

# PC構造物に対する耐震要求性能と次世代高耐震構造

運上 茂樹\*

## 1. 道路橋に対する耐震要求性能

道路橋の技術基準である道路橋示方書は、平成7年1月の兵庫県南部地震による橋梁の甚大な被害の経験を踏まえ、平成8年11月に改訂された<sup>1)</sup>。ここでは、従来の震度法による耐震設計に加えて、地震の影響が支配的な橋脚、基礎、支承部、落橋防止システムなどの構造部材等は、地震時保有水平耐力法により耐震設計するように改訂された。大規模地震時に、構造物にどのような損傷が進展し、非線形域においてどのような耐力や変形性能を発揮できるかを追跡しながら設計する地震時保有水平耐力法が耐震設計法の中心となっている。

道路橋示方書では、地震に対する耐震要求性能として表-1に示す目標が規定されている。すなわち、比較的生じる可能性の高い中規模程度の地震に対しては、健全性を損なわないこと（降伏状態を超える損傷を生じないこと：弾性限界）、大正12年の関東地震のような比較的距離をおいて起こるプレート境界型の大規模地震や平成7年の兵庫県南部地震のようなマグニチュード7級の内陸直下で起こる地震による地震動に対しては、橋の重要度に応じて、落橋に至るような致命的な被害が生じないように主要構造部材の水平耐力が低下しはじめる状態の前にあること（終局限界）、あるいは、橋としての機能の回復をより速やかに行うためにこの限界よりもさらに余裕をもった状態であること（復旧限界あるいは修復限界）が、基本的な橋の耐震性能の目標として位置づけられている。

このような耐震要求性能に対して構造設計上の限界状態を設定し、応力、変位、ひずみ、あるいは保有水平耐力、許容塑性率、残留変位などを指標として設計照査を行う。

さらに、道路橋示方書では、構造設計思想として橋全体としてねばり強い構造を目指すことを目的に、塑性ヒンジは確実にエネルギー吸収を図ることが可能な橋脚基部等に生じるように設計すること、非線形応答を許容してもよい構造部材と弾性域にとどまっている必要のある構造部材を区別して適切に構造系を構成することが解説されている。

道路橋におけるPC部材に関しては、現状では必ずしも十分な震災経験もなく、また、地震力を想定した繰返し荷重を受けるPC部材の実験的な検討も必ずしもまだ十分ではないのが実状である。道路橋示方書の中では、ラーメン橋脚を一例にとり、梁部材にプレストレスを導入している場合には一般にエネルギー吸収の少ない非線形履歴特性を有するなど構造条件によっては降伏以降の挙動やその影響が未解明の部分があること、さらに、被災後の修復性の観点などから、現段階ではPC部材にエネルギー吸収を図る主たる塑性ヒンジを誘導することを避けることとされている。しかしながら、鉄筋コンクリート構造と同様にPC構造でもこうした非線形域の特性を十分に明らかにすることにより、PC構造の非線形域の特性を生かした耐震設計や高耐震構造の実現も可能と考えられる。

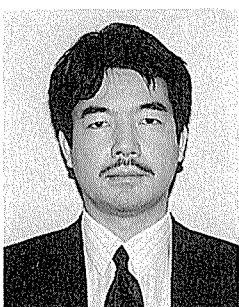
## 2. PC橋の耐震性能のポイント

PC部材の耐震性能を考えた場合、一番重要なことは何であろうか。基本は、繰返し荷重を受ける非線形域の特性を十分に理解することではないかと考える。

平成8年の道路橋示方書の改訂に伴って、新設、既設ともに主として規模の大きいPC橋の大規模地震に対する耐震安全性の照査が静的非線形解析（プッシュオーバー解析）や非線形動的解析などにより実務レベルで検討されるようになって<sup>2)~6)</sup>。

