

弾性エネルギー—一定則によるP C構造物の耐震設計

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 博(工) 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 “Seismic Design of Prestressed Concrete Structures based on Elastic Energy Balance Concept”. The prestress force has a remarkable intrinsic restoration reaction in case of seismic responses according to the bilinear characteristics in the force vs. deformation relationships. Performances of the beam column joints subjected to horizontal earthquake motions are the most essential mechanical behavior in the prestressed concrete framed structures. The Prestressed Articulation Joint System (PAJS) is a definite solution together with the elastic energy balance concept where precast beams and precast column elements are jointed together.

“Elastic Energy Balance Concept” is a clear concept to express the excellent peculiarity of prestressed concrete structures against moderate and severe repetitive earthquake motions. A practical and useful formula of elastic energy balance concept was successfully obtained here.

Key words : Seismic design, Elastic energy balance concept, Prestressed articulation joint system

1. はじめに

プレストレストコンクリート(P C)構造は曲げ変形時にバイリニアの弾性非線形特性をもつ^{1)~5)}。鉄筋コンクリート構造ではニューマークのエネルギー一定則が用いられ、塑性変形によるエネルギー吸収により地震力に対処するが地震後に残留変形を許すこととなる。これに対してP C構造は材料が弾性範囲でバイリニアな変形性能を発揮し、かつ、復元性を有するので地震後に残留変形を残さないような設計が可能となる。これにより従来の「エネルギー一定則」を発展させた「弾性エネルギー一定則」を新しく構築することにより地震後に業務が継続して行えるBCP(Business Continuity Plan)の可能な構造による耐震設計法を確立することが可能である。P C固有の優れた耐震性を「弾性エネルギー一定則」によって妥当に評価し耐震設計に取り入れることは今後の地震防災にとって必須である。

2. モデル化

P C部材は曲げを受けて変形するとき、**図-1**に示すようにバイリニアの弾性非線形特性を示しコンクリートのひび割れ現象を除けば材料特性が弾性状態であるために除荷時には原点に戻るような復元力特性を示す。この荷重変位の関係はプレストレスやプレストレス力のレベル、緊張力導入時のP C鋼材の引張応力度、P C鋼材の降伏強度、コンクリートの引張強度、P C鋼材とコンクリートとの付着の程度、P C鋼材の断面配置および重力の影響などによって異なってくる。P C部材の弾性バイリニア特性を基本としたひずみエネルギーを考えると、ニューマークのエネルギー一定則に対比する形で**図-2**に示すような「弾性エネルギー一定則」の概念を誘導することが考えられる。一方、ニューマークのエネルギー一定則の場合には部材の荷重変位の関係を完全な弾塑性体とするバイリニア型が基本であるため取り扱いが容易であり塑性率と応答地震力との関係の定式化がなされ、広く耐震設計で用いられている。しかしながらP Cにおける塑性を含まない弾性バイリニアの場合の「弾性エネ

「ルギー一定則」を検討するには上述のような多くのパラメーターを考慮したモデル化が必要であり、そのためには以下のように段階的な把握が必要となる。ただし、基本的なモデル化を図るために断面は長方形断面とし、緊張材は断面の中心に配置されている場合を代表的に考える。

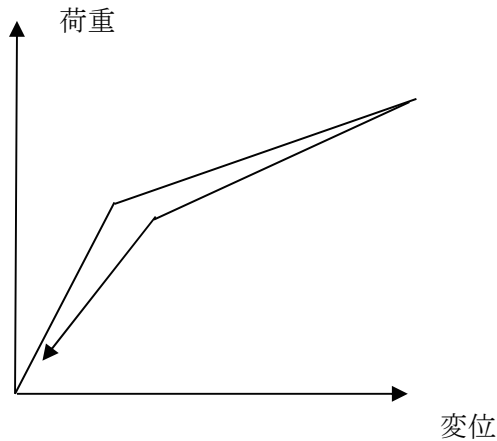


図-1 曲げに対するPC部材のバイリニア特性

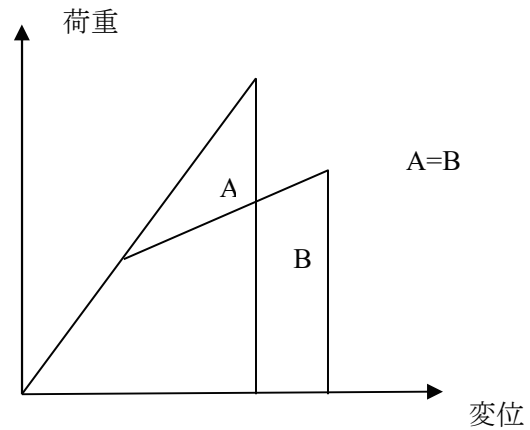


図-2 弾性エネルギー一定則の概念 (面積AとBとが等しい)

