

論文

[2053] 梁端部における塑性回転評価に関する一考察

是永健好*1・渡辺 英義*1・小林 淳*1

1. はじめに

地震時応力下の梁端部には、柱梁接合部からの鋼材の抜け出しと梁塑性ヒンジの生成により、塑性回転変形が集中する。この塑性回転に関する研究は、鉄筋コンクリート部材（以下、RC部材）を中心として古くから行われているが、鉄筋の付着劣化に伴う塑性ヒンジの生成機構を実験的に把握することが難しく、抜け出し現象と塑性ヒンジの生成を明確に関連づけた研究資料は少ないように思われる。

本報告では、既往のプレキャストプレストレストコンクリート梁（以下、プレキャストPC梁）の実験をもとに、梁端部の塑性回転量について、PC鋼材の抜け出し現象とあわせて考察する。

2. 梁端部における塑性回転評価

図1に地震時における梁端部のPC鋼材と鋼材位置コンクリートのひずみ分布の模式図を示す。なお、後述する実験との対応も考慮し、この図はPC梁を対象としたものとなっているが、PC鋼材を鉄筋に置き換え、伸びひずみを鉄筋のひずみとすれば、RC梁として考えることもできる。図に示すように、部材終局時には、接合部にはせん断ひび割れ、梁には曲げひび割れが生じており、ひび割れを境にして、鋼材位置コンクリートにも引張ひずみが生じている。また、変形の適合条件により、図に示すように、PC鋼材の伸びひずみ分布から求まる伸び量と、鋼材位置コンクリートのひずみ分布から求まる伸び量の差（図中網かけ部分）が接合部と梁部材に生じているPC鋼材位置のひび割れ幅の総和となる。また、正負繰り返し载荷では、図中のA点を含む鋼材位置コンクリートには逆方向载荷時の残留圧縮ひずみ（図2）が生じており、コンクリートのひずみも梁端付近では圧縮ひずみになっており、単調一方向载荷に比べ、鋼材とコンクリートとの伸び量の差はより大きくなる。

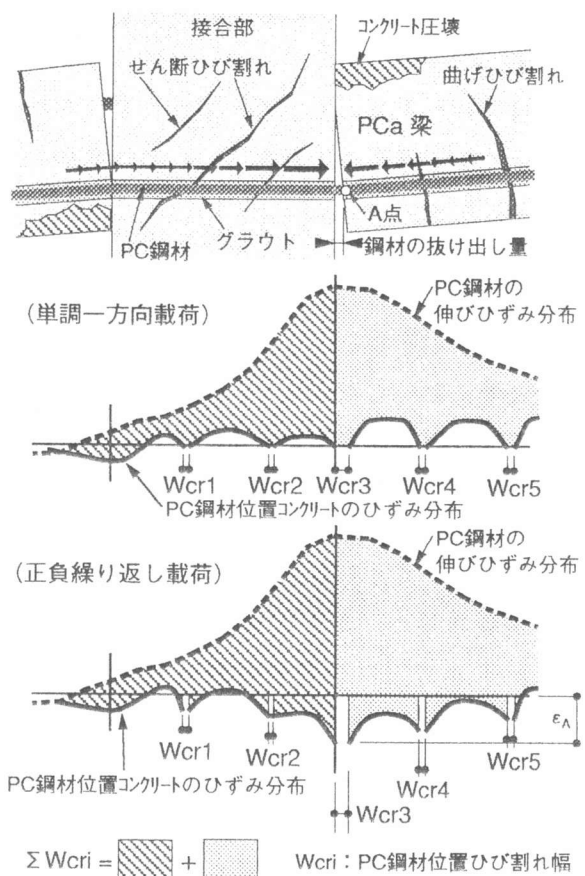


図1 梁端部におけるPC鋼材と鋼材位置コンクリートのひずみ分布（模式図）

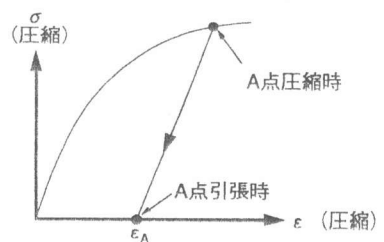


図2 コンクリートの载荷履歴（模式図）

*1 大成建設(株)技術研究所 構造研究グループ (正会員)

