

論文

[2099] PC柱のひびわれおよび破壊性状に関する基礎的研究

宮川邦彦^{*1}・前田隆志^{*2}・佐藤武夫^{*3}

1. はじめに

新幹線、モノレール、都市高速など高架構造物の施工急増に伴い、近年、土木構造分野でも建築構造物と同様、柱部材の設計が重要視されるようになってきた。特に我が国は地震多発地帯に位置する関係上、構造物の崩壊原因に繋がる柱部材の構造安全性を十分に確保しておくことが不可欠である。ところで、主に地震時の建築構造物に観られるRC短柱のせん断破壊や軸方向鉄筋の座屈破壊、また、土木構造物でも、モノレール橋脚に観られるRC長柱の供用状態下における曲げひびわれ発生に起因する耐久性や美観性の低下など、現行の柱部材に対する設計にはまだ改善、あるいは究明すべき問題が残されているように思われる。なお、これらの問題点は、現行の設計法がコンクリートの時間依存ひずみ（乾燥収縮およびクリープ）に起因する断面内部の応力移行現象を無視して設計している点にあると考えられる。一方、主に軸圧縮力を受ける柱部材にプレストレスの原理を適用することには若干矛盾を感じる向きもあろうが、PC柱を使用すれば、前述のようなRC柱に観られる構造上の欠点を改善できるとともに、高強度化による部材寸法の削減や自重軽減、あるいはプレキャスト化による現場施工の省力化や迅速施工など、これまでにはり部材で培われてきたPC構造の特長を柱部材の施工にも十分活用し得るものと考えられる。

そこで本研究では、比較検討のために曲げ破壊耐力がほぼ等しいRC柱とPC柱とを作製し、各部材の水平載荷時におけるひびわれ耐力や変形性状などを調べ、PC柱の有用性を検証した。以下に本研究の概要および結果について述べる。

2. RC柱の断面内部における応力移行現象

コンクリート構造物には永久荷重、変動荷重、あるいは偶発荷重など作用時期の異なる様々な荷重が作用する。しかしながら、現行の設計法では荷重の作用時期については一般に無視されている。鋼構造のように供用状態下では弾性を呈する構造系であれば、荷重の作用時期を無視して設計しても差し支えないであろうが、コンクリートのように大きな時間依存ひずみを生じる材料と鋼材とを合成した複合構造系では、断面内部の応力状態が大幅に経時変化するため、以前に作用していた荷重状態、すなわち、荷重履歴の違いが部材のひびわれ耐力や破壊性状に重大な影響を及ぼすことが懸念される。

そこで本章では、まず本研究の主旨を明確にするため、特に持続軸圧縮力を受けるRC柱の断面内部における応力移行現象とそれに付随する問題点について述べる。

コンクリート部材の時間依存現象を求めるための解析法としては、すでに多くの手法が提案されているが、ここに述べるモデル解析法は、コンクリートの時間依存ひずみを予測するために考案した特殊な力学モデルに、さらに図-1に示すように軸方向鉄筋およびPC鋼材を表す弾性ばね(G_s および G_p)を加え、種々な複合部材の時間依存現象を解析できるようにしたものである。なお、紙面の関係上、モデル解析法の詳細については割愛する[1][2]。

*1 九州産業大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 オリエンタル建設(株) 福岡支店工事部工事長

*3 九州産業大学技能員 工学部土木工学科

図-2および図-3は中心軸圧縮力を受けるRC柱の応力移行状態と軸方向鉄筋比との関係を求めたモデル解析結果の一例である。なお、同図にはTrost-Bazant法から求めた計算結果も示しているが、同結果はモデル解析のそれより軸方向鉄筋への応力移行を若干過小に予測するようである[3]。図示するように軸方向鉄筋比の増加に伴い、コンクリート断面の圧縮応力度が軸方向鉄筋に大幅に移行される

