コンクリート合成梁の力学的解析とプレストレスと鉄筋補強の選択の研究

STUDY OF ANALYSIS OF CONCRETE COMPOSITE BEAMS AND CHOOSING REINFORCEMENTS BETWEEN PRESTRESSING STEELS AND STEEL BARS

池田 永司^{*1}, 青木 繁^{*2}
Eiji IKEDA and Shigeru AOKI

Preserved compressive stress in concrete composite beam due to loading itself-weight on the PCa under construction works as the same reinforcement stress as prestress, and it is available to be optimal designs for concrete composite beams that choosing reinforcements between prestressing steels and steel bars balances their performances and costs. Analysis of mechanical properties of four models of concrete composite beams on Reinforced Concrete, Prestressed Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Structures leads to the best field of prestressing rate for the designs of the beams, that is 0.5 rate. Because the preserved compressive stress works very effectively as reinforcement in this field than in the others. And concrete composite beams in this field are possible to be the most balanced ones between performance and cost.

Keywords : Concrete Composite Beam, Preserved Compressive Stress, Choosing Tensile Steels, Prestressing rate, Performance, Cost,

コンクリート合成梁 残存圧縮応力 引張鋼材選択 プレストレス力率 性能 コスト

1. はじめに

コンクリート合成梁部材の施工工程は通常プレキャストコンクリート材 (PCa) 単独でその自重等の固定荷重を担う段階と、合成梁となって積載荷重等を担う段階から成る。これに対応する断面算定法はプレストレストコンクリート造 (PC) では明確になっている¹⁾が、鉄筋コンクリート造 (RC) プレストレスト鉄筋コンクリート造 (PRC) では明らかになっていない^{2) 3)}。この段階を経る合成梁にあっては、プレストレスの有無に関わらず、第1段階で生ずるPCa断面の諸応力は、次の段階に持ち越されて残存応力として永続する。このうちコンクリート圧縮応力 (残存圧縮応力) はプレストレスの機能をもって働く。この働きを考慮する合成梁断面算定法は、PRCのみならずRC、PC合成部材全般に適用することができる。これにより精度の高い鉄筋応力度算定が可能となり、コンクリートのひび割れ制御に有効な方法であることを報告した⁴⁾。

またこの方法を利用して、合成梁のスパン中央の性能とコストのバランスを計る設計が可能であることを報告した⁵⁾。合成梁の主要性能とコストの関係を引張鋼材 (引張鉄筋とPC鋼材の組合せ) とプレストレス力率 (フルプレストレスPCのプレストレス導入力を1とし、RCのそれを0とするプレストレス力率) をマトリックスとする数式と図表で表すことができることを提案し、これにより引張鋼材の選択がRC、PRCまたはPC合成梁の構造種別を決定すること、性能とコストのバランスの最もよく計れる構造領域がプレストレス力率0.5近傍のPRCにあること等に言及した⁵⁾。

本研究の目的は本断面算定法を一連の載荷荷重下にあるコンクリート合成梁の断面応力算定に適用して、RC、PRCとPC合成梁モデルの力学的性状を明らかにすることと、これにより合成梁の長所を最も発揮できるPRCモデルを検証することにある。

コンクリート合成梁の特徴は固定荷重によって生ずる大きな引張応力を下部の高品質で高価格のPCaが受け持ち、上部の低品質で低価格の場所打ちコンクリートが積載荷重による小さな圧縮応力を分担して両者の工学的経済的長所を発揮することと、省資源、省力、工期短縮や環境等によく順応できることである。またPRCは、低価格のRCと、高価格のPCの中間にあり、両者の経済的かつ工学的特徴を併せもっている。しかし広範な領域に跨って存在するPRC合成梁の研究は数少なく、またコスト研究報告も殆どないに等しい。ここでRC、PRC、PCの3モデルと、これにPRCと同プレストレス力率で多様な組合せをもつ引張鋼材の内の一モデルを選び加えて、4モデルの合成梁の力学的性状を比較検討する。そして、コンクリート合成梁構造が本来もっている残存圧縮応力の機能の働き方を調べ、有効活用のモデルを検証する。これによりPRC合成梁のより広範な活用に資そうとするものである^{6) 7)}。