2.1 PC鋼材を降伏点まで緊張して定着した基本状態

PC鋼材を降伏点直前まで緊張してそのまま定着したとすれば荷重の増加によってコンクリートにひび割れが発生するまでは断面の中心に配置されたPC鋼材の応力とひずみはほぼ一定に保たれるがひび割れが発生すれば図-3に示すように変形は一気に進む。ただし、ここでは地震動の繰り返し作用を考えコンクリートの引張強度を無視する。

プレストレスのレベルあるいはプレストレス量の大小に応じてディコンプレッションとなるときの荷重は図-3に示すように変化する。ディコンプレッション以降においても緊張材に降伏応力度が発生しても緊張力自身は変化しない。荷重の増加に伴って断面の抵抗曲げモーメントは断面が究極(Ultimate)曲げモーメントに達するまで徐々に増加する。図-4に示すようにディコンプレッション時とPC鋼材の降伏開始時の抵抗曲げモーメントは腕長の変化で表わすことができ、腕長が $0.167h$ から $0.33h$ に増大するので曲げモーメントは2倍に増加する。一方、この間に曲率は4倍に増加する。図-5に示すようにこの場合の荷重変位のバイリニアな関係を定量的に無次元で表すことができる。

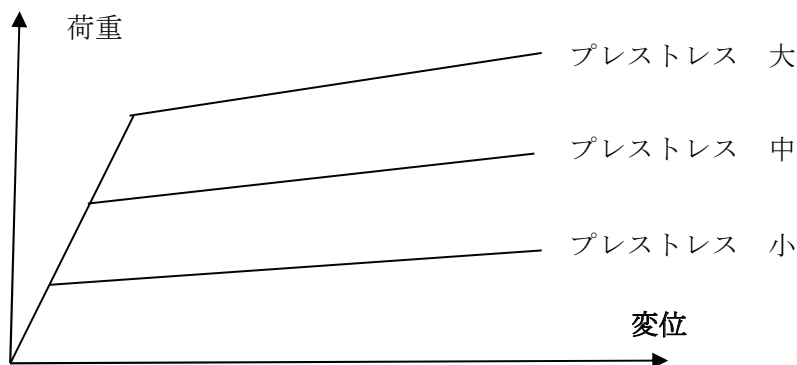


図-3 プレストレスの量の影響

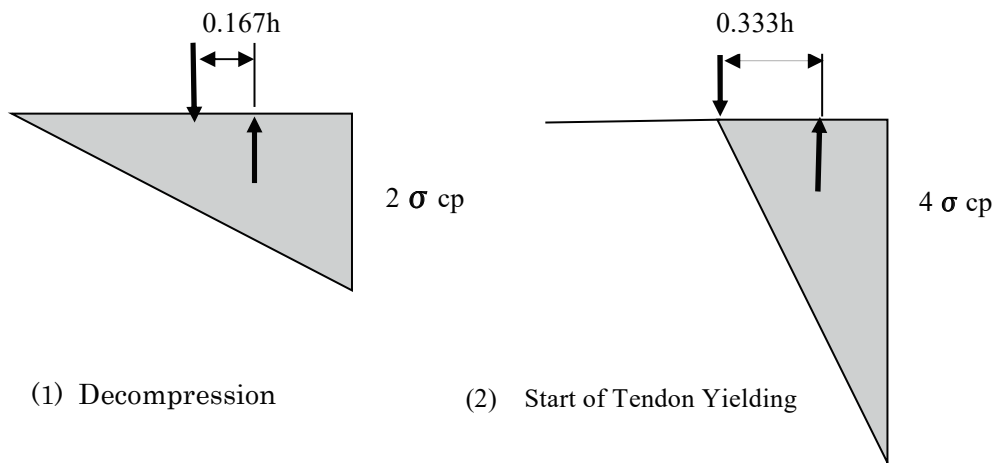


図-4 断面の応力分布の変化

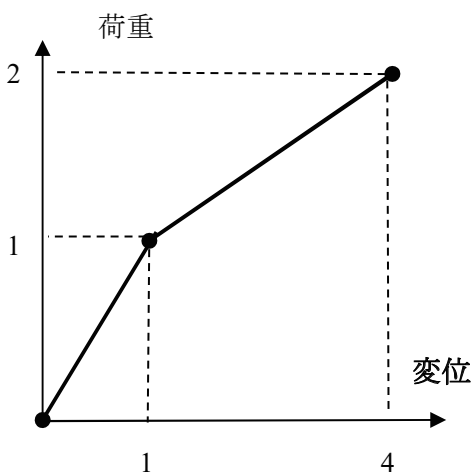


図-5 荷重変位の基本関係

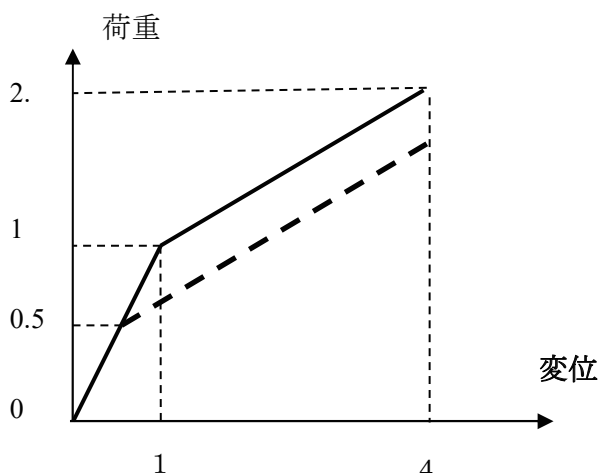


図-6 降伏点緊張状態と50%緊張状態(破線)

2.2 PC鋼材が無緊張時の荷重と変位

コンクリートの引張強度を無視すると断面に一様に導入されたプレストレス σ_{cp} を持つ部材が曲げを受けて最外縁の応力がゼロとなるディコンプレッション時の曲率 Φ_c は $2\sigma_{cp} / E_c / h$ で表わされる。