たとえば、動的解析の一例として、図-1に示す3径間PCラーメン橋の例を示す<sup>2)</sup>。主たる塑性ヒンジは、橋脚の上下端に発生するが、PC部材である上部桁の曲げモーメントに対する照査結果を示すと図-2のとおりとなる。橋軸方向では側径間の支間中央部および中央径間のインフレクションポイント付近で、橋軸直角方向では中央径間の支間中央部で、最大曲げモーメントが初降伏モーメント程度まで生じている。本例では、中空PC桁の非線形域の挙動特性の解明や解析に用いた力学モデルが十分ではないこと、さらに地震後のPC桁の修復性を考慮し、PC部材には降伏が生じないように鉄筋量などを変更して断面設計を行っている。しかしながら、支間長や橋脚高さなどの構造条件によっては、PC部材である上部構造が非線形挙動を余儀なくされる可能性は容易に予想され、大規模地震において耐震設計上の配慮が重要となる構造部材となる。

道路橋示方書に規定される地震時保有水平耐力法に基づく耐震設計では、前述のように構造物の非線形域の挙動を追跡して耐震設計を行うことが必要不可欠である。このためには、繰返し地震力を受ける部材の非線形域の履歴特性と各種の限界状態を明らかにすることが最も基本となることは言うまでもない。すなわち、安全性を確保できる終局



\* Shigeki UNJOH

建設省土木研究所  
耐震技術研究センター  
耐震研究室

表-1 道路橋の耐震設計で考慮する地震動と目標とする橋の耐震性能

耐震設計で考慮する地震動	目標とする橋の耐震性能		耐震計算法	
	重要度が標準的な橋 (A種の橋)	とくに重要度が高い橋 (B種の橋)	静的解析法	動的解析法 (地震時の挙動が複雑な橋)
橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動	健全性を損なわない		震度法	時刻歴応答解析法
橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動	タイプIの地震動 (プレート境界型の大規模な地震) タイプIIの地震動 (兵庫県南部地震のような内陸直下型地震)	致命的な被害を防止する	地震時保有水平耐力法	応答スペクトル法

