

軸引張力が作用するプレストレストコンクリート部材の残留ひび割れ幅に関する実験的研究

Experimental study on residual crack width of prestressed concrete members subject to axial tension

大谷 悟司*, 江口 信三*, 吉岡 民夫**

Satoshi Ohtani, Shinzo Eguchi, Tamio Yoshioka

*オリエンタル建設機技術研究所 (〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘 5)

**工博 オリエンタル建設機技術研究所 (〒321-4367 栃木県真岡市鬼怒ヶ丘 5)

One of seismic performances for prestressed concrete tanks is to keep watertightness after very severe earthquakes. The watertightness of concrete tanks depends deeply on residual crack width. Cracks open during the earthquake and close after it. The crack width seems to be strongly affected by the prestress level, re-bar ratio and precast joint, where re-bars are not continuous. Uni-axial tension test is carried out to know the relationship among increased steel strain, max. crack width and residual crack width. Strong linearity is observed between increased steel strain and residual crack width.

Key Words : uni-axial tension test , residual crack width

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震を契機に、我が国の土木構造物の耐震設計概念は、従来の震度法から、動的解析法や保有耐力法へと、大きく変遷した。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）では、宮城県沖地震後に制定された「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）¹⁾に従って、震度法により、耐震設計を行ってきた。それは、地震時にコンクリートに発生する引張応力度が、PCタンク本来の性能である液密性を阻害することがないように、ひび割れ発生を避けられると期待できる許容応力度以下であることを照査する方法で行ってきた。

新しい耐震設計法の特徴の一つは、兵庫県南部地震のような、極めて巨大な地震を想定して、耐震設計を行うことである。PCタンクは、兵庫県南部地震でも大きな被害を受けておらず、また、海外でもPCタンクの震害例の報告が少ないことから、巨大な地震を受けた時に、PCタンクがどのような挙動を示すかについては定かではない。そこで、有限要素法を用い、代表的な形状のPCタンクの線形動的解析および静的非線形解析を実施して、巨大地震下におけるPCタンクの挙動予測を行ったところ、円周方向の軸引張力が最もクリティカルで、また、通常用いられるプレストレス量や鉄筋量の場合、PCタンクの円周方向は、軸引張部材として高いじん性を示すことが判った。

「水道用PCタンク設計施工指針・解説」（1998

年、日本水道協会）²⁾では、PCタンクの耐震性能を、1) 急激に大量の水が漏洩し、第三者被害を発生させることのないように、PCタンクは崩壊してはならないこと、および、2) 地震後の緊急水確保のために、液密性を確保することと定め、巨大地震（レベル2地震）時に、PCタンクの円周方向が、十分な保有耐力を有していることと、地震後に液密性を保持できると考えられるほど、十分にひび割れが閉じていることを確認することとしている。前者は、PCタンクのじん性を考慮に入れた（等価）設計水平震度により発生する軸引張力が、部材の終局軸引張耐力より小さいことを確認し、後者は、鋼材に発生する応答ひずみが、地震後にひび割れが十分に閉じると期待できる程度以下であることを確認することにより行う。

地震後の残留ひび割れ幅については、プレストレス量に大きく依存すると同時に、配置されている鉄筋の量に影響を受けると考えられる。また、プレキャストタンクで、円周方向の鉄筋が連続していない鉛直目地が存在する場合、目地の開きと地震後の復元性については、未解明の部分が多い。そこで、本研究は、PCタンク側壁の円周方向に着目し、地震力により貫通ひび割れが発生することを想定し、軸引張実験を行い、大変形時のPC部材の鋼材のひずみと除荷後の残留ひび割れ幅について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

2.1 実験供試体

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、鉄筋量、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9体の供試体を用いて実験を行った。

供試体は、鉄筋量、プレストレス量、目地の有無によりA、B、Cの3シリーズがある。Aシリーズ（4体）およびB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タンクの側壁をそれぞれ想定したものである。供試体の全般的な特徴は以下の通りである。

- (1) 供試体は、図-1(a)に示すように、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。
- (2) 目地を有しない供試体（A、Bシリーズ）では、断面中央部にひび割れを誘発させるため、60mmのVカットを上下面に設けた（図-1(a)参照）。
- (3) 目地を有する供試体（Cシリーズ）では、目地幅を200mmとし、鉄筋が連続していない目地とした（図-1(b)参照）。
- (4) プレストレス量は、断面20cm×20cmにおける値とした。