このような梁の変形状態では、梁材軸方向の曲率分布は、ひび割れの位置で曲率が突出した不連続なものとなり、ひび割れが発生した時点で、厳密には「平面保持の仮定」は成立しない。RC部材におけるこの現象を、ひび割れ開閉性状と関連づけ、実験と解析から検討した例として松崎・福山らの研究が挙げられる[1],[2]。松崎・福山らは、「平面保持の仮定」を基本とする従来の曲げ解析で表現しえなかった変形の不連続性を、ひび割れ開閉モデルにより適切に表現し、純曲げ区間を有する単純梁の実験によって評価法の妥当性を検証している。松崎・福山らのモデルでは、ひとつの曲げひび割れに対して、その両側のコンクリートと鉄筋の付着抵抗機構が、ひび割れの幅を決定する主要因となる。しかし、曲げとせん断を同時に受け、曲げモーメント勾配を持つような梁において、図1に示す梁危険断面位置のひび割れ幅 W_{cr3} は、部材終局時には変形の増大とともにかなり大きくなるが、 W_{cr4} 、 W_{cr5} 等のひび割れ幅はほとんど拡大しない。梁危険断面位置のひび割れは、接合部から引張側鋼材が抜け出してくるためにひび割れ幅の拡大が顕著となるが、図1中に矢印で示すように、松崎・福山らの提案より更に広い範囲の梁ひび割れ領域から鋼材が抜け出してくると推察される。そこで、著者らは、松崎・福山らの研究を参考として、図3に示す梁解析モデルを用い、回転変形を梁危険断面位置に極端に集中させた曲げ変形解析を実施している[3]。

図3の解析モデルでは、梁のヒンジ領域を圧縮側と引張側で異なる長さを仮定し[4]、その力学的特性も異なるとした。すなわち、圧縮側ヒンジ領域では、圧縮ひずみが材軸方向に一様に分布するとし、引張側ヒンジ領域では領域内の引張側鋼材の伸び量がすべて梁危険断面に抜け出してくると考えた。したがって、梁危険断面における総抜け出し量は、接合部からと塑性ヒンジ領域からの抜け出し量の和となる。また、その抜け出しによる回転中心は曲げ応力状態および抜け出し量に応じて変化すると仮定した(3.2で詳述)。

この梁端部における塑性回転評価法の妥当性の検証と、部材内でのPC鋼材とグラウト材の付着性状を把握することを目的として、内柱・梁接合部を対象としたプレキャストPC梁の実験を実施し、実験結果の一部を文献[5]で報告した。本報告では、この実験結果をもとに、実験における実現象と既提案の塑性回転評価法との整合性の確認および問題点の抽出を目的として、梁端部での塑性回転および抜け出し性状についての検討を行う。

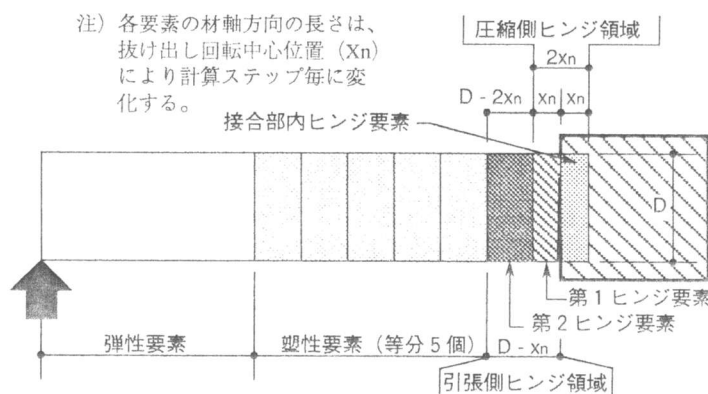


図3 梁解析モデル

3. 抜け出し現象と塑性回転量

3.1 実験における抜け出し現象

ここでは、実験計画の概要と、抜け出し量に関する検討結果を要約して述べる。

表1に検証のために行った実験の試験体一覧、図4に試験体形状と加力方法を示す。実験のパラメータは、PC鋼材自身の表面形状から決まる付着条件、すなわちPC鋼材の種類(PC鋼より線、PC鋼棒、異形PC鋼棒)である。なお、試験体の柱接合部は、加力時にひび割れを生じさせないように計画とした。図5、図6に梁端部の変位測定位置とPC鋼材のひずみ測定位置を示す。