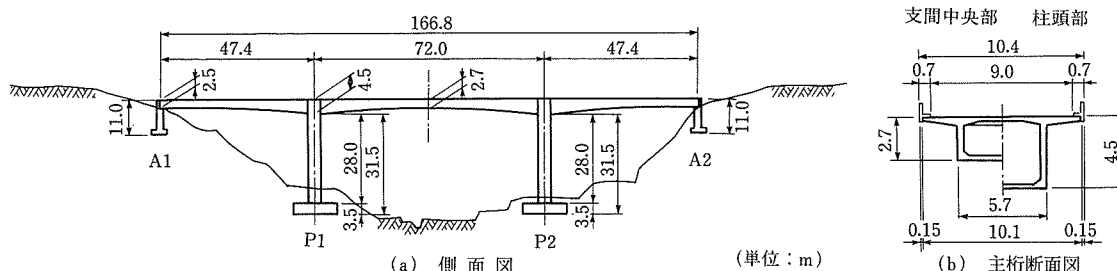


図-1 3径間PCラーメン橋

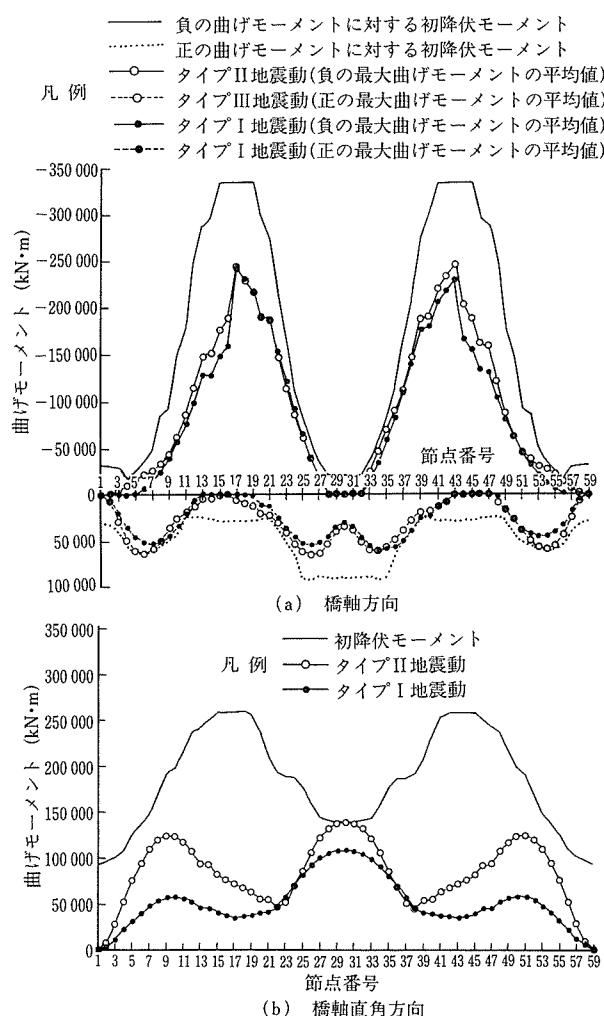


図-2 非線形動的解析による上部構造の曲げモーメントに対する照査結果

限界, さらに, 地震後の構造物の供用性を確保するための使用限界, 地震後の早急な補修復旧を可能とする修復限界に対応するそれぞれ必要な耐震性能を満足させることが必要となる。

PC構造物の非線形域の履歴特性に関しては, これまでいくつかの解析的, 実験的研究がある<sup>7)~14)</sup>。プレストレスの導入量にもよるが, 曲げと軸力を受ける一般的なPC部材の非線形域の基本的な特性をモーメント-曲率関係で見ると, 図-3に示すようなイベントが想定される。すなわち, ひび割れ, 軸方向鉄筋の降伏, PC鋼材の降伏, PC鋼材の終局・破断あるいは圧縮側コンクリートの破壊, である。こうしたイベントが鉄筋やPC鋼材の配置方法や配筋量, コンクリート強度などに応じてどういった順番あるいはどういった特性で生じるかを知ることが基本になる。

PC構造の非線形域の履歴特性を考察してみると, 以下のような特徴が窺える(図-4~7)。

- ① PC部材は, 高強度の構造材料(PC鋼材およびコンクリート)を利用することによって耐力を大幅に大きくできる可能性がある(図-4。このため, RC構造より自重の軽いスレンダーな構造物を実現可能)。
- ② PC鋼材が高強度材料であることから復元可能な弾性変形範囲を拡大することができる(図-4。過大な作用荷重を受けても鋼材応力度が弾性限以下であればひび割れは再び完全に閉じ, また, 同時に耐久性も高くできる)。
- ③ 部材の耐力の低下あるいは荷重を保持できなくなる終局状態は, PC鋼材の破断あるいは圧縮側コンクリートの破壊で決まる。ただし, 圧縮縁のコンクリートが外側から徐々に破壊してもPC鋼材が復元特性を保持している限り, 中立軸が移動することにより完全にコンクリートが圧縮力を保持できなくなるような破壊が生じない限り, 水平耐力が急激には低下しにくく, 結果

としてねばり強い破壊モードを有する。ただし、圧縮側のコンクリートの保持のためには、コンクリートの適切な拘束が必要となるとともに、部材の十分なせん断耐力とPC鋼材そのものやその定着部の構造特性が重要となる。なお、損傷したPC部材の復旧性・修復性を考えた場合、どの損傷まで許容できるか、また、その復旧工法を明らかにする必要がある。

- ④ 鉄筋とPC鋼材の組合せにより鉄筋降伏後の非線形特性のバイリニア特性の2次勾配を大きくすることができる。これによって、地震時の最大応答変位および残留変位を小さくすることができる(図-5)。
- ⑤ 荷重履歴を受けてその荷重の除荷時の復元特性がPC鋼材の緊張力に支配されるために、通常のRC構造に比較し、原点指向型の履歴特性を有する<sup>8), 9)</sup>(図-6)。このため、RC構造に比較し、履歴曲線に囲まれる領域が小さくなり、エネルギー吸収性能は相対的に小さくなる。一方、原点指向を有するため残留変形は小さくなる。
- ⑥ 鉄筋、PC鋼材の配置方法により正負非対称の復元力特性を有する(図-3)。この特性によって、方向性をもたせた復元力特性を付与・発揮できる部材をつくることができる。
- ⑦ 引張力と曲げを同時に受ける部材の場合には、軸力

