

◆ 特 集 ◆

建 築 特 集

PC 建築構造の性能評価型設計法に向けての 取り組み

中塚 侑*

1. はじめに

構造設計法の近年の趨勢は、1999年の建築基準法の改正や、2002年の土木学会の性能照査型コンクリート標準示方書、2004年に発刊された日本建築学会の鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説（以下、RC性能評価指針案と略記）に見られるように、変形を陽に設計クライテリアとする性能評価型設計法になってきている。

一方、わが国のプレストレストコンクリート（以下PCと略記）建築構造の設計法は、1961年に日本建築学会から「プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説」が刊行され、当時、許容応力度設計法であった鉄筋コンクリート（以下RCと略記）構造とは異なる終局強度設計法が提示されて以来、若干の部分改訂・変更はあったものの現在に至るまで、主に耐力面に注目した同設計法が踏襲されている。したがって、性能評価型設計法は、弾性設計に基づく終局強度型設計法を主に用いてきたPC構造設計者にとって、どちらかといえば馴染みの薄い知見、すなわち、PC梁・柱部材および柱梁接合部の荷重-変形関係、同関係と材料損傷度との関連、さらには残留変形とひび割れ幅などの知見にベースを置くもので、それら特性の具体的な評価手法を確立することが緊急の課題となっている。

上記の事情から、PC建築構造の部材性能評価型設計法への取り組みは緒に就いたばかりの現状である。したがって、本稿は十分オーソライズされていない途中経過を述べるにとどまり、総説とはほど遠い面もあるが、以下に現状の主な課題を概観する。

2. RC および PC 梁部材の荷重-変形関係推定法

RCおよびPC梁・柱部材の性能評価型設計法の基本には、それら部材が各種限界状態に至ったとき、支持荷重および変形が、さらにはコンクリート、普通鉄筋、PC鋼材など構成材料の損傷状態がどの程度であるかを把握できること、すなわち、荷重-変形関係を材料損傷状況と関連づけ

て推定できることがある。その際、付着性能が低い鋼材も使用するPC部材では、付着は鋼材の降伏・未降伏と関係して、部材の荷重-変形関係の骨格曲線、履歴における高復元性などと密接に関わり合うため、付着の影響を明確化しておくことも重要となる。

以下に、現在提案されている建築関係のRCおよびPC部材の荷重-変形関係推定法に関する概容および課題などを述べる。

2.1 RC 部材に対する改正建築基準法告示の手法

告示（第1457号の第3）では、部材設計における簡便性から有用と思われる、断面解析とペアで用いられる等価塑性ヒンジ長さ（以下 L_{eq} と略記）による手法と、鉄筋の抜け出しによる付加変形やせん断変形などの考慮とによって、RC部材の安全限界変形を推定する方法が提示されている。しかし、等価塑性ヒンジ長さ、ならびに鋼材の抜け出しによる付加変形などについての明確な推定方法は示されていない。 L_{eq} を用いる手法は、図-1に示すように、部材の塑性変形および塑性回転が、等価塑性ヒンジ部分に集中する平均塑性（非線形）曲率によって生じると考える非常に簡便な方法であるが、部材変形の算出に対し次のような問題点を有している^{1,2)}。