図5と図6で示した測定から得られる変位とひずみの実測値を用いて、梁危険断面位置(圧着

部)における抜け出し量を、接合部からと梁部材からのものに分けて推定した。その考え方を図7に示す。なお、図中に示すコンクリートのひずみは、ひび割れの影響も含んでおり、図1で示したコンクリートのひずみ(真のひずみ)とは異なる。ここでは、梁危険断面の引張側PC鋼材位置で測定された変位量(図5に示す抜け出し量測定区間: 検長25mm)を、PC鋼材の総抜け出し量の実測値として、ひずみ分布から推定した抜け出し量と比較・検討した。接合部コンクリートのひずみは、実験で接合部にひび割れが生じていないことからひずみ量も小さいと考えて無視し、対向側梁による影響(③)も本実験では小さいと考えて考慮してない。梁部分のひび割れコンクリートのひずみは、抜け出し量測定区間を除く、鋼材位置の変位実測値を測定区間長さで除した値とし、区間内一定とした。PC鋼材の伸びひずみは、加力開始から生じた鋼材のひずみ増分量である。以上の仮定により、①、②、④の面積を計算し、これらをひずみ分布から求まる抜け出し量の推定値とした。

抜け出し量に関する検討結果の一例(R-1: PC鋼より線)を、図8と図9に示す。図9に見

表1 試験体一覧

試験体名	PC鋼材	断面平均 フレストレス (kgf/cm ²)
R-1	PC鋼より線(6-7本より15.2mm上下共) 	55.6
R-2	PC鋼棒(2-φ23上下共) 	
R-3	異形PC鋼棒(2-D23上下共) 	

