

プレストレストコンクリート部材が持つ固有の復元力特性の探究

横浜国立大学名誉教授 名誉会員 工博 ○池田 尚治
 黒沢建設(株) 名誉会員 黒沢 亮平
 黒沢建設(株) 正会員 工修 平井 圭
 黒沢建設(株) 正会員 博(工) 山口 隆裕

Abstract : This paper is entitled as “Intrinsic Restoration Capability of Prestressed Concrete Structures”. Prestressed concrete structures are considered to have excellent characteristics against static and dynamic loadings due to the effect of the prestress in the members. Although the prestress force is known to become a remarkable intrinsic restoration action in case of cracked situations in particular, the intrinsic restoration capability has not yet been identified quantitatively so far and the prestress force is not necessarily recognized as an internal force different from an ordinary axial force. The prestress force has a potential to restore the member in case of flexural deformation different from reinforced concrete. Moreover, this potential becomes a remarkable intrinsic restoration capability in case of the severe seismic responses. This paper describes the concept and the findings of the intrinsic restoration capability of prestressed concrete structures by analytical and experimental studies.

Key words : Prestressed concrete, Intrinsic restoration capability, Seismic response

1. はじめに

線材に引張力を与えた状態で両端を固定すると線材はその直交方向の力に抵抗できる。従って緊張定着されたPC鋼材を持つプレストレストコンクリート(以下PC)部材は、曲げ変形に伴ってPC鋼材自身の直交方向の抵抗力が付加されるのでこの抵抗力について明確にすることが重要である。特にPC構造の特性を活用して耐震化を図る場合にこのような抵抗性の明確な認識を把握することが重要である。多くのPC技術者はこのようなPC鋼材の有する抵抗性能の存在を直感的に期待しているが現在までこれに関する定量的な検証はなされていなかった。なお、プレストレス力は内力として存在するので緊張材の曲げ変形の影響と内力との整合性を検証する必要がある。PC鋼材が弾性範囲にある限りPC鋼材の緊張力による復元性能は極めて大きく、除荷時にはひび割れも閉じて残留変形もほとんど生じない。このように優れた復元性能を持ち、かつ、プレストレス力によって座屈することがないPC構造はコンクリート柱や橋脚に鉛直プレストレスを導入する工法、柱梁接合部のPC圧着関節工法、などとしてコンクリート建造物の耐震性向上の目的ですでに実際に適用されている。また、耐震性の一層の向上のためにPCの持つ優れた復元性能を建造物の制震構造に活用する技術開発が進められている。このような力学特性を持つPC構造を耐震構造や制震構造などの新しい技術として一層発展させるためにはここで述べるPC構造の基礎的な力学特性の認識とその理論的な解明が必要である。

2. ひびわれの生じない状態でのPC部材固有の力学特性

PC部材はPC鋼材の緊張定着により内力としてプレストレス力が存在する。コンクリートにひび割れがない状態においてこの内力の要素が部材の変形や力学挙動に影響を与えることについて検討する。

2.1 PC 鋼材の緊張力がコンクリート体に与える影響

まず、PC 鋼材の緊張力の定着によって発生するプレストレス力が外力としてコンクリート部材端の断面にノーマルに作用し、部材の曲率に比例して PC 鋼材の緊張力の面外力がコンクリート体に曲げ荷重として作用する釣合状態を対象とする。ここでは部材として下端が固定されたコンクリート柱 (高さ h , 断面積 A) の中心に PC 鋼材が配置され、この緊張定着により中心軸方向に C のプレストレス力が導入されている図-1 の場合を考える。これにより緊張材の曲げ変形とそれによる直交方向の力の関係が求められる。

曲げモーメントを作用させる荷重として柱頭に水平力 P が作用する場合、コンクリート体には図-1 に示すように柱頭断面にノーマルな軸力 C の水平成分 C_s , および鉛直成分 C_v と、PC 鋼材の曲率によって発生する面外力が外力として作用する釣合状態となる。

