最小のプレストレス力を導入する場合の2通りに分けて考える (図—20中の⑦, ⑧). すなわち, 前者の場合は, まず導入プレストレス力が制約条件から決定され, その後, ケーブル材料およびケーブル断面積を決定する (図—20中の⑨). ケーブル材料はFRPも含めて考えると, 実験結果および解析結果から明らかのようにヤング係数の大きなものほど補強効果も大きくなるが<sup>10)</sup>, 主としてケーブルの腐食保護や定着の問題等から決定する. ケーブル断面積は桁降伏時にケーブルが降伏 (FRPの場合は破断) しないように決定する. これに対し, 後者の場合は, まずケーブルのヤング係数およびケーブル断面積を与える必要がある (図—20中の⑩). これは, プレストレス力が不静定力であり, 荷重による変形の増大によりケーブル張力も増加し, この荷重と増加ケーブル張力との関係を知る際にケーブルのヤング係数およびケーブル断面積が必要になるためである.

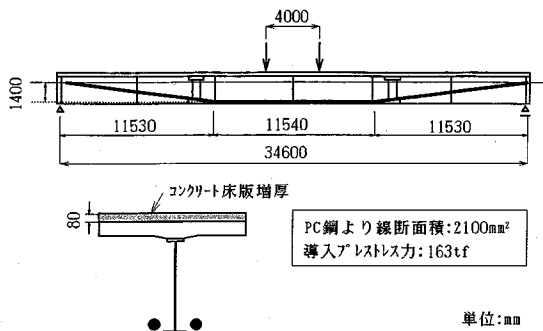
このように決定された導入プレストレス力は図—20中の⑦で設定した制約条件は満足しているが, 断面内でのその他の部位の応力状態についてはチェックしていないので, ここで断面内部の応力が許容値以下であることを確認する (図—20中の⑪).

以上で全ての必要項目の数値が決定される. これらの数値を用いて弾性挙動解析を行う (図—20中の⑫). そして, 弾性挙動解析結果が①で設定した目標値を満足している場合は⑬へ, 満足していない場合は⑮へそれぞれ進む (図—20中の⑬). すなわち, 弾性範囲においては①で設定した目標値を満足し, 補強の目的が達成された場合は弾塑性挙動解析を行い, 終局状態に対する安全性のチェックを行う (図—20中の⑭). また, プレストレス導入だけでは十分な補強効果が得られない場合は, 他の工法との併用を検討し, 再びケーブル配置形状から決定し直す (図—20中の⑮, ⑯). さらに, 補強の目標値が達成されてはいるが終局耐力や破壊モードが予定のものとは異なる場合は②へ戻り必要部分の再検討を行う (図—20中の⑰). 特に, 破壊モードがケーブル破断の場合は, ケーブル材料およびケーブル断面積の決定の部分に戻り再度検討を行う.

#### b) プレストレス導入による補強工法の適用例

以下, プレストレス導入による補強の具体例として, 実橋主桁に対して本手法を適用してみる.

対象とする橋梁は, 架設時に2等橋として設計された1スパン3主桁の単純支持活荷重合成桁橋である. 本橋には, 近年の交通量の増加にともない, ほぼ1等橋に相



図一21 プレストレス導入による補強設計の結果

当する活荷重が載荷されていることが予想された。このような本橋の現状を考慮して、本橋の拡幅およびプレストレス導入とコンクリート床版増厚を組み合わせた1等橋への格上げが計画されている。このように、本橋に対する補強の目的は、2等橋から1等橋への格上げ、すなわち降伏耐力の向上である。この目的を達成するには、TL-20 荷重 (TL-14 荷重の約 1.43 倍) が主桁に作用しても桁各部の応力が許容応力度以下であればよいことになる。ここでは、補強後の主桁の降伏耐力が補強前の桁の降伏耐力に対して 1.43 倍以上となることを補強の目標値と設定する。また、コンクリート床版の増厚量を 8 cm とすることがすでに決定しているものとする。

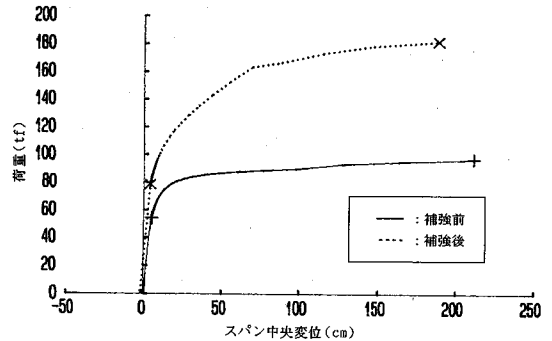
以下、図一20 の流れに従って具体的な諸数値を決定してみる。

まず、図一20 中の②以下の手順に従ってケーブル配置形状を決定する。今回の補強の対象とした橋梁では、現状の桁下クリアランスを変更できないという制約条件があるので、ケーブル定着位置はコンクリート床版増厚前の中立軸位置とし、偏心距離  $e$  はケーブルが全て主桁断面内におさまる範囲内で最大とする。また、ケーブル折曲げ位置は施工性を考え、鋼桁ジョイント部にあたらない  $L/3$  点および  $2L/3$  点 ( $L$  はスパン長) でケーブルを折曲げる。この場合のケーブルの曲げ角度は  $\alpha=7^\circ$  となり制限値を満足している。