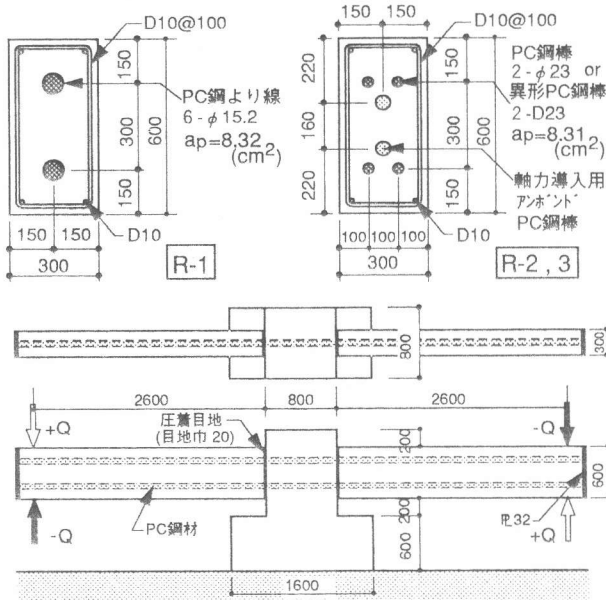


図4 試験体形状および加力方法

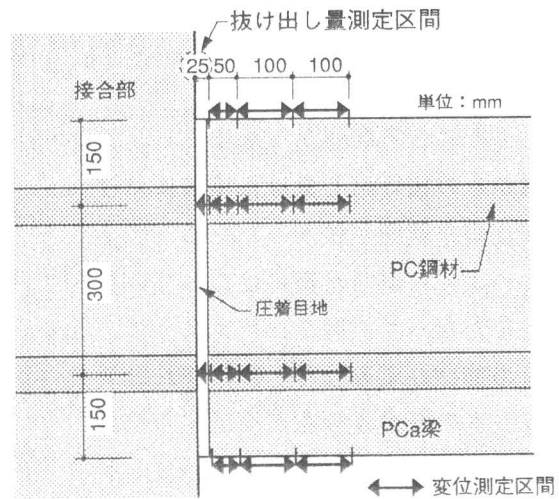


図5 変位測定位置

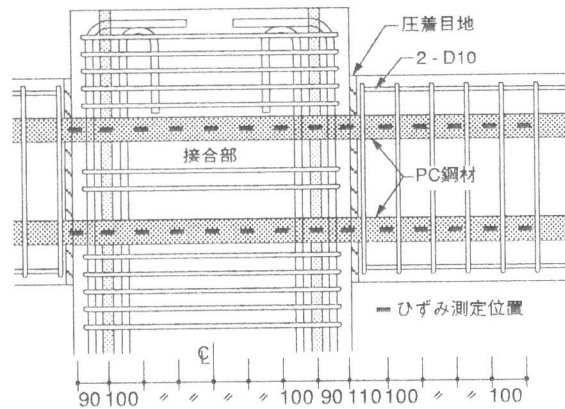


図6 鋼材ひずみ測定位置

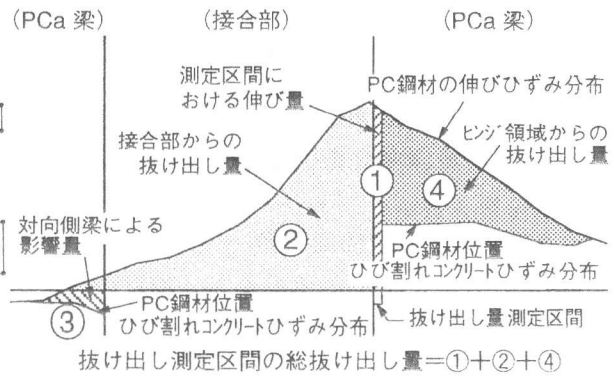


図7 ひずみ分布からの抜け出し量推定方法

られるように、ひずみ分布から求めた抜け出し量の推定値の総和 (①+②+④) は、図中の実線と破線の実測値とほぼ一致しており、「引張側PC鋼材が、接合部と塑性ヒンジ領域から抜け出す」という考え方の妥当性については概ね確認できた。また、この検討結果から、接合部及び梁塑性ヒンジ領域における鋼材とコンクリートの伸び量の差の大部分が、図10に示すように、

梁危険断面位置に抜け出し量として生じ、その伸び量の差のうちわずかな量が危険断面以外のひび割れを生じさせていると予想される。ただし、図8に示すように、実験値から求まるヒンジ領域からの抜け出し量は、実験における変位測定範囲が狭かったため、図7の④のように閉じた形にはなっていない。したがって、図7に示すように、鋼材の伸びひずみ分布とひび割れコンクリートのひずみ分布が交差する位置までをヒンジ長さと考えると、ヒンジ領域からの抜け出し量を小さく見積っていることになり、推定値の総和も実測抜け出し量に比べて若干小さい結果となっている。これらの点は測定方法も含めて今後の課題である。

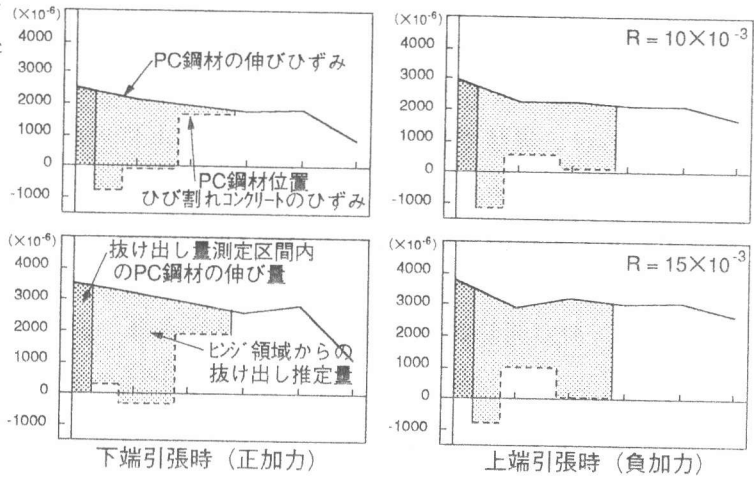


図8 梁部分のひずみ分布 (R-1)

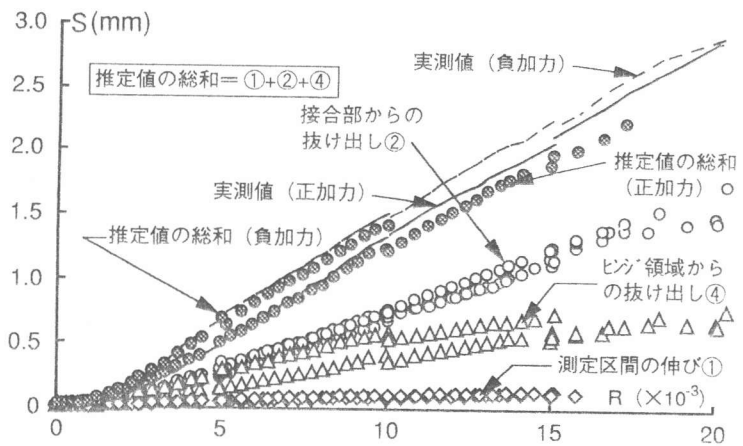


図9 抜け出し量一部材角関係 (R-1)

