

構造性能評価法の研究

—構造性能評価WG—

西山 峰広*1・加藤 博人*2

従来の設計では、主に、強度のみに焦点が当てられていた。荷重によって生じる応力と部材の強度を比較し、後者が大きければ、配筋詳細などはあるものの、設計の終了となった。プレストレストコンクリート（以下、PCと略記）建築物の設計において拠り所となる規準として、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」および「プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種PC）構造設計・施工指針・同解説」などが挙げられる。これらの規準・指針は、当時としては新しいPC構造を設計するための多くの情報を与えている。特筆すべきなのは、RC構造が許容応力度法により設計されていた時代に、終局強度設計法を導入していることである。しかしながら、終局強度設計を行うための部材応力が骨組みの弾性解析に基づくものであったり、変形能力確保のために鋼材係数の上限値を推奨してはいるが、変形そのものを扱うことはないなど今から考えれば不十分な点もあった。

1995年兵庫県南部地震以後における耐震設計法見直しの気運の中で、本共同研究で提示される設計法は、性能評価型の設計法となることを期待された。性能設計を行うために、部材レベルにおいて必要となる事項は、基本的には図-1に例示されるような荷重-変形関係である。さらに、その荷重-変形曲線上の各点において部材がどのような状態にあるのか、たとえば、ほとんど無傷で荷重が取り去られると元の状態に戻るのか、鉄筋が降伏しており、荷重が

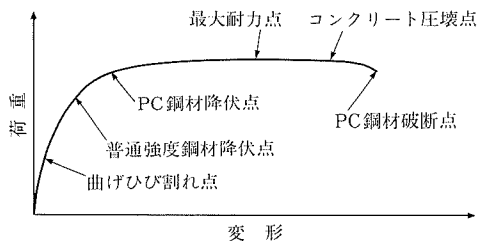
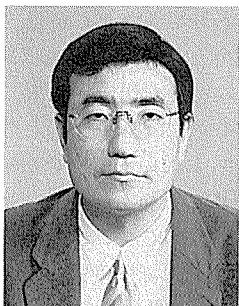


図-1 PC部材の荷重-変形関係



*1 Minehiro NISHIYAMA

京都大学 工学研究科
建築学専攻 助教授



*2 Hiroto KATO

建設省 建築研究所
第4研究部

なくなってもひび割れが開いたままになってしまうのか、あるいは、もう少し変形が大きくなると突然壊れてしまうのか、などの情報も必要となる。

「設計指針作成WG」ではPC架構に必要とされる性能を明確にすることが重要な作業項目であり、その要求性能を満足するような部材を設計する手法を提示することが「構造性能評価WG」の仕事である。このために必要となる部材挙動の予測方法を与えることが、主要な課題となる。また、柱梁接合部のせん断設計法などまだ提示されていない分野に関して研究し、新たに設計法を示すことも「構造性能評価WG」の役割である。

さらには材料レベルでの挙動、すなわち、材料の応力度-ひずみ度関係、PC鋼材の付着-滑り関係を調査し、モデル化することも重要な課題である。将来、材料レベルのモデル化に基づいて、たとえば、有限要素法などを用いて、骨組み全体の挙動を予測できるようになることが予想されるためであり、ここでの材料レベルのモデル化はその基礎的な情報を与えることになる。

以上のような背景のもとで、「設計指針作成WG」より要求される部材の性能評価法として次の5項目が挙げられる。

- (1) 部材損傷の設定法：
部材における損傷レベルと変形レベルの関連づけ
- (2) 静的弾塑性解析に用いる部材の荷重-変形関係：
荷重-変形関係のモデル化
- (3) 等価減衰定数：履歴減衰の評価法
- (4) 必要変形能力確保の方法：
鋼材係数および軸力の制限、横拘束補強筋の設計
- (5) いまだ設計法が与えられていない部分の設計：
柱梁接合部のせん断設計

上記のように要求される部材性能評価法を提示するために、「構造性能評価WG」には、以下の7つのサブWGが組織された。各サブWGの主な研究内容も併せて示した。

- (1) 履歴復元力特性の標準モデル構築
 - PC部材の履歴復元力特性標準モデルの提案
 - 曲げひび割れ点、降伏点、最大耐力点および終局限界点などの特性点の算出方法
 - 過去に提案された履歴復元力特性モデルの相互比較と実験結果との比較
- (2) 柱梁接合部設計法
 - 柱梁接合部（仕口部）のせん断設計法の提案
 - 柱梁接合部のせん断ひび割れ強度の算定法
- (3) 部材接合面の性能評価
 - 圧着接合部の設計法の提案

