

論文 非緊張圧縮鋼材を有する PC 部材に関する研究

宮川 邦彦*¹・豊福 俊泰*²

要旨：本論文では、PC部材のひび割れ耐力や曲げ破壊耐力を増強する配筋法として、荷重作用時の部材圧縮部に曲げ剛性を有する鋼材を配置したPC部材と通常のPC部材を製作し、両部材のひび割れ性状や破壊挙動の相違について比較検討した。その結果、部材圧縮部に溝形鋼を配置したPC部材が通常のPC部材と比較して、曲げひび割れ耐力の改善は勿論のこと、曲げ破壊耐力の増強や破壊じん性の改善に有効であることがわかった。

キーワード：複合構造、PC部材、時間依存解析、内部拘束、耐力増強

1. はじめに

構造物の大型化や長大化に伴い、近年、コンクリートと鋼材を複合化あるいは合成した種々な構造形式のコンクリート構造物が数多く施工されており、今後もそのような構造形式の多様化が一層進むものと予想される¹⁾。本研究の内容もPC構造物の性能を改善するための補強法として、これまで主に引張材として用いられてきた鋼材を逆に圧縮補強材の一部として積極的に活用しようとする考え方に立脚したものである。周知のように鋼材の強度や変形特性は、終局時の座屈現象を阻止することができれば、圧縮に対しても引張りと同様な特性を有しており、鋼材を圧縮材として利用することの有利性（例えば、部材断面の削減、破壊時のじん性増加、プレストレス分布の改善など）が確認できれば、前述の考え方は、経済性的問題も含めて、矛盾するものではないと考えられる。ところで、著者等は既報の研究で、荷重作用時の部材圧縮部にある程度多量な非緊張鋼材を配置し、その内部拘束力による付加モーメントを利用してPC部材のプレストレス分布を改善し、変動荷重作用時の許容抵抗曲げ耐力を増強する配筋法を提案したが、同配筋法は、使用限界状態における曲げひび割れ耐力の増強を目的としたもので、終局時の曲げ破壊耐力の増強を意図したものはなかった²⁾。

そこで本研究では、使用時の曲げひび割れ耐力の改善と同時に、終局時の曲げ破壊耐力も増強できる補強方法として、曲げ圧縮応力を受けるコンクリート断面に溝形鋼やI形鋼を配置し、同鋼材の曲げ剛性と終局時の横拘束効果を利用して曲げ破壊耐力の増強を図る配筋法の可能性について検討した。通常、はり部材の曲げ引張破壊は、鉄筋やPC鋼材が降伏した後、それが破断する前に圧縮部のコンクリートが圧壊して終局状態に達する。したがって、曲げ破壊耐力の増強やじん性の改善には、圧縮部のコンクリート断面を補強して、その見掛けの強度や終局時の圧縮ひずみを増大させ、引張鋼材と圧縮合力との距離、すなわち、抵抗モーメントの腕の長さを大きくすることも有効である。ただし、コンクリートは、鋼材とは異なり、通常の使用状態下でも大きな時間依存ひずみ（収縮およびクリープ）を生じる特異な構造材料であり、特にPC構造部材の性能を検討する際には、材料特性の違いに起因する部材断面内部における時間依存現象を適確に把握しておくことが必要である。そこで本論文では、まず、曲げ剛性を有する鋼材で補強されたPC部材（以下、SPC部材と呼ぶ。）に対する時間依存解析法の概要を示すと共に、同解析法の妥当性やSPC部材の有用性を検討するために行った基礎的実験の結果について述べる。

*1, *2 九州産業大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

2. 応力平衡化回転モデル

による時間依存解析法

コンクリート構造部材の時間依存解析法は、これまでにも Dischinger 法や Trost-Bazant 法など多くの手法が提案されてきたが、それらの手法は、コンクリートの時間依存特性値を別の算定式から求め、その値を用いて部材断面内部における力の釣り合い式とひずみの適合式から求められたもので、その解析過程には実際の現象とは相違する多くの仮定が含まれている³⁾。一方、ここに述べる応力平衡化回転モデルによる時間依存解析法（以下、本解析法と呼ぶ。）は、計算過程が複雑で電算処理を必要とするが、種々の補強形式の構造部材に適用できる汎用的な手法であり、コンクリートの配合条件や部材の形状寸法などを入力することにより、部材各部のひずみや応力の経時変化過程を簡単に予測することが可能である^{4) 5)}。以下に本解析法の概要について述べる。