ことがわかる。すなわち、このようなRC柱の断面内部における応力移行現象が、例えば、地震時の斜めひびわれ発生や軸方向鉄筋の座屈を助長させる原因になっているものと考えられる。ところで、RC柱に関してはこれまでも数多くの実験が行われてきたが、このような応力移行を考慮した実験は著者らが知る限り皆無である。また、既設のモノレール橋脚に観られるようなRC長柱の供用状態下における曲げひびわれの発生原因も、終局限界状態に対する構造安全性を確保するために長柱には多量の軸方向鉄筋が配筋されており、それによる内部拘束の影響に起因していることは明白である。このようなRC柱の欠点を補うためにはPC柱の使用が有効であると考えられる。すなわち、PC柱の場合は、鋼材がコンクリートの時間依存ひずみを拘束することがないので、柱の変形量やPC鋼材の有効率の低減割合は若干増大するであろうが、RC柱のようにコンクリート断面の圧縮応力度が大幅に低減することはなく、したがって、供用状態下でのひびわれ耐力を確保でき、しかも、終局限界に近い荷重が作用した場合でも鋼材は座屈することがないため、RC柱のような中間帯鉄筋の配置も不要である。さらに中空断面柱として施工すれば、マスコンクリートに観られるようなセメントの水和熱に起因する温度ひびわれや部材内外の湿度差に起因する収縮ひびわれの面でも有利である。これらの点を勘案すると、構造物の種類や施

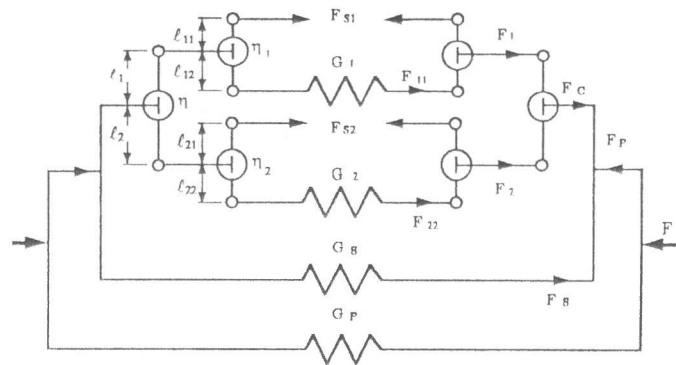


図-1 応力移行現象の解析に用いた力学モデル
(F:力 G:ばね定数 ℓ :容積割合 η :回転粘性係数)

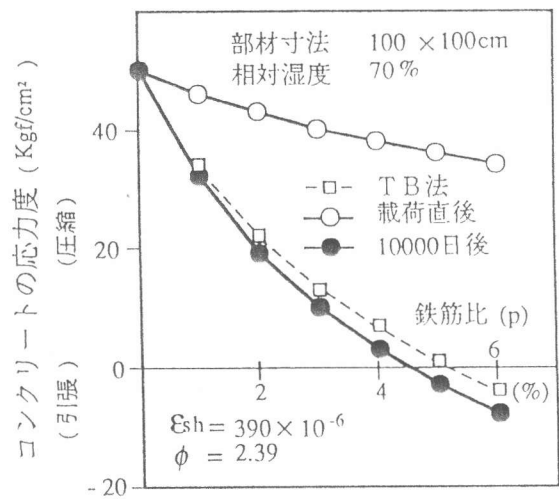


図-2 RC柱の応力移行状態(コンクリート)
($T_o=28$ 日 $C=300\text{kg/m}^3$ $W=180\text{kg/m}^3$ $N=500\text{tf}$)