2. 解析方針

PCaに生じ合成梁に残存する断面応力の算定は、そのPCaが準拠するRC規準²⁾、PRC指針³⁾、PC規準¹⁾により行う。合成梁断面の算定は筆者らの提案式⁴⁾によって行う。載荷荷重を増加して引張鋼材の降伏到達後は、その提案式を修正した式による。また引張鋼材の降伏以後に生ずる永久伸びが載荷荷重の除荷後に残留ひずみとなる時、その抵抗応力を仮定した釣合式を用いて梁の復元性を検討する。なお解析にあたって、引張鋼材とコンクリートは完全付着しているものとし、PCaとスラブは一体化した梁となっており、その打継ぎ部のずれは生じないものと仮定する。本解析では、梁スパン中央における鉛直荷重時の挙動を対象としているため、そのずれの影響は小さいと想定できるからである。

本論文は本大会学術講演発表(2004.9北海道および2005.9近畿)の報告を基としている⁶⁾⁷⁾

^{*1} イケダ ラボ 建築構造士

^{*2} 法政大学 名誉教授・工博

IKEDA Labo, Structural Eng. Consult
Prof. Emeritus, Hohsei Univ., Dr. Eng.

図1 合成梁断面と無載荷時の断面初期応力

図2 曲げひび割れ発生後の断面の釣合条件

3. 解析方法

1) 無載荷時（初期）の合成梁断面の釣合条件

無載荷時の合成梁断面には、梁スラブの自重の曲げによるPCa内の残存応力が初期応力として存在する（図1）。その釣合条件はPCaをPRCとすると、軸方向力を（1）式、曲げモーメントを（2）式として表される。ただし、PCaがRCまたは下縁応力が圧縮状態（PC）のときはそれぞれの基準^{5) 7)}により算定する。

$$C_o - (P_o + P_{t1} + T_{t1}) = 0 \quad (1)$$

$$M = M_d + M_1 = (P_o + P_{t1})d_p + T_{t1}d - M_{o0} \quad (2)$$

ここで、

$$C_o = b\sigma_o x_p / 2,$$

$$P_{t1} = a_p \sigma_{p1}, \quad T_{t1} = a_t \sigma_{t1}$$

$$M_1 = 0, \quad M_{o0} = b\sigma_o x_p^2 / 6$$

記号：後出の記号一覧を参照

2) 引張鋼材が弾性範囲内にある時の釣合条件

i. 曲げひび割れ発生まで

無載荷時に下縁応力が圧縮状態かコンクリートの曲げ引張強度以内にある時は、合成梁全断面を有効とみなしてPC基準¹⁾に準拠する断面計算を行う。この場合全コンクリート断面を断面算定に用いる。この範囲内では残存圧縮応力を用いる計算は必要でない。

ii. 曲げひび割れ発生後

載荷荷重を増加して曲げひび割れが生じた後は重心軸の引張側にあるコンクリートの引張応力を無視するので、残存圧縮応力の働きを算入する釣合条件が成立する。設計荷重時にあるとき重心軸の位置は一般にPCa内（ $x > t$ ）にあるが、載荷荷重の増加に伴い重心軸は上昇して、 $x \leq t$ となる（図2）。そのときの釣合式は重心軸の位置 x と鉄筋応力 σ_{t2} の関数として、軸方向力を（3）式、曲げモーメントを（4）式として表され、弾性域を超えた後の断面応力解析の基本式となる。（3）式で示される x と σ_{t2} の値を（4）式右辺に代入して載荷曲げモーメント M_1 と一致するよう反復計算して算定する。