コンクリートの全断面が有効の場合、梁理論による解析の結果、荷重 P による柱頭部の変位 δ は次式で表わされるようにプレストレス力 C の影響が求められた。

$$\delta = (1 / (1 + (3/10) C h^2 / EI)) P h^3 / 3EI \tag{1}$$

細長比を λ とすれば $\lambda^2 = h^2 / (I / A)$ であるから、上の式は次で表わされる。

$$\delta = (1 / (1 + 0.3 \lambda^2 \sigma / E)) P h^3 / 3EI \tag{2}$$

ここで、 $\sigma = C / A$: プレストレス

柱頭部の水平方向のバネ定数を K , $K_0 = 3EI / h^3$ とすれば、 $P = K \delta$ の関係から

$$K = (1 + 0.3 \lambda^2 \sigma / E) K_0 \tag{3}$$

すなわち、緊張材の曲げ変形による面外抵抗の発生によって水平力 P に対する柱の水平方向の剛性は $[1 + 0.3 \lambda^2 \sigma / E]$ 倍増加する。

通常のプレストレス部材では細長比 λ が 30 以下であるのでここで抽出したプレストレスの効果は高々 5 パーセント以下であり極めて僅かである。ただし、プレストレスの効果によるこのような剛性増加の効果は、緊張材の曲げ変形の効果のみに着目した場合である。

2.2 軸圧縮力が緊張材とコンクリート体に与える影響

PC 鋼材に緊張力を発生させているのはその周囲に存在するコンクリート体の圧縮力である。コンクリート体が圧縮されることによって PC 鋼材に緊張力が発生するのである。図-2 に示すようにコンクリート部材端ではこの緊張力 T の水平成分 T_s および鉛直成分 T_v がプレストレス力の水平成分 C_s および鉛直成分 C_v と逆方向に同じ大きさで PC 鋼材に作用している。部材が曲げ変形する場合にはコンクリート体の圧縮応力の合力が断面中心の軸圧縮力の曲率の影響として作用し、緊張材による曲率の影響と逆向きに同じ大きさで作用する。したがって式 (3) に対応したコンクリート部材の剛性 K_1 は次の式 (4) に示すように減少する。

$$K_1 = (1 - 0.3 \lambda^2 \sigma / E) K_0 \tag{4}$$

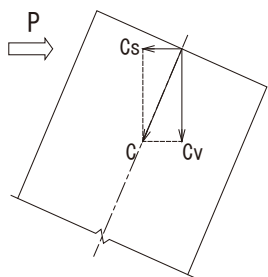


図-1 鉛直柱頂部に作用する水平力 P によって変形する時のプレストレス力 C , その水平成分 C_s , および鉛直成分 C_v

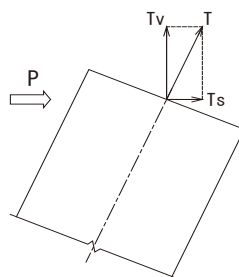


図-2 鉛直柱頂部に作用する水平力 P によって変形する時の緊張力 T , その水平成分 T_s , 鉛直成分 T_v

実際の PC 柱は式 (3), 式 (4) の両式の影響を同時に受けるので結果として緊張材の曲げ変形による剛性増加は発生しないことになる。

以上のことから, 式 (1) から式 (3) までに示した緊張材の曲げ変形による部材の力学的特性の変化はプレストレス力を外力と見做して計算すると存在するが内力であることによりコンクリート体の圧縮力の影響で完全に相殺されるのである。したがってひび割れのないPC部材の力学的特性はプレストレスのないコンクリート体と同一なのであり復元力特性も変化しない。