図-1 に示す応力平衡化回転モデルは、コンクリートの時間依存現象を予測するために用いた図-2 の力学モデルに更に鉄筋とPC鋼材を表す弾性ばねを組み入れ、鋼材とコンクリートが一体となって外力に抵抗することを表している。同モデルは、従来の力学モデルとは異なり、コンクリート複合体の各構成素材を表す弾性ばね（ばね定数： G ）、その容積割合を表す腕（腕の長さ： ℓ ）および遅れ弾性や流動を表す回転ダッシュポット（回転粘性係数： η ）から構成されており、特に従来の力学モデルにはなかった要素として、各変形要素を繋ぐ腕を組み入れ、その腕の長さを変化させてセメントの水和反応に起因するコンクリート物性値の経時変化を表した。モデル解析ではすべての要素値が定数であるとして線形解析したが、本来、コンクリートの時間依存現象を解析するためには、セメントの水和反応過程で要素値が経時変化するとして非線形解析すべきである。しかし、実際には要素値の時変数が複雑であるため、非線形解析することは極めて困難である。そこで本解析で

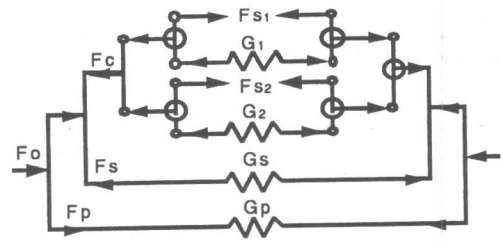


図-1 PC部材の解析モデル

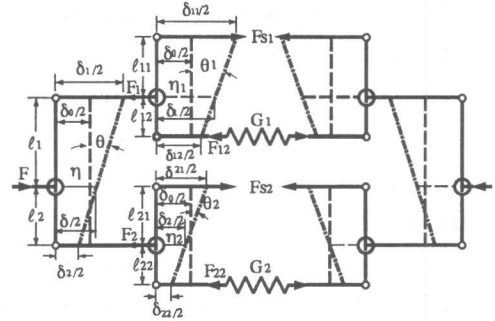


図-2 コンクリートの解析モデル

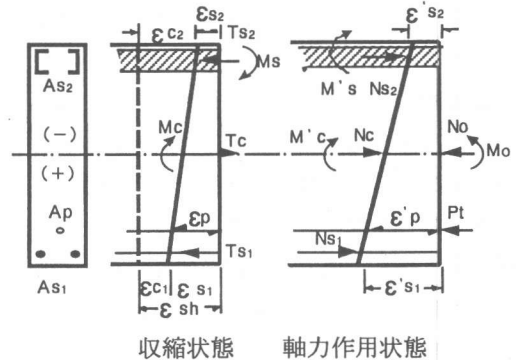


図-3 任意配筋部材の作用力

は時間間隔を適切に区切り、その区間では要素値が一定であるとして、逐次計算を行った。

いま、図-1 のモデルに一定軸力 F_0 が作用するとき、任意時間 t 後におけるプレストレス力 F_p 、コンクリート断面の分担力 F_c および軸方向鉄筋の分担力 F_s は、同モデルの力の釣り合い式とひずみの適合式を解くことにより求めることができる。ただし、上記のモデル解析は、コンクリート断面の図心と鋼材のそれとが一致する対称配筋部材に対するものであり、非