$$C - (P_o + P_{t2} + T_{t2}) = 0 \quad (3)$$

$$M_1 = M_o + M_\sigma + M_{p2} + M_{t2} \quad (4)$$

ここで

$$C = B\sigma_{t2}x^2 / 2n(d+t-x)$$

$$P_o = \frac{b\sigma_o x_p}{2} \left[1 - \frac{\{1 - \sigma_{t2}(t-x)/n\sigma_o(d+t-x)\}^2}{\{1 + \sigma_{t2}x_p/n\sigma_o(d+t-x)\}} \right]$$

$$P_{t2} = a_p \sigma_{t2} n_p (d_p + t - x) / n (d + t - x)$$

$$T_{t2} = a_t \sigma_{t2}$$

$$M_o = \frac{b\sigma_o x_p (t-x)}{2} \left[1 - \frac{\{1 - \sigma_{t2}(t-x)/n\sigma_o(d+t-x)\}^2}{\{1 + \sigma_{t2}x_p/n\sigma_o(d+t-x)\}} \right] + \frac{b\sigma_o x_p^2}{6} \left[1 - \frac{\{1 - \sigma_{t2}(t-x)/n\sigma_o(d+t-x)\}^3}{\{1 + \sigma_{t2}x_p/n\sigma_o(d+t-x)\}^2} \right]$$