一曲げモーメント相関関係より曲げに対する耐力を大きくすることができる。このため、コンクリートが本来得意領域とする圧縮状態に保つことにより耐力特性を向上することができる(図-7)。ただし、コンクリートの圧縮ひずみで終局が決まる場合は、当然ながら変形性能は小さくなる。

以上は、耐震設計を考えた場合にとくに重要な特性ということではなく、一般に知られるPC構造部材の基本的な非線形域の特性と考えられる。ただし、こうした特性を十分に理解し、活用することにより、より合理的な耐震構造を実現できる可能性がある。このため、今後、実験データを増やし、設計レベルで活用可能な履歴復元力モデルを確立するとともに、設計上重要となる限界状態の評価方法を明らかにしていくことが重要と考える。

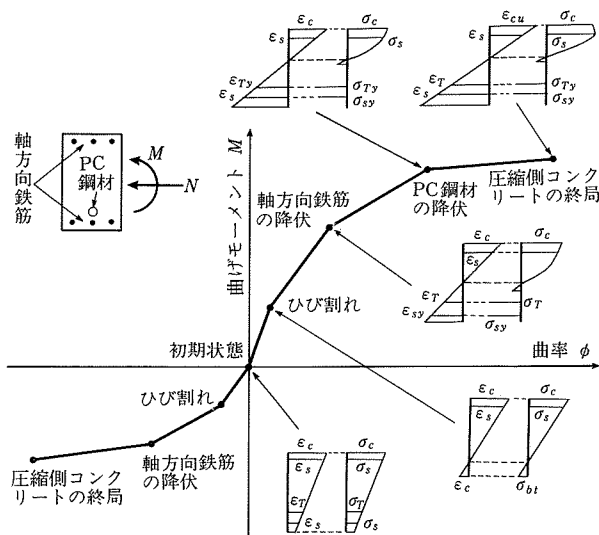


図-3 曲げと軸力を受ける一般的なPC部材の非線形域の基本的な特性

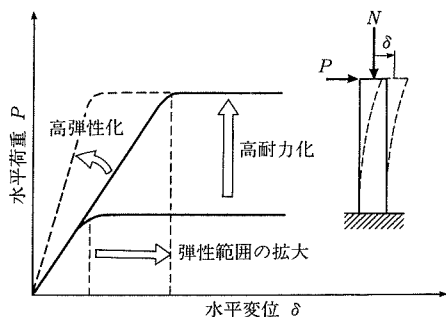


図-4 弾性変形範囲の大きい高耐力部材

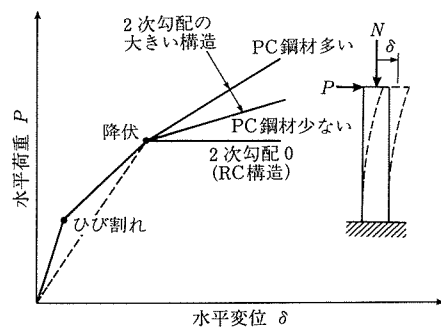


図-5 2次勾配の大きい非線形履歴特性

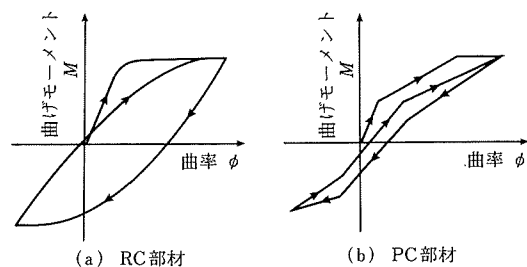
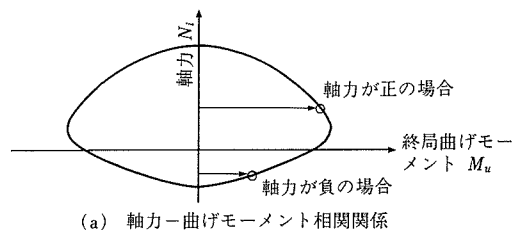
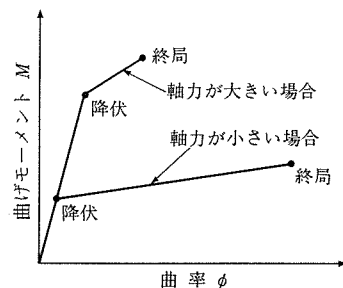