- (4) せん断耐力評価
 - PC梁のせん断設計法の提案
 - PC有孔梁の設計法の提案
- (5) 塑性ヒンジ領域の横補強法
 - 必要変形能力を満足するための横拘束補強筋設計法の提案
 - 塑性ヒンジ領域マクロモデルの提案
- (6) 終局状態での不静定2次応力の影響評価
 - プレストレス導入時不静定応力に関する検討
 - クリープ不静定応力に関する検討
 - 骨組み終局時における不静定応力の影響
- (7) PC鋼材の応力度－ひずみ度関係および付着特性
 - PC鋼材の応力度－ひずみ度関係
 - PC鋼材とコンクリート間の付着－滑り特性のモデル化

以下、各サブWGの活動概要を記す。

(1) 履歴復元力特性の標準モデル構築

PC部材の履歴復元力特性は、RC部材と比較して原点指向性が強く、残留変形が小さくなるが、履歴吸収エネルギーも小さくなる。このため、地震動に対するPC建物の応答がRC建物と比べて大きくなる懸念されてきた。このような特徴を有する履歴復元力特性をモデル化し、地震応答解析に利用することは、過去に行われてきた。海外では、SpencerやThompsonら、国内では、岡本によるPSモデル、岡田らによる日大モデルなどがある。いずれのモデルも原点指向型のPC部材の履歴復元力特性を表現するために、PCの程度を表現するパラメーターの関数で除荷時の勾配を表している。PC鋼材が配置されず、プレストレスも導入されないと、通常のRC型の履歴復元力特性となるようにモデル化されている。

本サブWGでは、まず、単調載荷時の荷重－変位関係を決定するために、ひび割れ点、降伏点、最大耐力点および終局限界点を与える既往の算定式を、実験結果を用いて検証した。次いで、解析的・実験的にPC型の履歴復元力特性に影響を与える要因(PC鋼材量、プレストレス導入力、普通強度鉄筋量など)を検討した。この結果に基づき、履歴復元力特性をモデル化した。本モデルでは、PC鋼材の付着性状もパラメーターの一つとしている。さらには、既往の提案モデル相互の比較も行っている。

これらの研究成果は、非線形静的増分解析を行う際の部材のモデル化に利用される。また、設計において地震動に対する応答を予測する際に必要となる履歴減衰の評価に用いられる。

(2) 柱梁接合部設計法

RC構造においても柱梁接合部(仕口部)のせん断設計については、過去さまざまな議論されてきた。日本においては、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針」において、初めて柱梁接合部設計法が規定された。ここでは、基本的に、接合部せん断強度は、接合部の形状とコンクリート圧縮強度により与えられるとしている。1995年兵庫県南部地震においてもRC柱梁接合部の被害

例が報告されている。1997年に発行された日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説」では、「終局強度型耐震設計指針」と同様に、接合部せん断強度は、接合部の形状とコンクリート圧縮強度により与えられるとしている。せん断補強筋は、せん断強度には関係なく、変形能力を確保するために必要であるとされる。

一方、日本においては、PC構造柱梁接合部設計法はなかった。PC構造の柱梁接合部では、プレストレスが接合部せん断強度に影響を与えるのかどうか問題となる。ニュージーランドの設計基準であるNZS3101:1995では、プレストレスと柱軸力により接合部が2軸圧縮状態となること、ストラット幅が大きくなるなどを考慮して、有効プレストレス力の70%を接合部入力せん断力より控除できるとしている。しかしながら、プレストレスが接合部のせん断強度に影響を与えなかったという実験結果も報告されており、更なる研究が待たれていた。

本サブWGの目的は、プレストレスが柱梁接合部せん断強度に及ぼす影響を解析的・実験的に明らかにし、その設計法を新たに提示することにある。また、常時使用状態の検定のため、接合部のせん断ひび割れ強度算定式も提案される。

(3) 部材接合面の性能評価

PC構造を有効に利用する方法の一つは、プレキャスト構造と組み合わせることである。工場で作られた部材を、現場において組み立てる。この時に、プレストレスによる圧着を用いれば、RC型の接合方法と比べて、部材の接合面における滑りもなく、骨組みとしての一体性が実現される。圧着接合では、基本的に、プレストレスによる軸圧縮力によって生じる接合面での摩擦力によりせん断力を伝達する。日本建築学会PC規準では、圧着接合面でのせん断伝達力を評価するために摩擦係数0.5を与えている。しかし、実際には、地震による繰返し荷重下でのプレストレスの減退、摩擦係数の低下などを考慮する必要がある。

以上のような観点から、実験的・解析的に圧着接合部を検討し、その設計法を提示することが本サブWGの役割である。また、摩擦接合だけでなく、鉄筋のダウエル作用による接合面せん断抵抗についても実験的・解析的研究を行い、設計式を提示している。