$$M_o = B\sigma_{t2}x^3 / 3n(d+t-x)$$

$$M_{p2} = a_p \sigma_{t2} n_p (d_p + t - x)^2 / n (d + t - x)$$

$$M_{t2} = a_t \sigma_{t2} (d + t - x)$$

記号一覧

P_o ：有効プレストレス力

P_{t1}, σ_{p1} ：PC鋼材の M_d による引張力と応力

T_{t1}, σ_{t1} ：引張側鉄筋の M_d による引張力と応力

C_o ：初期残存圧縮力

M_d ：PCaに作用する梁・スラブ自重による曲げモーメント

M_1 ：合成梁にかかる載荷曲げモーメント

σ_o ：PCa上縁の残存圧縮応力

x_p ：PCa上縁から残存圧縮応力0点までの距離

a_t, d ：引張鉄筋の断面積とPCa上縁からの距離

a_p, d_p ：PC鋼材の断面積とPCa上縁からの距離

C ：圧縮側のコンクリートと鉄筋の圧縮合力

P_{t2} ：PC鋼材の M_1 による引張力

P_o ：重心軸の引張側にあつて減少するコンクリート残存圧縮力

T_{t2} ：引張鉄筋の M_1 による引張力

M_{d+1} ：想定設計荷重による曲げモーメント

M_o ：圧縮側のコンクリートと鉄筋の分担する曲げモーメント

$M_{t2}, \sigma_{t2}, \varepsilon_{t2}$ ：引張鉄筋による曲げモーメント・応力とひずみ

$M_p, \sigma_{p2}, \varepsilon_{p2}$ ：PC鋼材による曲げモーメント・応力とひずみ

M_σ ： P_o による曲げモーメント

t ：場所打ちコンクリートの厚さ

x ：重心軸の合成梁圧縮縁からの距離

n, n_p ：鉄筋とPC鋼材のコンクリートに対するヤング係数比

a_c, d_c ：圧縮鉄筋の断面積とスラブ上縁からの距離

σ_c, F_c ：圧縮縁コンクリート応力度とコンクリート設計基準強度

k_1, k_2 ：圧縮コンクリートの応力修正係数と合力作用点係数

T_y, σ_{ty} ：引張鉄筋の降伏点荷重と降伏点応力

P_y, σ_{py} ：PC鋼材の降伏点荷重と降伏点応力

$\varepsilon_{py}, \varepsilon_{pl}, \varepsilon_{p2}$: PC鋼材の永久伸び、残留伸びと弾性縮み

$\varepsilon_{ty}, \varepsilon_{tl}, \varepsilon_{t2}$: 引張鉄筋の永久伸び、残留伸びと弾性縮み

$\varepsilon_{\sigma}, E_c$: σ_0 によるひずみとコンクリートのヤング係数

3) 引張鋼材降伏時の釣合条件

載荷荷重の増加に伴い曲げひび割れが進行して引張鋼材が降伏点に到達する時、鉄筋とPC鋼材のどちらが先行するかはそれらの配置位置、断面積、プレストレス導入力等の要因によって決まる。ここでは算定を単純化するために、鉄筋の降伏が先行し、次にPC鋼材が降伏するものとする。それはPC鋼材の耐力が一般的に鉄筋のそれと比べて3~5倍と高く、プレストレス導入によるPC鋼材の弾性ひずみ分を差し引いたとしてもPC鋼材の載荷荷重で増分する弾性ひずみの可能域が大きいと想定できるからである。またこのとき上縁コンクリートは弾性範囲内にあるものとする(解析例参照)。

i. 引張鉄筋のみの降伏後

引張鉄筋応力は降伏点に達すると σ_{ty} を一定値 σ_{t1} とみなし、基本式(3)(4)式をPC鋼材応力 σ_{p2} の関数式(5)、(6)式に変換して、PC鋼材降伏時までを解析する。

$$C - (P_{\sigma} + P_{t2} + T_{y'}) = 0 \quad (5)$$

$$M_i = M_{\sigma} + M_{\sigma} + M_p + M_{ty'} \quad (6)$$

ここで

$$T_{y'} = a_t (\sigma_{ty} - \sigma_{t1}) = (T_y - T_{t1})$$

$$M_{ty'} = T_{y'} (d + t - x) = (T_y - T_{t1}) (d + t - x)$$

ii. PC鋼材の降伏到達後

PC鋼材降伏点強度 σ_{py} を一定とみなし、(5)(6)式を上縁コンクリート応力 σ_{py} の関数として(7)(8)式により解く。

$$C - (P_{\sigma} + P_{y'} + T_{y'}) = 0 \quad (7)$$

$$M_i = M_{\sigma} + M_{\sigma} + M_{py'} + M_{ty'} \quad (8)$$

ここで

$$P_{y'} = a_p (\sigma_{py} - \sigma_{p0} + \sigma_{p1}) = P_y - (P_0 + P_{t1})$$

$$M_{py'} = \{P_y - (P_0 + P_{t1})\} (d_p + t - x)$$

4) 終局時の釣合条件

終局時の圧縮部コンクリートの圧縮合力 C_u 、その分担曲げモーメント M_{cu} をPC規準⁷⁾による応力修正係数 k_1 、作用点係数 k_2 によって表せば、終局時の釣合条件式は(9)(10)式となる。

$$C_u - (P_{\sigma} + P_{y'} + T_{y'}) = 0 \quad (9)$$

$$M_{iu} = M_{cu} + M_{\sigma} + M_{py'} + M_{ty'} \quad (10)$$

ここで

$$C_u = k_1 F_c B x$$

$$P_{\sigma} = b \sigma_0 x_p / 2$$

$$M_{cu} = k_1 (1 - K_2) F_c B x^2$$

$$M_{\sigma} = b \sigma_0 x_p (t + x - x_p / 3) / 2$$

(9)式は(1)式の関係から、

$$k_1 F_c B x = T_y + P_y$$

となり、 x は一定値 $\bar{x}$ となる。残存圧縮応力による曲げも一定と

なり、(10)式は(11)式に変換される。

$$\begin{aligned} M_{iu} = & k_1 (1 - K_2) F_c B \bar{x}^2 + T_y (d + t - \bar{x}) \\ & + P_y (d_p + t - \bar{x}) - \{T_{t1} d + (P_0 + P_{t1}) d_p\} \\ & + b \sigma_0 x_p^2 / 6 \end{aligned} \quad (11)$$

(11)式は(2)式を用いて次式で表される。

$$\begin{aligned} M_{iu} = & k_1 (1 - K_2) F_c B x^2 + T_y (d + t - \bar{x}) \\ & + P_y (d_p + t - \bar{x}) - M_d \end{aligned} \quad (12)$$