対称配筋部材に偏心軸力が作用する一般的な部材を解析するためには更に以下のような計算過程が必要である。

まず、毛細管張力を仮想した吸引力だけが作用するときのモデル解析から、クリープを考慮した任意時間 t 後におけるコンクリートの見掛けのヤング係数 ($E'ct$) を求め、以下に示す力の釣り合い式とひずみの適合式を解くことにより、任意時間 t 後の収縮応力やひずみを求めることができる。(図-3参照)

$$T_c + T_{s1} + T_{s2} = 0$$

$$M_c + T_{s1} y_{s1} + T_{s2} y_{s2} + M_s = 0$$

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{c1} + \epsilon_{s1} = \epsilon_{c2} + \epsilon_{s2}$$

$$M_s = (\epsilon_{s1} + \epsilon_{s2}) E_s I_s / (y_{s2} + y_{s1})$$

$$\epsilon_{c1} = -T_c / A_c E'ct - M_c y_{s1} / E'ct I_c$$

$$\epsilon_{c2} = -T_c / A_c E'ct - M_c y_{s2} / E'ct I_c$$

$$\epsilon_{s1} = T_{s1} / A_{s1} E_s, \quad \epsilon_{s2} = T_{s2} / A_{s2} E_s$$

ここに T_c : コンクリートに作用する収縮力

T_s : 鋼材に作用する収縮力

y_s : コンクリート図心から鋼材までの距離

M_c : コンクリートに作用するモーメント

M_s : 鋼材に作用するモーメント

ϵ_{sh} : コンクリートの乾燥収縮ひずみ

A_c, A_s : コンクリートと鋼材の断面積

I_c, I_s : コンクリートと鋼材の断面二次モーメント

次に、軸力とプレストレス力だけが作用するときのモデル解析から、クリープを考慮した任意時間 t 後におけるコンクリートの見掛けのヤング係数 ($E'ct$) を求め、以下に示す力の釣り合い式とひずみの適合式を解くことにより、

任意時間 t 後の軸力とプレストレス力による部材各部の応力とひずみを求めることができる。

$$N_o + P_t = N_c + N_{s1} + N_{s2}$$

$$P_t e_p - M_o = M_c + N_{s1} y_{s1} + N_{s2} y_{s2} + M's$$

$$\epsilon's_1 = N_{s1} / A_{s1} = N_c / A_c E'ct + M_c y_{s1} / E'ct I_c$$

$$\epsilon's_2 = N_{s2} / A_{s2} = N_c / A_c E'ct + M_c y_{s2} / E'ct I_c$$

ここに N_o : 中心軸力, M_o : 曲げモーメント

P_t : プレストレス力

e_p : PC鋼材の偏心距離

N_c : コンクリートに作用する力

N_s : 鋼材に作用する力

最後に、上記の両結果を加算することにより任意配筋部材の応力やひずみが求められる。

3. 検証実験

本章では、前章までに述べた時間依存解析法や耐力増強法の妥当性を確認するため、PC部材およびSPC部材を各2体作製し、静置期間中の部材各部のひずみ変化や載荷試験時のひび割れ耐力などを調べた。

3.1 実験概要

本実験では、セメントに早強ポルトランドセメント、細骨材に海砂、粗骨材に最大寸法 20mm の輝緑岩砕石を用い、配合条件として、単位水量 $W = 200 \text{ kg/m}^3$ 、単位セメント量 $C = 420 \text{ kg/m}^3$ 、細骨材率 $s/a = 43\%$ のコンクリートを打設した。なお、PC鋼材には SWPR-7A、軸方向鉄筋に

