

(74) プレストレストコンクリート部材の軸引張特性について

オリエンタル建設(株)	技術研究所	正会員	○大谷 悟司
同	上	正会員	吉岡 民夫
(株)安部工業所	技術本部	正会員	西尾 浩志
ドーピー建設工業(株)	技術営業部	正会員	岡島 武博

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、わが国の耐震設計法は震度法から地震時保有水平耐力法に大きく変わろうとしている。平成8年12月に改訂された道路橋示方書では、地震時保有水平耐力法が、震度法と同格の設計を決定する設計法として採用されている。

プレストレストコンクリート円筒形タンク(以下、PCタンクという)では、宮城沖地震以後に制定された「水道用プレストレストコンクリートタンク標準仕様書」(1980年3月、日本水道協会、以下、PCタンク仕様書という)によって設計が行われてきた。PCタンク仕様書は、「水道施設耐震工法指針・解説」(1979年5月、日本水道協会)に従う規定となっている。PCタンク仕様書では、一般のPCタンクの固有周期は、0.5秒より短いと考えられるので、耐震設計法は原則として震度法でよいとしている。設計に用いる水平震度は0.126~0.24である。側壁の安全度は、コンクリートに発生する応力度が、前述の震度において、コンクリートにひび割れが発生しないと期待できる許容応力度以下であることを、照査することになっている。

PCタンクが兵庫県南部地震のような大地震を受けた場合、PCタンクは非線形的な挙動を示すと考えられる。このため、上述した従来の耐震設計法の考え方では、大地震の地震動の想定がないこと、PCタンクの非線形挙動が考慮されていないことから、不十分な点が生じると考えられる。このような点を考慮して、PCタンク仕様書は、水道用PCタンク設計・施工指針(以下、PCタンク指針という)として、PCタンクの耐震設計法の大幅な改訂が行われた。

PCタンク指針の耐震設計法では、兵庫県南部地震のような大地震を設定し、この地震動を受けた場合の耐震水準が規定された。また、PCタンクの耐震水準を満足するために、側壁の非線形性を考慮した照査方法が示された。照査方法の中で、PCタンクの側壁に対して、保有耐力の照査と同時に、地震後に水密性が確保される程度に復元されるひずみ(以下、許容ひずみという)により、側壁部材の耐震性能を照査する方法が示された。これは、地震時に側壁部材に生じるひずみが、許容ひずみ以下であることを確認することで照査するものである。ここで、問題は、許容ひずみ量をどの程度にするかである。PCタンク指針では、許容ひずみを鉄筋の降伏ひずみとしてよいと示されている。しかし、これは、経験的に安全側の値として定められたものであり、プレストレストコンクリート(以下、PCという)固有の復元力特性を考慮すると、その規定を緩和することが可能であると考えられる。また、鉄筋が連続していない目地を有するプレキャスト部材を、PC鋼材を用いて接合した場合の許容ひずみについて、新たな知見を求められている。

よって、本研究は、PCタンク側壁の円周方向に着目し、地震力により発生する貫通ひび割れを想定し、軸引張実験を行いPC部材の軸引張特性を検討したものである。

2. 実験に用いた供試体および実験方法

本実験では、現場打ちPCタンクおよびプレキャストPCタンクの側壁を想定した供試体を製作し、プレストレス量、目地の有無をパラメータとし、表-1に示すように合計5体の供試体を用いて実験を行った。

供試体は、実験時にひび割れを発生させる断面(20cm×20cm)と供試体に引張力を与えるための両端の拡

幅部から構成されている。目地を有しない供試体では、断面中央部にひび割れを誘発させるため、面ずら60mmのVカットを上下面に設けた。目地を有する供試体では、目地幅を200mmとし、鉄筋が連続していない目地とした。プレストレス量は、断面20cm×20cmにおける値とした。