A、Bシリーズ供試体の形状寸法図を図-1(a)に、Cシリーズ供試体の形状寸法図を図-1(b)に示す。

また各シリーズの供試体の特徴は以下の通りである。

- (1) Aシリーズ：Aシリーズ供試体は、鉄筋量を断面の約1.0%とし、プレストレス量を0、1.5、3、5N/mm²と変化させた。
- (2) Bシリーズ：Bシリーズ供試体は、鉄筋量を断面の約1.7%とし、プレストレス量を0、3、5N/mm²と変化させ、Aシリーズの同じプレストレス量の供試体と比較することにより、鉄筋量が異なることによる影響を検討した。
- (3) Cシリーズ

Cシリーズ供試体は、プレストレス量を1.5、3N/mm²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、BおよびCシリーズの代表的な供試体の配筋図およびPC鋼材配置図を図-1(a),(b)に示す。なお、PC鋼材は供試体コンクリートと同じ強度のグラウトを実施した。

2.2 使用材料

供試体には、早強ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの強度は35N/mm²とし、スランブは8cmとした。粗骨材の最大寸法は20mmである。

供試体の軸方向鉄筋には、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-2に示す。Aシリーズ（A-2,3,4）、Bシリーズ（B-3,4）、Cシリーズ（C-2,3）には、材質がSBPR 930/1080のPC鋼棒

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 N/mm ²
	配置	断面積 cm ²	径 mm	断面積 mm ²	緊張力 kN	
A-1	4-D13	3.700*	-	-	-	0
A-2			13	132.7	60	1.5
A-3			17	227.0	120	3
A-4			23	415.5	200	5
B-1	6-D13	6.918*	-	-	-	0
B-3			17	227.0	120	3
B-4			23	415.5	200	5
C-2	-	-	2-9.2	132.96	60	1.5
C-3	-	-	2-13	265.4	120	3

*鉄筋ゲージ貼付のために、Aシリーズでは4本、Bシリーズでは2本の溝切り鉄筋(As=0.925cm²)を使用

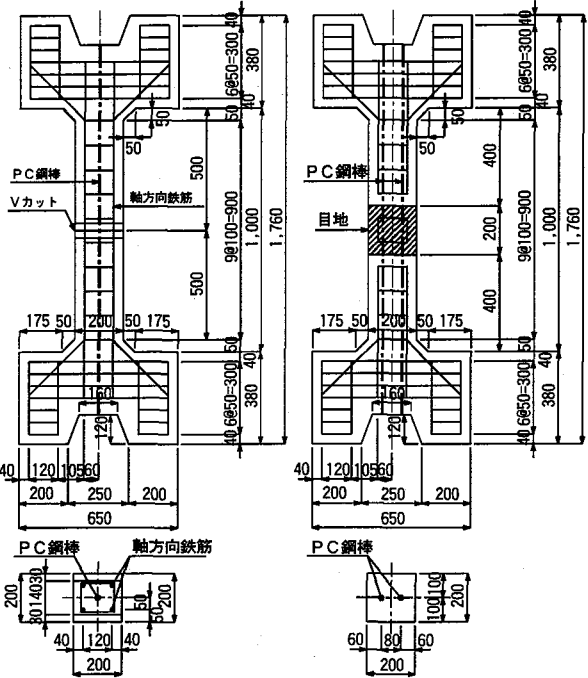


図-1 供試体の形状寸法および配筋図

表-2 鉄筋の引張試験結果

種別 SD295A	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (N/mm ²)
A-1,3,4,B-1,3,4	372.4	1,803	206,500
A-2,C-2,3	389.8	1,872	208,200

表-3 PC鋼棒の引張試験結果

種別 SBPR 930/1080	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	弾性係数 (N/mm ²)
φ9.2 C-2	1,286	6,300	204,100
φ13 A-2,C-3	1,099	5,385	204,100
φ17 A-3,B-3	1,039	5,066	205,100
φ23 A-4,B-4	1,034	5,066	204,100

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ではφ9.2mmを、A-2、C-3ではφ13mmを、A-3、B-3ではφ17mmを、A-4、B-4ではφ23mmを使用した。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-3 に示す。同表に示したPC鋼棒の引張試験結果は、ミルシートによる値である。なお、PC鋼棒は明確な降伏点をもたないため、0.2%の永久ひずみを生じる応力度を降伏強度、この時の降伏強度を弾性係数で除して求めた値を降伏ひずみとした。