次に、ケーブル材料、ケーブル断面積および導入プレストレス力の決定を行う。前述のパラメータ解析では、コンクリート床版上縁の引張応力を制約条件として最大導入プレストレス力を求めたが、明確な補強目標値が設定される場合には、その値を達成できる最小の導入力とすればよい。そこで、ここでは降伏耐力を 1.43 倍にするという目標値があるので、これから求める導入力とプレストレス導入時のコンクリート床版上縁引張応力が  $20 \text{ kgf/cm}^2$  以下であるという制約条件で得られる導入力との小さい方を採用する。導入力の決定は、弾性挙動解析<sup>8)</sup>を用いて行う。導入プレストレス力を決定するた

表一5 プレストレス導入による補強工法の解析結果一覧

	補強前	補強後(PC鋼より線)
降伏耐力 (tf)	54.6	78.5 (1.44倍)
終局耐力 (tf)	96.7	181.9 (1.88倍)
直線部傾き (tf/cm)	11.0	13.1 (1.19倍)



図一22 補強前、後の性能改善効果の一例 (荷重～スパン中央変位関係)

めには、まずケーブルヤング係数およびケーブル断面積を与える必要がある。ケーブル材料としては FRP も含め種々のものが考えられるが、ここでは JIS に規格化されている PC 鋼より線について検討する。ケーブル断面積に関するパラメータ解析からケーブル断面積を大きくすれば降伏耐力も大きくなることがわかっているが<sup>10)</sup>、ここでは安全性および経済性も考慮し、PC 鋼より線が鋼桁降伏時に降伏に至らないことおよびプレストレス導入時の PC 鋼より線の応力が、引張強度の 40% 以下であることの 2 点を制約条件として可能な限り小さな断面積とする。

これらの制約条件のもとで、導入プレストレス力は  $P_i=163 \text{ tf}$ 、ケーブル断面積は  $21 \text{ cm}^2$  と決定された。この導入力は制約条件 (コンクリート床版上縁引張応力が  $20 \text{ kgf/cm}^2$  以下) を満足している ( $P_i=170 \text{ tf}$  作用時の引張応力は約  $13 \text{ kgf/cm}^2$ )。

以上のように決定した諸数値を図一21 に示す。

### c) プレストレス導入による補強効果の確認と考察

プレストレス導入による補強前、後の合成桁について、変形増分法を用いて解析を行った結果を表一5 および図一22 に示す。表一5 より、降伏耐力を 1.43 倍にするという補強の目的が達成されていることがわかる。また、その他の桁の性能に関しても終局耐力が 1.88 倍、荷重～スパン中央変位関係の弾性範囲における直線部の傾きが 1.19 倍に向上している。また、破壊モードはいずれの場合もコンクリート床版の圧壊で、補強前、後で同一の破壊モードである。補強後のモデルでは荷重 70 tf 付

近でケーブルが降伏しているが、その後破断することなく終局状態に至っており、ケーブル断面積が妥当なものであったことを示している。また、図-22より、コンクリート床版の増厚およびプレストレス導入の組合せによる補強を行うことにより弾性範囲の拡大、終局耐力の増大など、全て所定の目標が達せられていることが確認できる。

以上のように静的挙動の面から考えると、プレストレス導入による補強工法は主桁の性能向上に有効な方法であるといえる。しかし、今後、動的挙動に関する検討も行っていく必要があると考える。

## 5. 結 論

本研究は、既存橋梁の補強を目的としたプレストレスの導入による合成桁の性能改善効果を検討したものである。得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 本研究で取り上げた変形増分法は、各部のひずみを増加させ内力と外力が等しいとして作用荷重を求める方法であり、不静定力であるプレストレス力は変形の適合条件を用いて求めている。本解析手法は比較的少ない計算量でプレストレス合成桁の弾塑性挙動を追跡することが可能であり、その有効性が実験結果からも確認された。

(2) 実験結果および解析結果からプレストレス合成桁は普通合成桁に比べて降伏耐力や終局耐力において優れた性能を有していることが明らかになったが、これらの性能は、ケーブルの配置形状やケーブルの材料によって変化することも確認された。