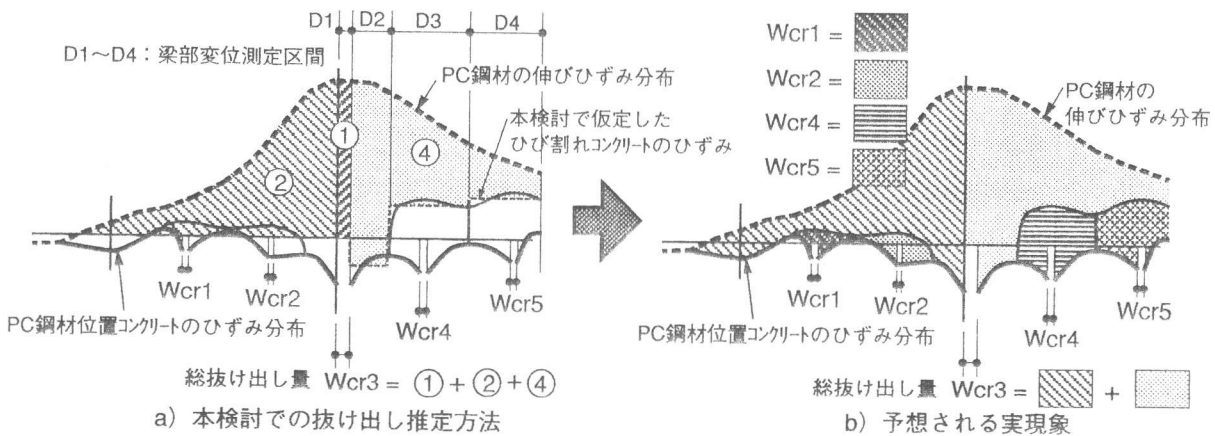


図10 梁危険断面における鋼材の抜け出し量

3.2 梁端部の塑性回転量

プレキャストPC梁の実験から、鋼材の抜け出し現象については概ね把握できた。ここでは、抜け出し回転変形を算出する際に重要となる「抜け出し回転の中心」を、実測データを使って既に提案した方法と同様の考え方により予測し、梁端部における塑性回転量を推定する。計算に用い

たデータは、実測抜け出し量 (S) とPC鋼材の実測伸びひずみ ($\Delta \epsilon_U$ 、 $\Delta \epsilon_L$) から求まるPC鋼材の引張力 (P_U 、 P_L) である。

図11に抜け出し回転中心の計算方法を示す。回転中心の決定に際し、「抜け出し吸収領域」を設定し、実測抜け出し量をこの領域内の平均ひずみで表現し、そのひずみ値を基に回転中心位置を決めた。なお、抜け出し吸収領域の長さは、山田ら

の研究[4]を参考として、図3に示す接合部内ヒンジ要素と梁第1ヒンジ要素の領域、すなわち $2x_n$ (x_n : 圧縮縁から抜け出し回転中心までの距離) とした。

計算では、まず、求める抜け出し回転中心の位置 (x_n) を仮定し、実測抜け出し量 (S) から抜け出し吸収領域内の平均ひずみ ($\epsilon_s' = 0.5S/x_n$) を求める。次に、仮定した抜け出し中心と ϵ_s' により決まるひずみ勾配に対して圧縮コンクリートの合力 (C_c) を計算し、その圧縮力とPC鋼材の実測引張力が釣り合うまで x_n を変化させることにより、抜け出し中心を決定し、塑性回転量を求める。なお、コンクリートの $\sigma - \epsilon$ モデルは六車・渡辺モデルを用いた[6]。