2.3 単純梁の場合

先ずコンクリート単純梁にPC鋼材の緊張力の曲率の影響のみを抽出する状態を考えてみる。すなわち, 2本の緊張材を外ケーブルとして断面の中立軸の両側に対称配置して緊張し, コンクリート梁の両端で緊張力を保持させた状態でケーブルのみに鉛直荷重を作用させるとケーブルの緊張力の鉛直分力でこの荷重に抵抗できる。次に外ケーブルとコンクリート断面が一体の場合を考えると, 軸圧縮でプレストレスされたコンクリート部分は緊張材と同一形状で曲げ変形し軸圧縮力の曲率の作用で曲げ変形量が増加する。したがって緊張材とコンクリート梁が一体となったPC梁では結果的に双方の効果が相殺されて緊張材の曲率による曲げ抵抗の増加が打ち消されるのである。外ケーブル構造の場合は構造システムが純粋な梁構造と若干異なるが上述の事柄はほぼ同様に適用すると考えてよく, また, ひび割れが発生しているPC梁の場合も同様である。以上に述べた検証により, コンクリートが一定の弾性率を持つ場合, PC部材の力学性状には緊張材の変形による曲げ耐力の増加現象は存在しないことが明らかにされたのである。

3. ひび割れが生じるPC部材の固有な力学特性

PC部材の特徴はひび割れが発生すると図-3に示すように顕著なバイリニア状態の変形性状と優れた復元力特性とを有することである。また, 変位がさらに増大すれば荷重が一定値となるトライリニア形となる。

PC部材ではコンクリート断面にひび割れがない場合, 断面に発生する曲げ応力度による偶力のみが復元曲げモーメントであり, これを除外すると前章で述べたPC鋼材の緊張力とコンクリートの圧縮力の合力とは同一位置に存在して何ら復元力に影響しないが曲げモーメントと合わせた圧縮合力として考える場合には図-4(1)のように示される。しかしながらひとたび曲げひび割れが発生するとコンクリートの圧縮合力 C' は図-4(2)に示すように断面の圧縮側に大きく移動し, PC鋼材の緊張力との偶力によって大きな復元モーメントを生み出す。この復元力が地震時における復元力としてPC建造物の耐震性に大きく寄与するのである。

長方形断面の場合, デコンプレッションモーメントのときの復元モーメントは図-4に示すように $(b/6)C$ であるがひび割れ発生後は2倍以上の $(2b/5)C$ 程度まで増大し, そのあとはPC鋼材の引張力が増大してひずみエネルギーを蓄積しながら更に復元モーメントが増大する。このように変形の過程で材料が弾性状態にある限り除荷時には変形がゼロ近傍に復元し, 健全性が確保される。