図-6 非線形履歴特性<sup>8)</sup>



(a) 軸力-曲げモーメント相関関係



(b) 耐力と変形性能

図-7 軸力-曲げモーメント相関関係

### 3. PC構造のメリットを生かした次世代高耐震構造

第2章に示したPC構造の基本的な特性を踏まえると、PC構造を活用することにより従来構造よりも大幅に性能を向上させた高耐震構造を実現することが可能と考える。土木研究所においても新材料や新構造を活用した次世代の高耐震構造の開発に関する研究に取り組んでいるところである。

地震に対する高性能といってもいろいろな性能が考えられる。構造全体を想定して考えられるのは、

- ① 地震被害を受けないあるいは受けにくい耐震構造 (弾性限界, 終局限界の高性能化)
- ② 地震被害を受けても早期に復旧可能な耐震構造 (復旧限界・修復限界の高性能化)

などが考えられる。従来技術と同等のコスト, あるいは, 多少のコスト増で従来構造に比較して大幅に耐震性能を向上することができれば非常に有用と考えられる。高強度材料であるPC鋼材を用いるPC構造はこうした点で非常に有利になり得る構造の一つと考える。

構造物の耐震性能を高める方法としては, 構造的には, 一般に, ① 耐力を高める, ② じん性能を高める, ③ 作用する地震力を低減する, 方法が考えられるが, 高耐震構造としてPC構造を活用できるものを整理してみると, 表-2のとおりとなる。

高強度材料を活用したPC構造の活用により, 容易に高耐力構造 (高曲げ耐力, 高せん断耐力), また, コアコンクリートの拘束を高めることにより高じん性構造が実現できる。また, PC鋼材を弾性範囲で活用することにより弾性挙動領域の広い構造, PC部材の履歴復元力特性を適切に与えることにより地震後の残留変位を小さくすることができる<sup>12), 13)</sup>。

さらに, 近年コストの観点で優れるコンクリート構造の長大橋への適用, あるいは適用の検討が行われつつある。

図-8に示すように長大橋の主塔タワーが, 橋軸直角方向の地震力を受けた場合など, 引張力あるいは引張力と曲げが同時に作用するコンクリート部材の非線形域の特性の高性能化を図る場合などに有効と考えられる<sup>15), 16)</sup>。また, 一般に高軸力を支持する主塔構造の場合には, 変形に伴う $P-\delta$ 効果が大きな影響を及ぼすが, プレストレスを適切に導入し, 耐力の向上あるいは非線形域の2次勾配の向上を図ることによりこうした影響を低減することも可能と考えられる。

また, 新しい構造としては, たとえば, 図-9に示すような高拘束PC部材が考えられる<sup>17)</sup>。近年, 耐力とじん性の向上のために, コンクリート充填鋼管が用いられる場合があ