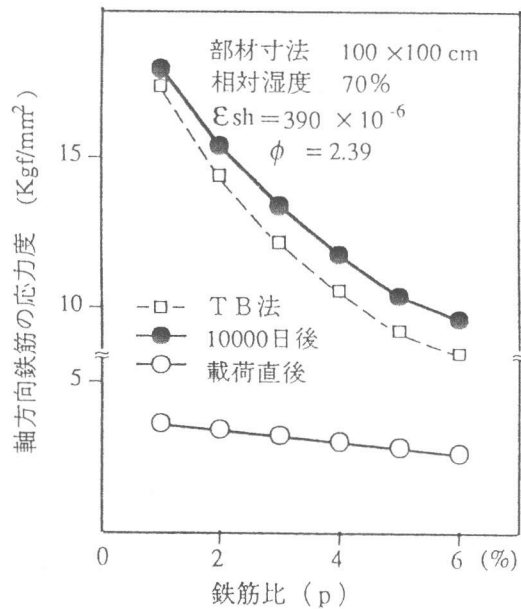


図-3 RC柱の応力移行状態(鉄筋)

工場によっては、PC柱の方がRC柱より相当有利になることもあると考えられる。

3. 実験概要

本実験では、単位水量 $200\text{kg}/\text{m}^3$ 、単位セメント量 $420\text{kg}/\text{m}^3$ のコンクリートを用い、図-4および図-5に示す逆T形のRC柱（軸方向鉄筋 4-D16：降伏強度 $35\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、帯鉄筋 D6：降伏強度 $34\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、帯鉄筋間隔 10cm ）とPC柱（PC鋼棒A種1号 4- $\phi 11$ ：耐力 $80\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、引張強度 $95\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、帯鉄筋：RC柱と同じ）を各4本作製した。部材の作製は、まずフーチング部のコンクリートを打設し、翌日にフーチング部上面のレイタンスを除去した後に柱部のコンクリートを打設した。ただし、RC柱の場合は縦向き（軸方向）に、PC柱の場合は、定着板の関係上、横向きにしてコンクリートを打設した。PC柱はポストテンション方式により、材令7日で目標プレストレス力 10tf を導入した後、シース中にセメントペースト（W/C=45%）をグラウトして一体化した。破壊試験は、図-6のように所定の材令で載荷フレームに柱部材を固定した後、単調水平載荷（せん断スパン比 $a/d=3$ ）しながら、部材のひびわれ耐力や変形性状などを調べた。なお、軸圧縮力を載荷したままで水平載荷する部材には、同図のように上端部にテフロン板を挿入し、載荷フレームと部材間の摩擦力が水平荷重に及ぼす影響を極力押さえた。以下に各部材の実験条件を示す。