図12に、以上の考え方によって推定した塑性回転量 (θ_c) と、抜け出し量測定区間 (図5) で実測された変位データから直接求まる回転量 (θ_e) を比較して示す。なお、図中に黒塗で示す値は、上記の計算方法で釣り合い計算を行うと、 ϵ_s' の値が極端に小さくなり、計算が収束しないため、PC鋼材の実測伸びひずみ分布から決まる中立軸位置を回転中心として求めたものである (平面保持の仮定による計算)。したがって、変形の小さいレベルに既提案の考え方を適用するには若干無理があるように思われる。この点を除けば、 θ_c と θ_e の値はほぼ等しい。

図13に、部材角 15×10^{-3} と 20×10^{-3} 時における上記の計算から求まるコンクリートのひずみ (推定値) とPC鋼材の実測伸びひずみを、断面ひずみ分布の形で示す。図に見られるように、PC鋼材の付着条件によって断面のひずみ分布は大きく異なり、鋼材の付着性能が最も悪いR-2 (PC鋼棒) では、「平面保持の仮定」からかなりかけ離れたひずみ分布となっている。また、図中には梁端圧壊開始時の部材角も示しているが、圧壊開始時の圧縮縁コンクリートのひずみが -4000×10^{-6} 程度と考えれば、計算により求まる圧縮縁ひずみはほぼ妥当な値と思われる。

抜け出し回転中心を決める際に「抜け出し吸収領域」という概念を導入したことにより、抜け

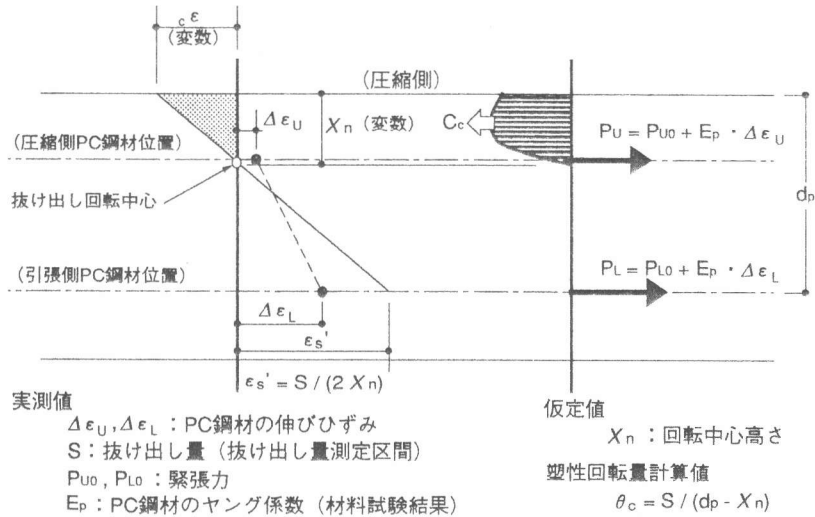


図11 梁端部の塑性回転推定方法

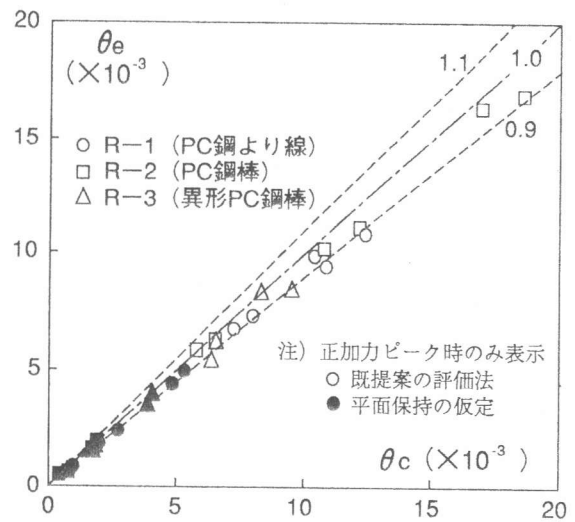


図12 塑性回転量の実験値と計算値

出し回転中心が、梁の曲げ応力状態および抜け出し量に応じて変化するという実現象に近い評価を行うことができた。この抜け出し吸収領域長さの明確な物理的根拠はないが、その仮定により求めた塑性回転量や断面ひずみ分布は、図12と図13に示したように、実験における実現象を模擬していると言えよう。