1) 図-2は、一体型および圧着型片持ちPC梁の載荷実験において、部材の荷重点塑性たわみの測定値（ δ_p ）と梁

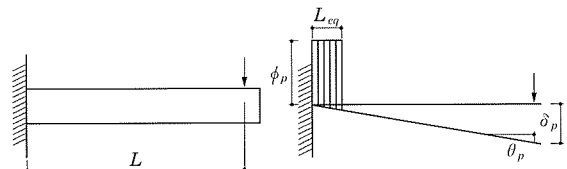


図-1 等価塑性ヒンジ長さ

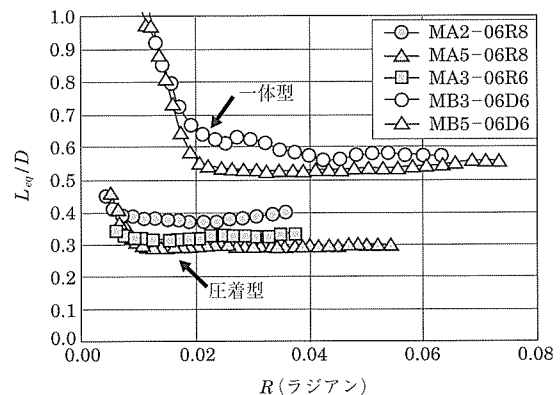


図-2 圧着型・一体型PC梁の等価塑性ヒンジ長さ



* Tadashi NAKATSUKA

大阪大学大学院 工学研究科
地球総合工学専攻助教・工学博士

端部におけるある検長での塑性曲率測定値 (ϕ_p) の間でモールの定理から誘導される次式によって求めた L_{eq} の実験結果を示したものである。同図によれば、 L_{eq} の値は部材変形の大きさによって変化するので、 L_{eq} の設定にあたっては想定部材変形の大きさ (領域) を明確にしておく必要がある。

$$\delta - \delta_e = \delta_p = (\phi_p - \phi_y) (L - L_{eq} / 2) L_{eq}$$

(ここで、 δ_e ; 弾性変形, ϕ_y ; 降伏曲率)

2) L_{eq} は実験におけるその求め方から理解されるように、平均曲率と密接に関連して両者は不即不離の関係にある。図 - 2 の例でいえば、梁断面が同じ場合でも、梁端部における曲率の測定方法、たとえば、引張鋼材の柱梁スタブからの抜け出し変形を控除する方法、しない方法で L_{eq} の大きさ・性状は異なってくる。逆にいえば、 L_{eq} の設定根拠に関わりなく、たとえば梁危険断面の曲率計算値を用いて変形推定を行うことなどは、 L_{eq} とペアであるべき平均曲率の扱い方に相反するものである。また、スタブなどからの鋼材抜け出し変形も考慮して断面解析から曲率を算定する場合、平面保持仮定の中で鉄筋ひずみをどのように取り扱うか (たとえばひずみ適合係数などの利用) にも十分な配慮が必要である。

2.2 RC 性能評価指針案での手法

RC 性能評価指針案では梁の変形は、梁の弾性変形、せん断変形、ならびに柱梁接合部と梁引張側ヒンジ領域からの鉄筋の抜け出しによる付加変形の四つの成分和として与えられるが、ここではそれら変形成分のうちの後二者による変形の推定手法について述べる。すなわち同手法では、まず、既往の研究からおおよそ $0.5D \sim 1.5D$ (D : 梁せい) の範囲を妥当とする³⁾ ヒンジ領域長さを適宜定める。次に、同領域内において仮定する引張鉄筋の付着応力分布やひずみ分布に従う梁部での抜け出し変形、ならびに接合部からの抜け出し変形を算出し、それら抜け出し変形による付加回転角 (回転中心は梁危険断面の平面保持仮定に基づく断面解析での中立軸位置とする) のために梁変形が生じると仮定している。

本指針案の手法は、等価塑性ヒンジ長さという便宜的な概念ではなく、梁部材の変形メカニズムをできるだけ忠実に反映しようとするモデルによる推定法であるが、同方法の根幹をなすヒンジ領域長さの推定法、通常の梁部材で観察されて損傷度と関係する圧縮部コンクリートの有限な破壊領域、ならびに鉄筋降伏後の付着特性が抜け出し量におよぼす影響などについての検討が今後必要と考えられる。

2.3 マクロモデルによる推定手法

RC 性能評価指針案での手法もマクロモデルの一つと位置づけられるが、本小特集の論説で示されるように、梁圧縮部コンクリートの有限な破壊領域、鋼材の付着性能を直接考慮して部材の変形機構をさらに忠実に模擬しようとする^{3,4)}、圧着 PC 梁部材に対するマクロモデルが提案されている^{3,4)}。すなわち、梁危険断面の断面解析ではなく、塑性ヒンジ領域における圧縮部コンクリートの潜在的破壊領域での縮み変形と、鋼材の付着性能に影響を受ける柱梁接合部および梁部からの引張鋼材の抜け出し変形とが変形適合す