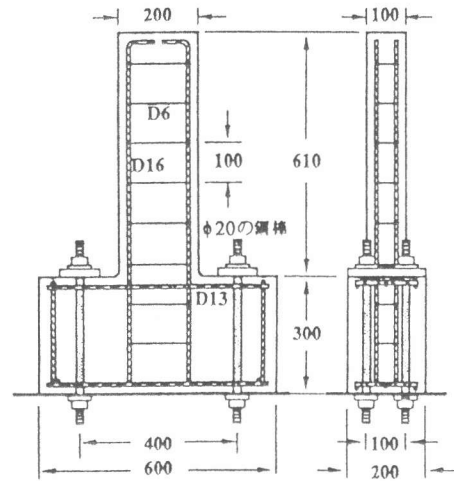


図-4 RC柱の形状寸法

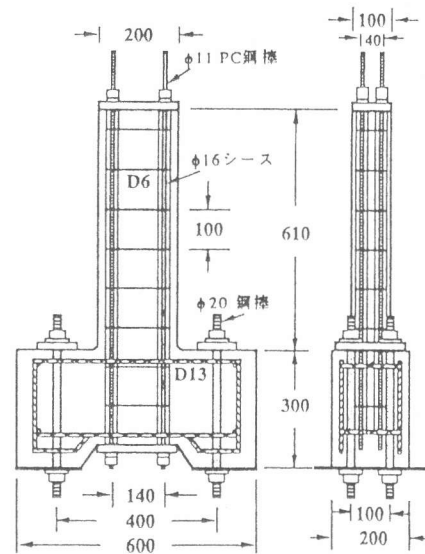


図-5 PC柱の形状寸法

- RC I 部材：約70日間湿潤養生後に破壊
- RC II 部材：約70日間湿潤養生、軸圧縮力 10tf 載荷直後に破壊
- RC III 部材：材令7日から軸圧縮力 10tf を約60日間持続載荷、除荷直後に破壊
- RC IV 部材：材令7日から軸圧縮力 10tf を約60日間持続載荷、そのまま破壊
- PC I 部材：約40日間実験室内静置後に破壊
- PC II 部材：約40日間実験室内静置、軸圧縮力 10tf 載荷直後に破壊
- PC III 部材：材令7日から軸圧縮力 10tf を約60日間持続載荷、除荷直後に破壊
- PC IV 部材：材令7日から軸圧縮力 10tf を約60日間持続載荷、そのまま破壊

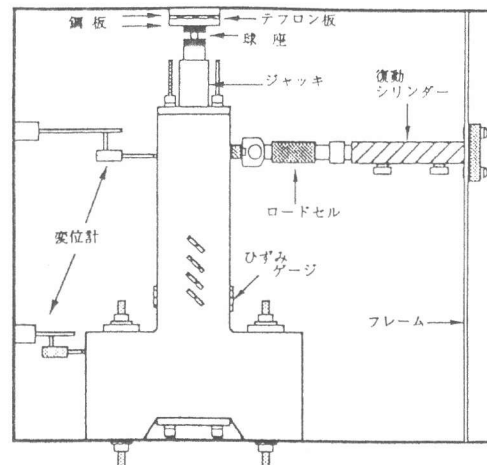


図-6 載荷試験装置

4. 実験結果および考察

本実験ではコンクリートを4回打設した。その力学試験結果を表-1にまとめて示す。また、部材内部の応力移行状態を確認するため、部材表面および軸方向鉄筋に貼付したひずみゲージを用いて、静置期間中の時間依存ひずみを実測した。図-7に実測曲線および前述のモデル解析から求めた解析曲線の一部を示す。なお、RCⅢおよびⅣ部材の時間依存ひずみは250 μ 程度、PCⅠおよびⅡ部材のそれらは320 μ 程度、PCⅢおよびⅣ部材のそれらは480 μ 程度であった。これらの実測結果を基に推定した破壊試験時におけるコンクリート断面の圧縮応力度($\sigma'c$)を表-2に示す。特にRC柱の場合、同表のように実験条件の違いでコンクリート断面の圧縮応力度が大幅に相違することがわかる。また、軸圧縮力を受ける部材の水平荷重を補正するため、本実験では軸圧縮力10tfを載荷したテフロン板の二面せん断試験を行った。図-8にテフロン板一面の摩擦力と変位量との関係を示す。なお、表-2の実測結果は図中の実線で示す値を用いて補正している。

表-2に各部材の破壊試験結果の一覧を示す。ひびわれ荷重の実測値は部材に貼付したひずみゲージの出力が急

表-1 コンクリートの力学諸特性

部 材 記 号	材令7日		破壊試験時			
	f'c	Ec	f'c	ft	fb	Ec
RCⅠ,Ⅱ	354	2.89	421	35.6	51.8	3.27
RCⅢ,Ⅳ	319	3.01	423	34.1	50.9	3.23
PCⅠ,Ⅱ	364	2.97	419	32.1	49.3	3.18
PCⅢ,Ⅳ	355	3.08	448	32.7	50.9	3.14

f'c:圧縮 ft:引張 fb:曲げ強度(単位:kgf/cm²)
Ec:ヤング係数(単位:×10⁵kgf/cm²)