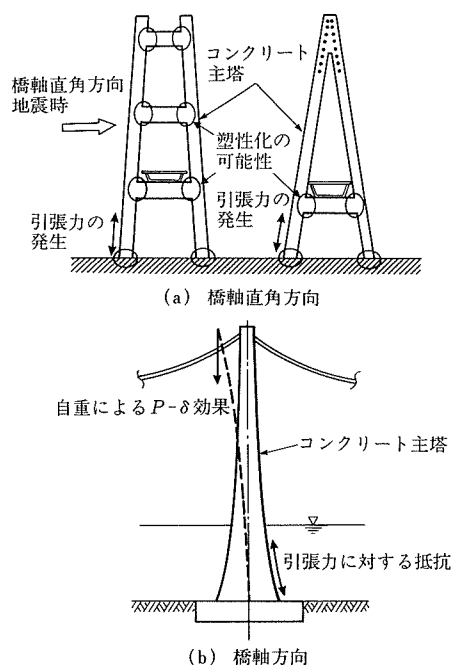


図-8 長大橋主塔構造の耐震性能

表-2 PC構造を活用した次世代高耐震構造の可能性

分類	構造	高耐震性能のイメージ
地震被害を受けにくい耐震構造	高耐力構造	・高強度材料 (PC鋼材・コンクリート) を用いた高曲げ耐力構造, 高せん断耐力構造
	高弾性構造	・PC鋼材を用いた弾性変形領域の広い構造 ・高弾性特性を有するPC鋼材を用いた高剛性構造
	高じん性構造	・圧縮側コンクリートで特性が定まる部材の圧縮側コンクリートを高拘束した高じん性構造
	引張力を受ける部材の高耐震化	・長大橋主塔等のラーメン構造, アーチ橋のアーチリブ構造等で, 面内地震力を受ける場合の引張部材の高性能化 (引張抵抗の向上)
	曲げと引張力を受ける部材の高耐震化	・長大橋主塔等のラーメン構造で, アーチ橋のアーチリブ構造等で, 面内地震力を受ける場合の曲げ引張部材の高性能化 (引張力を受ける状態での曲げ耐力の保持)
	高拘束PC部材 (CPCC)	・高せん断耐力, 高曲げ耐力を発揮させるために, PCケーブルで周方向, 軸方向を緊張, 高拘束したコンクリート部材
早期に復旧可能な耐震構造	高復元性構造	・残留変形を小さくすることが可能な高復元性構造 ・残留変形を小さくすることが可能な2次剛性の大きい非線形履歴特性を有する構造 ・長大橋主塔, タワー構造等における $P-\delta$ の影響低減
新構造	アクティブPC構造	・地震時の構造物あるいは構造部材の剛性, 耐力, 変形性能の向上のため, PC鋼材をアクティブに制御する構造
	超弾性構造 (弾性変形吸収構造)	・地震時の変形を弾性変形吸収部材, 弾性変形吸収装置により吸収する超弾性構造

る。これは、引張りに対しては鋼材で、また、圧縮や鋼材の座屈防止にはコンクリートで抵抗することにより相互の弱点を補った一つの高性能複合構造である。同様の考え方でいくと、柱部材の周囲にPC鋼材を緊張して配置するとともに、軸方向にも同時に緊張することにより、圧縮、引張り、曲げ、せん断に抵抗できる優れた高強度部材が実現可能と考えられる。

さらに、構造物の地震応答制御にはテンドン方式の制御装置がすでに開発、実用化されているが、図-10に示すようなPC部材に配置されたPC鋼材のプレストレスを地震力と構造物の応答性状に応じてアクティブに制御することにより、地震力に適切に抵抗したり、地震力を逃がしたりして、構造全体の耐震性能を向上させることが可能な高耐震