供試体は、プレストレス量、目地の有無によりA、Cの2シリーズがある。Aシリーズ(3体)は目地を有しない供試体であり、Cシリーズ(2体)は目地を有する供試体である。目地を有しない供試体は、現場打ちPCタンクの側壁を、目地を有する供試体はプレキャストPCタンクの側壁を想定したものである。Aシリーズでは、鉄筋量を断面の約1.0%とし、プレストレス量を0、15、30kgf/cm²と変化させた。Cシリーズでは、プレストレス量を15、30kgf/cm²と変化させ、目地を有すること、鉄筋が連続していないことによる影響を検討した。A、Cシリーズの供試体の形状寸法および配筋図を図-1に示す。

PC鋼棒は材質がSBPR 930/1080のものをを使用した。使用したPC鋼棒の径は、与えるプレストレス量より、C-2供試体ではφ9.2を、A-2、C-3供試体ではφ13を、A-3ではφ17とした。なお、Cシリーズでは、目地の接合がPC鋼棒のみであることから、供試体の微妙な偏心が、PC鋼棒のひずみに悪い影響を与えないようにするため、PC鋼棒を2本配置した。PC鋼棒の引張試験結果を表-2に示す。表-2に示したPC鋼棒の引張試験結果はミルシートによる値である。また、この時の降伏強度を弾性係数で除した値を降伏ひずみとした。

供試体の軸方向鉄筋は材質がSD295Aで径がD13の異形棒鋼を使用した。鉄筋の引張試験結果を表-3に示す。なお、Aシリーズでは溝切りした鉄筋を用いた。これは、軸方向鉄筋に連続的にひずみゲージを添付するため、鉄筋の付着特性に悪い影響を与えないようにするため、溝切りしたものである。

表-1 実験に用いた供試体

供試体名	鉄筋		PC鋼棒			プレストレス量 kgf/cm ²
	配置	断面積 cm ²	径 mm	断面積 mm ²	緊張力 tf	
A-1	4-D13	3.700	—	—	—	0
A-2			13	132.7	6.0	15
A-3			17	227.0	12.0	30
C-2	—	—	2-9.2	132.96	6.0	15
C-3	—	—	2-13	265.4	12.0	30

注) 鉄筋には溝切り鉄筋を使用しているため、断面積 $A_s = 4 \times 0.925 = 3.700 \text{ cm}^2$ となる。

表-2 PC鋼棒の引張試験結果

種別	降伏強度 kgf/cm ²	弾性係数 kgf/cm ²	降伏ひずみ μ
SBPR 930/1080			
φ9.2 C-2	12,860	2,041,000	6,300
φ13 A-2, C-3	10,990	2,041,000	5,385
φ17 A-3	10,390	2,051,000	5,066

表-3 鉄筋の引張試験結果

種別	降伏強度 kgf/cm ²	弾性係数 kgf/cm ²	降伏ひずみ μ
SD295A D13			
A-1, 3, 4	3,724	2,065,000	1,803
A-2, C-2, 3	3,898	2,082,000	1,872