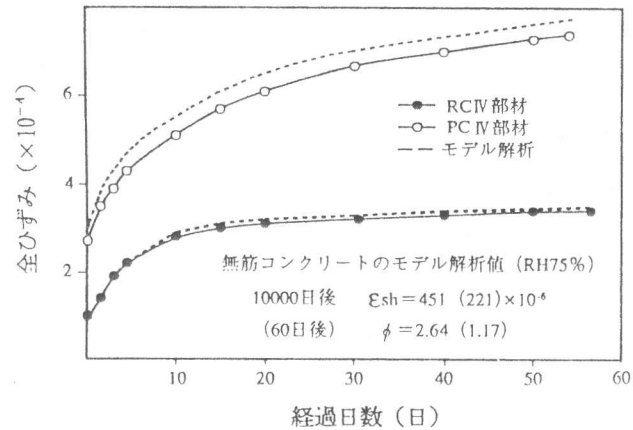


図-7 部材のひずみ-時間曲線

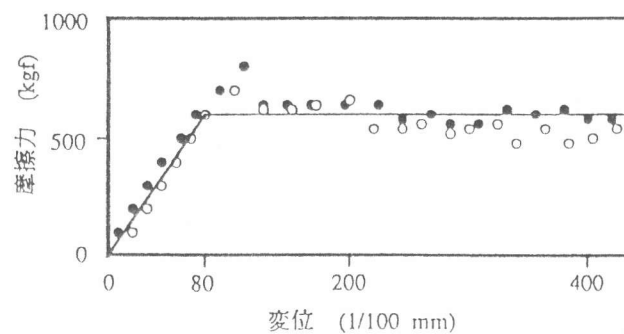


図-8 テフロン板の摩擦力と変位量との関係

表-2 部材の破壊試験結果

部 材	$\sigma'c$	Hmc	Hvc	Hvd	Hvc/Hvd	Hmu	Hmd	Hmu/Hmd	δmu	破壊形式
RCⅠ	0	1.0	3.0	2.37	1.27	4.80	4.22	1.14	12.5	曲げ引張り
RCⅡ	39.7	2.8	4.0	2.97	1.35	5.66	5.59	1.01	8.9	曲げ引張り
RCⅢ	-22.5	0.2	2.1	2.37	0.89	4.30	4.25	1.01	11.4	曲げ引張り
RCⅣ	21.7	2.0	3.6	2.97	1.21	6.60	5.60	1.18	7.2	せん断付着
PCⅠ	36.5	2.3	3.2	2.24	1.43	4.73	4.67	1.01	16.0	曲げ圧縮
PCⅡ	83.0	3.7	4.8	2.73	1.76	6.25	5.39	1.16	15.3	せん断
PCⅢ	37.6	2.1	3.1	2.29	1.35	5.48	4.74	1.16	14.3	せん断
PCⅣ	78.6	3.5	4.8	2.72	1.76	5.91	5.51	1.07	13.3	せん断

Hmc:曲げひびわれ荷重 Hvc:斜めひびわれ荷重 Hvd:斜めひびわれ耐力の計算値

Hmu:最大荷重 Hmd:破壊耐力の計算値(単位:tf)

$\sigma'c$:コンクリート断面の圧縮応力度(kgf/cm²) δmu :破壊荷重時の変位量(単位:mm)