一方、無緊張の場合にPC鋼材が降伏開始するときのPC鋼材の応力を σ_{py} 、断面における中立軸からPC鋼材までの距離を $0.4h$ とすれば曲率 Φ_y は $\sigma_{py} / E_p / 0.4h$ で表わされる。すなわち、その比率は $\Phi_y / \Phi_c = (\sigma_{py} / \sigma_{cp}) (E_c / E_p) / 0.8$ である。たとえば単純に考えるために σ_{py} を 1400MPa 、 σ_{cp} を 15MPa 、 E_p / E_c を 7.0 とすれば約 17 となる。曲率と変位が比例関係にあるとすれば、PC部材のディコンプレッション時と無緊張のPC鋼材降伏時との変位の比率は、この1例の場合 17 であり、そのときの荷重は腕長を $0.45h$ とすれば $0.45 / 0.167 = 2.69$ であり、ディコンプレッション荷重の約 2.7 倍である。以上の関係を用いて無緊張の場合の荷重変位の直線関係を無次元的に図示することができる。ここで示した値は図-3の各線の究極状態(Ultimate state)の開始の大略の位置となる。

2.3 PC鋼材の降伏点未満で緊張定着した状態

PC鋼材を降伏点未満で緊張した部材のバイリニア関係は、コンクリートに引張応力が発生して断面が開くディコンプレッション状態から図-5の第2直線と平行な第2直線となる。何故ならば図-4を参照すればこの点(ディコンプレッション時)の4倍の変位のときに荷重が2倍になり、第2

直線の勾配が一致するからである。以上により、P C鋼材の降伏点の50%で緊張定着した場合の荷重変位の関係を図-6に示すことができる。

3. 弾性エネルギー一定則の標準的モデル

ここまでで求めた手順を用いた場合の弾性エネルギー一定則の標準的なモデルとして図-7に無次元のバイリニア関係を示す。図-5と同様にP C鋼材を降伏点まで緊張して定着する場合を基本としてディコンプレッション荷重とそれに対応する変位とをそれぞれ1.0(Unity)とし、変位が4.0のときの荷重を2.0として単純化した無次元化モデルである。この荷重変位の範囲では材料は弾性範囲である。