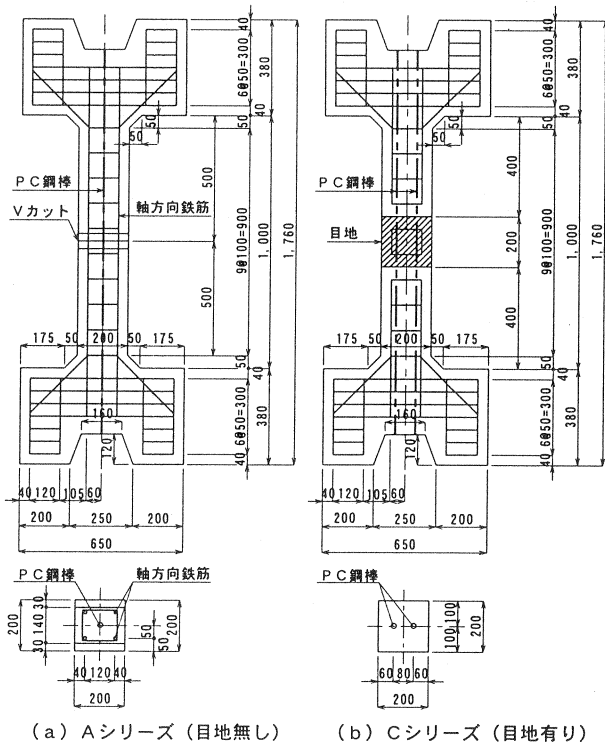


図-1 供試体の形状寸法および配筋図

コンクリート強度は350kgf/cm²とした。また、グラウト強度および目地を有する供試体 (Cシリーズ) の目地部に用いた無収縮モルタル強度は、供試体に用いたコンクリート強度と同じ350kgf/cm²が得られるようにした。

載荷実験は図-2に示すような載荷装置を用いて行った。Aシリーズの載荷は、ひび割れ発生までは荷重制御とし、鉄筋降伏までは鉄筋のひずみ制御とした。その後、破壊までは鉄筋降伏時の供試体変位量 (80cm標点で測定した供試体の変位量、以下、標点80cm変位という) を1δとし、これの整数倍で載荷した。荷重の除荷は、A-1供試体では、ひび割れ発生時、鉄筋降伏時、これ以降、破壊まで2δ、3δ・・・

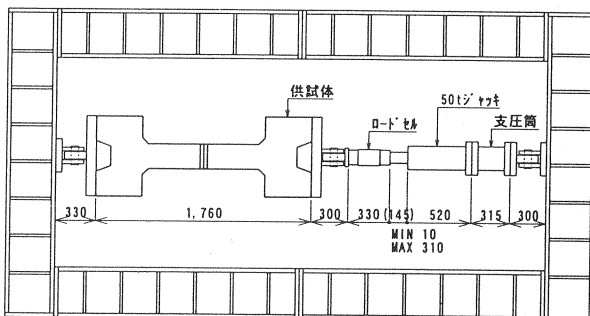


図-2 軸引張実験載荷装置

とし、A-2、3供試体では、ひび割れ発生時、鉄筋降伏時、PC鋼棒降伏時、これ以降、破壊まで2δ、3δ・・・とした。荷重サイクルの繰り返しは、ひび割れ発生時、鉄筋降伏時において2回繰り返した。Cシリーズの載荷は、目地ひび割れ発生までは荷重制御とした。その後、破壊までは、目地ひび割れ発生時の標点80cm変位を1δとし、これの整数倍で載荷した。荷重の除荷は、目地ひび割れ発生、PC鋼棒降伏時、これ以降、破壊まで2δ、3δ・・・とした。荷重サイクルの繰り返しは、目地ひび割れ発生時において2回繰り返した。

実験では、荷重、標点80cm変位、ひび割れ幅、軸方向鉄筋およびPC鋼棒ひずみを計測した。ひび割れ幅と軸方向鉄筋およびPC鋼棒ひずみの計測位置は、これらの関係を検討することから同じ断面とした。

3. 実験結果

3.1 荷重-平均ひずみの履歴曲線

A、Cシリーズの代表的な供試体の荷重-平均ひずみの履歴曲線を図-3(a)~(c)に示す。ここで示す平均ひずみとは、供試体の左右で計測した標点80cm変位を、標点距離80cmで除した値とした。

図-3(a)、(b)は、目地を有しない供試体 (Aシリーズ、この内、プレストレスを導入していないA-1供試体を、以下、RC供試体と、プレストレスを導入した供試体A-2、3供試体を、PC供試体という) を、図-3(c)は、目地を有する供試体 (Cシリーズ、以下、PCa供試体という) の履歴曲線を示す。これらの図には、ひび割れが発生した時点、鉄筋が降伏した時点、PC鋼棒が降伏した時点を矢印で示している。ひび割れが発生した時点は、目視でひび割れが確認された時点を、鉄筋が降伏した時点は、鉄筋の計測ひずみが表-3に示した鉄筋の降伏ひずみに達した時点を、PC鋼棒が降伏した時点は、実験で計測した増加ひずみとプレストレスを導入することにより、あらかじめPC鋼棒に生じているひずみの和が、表-2に示したPC鋼棒の降伏ひずみに達した時点とした。各供試体の荷重-平均ひずみの履歴曲線の特徴は以下の通りである。