変する点および目視から求めた値である。同表および図-9からわかるように曲げひびわれ荷重 (Hmc) および斜めひびわれ荷重 (Hvc) の実測値は、破壊試験時におけるコンクリート断面の圧縮応力度とほぼ比例関係にあり、この点を勘案すると、軸方向鉄筋の内部拘束でコンクリート断面の圧縮応力度が大幅に低減するRC柱に比べ、その影響がないPC柱の方がひびわれ耐力の面で有利であることがわかる。また、表中のHvdは現行の土木学会コンクリート標準示方書に規定されている斜めひびわれ耐力の算定式から求めた計算値である[4]。ただし、安全係数をすべて1.0とし、応力移行の影響や係数 β_d および β_p に対する制限を無視し、 $\beta_n = 1 + 2 M_o / M_u$ として求めた。ここに、 M_o は軸方向力による部材引張縁の応力度を打ち消すために必要な曲げモーメント、 M_u は部材の曲げ破壊モーメントである。実測値と計算値との比(Hvc/Hvd)を比較すると、時間依存ひずみの影響を受けていないRC IおよびII部材のそれらが1.3程度であるのに対し、その影響を受けたRC IIIおよびIV部材のそれらが小さくなっていることがわかる。したがって、さらに長期間乾燥や持続荷重の影響を受ける実構造物の場合、現行の斜めひびわれ耐力の算定式では危険になることも予想される。一方、PC柱の場合は、破壊試験時に軸圧縮力が作用していないPC IおよびIII部材の値が1.4程度、軸圧縮力が作用しているPC IIおよびIV部材のそれらが1.8弱と、その値がRC柱に比べて大きくなっている。これは、RC柱の場合、前述のように現行の設計法がコンクリートの時間依存ひずみの影響を無視しているのに対し、PC柱では有効プレストレス力でその影響が考慮されているためと考えられる。その他、現行の算定式がRCはりの実測結果を基に求められた経験式であることや、斜めひびわれ発生時の鋼材の応力状態や付着特性がRC柱とPC柱とでは相違することなどに起因するものと考えられる[5]。

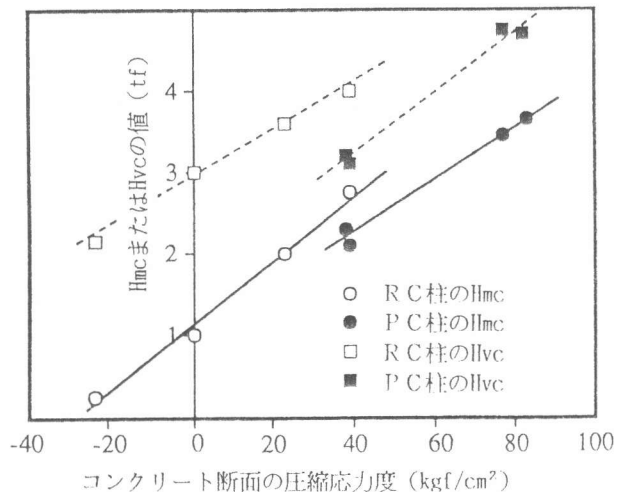


図-9 ひびわれ荷重と圧縮応力度との関係

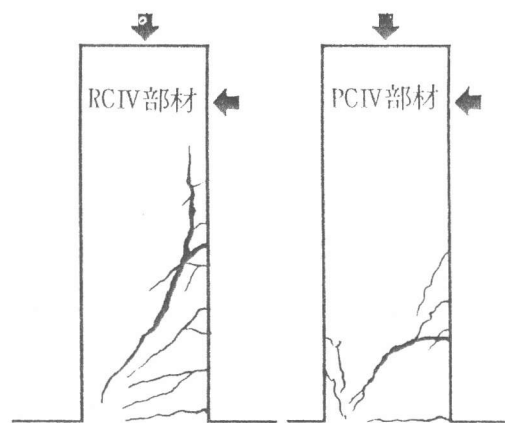


図-10 部材のひびわれ発生状況

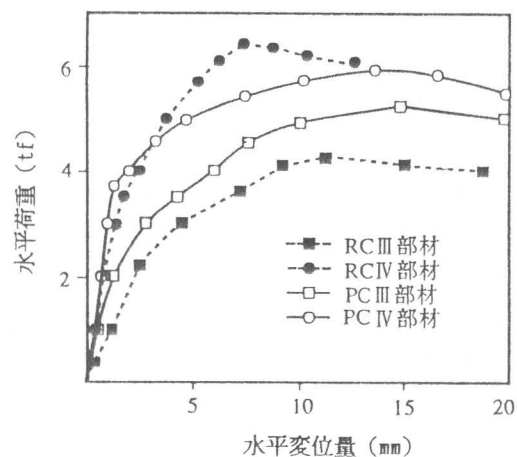


図-11 荷重と水平変位との関係

表中のHmuは最大荷重の実測値、Hmdは曲げ破壊に対する計算値である。なお、現行の終局強度算定式から破壊形式を求めると、RC柱の場合は曲げ引張り破壊、PC柱の場合は曲げ圧縮破壊(PC鋼材の全ひずみ量が0.004~0.015の範囲内)になる。同表のように実測値と計算値との