目地を有する供試体（Cシリーズ）の目地部には、無収縮モルタルを用いた。無収縮モルタルの強度は、供試体に用いたコンクリート強度と同じ 35N/mm² が得られるようにした。

2.3 実験方法

載荷実験は、図-2 に示すような載荷装置により実施した。A、Bシリーズの載荷は、ひび割れ発生までは荷重制御とし、ひび割れ発生後は鉄筋またはPC鋼棒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 標点で測定する供試体の変位量）を1δとし、2δ、3δ、4δ・・・と載荷した。荷重の除荷は、A-1、B-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、4δ・・・とし、A-2、3、4、B-3、4 供試体では、プレストレスによる圧縮力が0となる時（以下、デコンプレッション時という）、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、4δ・・・とした。荷重サイクルの繰り返しは、デコンプレッション時、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、目地ひび割れ発生後は変位制御とした。目地ひび割れ発生後、PC鋼棒降伏までは、目地ひび割れ発生

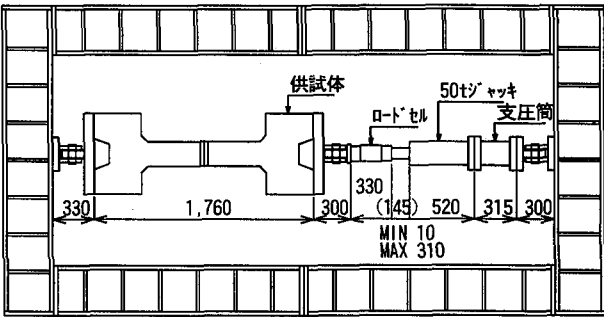


図-2 軸引張実験載荷装置

時の供試体変位量（80cm 標点で測定する供試体の変位量）を1δとし、2δ、3δ、4δ・・・と載荷した。その後、破壊までこれと同様に載荷した。荷重の除荷は、デコンプレッション時、目地ひび割れ発生、PC鋼棒降伏時、これ以降、破壊まで2δ、3δ、4δ・・・とした。荷重サイクルの繰り返しは、デコンプレッション時、目地ひび割れ発生時において2回繰り返した。

2.4 測定項目

実験では、荷重、標点 80cm における供試体の変位量、ひび割れ幅、コンクリートひずみ、軸方向鉄筋およびPC鋼棒ひずみを計測した。荷重の測定はロードセル、標点 80cm における供試体の変位量は変位計、ひび割れ幅はπゲージ（標点 10cm）、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみおよびPC鋼棒ひずみはひずみゲージを用いた。

なお、Cシリーズでは、目地を有しているため鉄筋が連続していないことから鉄筋ひずみの計測は行っていない。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。

表-4 実験結果一覧表

供試体名	ひび割れ発生	鉄筋降伏	PC鋼材降伏	破壊または実験終了状況
A-1	P=70.0kN	P=126.3kN δ=0.740mm	—	・P=193.9kN(82.00 δ=60.860mm)において鉄筋の破断により破壊に至る。
A-2	P=110.0kN	P=197.5kN δ=0.800mm	P=283.6kN δ=5.280mm	・P=332.1kN(56 δ=44.80mm)においてPC鋼棒の破断により破壊に至る。
A-3	P=185.0kN	P=323.3kN δ=1.550mm	P=352.6kN δ=3.126mm	・P=451.7kN(29 δ=44.95mm)においてPC鋼棒の破断により破壊に至る。
A-4	P=225.0kN	P=409.9kN δ=1.520mm	—	・2.50 δ=3.800mm,P=510.1kNでジャッキ容量不足で実験終了。
B-1	P=65.0kN	P=201.7kN δ=0.900mm	—	・120.0 δ=108.0mm,P=362.0kNでジャッキストローク不足で実験終了。
B-3	P=180.0kN	P=442.3kN δ=1.950mm	P=464.8kN δ=2.803mm	・2.12 δ=4.125mm,P=473.2kNでジャッキ容量不足で実験終了。
B-4	P=240.0kN	P=517.9kN	—	・P=517.9kNでジャッキ容量不足で実験終了。 ・PC鋼棒の降伏まで至らず。
C-2	P=92.0kN δ=0.80mm	—	P=167.0kN 10.0 δ=8.00mm	・P=172.5kN(48 δ=38.40mm)においてPC鋼棒の破断により破壊に至る。
C-3	P=164.0kN δ=0.30mm	—	P=276.7tf 18.0 δ=5.40mm	・P=295.1kN(128 δ=44.40mm)においてPC鋼棒の破断により破壊に至る。