(3) 既存橋梁の補強を目的とした種々の無次元化パラメータを変化させ、プレストレス合成桁の性能に及ぼす各パラメータの影響について解析を行った。その結果、今回取り上げた範囲内ではプレストレス合成桁の性能を低下させるようなパラメータはなかったが、各性能の向上率や傾向はパラメータごとに異なっており、補強目的に応じたケーブル配置形状やケーブル材料等の選択が必要である。特に、ケーブル定着位置の偏心距離の影響は降伏耐力向上の場合と終局耐力向上の場合では傾向が異なるため十分な配慮が必要である。

(4) パラメータ解析から得られた結果をもとに、プレストレス導入による既存橋梁の降伏耐力の向上を目的とした補強を行う場合の手順を提案し、その手順に従って実際に降伏耐力の向上が必要な橋梁をモデル化し、本補

強工法の適用を行った。その結果、補強の目的を十分に満足する成果が得られ、本補強工法の有効性が確認された。

謝辞：本研究の一部は、関西道路研究会 複合構造小委員会（委員長：藤井 学 京都大学教授）での検討結果を基にしたものである。また、本研究における検証実験では、近畿大学 柳下研究室の皆様にお世話になった。紙上を借りて関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Troitsky, M.S. : *Prestressed Steel Bridges —Theory and Design—*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp.1-16, 1990.
- 2) Saadatmanesh, H., Albrecht, P. and Ayyub, B.M. : Guidelines for Flexural Design of Prestressed Composite Beams, *Jour. of Str. Eng.*, ASCE, Vol.115, No.11, pp.2944-2961, 1989.11.
- 3) Hoadley, G. : Behavior of Prestressed Composite Steel Beams, *Jour. of Str. Eng.*, ASCE, Vol.89, No. ST3, pp.21-34, 1963.6.
- 4) Ayyub, B.M., Sohn, Y.G. and Saadatmanesh, H. : Prestressed Composite Girders under Positive Moment, *Jour. of Str. Eng.*, ASCE, Vol.116, No.11, pp.2931-2949, 1990.11.
- 5) 土木学会編：鋼、コンクリート合成構造の設計ガイドライン, pp.80-85, 1989.3.
- 6) 例えば、山口富夫, 白木万博, 淡立靖夫：筏橋プレストレス橋の載荷実験結果の考察, 三菱重工研究報告, 第883号, pp.1-10, 1958.8.
- 7) 土木学会編：プレストレスコンクリート標準示方書, pp.35-44, 1979.1.
- 8) 宮本文徳, 平田勝己, 柳下文夫, 森 拓也：プレストレス合成桁の弾塑性挙動解析と橋梁補強工法への適用, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.1101-1114, 1994.3.
- 9) Miyamoto, A., Yagishita, F., Maki, A. and Kobukata, Y. : Application of Prestressing Technique for Bridge Strengthening, *Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering '94*, Nova Scotia, Canada, pp.1231-1245, 1994.8.
- 10) 関西道路研究会 道路橋調査研究委員会：複合構造小委員会報告書—橋梁用材料・構造の複合化—, pp.109-190, 1994.3.
- 11) 丸山武彦, 本間雅人, 岡村 甫：FRP ロッドの曲げ加工部の引張耐力に関する実験的研究, 第12回コンクリート工学協会年次論文報告集, Vol.12-1, pp.1025-1030, 1990.6.

(1994.4.14 受付)

# MECHANICAL BEHAVIORS AND DESIGN CONCEPT OF PRESTRESSED COMPOSITE PLATE GIRDERS WITH EXTERNAL TENDONS

Ayaho MIYAMOTO, Katsumi HIRATA and Katsuji TEI

The application of prestressing technique to steel structures makes it possible to increase the load-carrying capacity as well as to stretch the elastic region of existing steel bridge system. The aims of this paper are not only to develop a method of nonlinear analysis of prestressed composite plate girders based on the incremental deformation method but also to demonstrate the feasibility of the prestressing technique to strengthening of steel bridges. The accuracy of the proposed analysis is verified by comparisons with test results on full scale prestressed composite plate girders which varied of prestressing force level, eccentricity of draped tendons and material properties of tendons. This method is found to be capable of predicting the ultimate response and also failure modes of the various prestressed composite plate girders. Then the performance of different types of prestressed composite plate girders under static loading is analytically evaluated in the strengthening of existing steel bridge system. Furthermore, a method of the performance evaluations related to the load-carrying capacity and the deflection control of the prestressed composite plate girders with external tendons is proposed based on the analytical results considered with some optimum parameters which are geometric parameters and material parameters. Finally, a design concept of the prestressed composite plate girders with external tendons is discussed in the construction of new bridges as well as in the bridge strengthening.