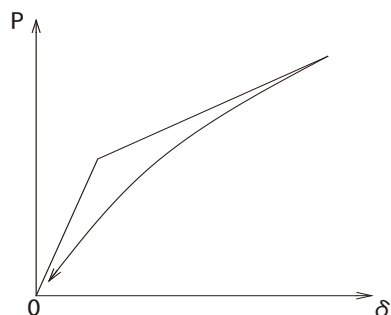


図-3 PC 構造のバイリニアモデル

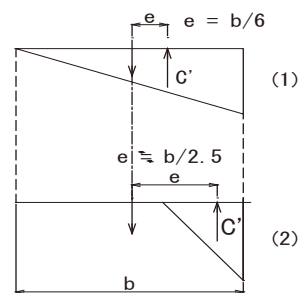


図-4 合力 C' の移動

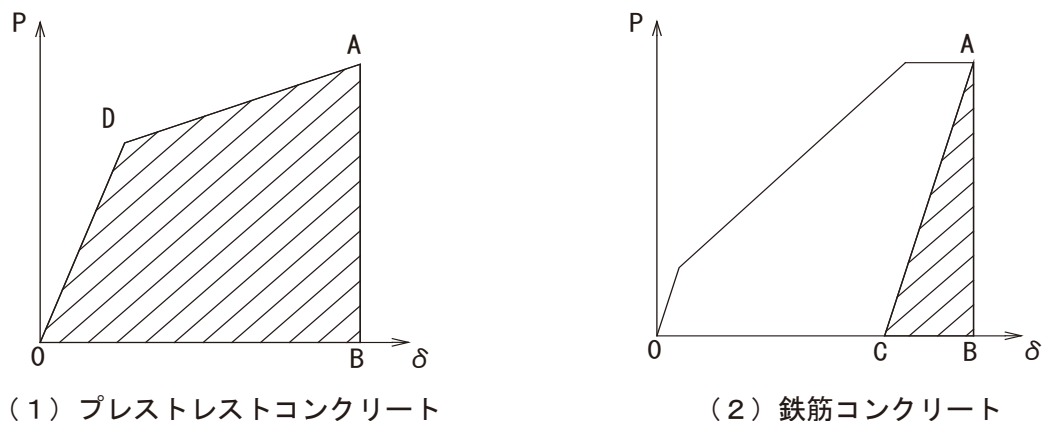


図-5 復元性のエンジンとなるひずみエネルギー (ハッチ部分の面積)

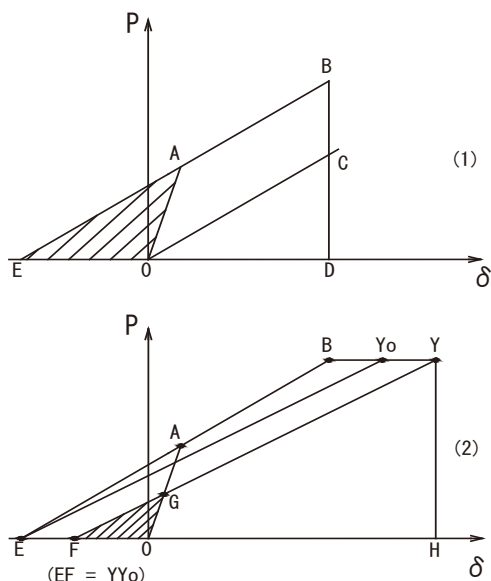


図-6 潜在ひずみエネルギー

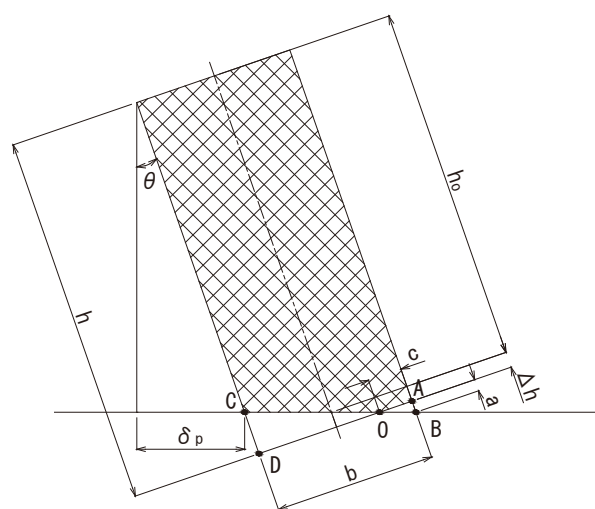


図-7 潜在ひずみエネルギーの説明のための柱の底部の状態

部材が変形してひずみエネルギーが生じる場合、弾性ひずみエネルギーは復元力として保存され、塑性ひずみエネルギーは消費したエネルギーであって復元力には寄与できない。図-5に PC 部材と鉄筋コンクリート部材における大変形時のひずみエネルギーの模式的な相違を示す。すなわち、鉄筋コンクリートの場合には大半が塑性ひずみエネルギーであって復元性能を発揮する弾性ひずみエネルギーはハッチした部分 CAB の面積のみである。これに対して PC 部材ではハッチした部分 OADB の面積で示されるように、変形のほとんどすべてが弾性ひずみエネルギーであって復元性能に全て寄与できる。

曲げを受ける PC 部材の変形によるひずみエネルギーは図-6 (1) に示すように OABD の面積で表わされ、無緊張の PC 鋼材の場合の OCD の面積と比べて圧倒的に大きく地震時の弾性的なエネルギーの蓄積に有利である。PC 部材がこのような大きな弾性ひずみエネルギーを蓄積して優れた復元力特性を有するが、これを可能にするのが図-6 (1) の EOA の面積で表わされる PC 部材の潜在的なひずみエネルギーの存在なのであり、これによって同図の A 点の位置が上昇し PC 部材特有の優れた復元力性能が形成されているのである。ただしこの潜在ひずみエネルギーは PC 部材が降伏荷重を受けなければ単なるポテンシャルであってそれ自身の値は変化しない。しかしながら究極荷重を受けて図-6 (2) の OABY のような応答を示す場合、潜在的に存在していた EO で表わされる潜在復元性能の内の EF (= YoY) が消費されて残存潜在ひずみエネルギーが FOG の面積に減少するが依然として原点回帰の復元性能に潜在的に寄与するのであ