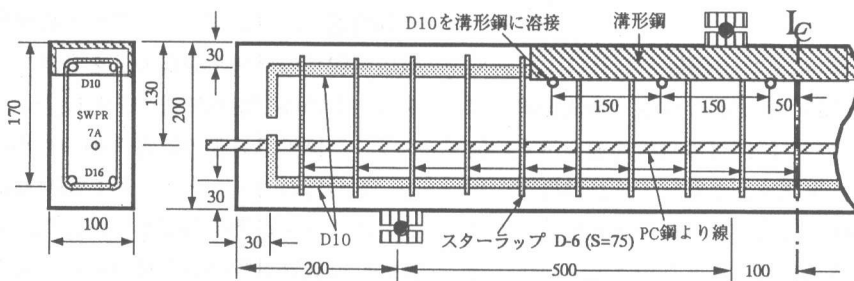


図-4 部材寸法および載荷試験方法

はSD295AのD10、帯鉄筋にはSD295AのD6、溝形鋼にはSS490の100×50×5×7.5mmを用いた。図-4に部材の形状寸法および載荷試験方法を示す。本実験では、SPC部材の上縁に長さ80cmの溝形鋼を配置した関係で、全部材とも載荷試験時の上面を下にしてコンクリートを打設した。部材は材齢3日でプレテンション方式によりプレストレスを導入した後、恒温室内(温度:20±1℃ 湿度:70±5%)に移し、部材表面(打設時の上縁と側面中央部)、軸方向鉄筋(上部と下部)および溝形鋼の表面に貼付したひずみゲージを用いて載荷試験までの約60日間部材各部のひずみ変化を実測した。PC鋼材の緊張はロードセルを介して、中空ジャッキにより初期緊張力 $P_i=98.0\text{kN}$ を導入した。また、本実験に用いたSPC部材は、部材寸法の関係上、溝形鋼を載荷試験時の部材上縁に配置したが、本来は曲げ圧縮部のコンクリート断面内部に鋼材を配置した部材について実験すべきであり、両配筋法では終局時の補強程度が若干相違すると考えられる。なお、この点については今後の研究課題とする。

3.2 実験結果および考察

表-1にコンクリートの力学特性を、図-5と図-6にプレストレス導入時のひずみ分布の実測値(図中の()内の値)と計算値を示す。図示するように実測値は計算値とほぼ一致していることがわかる。ただし、SPC II部材の場合、実測ひずみ分布の傾きが計算のそれと相違しているが、これは、部材作製時のPC鋼材位置が下側に若干ずれたことに起因するものと考えられる。

図-7~10にPCI部材とSPC I部材の静置期間中における実測ひずみ-時間曲線と本解析法から求めた同部材の解析曲線を示す。図示するように実測曲線と解析のそれはほぼ一致しており、前章で述べた本解析法の妥当性を立証し得たと考えられる。したがって、以下に述べるひび割れ荷重の算定には本解析法から推定

表-1 コンクリートの力学特性

材 齢	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
	N/mm ²	N/mm ²	kN/mm ²
3日	28.6	----	23.1
60日	40.0	3.33	28.1

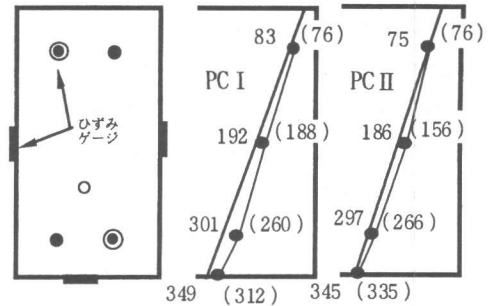


図-5 PC部材のひずみ分布

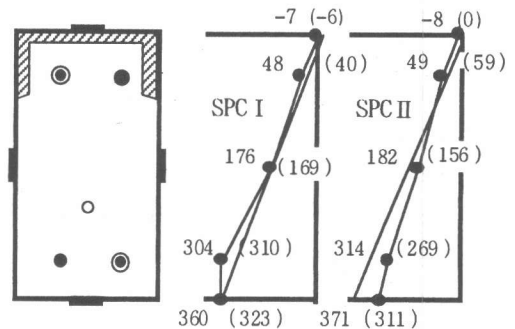


図-6 SPC部材のひずみ分布

した破壊試験時の部材下縁応力度(σ'_{cl})を用いて検討した。

表-2に破壊試験時の各部材の実測結果と計算結果の一覧を示す。ここに、ひび割れ荷重の実測値は部材に貼付したひずみゲージの値が急変するときの荷重から求めた。また、曲げひび割れ荷重の計算値はコンクリートの引張強度に破壊試験時の部材下縁応力度を考慮して弾性式から、斜めひび割れ荷重のそれは土木学会コンクリート標準示方書の算定式から求めた。ただし、安全係数を1.0とし、PC鋼材断面が係数 β_p に及ぼす影響を無視して求めた。また、係数 β_n は破壊試験時の部材下縁応力度を用いて $\beta_n = 1 + 2M_o/M_u$ として計算した。ここに、