るという仮定から荷重-変形関係を推定するモデルが提案されている。

モデルには 2 種類ある。第 1 のモデルは、PC 鋼材の付着強度が低い梁部材のためのもので、梁・柱接合部のみに曲げひび割れが入り、鋼材の付着劣化による柱梁接合部および梁部からの抜け出し変形が顕著に生じる梁を対象とするものである。第 2 のモデルは付着強度の高い鋼材をもつ梁部材に対するもので、梁塑性ヒンジ領域に曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れなどの斜めひび割れが発生して、トラス機構によるひずみシフトのための付加鋼材伸びと付着劣化による柱梁接合部からの抜け出し変形が圧縮部コンクリートの縮み変形と変形適合することを仮定するものである。いずれのモデルも荷重-変形関係の実験結果を良好に推定でき、前者のモデルによる解析的検討からは付着強度が荷重-変形関係ならびに同関係上の各種材料損傷点におよぼす影響を定量的に評価できることが示されている。また後者のモデルによれば、荷重-変形関係、各種材料損傷点のほかに、既往の研究では明らかでなかった、梁部材の塑性ヒンジ領域における鋼材降伏域の進展状況や、曲げ降伏後せん断破壊に対する物理的根拠を定性的に説明できること、さらには、簡便な部材設計手法である等価塑性ヒンジ法における等価塑性ヒンジ長さ、ならびに対応する鋼材のひずみ適合係数なども検討できることが示されている。

3. PC~RC 梁部材における設計指標と材料損傷度

「PC 部材は、破壊さえ起こらなければたとえ破壊寸前まで載荷されて塑性変形が著しく大きくなっても、作用応力を除去すれば、ひび割れは閉じて元に戻り、塑性変形の大部分も回復して再び元と同じ力学的性質を示す。すなわち、高度の弾性的性質と高度の復元性をもつ。これを生かす設計法としなければプレストレストコンクリート構造の特質を無視した不経済な設計となることは言うまでもない」と終局強度型設計法である日本建築学会の現行の PC 設計施工規準・同解説に書かれている。

PC 部材の性能評価型設計法を考える場合も、RC 部材と同じクリテリアによるのは合理的でなく、上の記述にあるとおり、RC 構造との差別化を図るために特徴である高復元性の活用が不可欠である。一方、コンクリートと補強鋼材の複合体という視点から PC~RC~RC と連続するコンクリート系構造設計法の統一化も希求すべき方向で、差別化と統一化という 2 つの相反する要求を受け入れる設計指標の確立が望まれる。

残留変形 (率) がその設計指標の一つと考えられて、検討され始めている^{3,5)}。残留変形 (率) のメカニズムは、有効プレストレス力まで緊張された PC 鋼材が応力零の状態に戻ろうとするばね作用に起因するが、このばね作用は、圧縮力を分担して戻ることによって抵抗する普通鉄筋の存在や、大きな変形下で PC 鋼材が塑性化してプレストレス力が減少することなどに大きく影響される^{5,6)}。それゆえ、残留変形 (率) におよぼす PC 鋼材量と普通鉄筋量の比 (プレストレス率) や PC 鋼材の降伏・未降伏と関係する付着性能

(鋼材の種類)などの影響を明確にする必要があるが、現状ではいまだ十分なものではない。

次に、残留変形(率)とも密接に関係するが、性能設計における各限界状態での材料損傷度についても検討されている。まず使用限界状態であるが、RC部材では構成材料はすべて弾性状態にあることと規定される。しかし、軸力と同様の効果のあるプレストレス力が作用するPC部材ではこの規定(とくにコンクリートの許容圧縮応力度規定)は実際的でない場合が多く、荷重-変形関係の非線形弾性(高復元性)に基づいて使用限界条件を規定することが望まれている。PC部材では、たとえば圧縮部かぶりコンクリートが圧壊する程度の損傷を受けても、変形は除荷後に顕著に復元する高復元性が期待できるので、修復限界状態の圧縮コンクリートの損傷度を残留変形(率)も考慮して規定すべきとの意見もある。一方、高復元性はPC鋼材のばね作用に依存するため、PC鋼材の降伏をどの限界状態にまで許容するかが大きな課題である。しかし、おおもとであるPC鋼材の付着特性は、グラウト強度や鋼材-グラウト-シー-ス-コンクリート間での破壊モードとの関係などにおいて、まだまだ未解明な部分が多い。設計指標、材料損傷点に関する課題としては、さらに、(残留)せん断ひび割れ幅、(残留)曲げひび割れ幅、圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性におよぼすせん断応力の影響、などがあるがいずれも早急に明らかにしなければならない大きな課題である。