(1) RC供試体の履歴曲線の特徴 (A-1供試体)

図-3(a)より、RC供試体では、ひび割れ発生時、鉄筋降伏時において、履歴曲線が大きく変曲している。鉄筋降伏後では、荷重の増加はほとんどなく、荷重はほぼ一定である。鉄筋降伏後の履歴曲線を見ると、荷重を除荷した場合、供試体に残留するひずみは、1サイクルの載荷によって供試体で増加させたひずみとほ

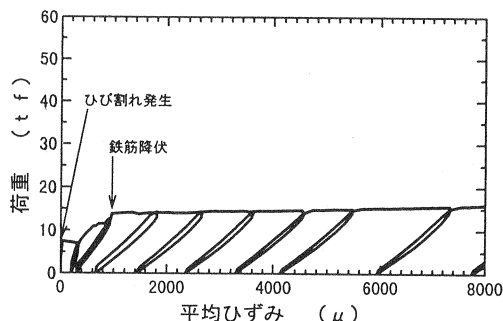


図-3(a) 荷重-平均ひずみの履歴曲線 (A-1, プレストレス量=0kgf/cm²)

ほぼ同じ量のひずみが残留している。

(2) PC供試体の履歴曲線の特徴 (A-3 供試体)

図-3(b)より、PC供試体では、上述のRC供試体と同じように、ひび割れ発生時、鉄筋降伏時において、履歴曲線が大きく変曲している。ただし、PC鋼棒が降伏する時点では、履歴曲線の変曲は顕著ではなかった。ひび割れ発生時で除荷した場合は、ひび割れが閉じたため、供試体にひずみは残留していない。

(3) PCa供試体の履歴曲線の特徴 (C-3 供試体)

図-3(c)より、PCa供試体では、目地ひび割れ発生時、PC鋼棒降伏時において、履歴曲線が大きく変曲している。PC鋼棒降伏後では、荷重の増加はほとんどなく、荷重はほぼ一定である。荷重を除荷した場合に供試体に残留するひずみは、PC鋼棒が降伏するまでほとんど生じていない。

(4) RC、PC供試体のプレストレス量の相違による履歴曲線の特徴 (A-1、3 供試体)

図-3(d)は、RC、PC供試体におけるプレストレス量の違いが供試体の履歴曲線に及ぼす影響を検討したものである。各供試体の軸引張耐力が異なっているため、荷重を実験より得られた最大荷重で除して無次元化している。図-3(d)より、プレストレス量が多くなると、供試体に残留するひずみは小さくなっており、供試体の復元力が大きくなる。例えば、A-1供試体とA-3供試体のひずみ(図中の矢印位置、A-1供試体では $4\varepsilon_{y1}$ 、A-3供試体では $2\varepsilon_{y3}$)が、ほぼ同じになる時に荷重を除荷した場合は、供試体に残留するひずみは、A-1供試体では約2,200 μ であり、A-3供試体では約800 μ である。

(5) PC供試体(目地無し)とPCa供試体(目地有り)の目地の有無による履歴曲線の特徴 (A-2、C-2 供試体)

図-3(e)は、PC供試体(目地無し)とPCa供試体(目地有り)の履歴曲線を比較したものであり、プレストレス量が同じ場合の目地の有無が供試体の履歴曲線に及ぼす影響を検討したものである。各供試体の軸引張耐力が異なっているため、荷重を実験より得られた最大荷重で無次元化している。図-3(e)より、C-2供試体では、目地ひび割れ発生後、急激に軸剛性が低下していることがわかる。また、C-2供試体のほうが、A-2供試体より高い復元性を示している。例えば、C-2供試体とA-2供試体のひずみ(図中