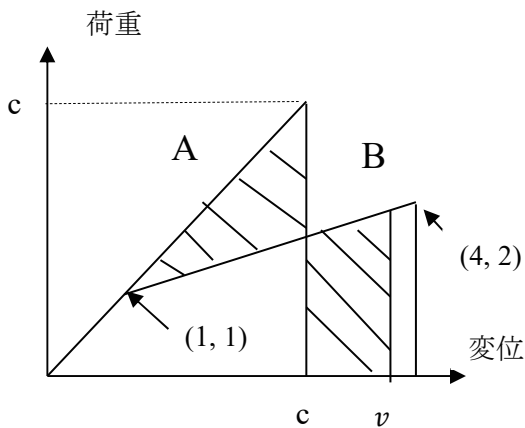


図-7 弾性エネルギー一定則の無次元モデル

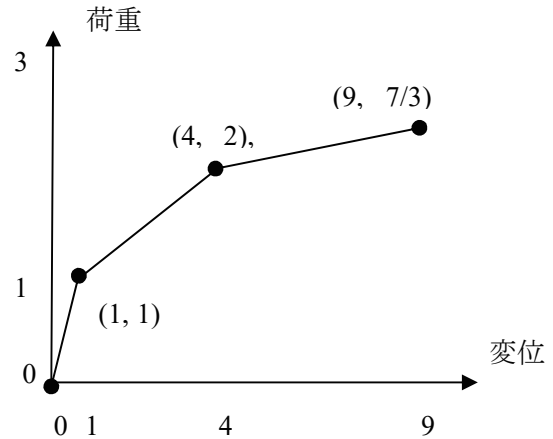


図-8 変形の大きい場合のモデル

4. 弾性エネルギー一定則の定式化

ニューマークのエネルギー一定則の式と同様な弾性エネルギー一定則を導く。図-7を参照し、 $A = B$ となるように v を変数、 c を解として定式化する。

$$A = \int_1^c x dx - \frac{1}{3} \int_1^c (x+2) dx = \frac{1}{3}(c-1)^2 \quad (1)$$

$$B = \frac{1}{3} \int_c^v (x+2) dx = \frac{(v^2+4v-c^2-4c)}{6} \quad (2)$$

$A = B$ より

$$3c^2 - v^2 - 4v + 2 = 0 \quad (3)$$

$$c = \sqrt{\frac{(v+2)^2}{3} - 2} \quad (4)$$

v が大きな場合には大略、 $c = \frac{v+2}{\sqrt{3}}$ である。ニューマークの式は、 $c = \sqrt{2u-1}$ である。

以上の関係から変位が4.0の場合を考えると、そのときの荷重は2.0であるが弾性エネルギー一定則を適用すれば式(4)で求められるように3.2程度の地震力に抵抗できることが示されている。緊張力を緊張材の降伏点の50%とする場合は図-6の破線で示したとおりであり、ディコンプレッション荷重は降伏点緊張の場合の50%であるが変位を10倍まで許容すれば弾性エネルギー一定則により式(4)を用いてディコンプレッション荷重の7倍程度の地震力に抵抗でき、しかも残留変位を生じない。

5. 変位の大きい場合のモデル

PC部材が無次元化した変位レベルの4を越えても部材が塑性域に入る前までは相当程度の復元特性を有することが期待できる。その領域のモデル化を考える場合にはトライリニアな荷重変位曲線をモデル化するのがよいと思われる。図-4に示した断面の応力分布の延長上として中立軸から圧縮上縁までの距離を断面高さの1/3となるときのトライリニア弾性の限界状態とすればそのときの圧縮合力の位置は上縁から断面高さの1/9であり、抵抗曲げモーメントおよび変位はそれぞれディコンプレッション時の7/3,すなわち,2.33倍および9倍である。これを図示すれば図-8となる。PC部材としてはこれ以上の変位が塑性を含む領域であり、一般に究極限界状態(Ultimate limit state)の変位は塑性域の始点から少なくとも2倍以上の位置にある。したがって究極時の塑性によるエネルギー吸収を考慮すればPC部材の地震に対する究極の安全度は極めて大きいことがわかる。

6. 耐震設計への適用

耐震設計の基本は、サイトスペシフィックである地盤の地域的、地形的および地質的特性と、ストラクチャースペシフィックである構造物特性とが構造物の共振状態を発生させないように配慮することである。しかしながら地震波それ自身の特性もあり、地震動が応答によってある程度増幅することは避けられないと思われる。免震構造を採用すれば衝撃的な地震力や共振状態の回避もある程度可能であるが事前の情報の把握には限度があり、また、想定外の大きな地震動や余震が繰り返し発生する可能性もある。一方、耐震設計に際してはBCP(災害時の事業継続計画)の観点から地震時および地震後の構造物の健全性を図ることが極めて重要である。PC構造の優れた復元力特性と共振回避性能とを適用して耐震性能の向上と機能創造を図ることが求められる時代である。

現在の耐震設計法の基本は、レベル1と呼ばれる発生確率の高い地震動と、レベル2と呼ばれる発生確率の低い地震動の2段階のレベルの地震動に対してそれぞれ別個に耐震性能を検討することである。まずはこのような耐震設計法への適用を考えてPC固有の弾性エネルギー一定則を検討する。