4. RC および PC の柱梁接合部の性能評価

RC建築の柱梁接合部については、日本での地震被害が過去にほとんど見られなかったことから、建築学会の終局強度型耐震設計指針が出される1990年まで特別に耐震設計されることはなかった。しかし、兵庫県南部地震においてRC建物の外端柱・梁のト型接合部および最外面の内柱・梁の十字型接合部などにせん断破壊が観察されたことから接合部に関する各種研究が活発に行われるようになり、その成果がRC造建物の靱性保証型耐震設計指針、さらにはRC造建物の耐震性能評価指針案にまとめられていった。

一方、PC建築では1970年代に柱梁接合部を含む部分架構の実験がニュージーランドで行われているが、わが国では地震被害例もなく、また配筋詳細も多様であるため接合部の力学特性はほとんど検討されてこなかった^{7,8)}。しかし、兵庫県南部地震以降はRCにならって柱梁接合部に関する構造実験がなされるようになり、これまで未解明であった次のようなPC建築特有の課題、すなわち、プレストレスが接合部せん断強度におよぼす影響、定着具が接合部内に配置されることの影響、アンボンド鋼材まで含めた各種PC

鋼材の付着性能の差がおよぼす影響などが研究されている。とくに、ここ数年の進捗度は著しく、RC造建物の性能評価指針案と同様に、PC柱梁接合部の各種限界状態の定義、ならびに骨格曲線、せん断ひび割れ点、パネルコンクリートの圧壊点、最大耐力点および耐力低下点で構成される柱梁接合部の復元力特性、さらに、ピーク時せん断変形角-ピーク時せん断ひび割れ幅-残留せん断変形角関係、ピーク時せん断ひび割れ幅-除荷時せん断ひび割れ幅関係などの損傷評価について、データの充実化は今後も望まれるが、その方向性はまとめられている³⁾。

5. ま と め

PC建築構造の性能評価型設計法への取り組みの一部を紹介した。まえがきに述べたような事情からその前途には解決しなければならぬ課題が山積しているが、コンクリート系構造設計の統一化も視野に入れて、研究が一層進展していくことを望むものである。

謝 辞

本総説は日本建築学会PC構造運営委員会傘下のPC終局性能・設計法小委員会の研究成果「プレストレスコンクリート部材の終局性能評価手法-考え方の基礎から最前線まで-」の内容を主に参考にして取りまとめたものである。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 中塚 信: 限界耐力計算によるRC構造物の設計の現状と問題点, 日本建築学会近畿支部RC部会コロキウムテキスト, 3.2節 梁および柱部材の変形能力, pp.3-4-1~3-4-17, 2003.6
- 2) 中塚 信: 性能評価型PC規準に向けて-設計手法とその課題-, 日本建築学会大会構造部門(PC構造)PD資料, 第3章 構造性能とその評価法, pp.11~17, 2004.8
- 3) 日本建築学会PC終局性能・設計法小委員会: プレストレス(鉄筋)コンクリート部材の終局性能評価手法-考え方の基礎から最前線まで-, 2005.1
- 4) プレストレスコンクリート技術協会 鋼材付着制御によるPC構造性能改善研究委員会: 付着が拓くPC構造の近未来-構造性能評価における鋼材付着の役割-, 2005.6
- 5) 鈴木計夫, 中塚 信, 榎本秀文: PRC梁断面の履歴性質に関する解析的研究, セメント技術年報, No.35, pp.467~470, 1981
- 6) 菅田昌宏, 中塚 信: アンボンドPC圧着工法によるエネルギー吸収型高復元部材の荷重-変形関係に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文報告集, 584号, pp.153~159, 2004.10
- 7) 日本建築学会PC部材力学予測法小委員会: プレストレス(鉄筋)コンクリート構造部材の設計法-現状と将来-, pp.197~203, 1997.4
- 8) 日本建築学会終局限界変形・変位小委員会: コンクリート構造(PC, PRC)部材の靱性設計手法と耐震架構への応用, pp.198~213, 2000.4

【2005年5月9日受付】