終局曲げ耐力 M_u は、自重曲げモーメントと載荷荷重のそれとの和として(13)式で表される。

$$\begin{aligned} M_u = & M_d + M_{iu} \\ = & k_1 (1 - K_2) F_c B \bar{x}^2 + T_y (d + t - \bar{x}) + P_y (d_p + t - \bar{x}) \end{aligned} \quad (13)$$

上式は中立軸を基準としたもので、PC規準で示される終局曲げ耐力式と一致する。残存圧縮応力の働きの示す数式が式中に表れていない。しかし無載荷時の梁自重による曲げ M_d に対応する残存応力による曲げ M_{σ} が存在し、中立軸の上昇に伴い増大し終局に至って一定値となる。同じく一定値となる載荷曲げモーメントは(11)式で示すごとく残存圧縮応力による曲げが加算されており、固定荷重による曲げモーメント内にある残存圧縮応力によるマイナスの曲げと相殺される。また載荷荷重の除荷後には、残存応力は固定荷重を負担する応力の一要素としての機能を果たしている。

5) 引張鋼材降伏後の除荷時の残留ひずみと復元性

引張鋼材の降伏後の残留ひずみと復元性の関係を考察する。載荷荷重を除荷して、1)項で述べた梁スラブ自重のみが作用する残存応力の釣合条件に復元しようとするとき、載荷荷重によって増加した弾性伸びに相当する縮みを経た後に、引張鋼材の永久ひずみ量に対応する抵抗力が生じて新たな均衡状態をつくる。引張鉄筋には圧縮力が働き、PC鋼材にはプレストレス力の弛緩がおり、復元に抵抗する方向に作用する。これらの復元抵抗力とコンクリート上縁に生じる圧縮力の和は引張側にある残存圧縮応力による復元力と等しい。復元力と抵抗力の関係はそれぞれの永久伸び量、断面積の大きさと位置、鋼材とコンクリートの付着切れによる鋼材の抜け出しとその戻りによる永久伸び量の緩和などの影響を受けて複雑な釣合条件を形成する。本論文は敢えて鋼材とコンクリートの付着が完全で剥離がないものとして以下推考する。

① 載荷時—鉄筋先行降伏 ② 除荷時—引張鋼材の同時みなし抵抗
図3 永久ひずみ発生後の釣合条件

1) 無載荷時 (初期応力) 2) 載荷時 (弾性変形) 3) 引張鋼材降伏時 4) 終局時 5) 除荷後

図4 各載荷段階における釣合イメージ図

図3①は鉄筋のみが降伏先行している載荷時の釣合状態である。場所打ちコンクリートの変形が弾性範囲内にあるときに除荷し、釣合条件が平面保持の仮定で成立するものとする。残留伸び抵抗はそれぞれ鉄筋永久伸び量 ε_{ry} と PC 鋼材永久伸び量 ε_{py} に比例して働くので、図3②でみられる関係から、その抵抗力は (14) 式で与えられる。仮定する鉄筋永久伸び量 ε_{ry} と PC 鋼材永久伸び量 ε_{py} を 3) 項 i. ii. の算定法により求めることができる。

$$P_y = E_c a_p (\varepsilon_{py} - \varepsilon_{p2}), \quad T_y = m E_c a_t (\varepsilon_{ty} - \varepsilon_{t2}) \quad (14)$$

$$\text{ここで } m = \varepsilon_{ry} (d_p + t - x) / \varepsilon_{py} (d + t - x)$$

引張鋼材の一定量の永久伸びを経て除荷した後の釣合条件は、コンクリートの変位と中立軸の位置 x の関数として (15) (16) 式で表すことができ、それぞれの残留伸びは同式を、2) 項 ii と同様の反復計算することにより求めることができる。

$$C - P_o + P_y + T_y = 0 \quad (15)$$

$$M_o + M_o - M_{py} - M_{ty} = 0 \quad (16)$$

ここで、

$$C = B E_c \varepsilon_o x^2 / 2 (d_p + t - x)$$

$$P_o = \frac{b E_c \varepsilon_o x_p}{2} \left[1 - \frac{\{1 - \varepsilon_{py1}(t-x) / n_p \varepsilon_o (d_p + t - x)\}^2}{\{1 + \varepsilon_{py1} x_p / n_p \varepsilon_o (d_p + t - x)\}} \right]$$