る。ここで Y_0 はPC鋼材の降伏開始時に対応し、 Y は極大変形時に対応する。なお、 B はトライリニア形の模式的な開始点である。

上述のPC部材の潜在的なひずみエネルギーが保有する復元力特性を変形のポテンシャルとして考えてみると、図-7に示すようにPC鋼材の緊張力がゼロになるまで除荷時にひび割れが閉じないような部材下端部の形状の場合に表現が可能である。即ち、部材下端部で O 点を回転中心とした固定点とし、三角形 OAB および OCD 部分のコンクリートを取り除いた柱形状（二重ハッチ部分）とすれば潜在ひずみエネルギー分を含めた変形をすることが可能である。柱部材が鉛直の状態から OCD 部分が閉じて柱部材が傾斜した状態（図-7）を考えると断面中心に配置されたPC鋼材のひずみが緊張ひずみの場合が前者、緊張材のひずみがゼロのときが後者の場合である。図-7の記号を用いてPC鋼材の緊張ひずみ ε および緊張伸び量 Δh は次式で表わされる。

$$\varepsilon = \Delta h / h \quad (5)$$

$$\Delta h = (b/2 - c) a / c \quad (6)$$

$$c = b / 4 \text{ のとき } \Delta h = a \quad (7)$$

$$\text{部材の傾斜 } \theta = 4 \Delta h / b = 4 \varepsilon h / b \quad (8)$$

$$\text{柱頭部変位 } \delta_p = 4 \varepsilon h^2 / b \quad (9)$$

$\varepsilon = 4000 \mu$ 、 $c = b / 4$ 、 $h = 10 b$ のとき、傾きは0.16、柱頭部変位は0.16hであり、PC部材の潜在的な復元性能を定量的に認識できることが示された。

4. PC構造固有の減震性

PC部材のバイリニアな変形特性は地震応答時の固有周期が変化するので共振による応答の増大を回避することができる。PC構造は鉄筋コンクリート構造における鉄筋の降伏による塑性変形によって振動エネルギーを吸収することと異なり、コンクリートやPC鋼材が健全な状態で地震応答を制御できるのでPC構造固有の減震性能を本質的に有していることが分かる。この性能は適切なスケルトンカーブを設定すれば時刻歴応答解析によって容易に確認することができる^{(1), (2), (3)}。

以上に述べた事柄に関しPC構造の耐震性能を考える場合、(1)地震波の作用での動的応答はバイリニア型の特徴によって固有周期が固定化されないために共振を回避できる優れた減震機能を有していること、(2)変形によるひずみエネルギーは弾性ひずみが主であるので優れた原点回帰の復元力特性を有していること、(3)プレストレスによる潜在的なひずみエネルギーを常に保持しているため部材の剛性を大きく保てるので変形量を低くできること、(4)プレストレスによる潜在的なひずみエネルギーは設計想定地震を越える地震に対してPC鋼材の降伏の影響を担保できること、などのPC構造固有の優れた減震性能を有していることは明らかである。

5. 実験による検証

柱供試体を用いて実験を行うことを想定し、実験の容易な小型のPC梁を用いて曲げによる載荷実験を行った。実験の目的はPC単純梁を用いてプレストレスの有無とそのレベルが梁の剛性、復元力特性に関し、ひびわれの有無の状態を検証することである。

供試体は、1辺が100mmの正方形断面、長さは3mのコンクリート梁で、PC鋼材には $\Phi 12.7\text{mm}$ のPC鋼より線を断面の中央に配置したものである。載荷時のスパンは2.8mである。