比 (μ_u/μ_{md}) は全部材とも1.0~1.2 の範囲内にあり、実測結果のばらつきを考慮すれば、現行の曲げ破壊耐力の算定式がほぼ妥当であることがわかる。ただし、RCIV部材の場合は、他のRC部材とは異なり、図-10に示すようにせん断付着破壊を生じた。これは、明らかに軸方向鉄筋への応力移行に起因するものと考えられる。また、RCIV部材の最大荷重が既報のそれとは大幅に相違する結果を得たが、これは、今回の実験と既報のそれとは、配合条件や破壊形式が相違したことによるものと考えられる[6]。特に既報の実験では斜めひびわれ発生以後、荷重が若干増加したものの、そのまま斜めひびわれが拡大して破壊したのに対し、今回の実験では、斜めひびわれが引張り側の軸方向鉄筋に沿って水平載荷点近くまで進行した後、せん断付着破壊を生じた。その結果、最大荷重が既報のそれより大きくなったものと考えられる。また、PCII~IV部材の破壊形式も前述の計算結果と異なっているが、これは、図-10に示すようにフーチング上面からほぼ15cmの所(二段目の帯鉄筋位置)に生じた曲げひびわれが徐々に斜めひびわれに進行した後にタイドアーチを形成し、圧縮部のコンクリート断面が圧壊してせん断破壊したためである。その結果、これらの部材では帯鉄筋がその役目を十分に果たし得なかったものと考えられる。これは、本実験に用いたPC鋼棒の付着特性や帯鉄筋の配置間隔に起因するものと考えられる。なお、この点に関しては、今後さらに検討すべきであろう。図-11は水平荷重と載荷点位置の水平変位量との関係の一部、また、表-2の $\delta\mu$ は最大荷重時の水平変位量である。このように特に軸圧縮力を受ける場合、PC柱の水平変位量がRC柱のそれより大きくなっていることがわかる。

5. まとめ

本研究では、RC柱の断面内部における応力移行現象とそれに付随する問題点、さらにその改善策として行ったPC柱に関する基礎的実験について述べたが、以下に結果を要約する。

(1) . RC柱のひびわれ耐力や破壊形式は、コンクリートの時間依存ひずみに起因する断面内部の応力移行現象で大幅に相違する。したがって、RC柱に関しては、今後、応力移行を考慮した実験を行うべきである。

(2) . ひびわれ耐力の面ではPC柱の方がRC柱より明らかに優れており、地震多発地帯や厳しい自然環境下に建設される柱部材には、PC柱の方が適している。

(3) . コンクリート部材の断面内部における応力移行現象を正確に算定するためには、現行の土木学会コンクリート標準示方書に規定されているコンクリートの乾燥収縮ひずみの特性値を無筋コンクリートのそれに改めるべきである。

参考文献

- 1) 宮川邦彦・渡辺 明:軸方向鉄筋を有するPC部材のクリープ解析法、コンクリート工学年次講演会講演論文集、第1回、No. 124、pp. 493~496、1979. 6
- 2) 宮川邦彦:力学モデルによるコンクリートの時間依存ひずみ予測、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集、V-84、pp. 167~168、1984. 10
- 3) Neville, A. M.・Dilger, W. H.・Brooks, J. J. :Creep of Plain and Structural Concrete、Construction Press、pp. 264~286、1983
- 4) コンクリート標準示方書[平成3年版]設計編、土木学会、1991
- 5) 二羽淳一郎ほか:せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、No. 372/V-5、pp. 167~176、1986. 8
- 6) 宮川邦彦ほか:RC柱の断面耐力に及ぼす荷重履歴の影響、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、V-345、pp. 716~717、1993. 9