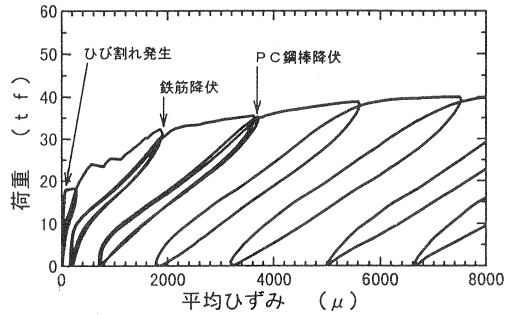


図-3(b) 荷重-平均ひずみの履歴曲線 (A-3, プレストレス量=30kgf/cm²)

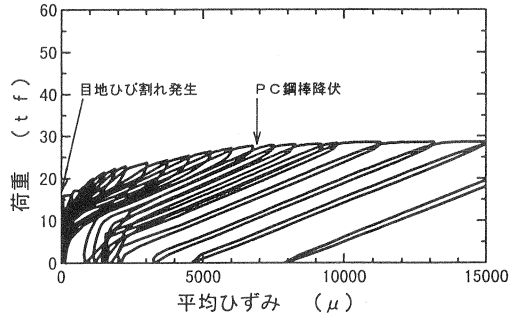


図-3(c) 荷重-平均ひずみの履歴曲線 (C-3, プレストレス量=30kgf/cm²)

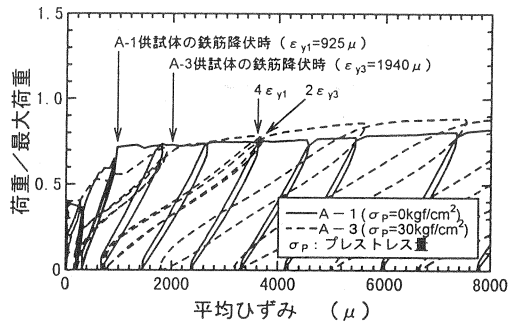


図-3(d) 荷重/最大荷重-平均ひずみの履歴曲線の比較 (Aシリーズ, $\sigma_p=0$ および30kgf/cm²とした場合)

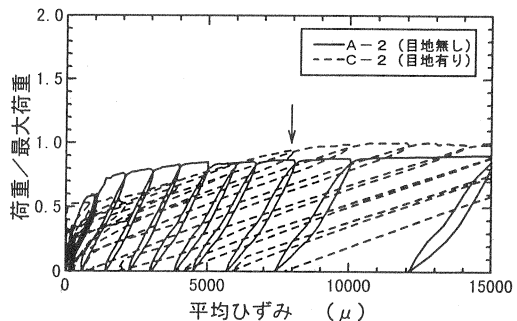


図-3(e) 荷重/最大荷重-平均ひずみの履歴曲線の比較 (A, Cシリーズ, $\sigma_p=15kgf/cm^2$ とした場合)

の矢印位置)が、ほぼ同じになる時に荷重を除荷した場合には、供試体に残留するひずみは、C-2 供試体では約1,000 μ であり、A-2 供試体では約6,000 μ である。