プレストレス力はプレテンション方式とアンボンド、ボンド有りのポストテンション方式を用いた。プレストレスのレベルは、0 MPa、6 MPa、および12 MPaの3段階とし、コンクリートには圧縮強度が約50 MPaのモルタルを用いた。載荷は1方向の中央1点荷重を途中で適宜徐荷しながら漸増させた。実験の結果、曲げひび割れが発生するまでの荷重に対し、梁の荷重-たわみ関係はプレストレスの有無およびその大きさに

関係なくほぼ同一の直線勾配であった。即ち、緊張材の曲げ変形の影響は認められなかった。

プレストレスされた梁では、ひび割れ発生後はマクロ的にはバイリニア形となる関係が得られ、また、除荷時には良好な原点回帰の復元力特性を示した⁽⁴⁾。

6. 結論

PC 部材が持つ固有の復元力特性について探究するために理論的な考察を行い、次いでこれを実験によって検証した。ここで得られた結論は以下のとおりである。

- (1) コンクリート部材にひび割れが発生していない状態でプレストレス力を PC 鋼材の緊張力、コンクリート体の圧縮力、および曲げ変形により曲率を持つ状態での両者の影響について分類して検討した結果、プレストレス力の効果はそれらが総合された状態で相殺され、結果的にプレストレスのない場合と同一になることが理論的および実験的に明らかにされた。すなわち、緊張された PC 鋼材が部材の曲げ変形によって曲率による分力が発生し曲げ抵抗への寄与が生ずるがコンクリート体の圧縮の合力による逆向きの作用によって打ち消されるのである。
- (2) 部材が変形してひずみエネルギーが生じる場合、弾性ひずみエネルギーは復元力として保存されるが、塑性ひずみエネルギーは消費したエネルギーであって復元力には寄与できない。したがって PC 部材は部材として非線形の挙動を有しながら材料は弾性挙動を保持して優れた復元性能を持つのである。
- (3) 部材に導入されたプレストレス力によるひずみエネルギーは潜在的なエネルギーであり復元性能には直接寄与しない。しかしながら部材に荷重が作用したときに生ずる部材の剛性の保持およびひずみエネルギーの容量増大に大きく寄与する。一方、この潜在的なひずみエネルギーは、PC 鋼材が降伏するような大きな荷重が部材に作用したときに塑性ひずみ発生によって減少する復元性能を担保することにより部材の復元性の確保に寄与することが明らかにされた。
- (4) PC 構造の耐震性能を考える場合、(a) PC 独特のバイリニア型の弾力的な特性によって固有周期が固定化されないために地震動に対し共振を回避できる優れた制震機能を有していること、(b) 弾性ひずみが主であるので優れた原点回帰の復元力特性を有していること、(c) プレストレスによる潜在的なひずみエネルギーを常に保持しているため部材の剛性を大きく保てるので地震時の揺れ幅を小さくできること、(d) プレストレスによる潜在的なひずみエネルギーは設計想定地震を越える地震に対して PC 鋼材の降伏の影響を担保して復元性能を確保できること、など PC 構造固有の優れた制震性能を有していることが明らかされた。

参考文献

- (1) 池田尚治, 森拓也, 吉岡民夫, プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究, プレストレストコンクリート技術協会会誌, 第 40 巻 5 号, 1998 年 9 月号
- (2) Ikeda, Shoji, Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns and Improvement by Vertical Prestressing, Proceedings of the 13th FIP Congress on Challenges for Concrete in the Next Millennium, Vol. 2, pp.879~884, 1998, Amsterdam
- (3) 鈴木宣政, 森拓也, 山口隆裕, 池田尚治, プレストレストコンクリート橋脚の復元力モデル, 第 9 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.673~678, 1999 年 10 月, プレストレストコンクリート技術協会
- (4) Kurosawa, R., Ikeda, S., Hirai, K., Intrinsic Restoration Capability of Prestressed Concrete Structures, Proceedings of the Ikeda & Otsuki Symposium, pp.189~196, 2016, Tokyo Institute of Technology