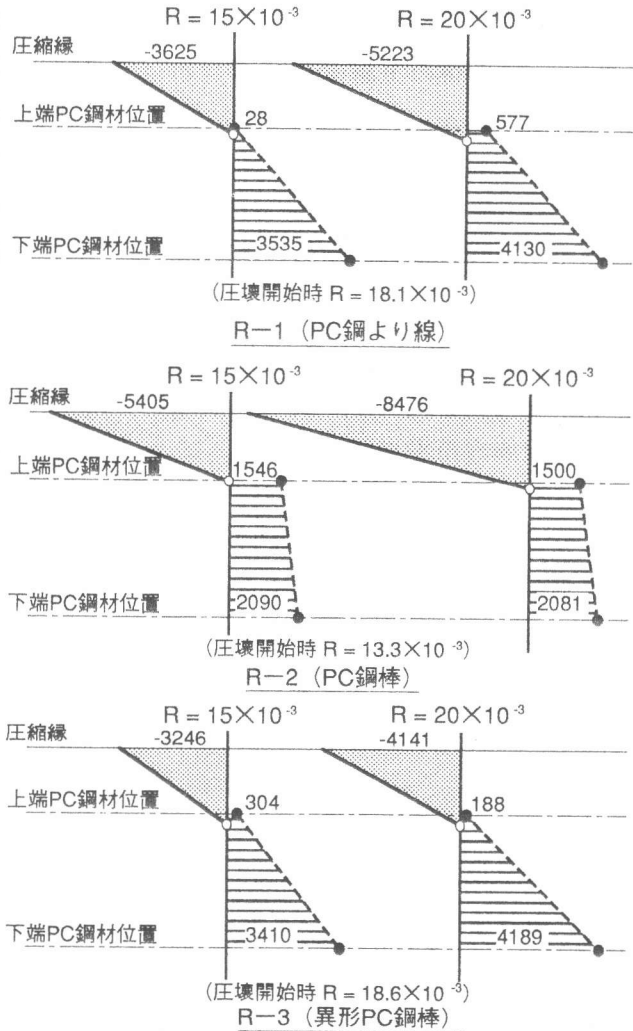
4. まとめ

地震時応力下の梁端部における抜け出し現象と塑性回転量に関して、既往の実験結果をもとに検討を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) 梁危険断面におけるPC鋼材の抜け出し量は、接合部からと塑性ヒンジ領域からの抜け出し量の和と考えることができる。

(2) 鋼材と鋼材位置コンクリートの伸び量の差の大部分は、梁危険断面位置のひび割れに抜け出し量として生じ、その伸び量の差の残りのわずかな量が接合部や梁塑性ヒンジ領域における他のひび割れを生じさせている。

(3) 鋼材の抜け出し回転の中心は梁の曲げ応力状態および抜け出し量に応じて変化し、その位置は抜け出し吸収領域を考慮した力の釣り合い計算から求められる。



注) 図中の数値は、ひずみ量 ($\times 10^{-6}$) を示す。
PC鋼材のひずみは伸びひずみ量である。

図13 梁危険断面における断面ひずみ分布

参考文献

- [1] 松崎育弘ほか：鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ発生領域の抵抗機構に関する実験研究—ひび割れ開閉性状—、日本建築学会構造系論文報告集、第388号、pp.35~44、1988年；同名—ひび割れ開閉モデルの検証—、日本建築学会構造系論文報告集、第409号、pp.37~50、1990年
- [2] 松崎育弘ほか：鉄筋コンクリート曲げ部材の復元力特性に関する解析的研究—ひび割れ開閉モデルを用いた部材回転変形の算出法—、日本建築学会構造系論文報告集、第411号、pp.39~48、1990年
- [3] 是永健好ほか：終局時にPC鋼材が降伏しないプレキャストPC梁の曲げ変形解析、第15回コンクリート工学年次講演会論文集15-2、pp.783~788、1993年
- [4] 山田 稔ほか：鉄筋コンクリート柱の弾塑性曲げ変形性状に関する研究（プラスチックヒンジの生成機構について）、日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.57~60、昭和43年
- [5] 是永健好ほか：プレキャストPC梁の地震時曲げ挙動に関する研究（その1）、（その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造II、pp.1053~1056、1993年
- [6] 六車 照ほか：横拘束筋によるプレレストレストコンクリート梁の曲げ靱性改善に関する研究、第2回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.377~380、1980年