$$M_o = B E_c \varepsilon_o x^3 / 2 (d_p + t - x),$$

$$M_o = \frac{b E_c \varepsilon_o x_p (t-x)}{2} \left[1 - \frac{\{1 - \varepsilon_{py1}(t-x) / n_p \varepsilon_o (d_p + t - x)\}^2}{\{1 + \varepsilon_{py1} x_p / n_p \varepsilon_o (d_p + t - x)\}} \right] + \frac{b \sigma_o x_p^2}{6} \left[1 - \frac{\{1 - \varepsilon_{py1}(t-x) / n_p \varepsilon_o (d_p + t - x)\}^3}{\{1 + \varepsilon_{py1} x_p / n_p \varepsilon_o (d_p + t - x)\}^2} \right]$$

$$M_{py} = E_c a_p (\varepsilon_{py} - \varepsilon_{py1}) (d_p + t - x)$$

$$M_{ty} = m E_c a_t (\varepsilon_{ty} - \varepsilon_{ty1}) (d + t - x)$$

6) 無載荷時から終局時までの断面応力の釣合と残存応力

図4は前項の1) から5) までの各段階の釣合に対応する図である。

応力は無載荷時の固定荷重に対応する残存応力と

図5 合成梁断面 (A-A) と引張鋼材配置

載荷荷重に対応する断面応力を加えたものである。弾性変形時であれば、除荷後の無載荷状態では完全に元の応力分布に復元する。引張鋼材の降伏履歴を経た後の除荷時には、その永久伸び量に対応する残留ひずみによる復元抵抗力が生まれ、それによる断面応力と残存応力とを加えた応力に変化する。終局後に上部コンクリート上縁部が圧壊するとしても PC 鋼材の緊張力が全て弛緩していないならば、除荷後には残された上部コンクリートの下半分が圧縮応力を分担して初期応力 (残存応力) とともに、固定荷重の曲げモーメントと均衡を保ちながら復元することができる。

4. 解析対象とその考察

4.1 解析モデル

RC、PRCとPC合成梁の解析モデルの共通断面を図5に示す。それらの引張鋼材とその配置を表1に示す。解析モデルはプレストレス力率を0、0.5、1とし、引張鋼材の合計降伏荷重比がほぼ等しいRC、PRC、PCの3型とPRC型の鉄筋量を最小限におさえてコストダウンに対応するPRC II型を加え計4とする。Md=56.5 kN・m

表1 解析モデル：引張鋼材の組合せとプレストレス力率

型	PS率* (MPa)	引張鋼材		降伏荷重比**			鋼材配置 mm	
		PC鋼材	引張鉄筋	PC鋼材	引張鉄筋	合計	d _p	d
RC	0 (0)	—	3-D38	—	1.000	1.000	—	300
PRC	0.5 (2.88)	5-10.8φ	4-D22	0.509	0.453	0.962	280	310
PRC II	0.5 (2.88)	5-10.8φ	3-D13	0.509	0.111	0.620	280	310
PC	0.8 (4.61)	8-10.8φ	3-D16	0.814	0.174	0.988	240	310