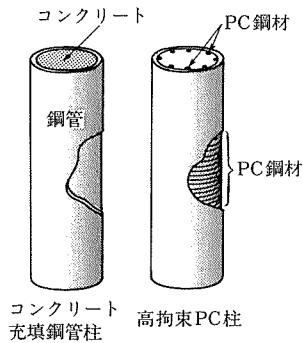


図-9 高拘束PC部材

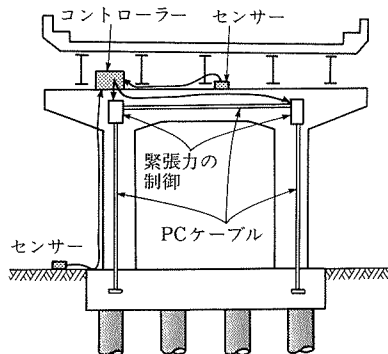


図-10 アクティブPC構造のイメージ

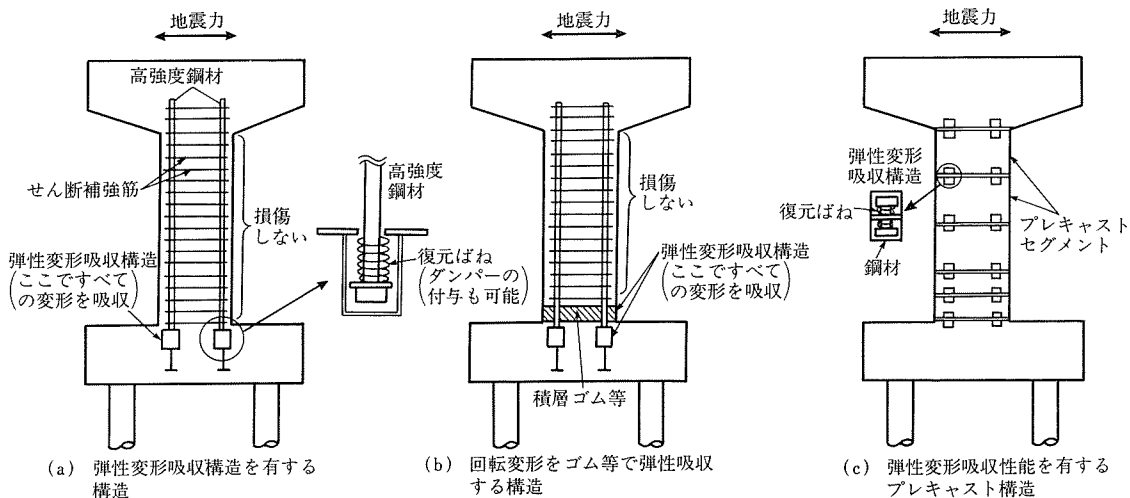


図-11 土木研究所における超弾性構造（弾性変形吸収構造）の開発

構造も実現可能と考えられる。

土木研究所においては、地震による被害を受けない高耐震構造の一つとして図-11に示すような構造（超弾性構造）を検討している。これは、地震時に生じる変形あるいは柱の回転性能をたとえば柱基部における弾性変形吸収構造においてすべて確保しようというものである。ここで、集中的に変形を吸収することから柱部材には一切損傷を生じさせないことが可能である。変形性能、また、必要な耐力性能などの履歴特性もこの部分のばねや初期張力を適切に設計することにより自在に、また、変形に伴うエネルギー吸収についてもばねの非線形履歴特性や粘性ダンパーの併用により自在に制御できるものである。(b)は、(a)を発展させて、(a)における圧縮側のコンクリートの損傷も防ぐために、橋脚の回転変形を弾性吸収できるゴム等の部材を柱基部に挟んだものである。(c)は、変形を弾性吸収できる部分を1カ所に集中させずに、いくつか配置し、それぞれを小型化したケースである。プレキャストのコンクリート部材を接合し、これを弾性部材で適切に接合するというものである。曲率の大きくなる基部付近においては、接合部を密にあるいは変形性能の大きい弾性接合装置を用いることが考えられる。あたかもシールドトンネルに用いられる弾性ワッシャーのようなものを橋脚に対して適切に耐力を保持できるように初期張力を与えて構成するというものである。

こうした高耐震構造の開発は、まだまだ、たくさんのアイデアが期待される場所である。

#### 4. おわりに

PC構造の耐震性能、限界状態、さらに高耐震化構造という観点で簡単な整理を試みた。非線形域の特性とともに限界状態を明らかにすることにより、PC構造の非線形域の特性を生かした耐震設計や高耐震構造の実現が可能と考えられる。従来構造にとらわれないさらなる高耐震構造に関する技術開発が進むことを期待するものである。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，1997.12
- 2) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料-PCラーメン