3.2 残留ひび割れ幅-最大ひび割れ幅の関係

ひび割れ幅が最も大きくなった位置における、残留ひび割れ幅-最大ひび割れ幅の関係を図-4に示す。ここで示す残留ひび割れ幅は、荷重を除荷した時の供試体に残留するひび割れ幅を、最大ひび割れ幅は、各荷重サイクルにおいて荷重が最大値に達した時の供試体に生じているひび割れ幅である。これらの図には、鉄筋が降伏した時点を●で、P C鋼棒が降伏した時点を■で示している。図-4より、目地を有しない供試体(Aシリーズ)では、いずれの供試体においても、最大ひび割れ幅の増加量に対する残留ひび割れ幅増加量は、鉄筋降伏後のほうが鉄筋降伏前より大きくなっている。例えば、A-1 供試体では、最大ひび割れ幅の増加量0.1mmに対する残留ひび割れ幅の増加量は、鉄筋降伏前では約0.031mmであり、鉄筋降伏後では約0.087mmである。また、プレストレス量が大きいほうが、最大ひび割れ幅の増加量に対する残留ひび割れ幅増加量は小さくなっている。例えば、A-2 供試体の鉄筋降伏前の最大ひび割れ幅の増加量0.1mmに対する、残留ひび割れ幅の増加量は約0.015mmであり、これは、上述したA-1 供試体の鉄筋降伏前の残留ひび割れ幅の増加量の約50%である。一方、目地を有する供試体(Cシリーズ)では、いずれの供試体においても、最大ひび割れ幅の増加量に対する残留ひび割れ幅増加量は、P C鋼棒降伏後のほうが、P C鋼棒降伏前より大きくなっている。例えば、C-2 供試体では、最大ひび割れ幅の増加量1.0mmに対する残留ひび割れ幅の増加量は、P C鋼棒降伏前では約0.098mmであり、P C鋼棒降伏後では約0.44mmである。また、プレストレス量が大きいほうが、最大ひび割れ幅の増加量に対する残留ひび割れ幅増加量は小さくなっている。例えば、C-3 供試体のP C鋼棒降伏前の最大ひび割れ幅の増加量1.0mmに対する、残留ひび割れ幅の増加量は約0.035mmであり、これは、上述したC-2 供試体の鉄筋降伏前の残留ひび割れ幅の増加量の約35%である。

以上のことから、目地を有しない供試体(Aシリーズ)では、鉄筋が降伏しなければ残留するひび割れ幅が小さく、鉄筋降伏後も、プレストレス量が大きいほど残留するひび割れ幅が小さくなる。一方、目地を有する供試体(Cシリーズ)では、P C鋼棒が降伏しなければ残留するひび割れ幅が小さくなる。このようなことから、目地を有しない場合には、鉄筋降伏時が、目地を有する場合は、P C鋼棒降伏時が、ひび割れ幅を制御する上で、ひとつの判断ポイントと考えてよいであろう。そこで、これらのポイントに着目して、残留ひび割れ幅と鉄筋またはP C鋼棒ひずみの関係を検討することとする。

3.3 残留ひび割れ幅-鉄筋またはP C鋼棒ひずみの関係

ひび割れ幅が最も大きくなった位置における、残留ひび割れ幅-鉄筋またはP C鋼棒ひずみの関係を図-5に示す。ここで示す鉄筋またはP C鋼棒ひずみは、各荷重サイクルで荷重が最大となった時のひずみであり、残留ひび割れ幅は、この時の荷重を除荷した時に供試体に残留したひび割れ幅である。図-5には、鉄筋の降伏ひずみを約1,800 μ として実線で示している。また、目地を有する供試体(Cシリーズ)において、P C鋼棒が降伏した時点を■で示している。図-5より、目地を有しない供試体(Aシリー