* : プレストレス力率, ( ) は平均プレストレス量を示す

** : PRC、PRC II、PC型の引張鋼材降伏荷重のRC型引張鉄筋降伏荷重に対する比

図6 引張鋼材降伏荷重比-プレストレス力率関係

図7 無載荷時の残存応力

使用材料の品質：鉄筋；SD295、PC鋼材；SWPR7A（降伏荷重102kN/本）、コンクリート（PCa、場所打）； F_c 50MPa

4. 2 解析の結果とその考察

図6はプレストレス率と引張鋼材の総降伏荷重の相関関係を示す。RC型の鉄筋量は応力度制御に要する量を超えて、ひび割れ幅制御のための最低限の必要量で決まる。PRC、PC型の総降伏荷重はRC型のそれとほぼ等しくする。PC鋼材量の最大値はフルプレストレスPCに必要なとする量で決まり、これもPCにとって最低限の必要量である。中間域にあるPRC等のそれぞれの必要量はプレストレス率0と1の最大値と最小値を結ぶ対角線上の量より上方に位置する。これ故にこの図は引張鋼材の経済的側面を表している。鉄筋とPC鋼材の各々降伏荷重比はそれらの使用重量比を表すことから、これらに各鋼材の材工単価比を乗ずると各々のコスト比となり、鉄筋とPC鋼材を合計した引張鋼材の相互のコスト比を読み取ることができる。引張鋼材の選択はそれを用いた合成梁が必要性能を満たすならば、図のRC型－PRC II型－PC型ラインより上方のどの点の選択であってもよいし、上記ラインより上方で下位の点ほどコストは小さくなる。

図7は合成梁の無載荷時の初期応力（残存応力）を示す。RC型の残存圧縮応力はPCa断面上部に偏って存在する。上縁で他の約1.5倍と最大であるが、高さは逆に1/2以下と最小である。PC型のそれは下縁に至るまで断面全体に厚く分布する。プレストレス率0.5の2型は殆ど同じで、PC型とも相似するがその大きさは約80%である。引張鉄筋の残存応力はRC型のみが降伏荷重の約0.2の引張状態にあるが、他のそれはみな圧縮状態で極く小さい。PC鋼材は有効緊張力と僅かな圧縮力（弛緩力）を受けている。

図8は曲げモーメント、引張鉄筋応力と重心軸（ $t \geq x$ のとき中立軸となる。以下同様に扱う）位置の関係を示す。RC型にあってはこの軸の移動は殆ど無く、残存圧縮応力の働きによる曲げモーメントは微小でその変化は殆どない。PRC型PC型にあっては、それぞれの曲げモーメント曲線は相似的である。特にその重心軸の移動は大きく、プレストレス率の大きいPC型では特に大きく、撓み変形に柔軟性のあることを示している。PRC IIは引張鋼材の降伏荷重が他の約60%と小さいが、曲げ耐力性能を満足している。

図9は上縁コンクリートの圧縮応力度と重心軸（中立軸）の関係を表す。合成梁の特徴の一つはこの応力度が小さいことで、この4モデルとも常時荷重時から引張鋼材の降伏時までには F_c の1/2と極めて小さい。その後から終局に至るまで急激に増大する。

図10は曲げモーメントと引張鉄筋ひずみの関係を示す。鉄筋ひずみ量はコンクリートのひび割れ幅に直接に関わる重要数値である。想定設計曲げモーメント（ M_d+1 ）ラインまでの鉄筋ひずみは、RC型では大きい、PC型は当然ながらプレストレス率0.5のPRC II、PRC型でも極めて小さい。しかし載荷曲げモーメントが大きくなるに従い、引張鉄筋量の少ない型ほどそのひずみは増大して、梁変形の進行がわかる。

a. RC

b. PRC

c. PRC II

d. PC

図8 載荷、残存圧縮応力分担曲げと鉄筋応力-重心軸（中立軸）

図9 上縁コンクリート圧縮応力度-重心軸

図10 曲げモーメント-鉄筋ひずみ

図 1.1 残存圧縮応力分担-曲げモーメント関係

図 1.1 は残存圧縮応力の分担曲げモーメント率と載荷曲げモーメントの関係を示す。その働き分担率は RC 型では極めて小さく、殆ど無視できる程である。残存圧縮応力の働きは、プレストレス率の大きい PC 型が最も大きく、また同率ならば引張鉄筋量の少ない PRC II 型が PRC 型より大きい。しかしその働きは載荷荷重の増加に伴い漸減する。

各型の最大曲げモーメント (図 8, 図 10, 図 12) は、表 1 と図 6 に示す引張鋼材の引張荷重力とその作用距離を乗じたものであり、その大小によって優劣を表すものではない。むしろ RC 型のそれは曲げ耐力の必要性能に対して過大となっていることに留意を要する。