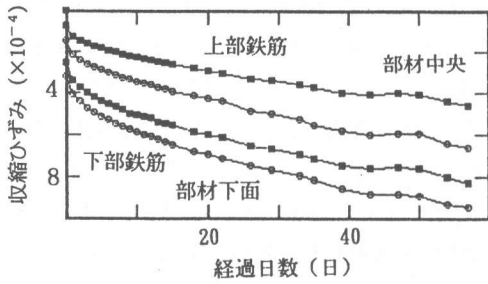


図-7 PC部材の実測ひずみ曲線

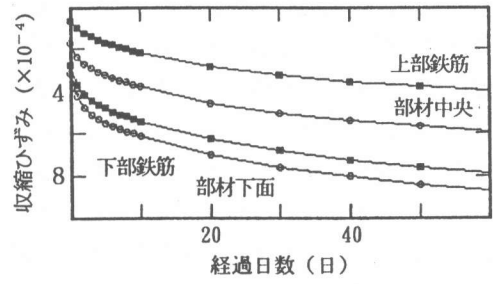


図-9 PC部材の解析ひずみ曲線

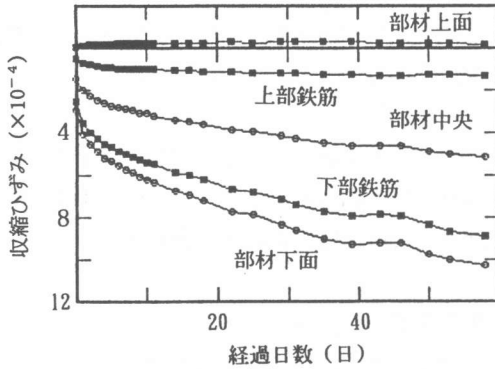


図-8 SPC部材の実測ひずみ曲線

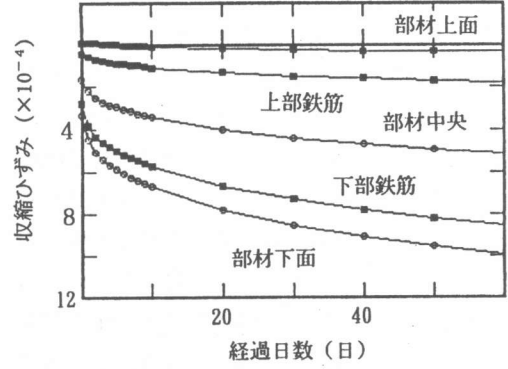


図-10 SPC部材の解析ひずみ曲線

M_o はデコンプレッションモーメント, M_u は部材の曲げ破壊モーメントである。同表のように曲げひび割れ荷重の実測値は, PC部材よりSPC部材の方が若干大きい程度で, 両部材間に明確な差異は観られない。これは, 本実験の場合, 実構造物のように部材自重による死荷重モーメントが作用しておらず, その結果, 圧縮鋼材量の違いがプレストレス分布の経時変化にほとんど影響しなかったことに起因している。このことは斜めひび割れ荷重の実測値についても同様で, 両部材間に全く差異が観られなかった。同表に示すように曲げひび割れ荷重の実測値が計算値より若干小さくなっているが, これは, 本実験の場合, 前述のようにコンクリートを上下逆にして打設した関係で, 破壊試験時の部材引張縁の強度が円柱供試体から求めたそれより小さかったことに起因するものと考えられる。また, 斜めひび割れ荷重の実測値と計算値との比が1.3強と, 実測値の方が大きくなって

表-2 部材の破壊試験結果 (単位:kN)

部材	σ'_{cl} N/mm ²	P _{mc}		P _{vc}		P _{mu}	
		実測	計算	実測	計算	実測	計算
PCI	5.22	27.4	26.5	58.8	43.1	98	88
PCII	5.22	24.5	26.5	58.8	43.1	94	88
SPCI	6.47	34.3	38.2	58.8	45.1	125	91
SPCII	6.47	34.3	38.2	58.8	45.1	108	91