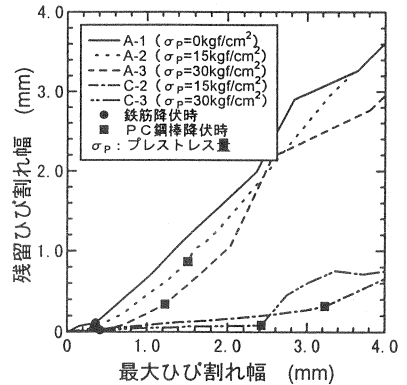


図-4 残留ひび割れ幅-最大ひび割れ幅の関係

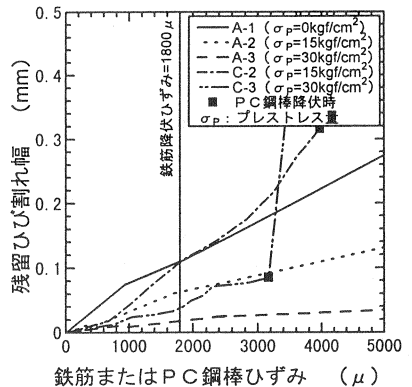


図-5 残留ひび割れ幅-鉄筋またはP C鋼棒ひずみの関係

ズ)の鉄筋が降伏ひずみに達する時の残留ひび割れ幅は、A-1供試体では0.11mm程度であり、A-2、3供試体では0.1mm以下である。一方、目地を有する供試体(Cシリーズ)のPC鋼棒が降伏ひずみに達する時の残留ひび割れ幅は、C-2供試体では0.32mm程度であり、C-3供試体では0.08mm程度である。また、C-2、3供試体において、PC鋼棒のひずみが鉄筋の降伏ひずみ相当に達する時の残留ひび割れ幅は、C-2、3供試体とも0.1mm以下であることがわかる。

以上のことから、プレストレス量が大きくなると残留ひび割れ幅は小さくなり、プレストレスを導入した供試体では、鉄筋またはPC鋼棒ひずみが、鉄筋の降伏ひずみに達する時の残留するひび割れ幅は、0.1mm以下である。

4.まとめ

PCタンク指針の耐震設計に反映するために、PCタンクの側壁円周方向に着目し、地震力により発生する貫通ひび割れを想定した、PC部材の軸引張実験を行い、部材の軸引張特性を検討した。本実験の範囲で得られた結論は以下の通りである。

(1) 供試体で計測した標点80cm変位を、標点距離80cmで除して求めたひずみを、供試体の平均ひずみとして、荷重との関係を履歴曲線より検討した結果、以下の結論が得られた。

(a) RC供試体(A-1)

①ひび割れ発生時、鉄筋降伏時において、履歴曲線が折れ曲がる特性を示す。鉄筋降伏後では、荷重の増加はほとんどなく、荷重はほぼ一定である。

②鉄筋降伏後の履歴曲線では、荷重を除荷した場合、供試体に残留するひずみは、1サイクルの载荷によって供試体で増加させたひずみと、ほぼ同じ量のひずみが残留する。

(b) PC供試体(A-2~A-3)

①RC供試体と同じように、ひび割れ発生時、鉄筋降伏時において、履歴曲線が折れ曲がる特性を示す。しかし、PC鋼棒が降伏する時点では、履歴曲線の折れ曲がりには顕著には現れていない。

②ひび割れ発生時で除荷しても、残留するひずみはなく、ひび割れは閉合する。

③残留するひずみは、プレストレス量が大きいほど小さく、プレストレス量が大きいほど復元性が高い。

(c) PCa供試体(C-2, C-3)

①目地ひび割れ発生時、PC鋼棒降伏時において、履歴曲線が折れ曲がる特性を示す。PC鋼棒降伏後では、荷重の増加はほとんどなく、荷重はほぼ一定である。

②残留するひずみは、PC鋼棒が降伏するまでほとんど生じない。

③プレストレス量が同じであれば、PCa供試体(目地有り)のほうが、PC供試体(目地無し)より復元性が高い。

(2) 供試体で計測したひび割れ幅に着目し、残留ひび割れ幅と最大ひび割れ幅、鉄筋またはPC鋼棒ひずみとの関係を検討した結果、以下の結論が得られた。

(a) RC、PC供試体では、鉄筋が降伏しなければ残留するひび割れ幅が小さく、鉄筋降伏後でも、プレストレス量が大きいほど残留するひび割れ幅が小さい。

(b) PCa供試体では、PC鋼棒が降伏しなければ残留するひび割れ幅が小さい。

(c) プレストレスを導入した場合、鉄筋またはPC鋼棒ひずみが、鉄筋の降伏ひずみに達する時の残留するひび割れ幅は、0.1mm以下である。

謝辞

本研究は、(社)プレストレストコンクリート建設業協会技術部会「PCタンク検討小委員会」の委員会活動の一環として実施したものである。ここに関係各位に謝意を示す。