図 1.2 は載荷曲げモーメントと主引張鋼材 (RC 型は鉄筋、その他の型は PC 鋼線) のひずみの関係図である。RC 型のは始点から鉄筋降伏点と永久伸び 0.2% 点と直線変化で単調な変化をするが、PRC、PRC II、PC 型の変化は複雑である。まず鉄筋が降伏し、荷重増加に伴い PC 鋼線が降伏し、永久伸び 0.2% の点で除荷する。除荷によって載荷荷重による弾性伸び分を弾性的に縮む。さらに残存応力の影響を受けて復元しながら、永久伸び分の抵抗を受けて均衡する。ここでは鋼材とコンクリートの付着は完全と見なしているため、鉄筋が強く抵抗することとなって、プレストレスによる復元効果あまり表れていない。現実的には引張鋼材の降伏点到達後はコンクリートとの付着がなくなり、引張鋼材の抜け出しがおこり、除荷時にはその滑り入りで、鉄筋の抵抗は小さくなり、復元性が大きくなると推測されるが、本研究では解明できていない。

PRC、PC の復元性について、引張鋼材とコンクリートとの付着は完全であるとする仮説にたって解析を試みたが、鉄筋の抵抗作用が極めて大きく、小さな復元数値となり、現実的でない結果を得た。引張鋼材とコンクリートの付着切れの効果を考慮する等 PRC、PC の残存応力による復元性の究明は今後の課題である。

5. まとめ

1) 残存圧縮応力の働きを考慮する断面算定法を終局時に至るまで載荷荷重の増加する時のコンクリート合成梁の解析に適用して、そ

(主引張鋼材の 0.2% 永久伸び後の復元)

図 1.2 曲げモーメント-主引張鋼材ひずみ

の断面応力とひずみの関係からそれらの力学的性状を把握することができる。

2) 合成梁における残存圧縮応力の引張要素としての働き方は、PC モデルで最大ではあるが、プレストレス率 0.5 近傍の PRC モデルで最も効果的に表れ、それは鉄筋と PC 鋼材の組み合わせ方で変化する。しかし RC モデルではその働きは殆ど見えない。

3) コンクリート合成梁の構造選定は引張鋼材の選択により決定されるが、プレストレス率 0.5 近傍の PRC には引張鋼材の組み合わせ方が最も豊富にあって、その PRC により広い活用場のいることがわかる。この領域は性能とコストを均衡させ、時代の要求に答えられる合理的な PRC 合成梁を生み出す可能性をもつ領域であると推測できる。

謝辞

本研究にご指導ご支援を戴いた大阪大学名誉教授鈴木計夫博士、東京工業大学教授滝口克己博士ならびに作図表にご協力を戴いた昭和コンクリート工業 (株) 山崎学氏に厚く御礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，pp20～22, pp271～278, 2002
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2002
- 3) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説，2002
- 4) 池田・青木：プレキャストコンクリートに残存する圧縮応力の影響を受けるコンクリート合成梁の断面算定法の研究；日本建築学会構造系論文集 No.549 pp121～126, 2001.11
- 5) 池田・青木：プレキャストコンクリートに残存する圧縮応力を利用して性能とコストのバランスを計るコンクリート合成梁の設計法の研究；日本建築学会構造系論文集 No.571 pp119～125, 2003.9
- 6) 池田・青木：プレキャストプレストレスト鉄筋コンクリート合成梁断面の算定法の研究(その 7. 引張鋼材を変動因子とするコンクリート合成梁の解析とその力学的性状について)；日本建築学会大会 (北海道) 学術講演梗概集 構造 N pp959～960, 2004
- 7) 池田・青木：プレキャストプレストレスト鉄筋コンクリート合成梁断面の算定法の研究(その 8. 引張鋼材降伏履歴後の残存圧縮応力の変化について)；日本建築学会大会 (近畿) 学術講演梗概集 構造 N pp795～796, 2005

(2006年7月10日原稿受理，2007年2月16日採用決定)