(4) せん断耐力評価

PC部材は、一般にせん断スパン比が大きく、せん断で部材耐力が決まることは少ないと言われてきた。しかし、PC部材にもさまざまな利用法が考案されてくると短スパンのPC部材も設計しなければならない場合も想定される。また、長スパンと短スパンが連続する梁にPC鋼材を通して配線する場合もある。さらには、PC柱においては、せん断破壊よりも曲げ降伏を先行させるために、せん断強度の算定を確実に行う必要がある。日本建築学会PC規準では、RC規準との連続性を考慮して、RC規準のせん断強度式に有効プレストレス応力の10%を加える形の設計式を採用していた。この設計式は、実験結果と比較するとかなり安全側の値を与えるが、精度のばらつきが大きい。また、実験式で

あるにもかかわらず、十分な検証が行われていなかった。そのため、1998年に改定されたPC規準では、トラス・アーチ理論に基づく設計式も併せて提示された。

本サブWGより提案されるPC梁のせん断設計式も同様にトラス・アーチ理論に基づいている。載荷実験も行われ、過去に行われた実験結果と併せて、設計式の精度が検証された。また、PC梁においてしばしば問題となる開口部の設計法も提案されている。

(5) 塑性ヒンジ領域の横補強法

従来の設計では、部材強度が荷重による応力を上回ることを確認し、付加的に、ある程度の変形能力を与えておくことが行われていた。この「ある程度の変形能力」は、部材回転角にして1/50であったり、1/30であったりするが、実際には、配筋規定によって変形能力が確保されてきた。最初に記したように、本共同研究で提案される設計指針では、強度もさることながら、変形を算定することが大切になる。予想される骨組みの変形から部材の変形を算定し、これを満足するような配筋を行う。このような設計を行うためには、必要となる変形能力を確保するための配筋設計法を与える必要がある。

本サブWGでは、解析的・実験的研究に基づいて、このような配筋設計法を提案している。軸力と鋼材係数をパラメーターに、必要変形能力を満足するような横拘束筋量を与えるものである。また、PC鋼材とコンクリート間の滑りを考慮すると、平面保持を仮定した場合と比べて、同じ変形に対するコンクリートのひずみ度は小さくなる。このような考察に基づいて、部材の荷重-変位関係上での材料のひずみ度レベルを明らかにし、部材の損傷度に基づく設計の可能性も探っている。さらには、塑性ヒンジ領域の挙動を的確に把握するためのマクロモデルを提案した。

(6) 終局状態での不静定2次応力の影響評価

日本建築学会PC規準に示されている終局強度設計法では、設計用荷重の組合せに、プレストレス導入に伴う不静定2次応力の項がそのまま加えられている。不静定2次応力は、プレストレス導入時、常時使用時に考慮されなければならないのは当然であるが、終局状態においてどのようなのか、あるいは、どのように扱えばよいのかは明らか

ではなかった。不静定応力やクリープに対する検討は、PC構造では重要な課題であるにもかかわらず、今まであまり顧みられることはなかった。

本サブWGでは、本共同研究で行われた立体架構実験において、試験体の製作から載荷実験までの間のひずみ測定に基づく、クリープや乾燥収縮の影響調査を行った。また、多層骨組みのクリープ解析、不静定2次応力解析に基づき、終局時における不静定2次応力の影響を検討した。その結果、終局時の耐力や変形に対する不静定2次応力の影響は小さいことが明らかにされた。

(7) PC鋼材の応力度-ひずみ度関係および付着特性

PC鋼材、とくにストランドのコンクリートとの付着-滑り特性は、曲げ終局耐力、終局時変位などにも影響を与えるにもかかわらず、十分なデータが蓄積されていなかった。アンボンドPC鋼材では、付着がないと考えられるので、煩雑ではあるが部材全長にわたる変形の適合条件を用いれば、部材の挙動を追跡することができた。ストランドでは、コンクリートとの付着-滑り特性が、丸鋼と異形鋼の中間に位置することは推定されるが、どれぐらいの付着剛性、付着強度があるのかに関するデータがほとんどなかった。

本サブWGでは、PC鋼材の付着試験を行い、付着剛性、付着強度などのデータを得、付着-滑り特性をモデル化した。これらの結果は、本設計指針には直接には反映されていないが、今後、繰返しによるプレストレス力の減退や、部材耐力や変形、さらには、部材損傷を評価する際に重要な基礎資料を与える。

以上のように広い分野にわたった研究の成果は、すべてではないが、今までになく多くの、PC部材に関する情報を与えている。設計式などのこれらの情報は、できるだけその成立、適用範囲、精度などを明確にしたうえで提示されている。したがって、設計の際には、闇雲に設計式をあてはめるのではなく、設計者はこれらの情報の成立および背景を十分理解したうえで、利用されることが望ましい。

【1999年5月18日受付】