P_{mc}: 曲げひび割れ荷重 P_{vc}: 斜めひび割れ荷重

P_{mu}: 曲げ破壊荷重 σ'_{cl} : 部材下縁の推定応力度

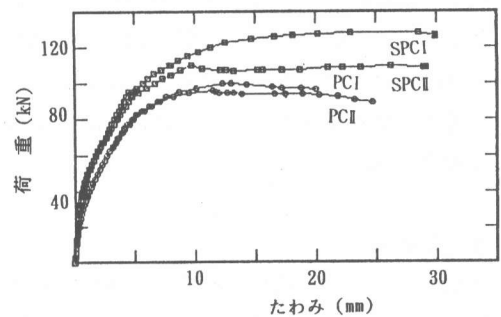


図-11 全部材の荷重-たわみ曲線

いる。通常、はり部材の破壊試験には気中養生された部材が用いられることが多く、その場合、乾燥に伴って部材下縁のコンクリート断面に引張りの収縮応力が生じて、曲げひび割れや斜めひび割れが発生しやすくなる。現行の斜めひび割れ耐力の算定式は、このような収縮応力の影響による耐力低下を無視して求められた経験式であり、したがって、本論文のように実際の収縮応力を考慮して計算した場合、計算値が実測値より小さくなると考えられる⁹⁾。

表-2のように曲げ破壊荷重はPC部材よりSPC部材のそれが2割強大きくっており、部材圧縮縁に配置した溝形鋼による補強効果が確認できた。なお、全部材ともPC鋼材が降伏した後に終局状態に達する、曲げ引張破壊を生じた。ここに、曲げ破壊耐力の計算値は現行の土木学会コンクリート標準示方書の算定式から求めた。ただし、SPC部材の場合は溝形鋼をそれと等価な鉄筋に置き換えて計算した。同表のようにSPCⅡ部材の値がSPCⅠ部材のそれより1割強小さく、両部材間にばらつきが窺われる。これは、SPCⅡ部材の場合、前述のようにプレストレス導入時のひずみ分布の実測値と計算値との相違および終局時のひび割れが片側の載荷点だけに集中したことから判断して、PC鋼材の有効高さが若干小さかったことと載荷荷重が均等でなかったことに起因するものと考えられる。

図-11に全部材の荷重-たわみ曲線を示す。同図からPC部材よりSPC部材の方が若干曲げ剛性や破壊時のじん性の面で優れていることがわかる。これは、部材圧縮部に配置した溝形鋼自身の曲げ剛性とコンクリートの圧壊による耐力低下を溝形鋼が阻止したことによるものと考えられる。

4. まとめ

本論文では、曲げ剛性を有する鋼材を荷重作用時の部材圧縮部に配置したPC部材の時間依存解析法を示すと共に、通常のPC部材と部材

圧縮縁に溝形鋼を配置したSPC部材との比較実験を行い、解析法の妥当性と補強方法の有用性を検討した。以下にその結果を要約する。

(1) 本論文で述べた力学モデルによる時間依存解析法は、溝形鋼で補強されたSPC部材の時間依存解析にも適用可能であり、汎用性に優れた解析手法であることがわかった。

(2) 本論文で提案したSPC部材は、通常のPC部材と比較して、プレストレス分布の改善による曲げひび割れ耐力の増強は勿論のこと、終局時の曲げ破壊耐力の増強や破壊時のじん性改善に有効であることがわかった。

最後に、本実験に際して部材の作製やデータ整理などにご協力戴いた本学工学部土木工学科佐藤武夫技能員に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 池田尚治：世界のプレストレスコンクリートの動向，第24回PC技術講習会，社団法人プレストレスコンクリート技術協会，pp. 1～23，1997.2
- 2) 宮川邦彦：非緊張鋼材の内部拘束力を利用したPC部材に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，第17巻第2号，pp. 719～724，1995.6
- 3) Neville, A. M. Dilger, W. H. and Brooks, J. J.: Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, 1983
- 4) 宮川邦彦：コンクリートおよび同構造物の時間依存現象に関する基礎的研究，学位論文，九州工業大学，1993.2
- 5) 宮川邦彦：力学モデルによるコンクリートの時間依存ひずみの予測，コンクリート工学年次論文報告集，第19巻第1号，pp. 715～720，1997.6
- 6) 宮川邦彦，佐藤武夫：PRC部材の斜めひび割れ耐力について，土木学会第49回年次講演会講演概要集 第5部，pp. 854～855，1994.9