- 橋・RCアーチ橋・PC斜張橋・地中連続壁基礎・深礎基礎等の耐震設計計算例一, 1998
- 3) 運上, 寺山, 緒方, 幸左, 前原, 矢部, 森, 角本: 大規模地震に対するコンクリート橋の耐震設計について—PCラーメン橋・RCアーチ橋・PC斜張橋—, プレストレストコンクリート技術協会第27回技術講習会資料, 1999
  - 4) 大場, 緒方, 前原: PCラーメン橋の動的解析における上部構造のモデル化の影響, 第1回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム論文集, 1998.1
  - 5) 土木研究センター: 耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会報告書, 平成8年度報告書, 1997.5, 平成9・10年度報告書, 1999.4
  - 6) 大塚, 根井, 矢葺, 堤, 岡田: 上部構造の非線形性を考慮したPC連続ラーメン橋の耐震性照査, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.967~974, 1999.3
  - 7) 松本: RC, PC及びPRC部材のモーメント—曲率関係とその応用, 土木学会論文報告集, 第331号, pp.155~165, 1983
  - 8) K.J.Thompson, R.Park: Seismic Response of Partially Prestressed Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 103, ST8, pp.1755~1775, 1980
  - 9) 岡本, 加藤: PC建造物の地震応答性状, プレストレストコンクリート, Vol.33, No.4, pp.52~63, 1991.7
  - 10) 林, 岡本, 小谷, 加藤, 傳: PC部材の履歴特性とPC建造物の地震応答性状, プレストレストコンクリート, Vol.37, No.4, pp.57~67, 1995.7
  - 11) 保坂, 睦好, 稲田, W.Zatar: プレストレストコンクリート高架橋におけるPC桁の地震応答性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.159~164, 1997
  - 12) 池田, 森, 吉岡: 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, Vol.40, No.5, pp.40~47, 1998.9
  - 13) 池田, 森: プレストレストコンクリート橋脚, 橋梁と基礎, Vol.99, No.8, pp.154~155, 1999.8
  - 14) 大塚, 矢葺, 堤, 角本, 岡田, 浦川: 交番載荷実験によるPC箱桁の履歴特性, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.697~700, 1999.7
  - 15) J.M.Muller: Very Long Span Bridges: Concepts, Materials and Methods, IABSE Symposium, Kobe 1998, Long-Span and High-Rise Structures, IABSE Report Vol.79, pp.35~48, Sep. 1998
  - 16) 尾高: RC主塔, 橋梁と基礎, Vol.99, No.8, pp.139~140, 1999.8
  - 17) 宇野, 久松, 岡山, 平: 一般国道23号一ツ木高架橋の橋脚補強工事, プレストレストコンクリート, Vol.41, No.1, pp.67~71, 1999.1

【1999年9月9日受付】

◀ 刊行物案内 ▶

## フレッシュマンのためのPC講座

— プレストレストコンクリートの世界 —

頒布価格: 3 000円(送料400円)

体 裁: A4判, 140頁

内容紹介

＝ 基 礎 編 ＝

- 基礎 編1 PCとは何か
- 基礎 編2 PCはどんなものに利用できるか
- 基礎 編3 プレストレスの与え方について考えてみよう
- 基礎 編4 プレストレスは変化する
- 基礎 編5 荷重と断面力について考えてみよう
- 基礎 編6 部材に生じる応力度について考えてみよう
- 基礎 編7 プレストレス量の決め方について考えてみよう
- 基礎 編8 PCに命を与えるには(プレストレスシグとその管理)
- 基礎 編9 PCを長生きさせよう

○申込み先:

(社)プレストレストコンクリート技術協会 事務局  
〒162-0821 東京都新宿区津久戸町4番6号 第3都ビル5F  
TEL: 03-3260-2521 FAX: 03-3235-3370

＝ P C 橋 編 ＝

- PC 橋 編1 PC橋にはどんなものがあるか
- PC 橋 編2 PC橋を計画してみよう
- PC 橋 編3 PC橋を設計してみよう
- PC 橋 編4 現場を見てみよう

＝ PC 建 築 編 ＝

- PC 建築 編1 PC建築とは
- PC 建築 編2 PC建築にはどんなものがあるか
- PC 建築 編3 プレキャストPC建築の設計について考えてみよう
- PC 建築 編4 PC建築でオフィスを設計してみよう

資 料 PCを勉強するときの参考図書  
索 引