6.1 レベル1およびレベル2地震動への対応

50年に1度程度遭遇する地震動に対してはまったく健全で躯体にひび割れの発生を許さない設計が好ましい設計法である。弾性エネルギー一定則を示す図-6を参照し、緊張力を降伏点の50%とすればディコンプレッション荷重をレベル1の地震力とすればよい。この状態で設計されたPC構造はコンクリートの全断面が有効であるから部材の剛性がひび割れ断面の場合と比べて相当に大きく変形を制御できる。

レベル1に対して以上のように設計されたPC構造はそのままレベル2に対しパーシャル設計としてディコンプレッション以降の変位の増大を許すことにより、弾性エネルギー一定則からこの変位の増大に見合った地震力への対応が可能である。しかも材料は弾性範囲であるから地震後の復元性も十分に確保できる。さらに、想定外の激震が作用してもレベル1の変位の10倍程度までは弾性範囲で復元性を確保できるのであり、対応する地震力もレベル1の地震力の7倍程度に対し弾性範囲で対応可能となる。

6.2 PC圧着関節工法への適用

ラーメン構造の場合、柱と梁の接合部が耐震上最も重要な部位となる。とくにプレキャスト材を用いる場合には接合部が構造上の要となる。この接合部にPC圧着関節工法を採用することにより極めて優れた耐震性を付与することができる。この場合のディコンプレッション荷重をレベル1の荷重とし、緊張力のレベルを降伏の50%として安全性を高めるのがよい。この場合の弾性エネルギー一定則のモデルは図-6の破線で示すものとなる。PC圧着関節工法に関しては我国で大地震遭遇時のBCPも含めた無被害の実績があり、また、トルコでは同国の大地震での無被害の実績が高く評価されている。

著者らは緊張力を規格降伏点の 50%として安全性を高めることを提案し実行している P C 圧着関節工法の設計法をニューマークのエネルギー一定則の例に倣って国際的に KEB 設計法と称する⁶⁾。なお、P C 圧着関節工法では柱の梁受け部にコーベルを配置して架設時の作業性を高めるとともに地震動の繰り返し作用に対してせん断による接合面のスリップや梁の落下を防止する機能を持たせている。

6.3 重力の影響

柱には重力によって自然に鉛直のプレストレスが導入される。これによりディコンプレッション荷重が増大する。しかしながら地震動には上下動が発生すること、ラーメン構造には剛体的な荷重作用があって柱に想定外の引張力が作用する場合があること、などを考えると弾性エネルギー一定則のモデル化に際しては重力によるプレストレスを含めないのが安全側の設計であると考えられる。

7. 結論

鉄筋コンクリート構造や鋼構造では耐震設計にニューマークのエネルギー一定則が用いられ塑性変形によるエネルギー吸収を評価して地震力に対処するが、地震後に残留変形を許すこととなる。これに対し P C 構造では材料が弾性範囲でバイリニアな変形性能を発揮でき復元性を有するので地震後に残留変形を残さない画期的な設計が可能となる。この特性を合理的に適用するには「弾性エネルギー一定則」による評価が有用である。これを用いることにより地震後に業務が継続して行える BCP の可能な P C 構造による耐震設計法を確立することが可能である。本論文では次のことが明らかにされた。

- (1) P C 部材のバイリニア荷重変位関係が P C 固有の普遍的特性を持つことを見出し、モデル化した。
- (2) ニューマークのエネルギー一定則に対応した「弾性エネルギー一定則」を定式化した。
- (3) 「弾性エネルギー一定則」はプレキャスト柱とプレキャスト梁との接合部に P C 圧着関節工法を適用する場合に極めて有用である。この場合、圧着接合におけるプレストレス力を緊張材の降伏点の 50%として安全性を高めた設計法⁶⁾は地震動が想定外の事象を生ずる可能性があるので極めて有用である。この場合の安全性については「弾性エネルギー一定則」の概念を適用することにより耐震設計の中で明確に評価することができる。

参考文献

- 1) 池田尚治, 黒沢亮平, 平井圭, 山口隆裕, 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, 第26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. 353~358, 2017年10月, プレストレストコンクリート工学会
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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 P C の発展に関するシンポジウム論文集, pp. 673~678, 1999年10月, P C 技術協会
- 5) 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
- 6) Ikeda, S., Kurosawa, R., Kurosawa, R., Hirai, K., Yamaguchi, T., Elastic Energy Balance Concept for the Design of Resilient Prestressed Concrete Structures against Repetitive Severe Earthquakes, 5th fib Congress, Oct.2018, Melbourne