注)鉄筋降伏時の標点80cm変位を1δとする。
注)Cシリーズのひび割れ発生は、目地ひび割れ発生とする。

3.実験結果

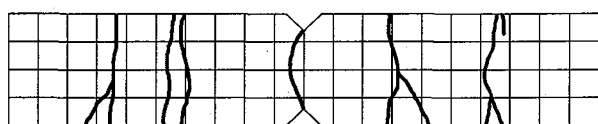
本実験の結果一覧を表-4に示す。

3.1 ひび割れ

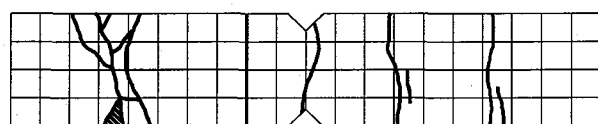
供試体 A-1, A-3 および C-3 の破壊時側面におけるひび割れ図を図-3(a)~(c)に示す。

現場打ちPCタンクを想定し、鉄筋が連続し、目地を有しない供試体 (A、B シリーズ、この内、プレストレスを導入していない A-1、B-1 供試体を、以下、RC 供試体と、プレストレスを導入したそれ以外の供試体を、以下、PC 供試体という) では、いずれの供試体とも、最初に、断面中央部 (V カット部) にひび割れが発生した。その後、荷重の増加とともに、ひび割れ本数は増加し、破壊時または実験終了時のひび割れ間隔は約 15cm であった。供試体の標点 80cm 区間に発生したひび割れ本数は、いずれの供試体においても 4、5 本程度であった。

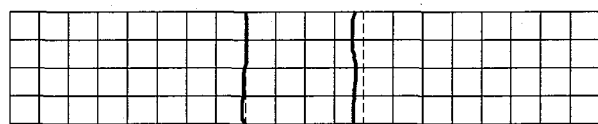
プレキャストPCタンクを想定し、鉄筋が連続していない目地を有する供試体 (C シリーズ供試体、以下、PCa 供試体という) では、最初に、断面中央部に設けた目地の片側にひび割れが発生した。その後、荷重の増加とともに、ひび割れは目地の他の一方にも発生し、これら以外に発生することはなかった。供試体の標点 80cm



(a) A-1



(b) A-3



(c) C-3

注) ハッチ部はコンクリートの剥落を示す。

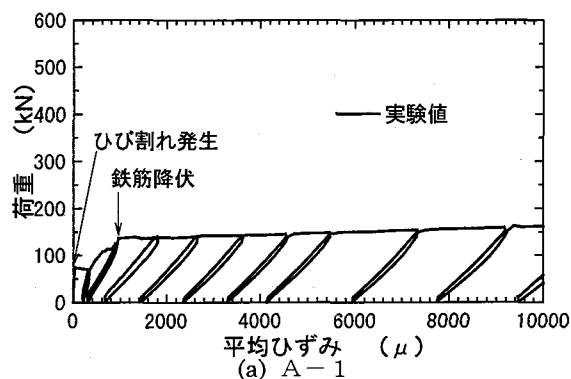
図-3 破壊時側面のひび割れ図

区間に発生したひび割れ本数は、C-2、C-3 供試体とも 2 本であった。

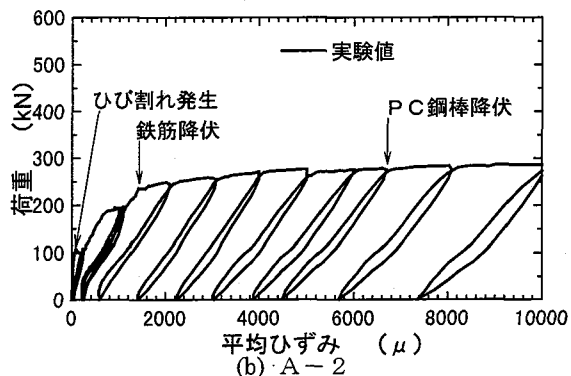
3.3 荷重-平均ひずみの履歴曲線

荷重-平均ひずみの履歴曲線を、図-4(a)~(i)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 (以下、平均ひずみという)。

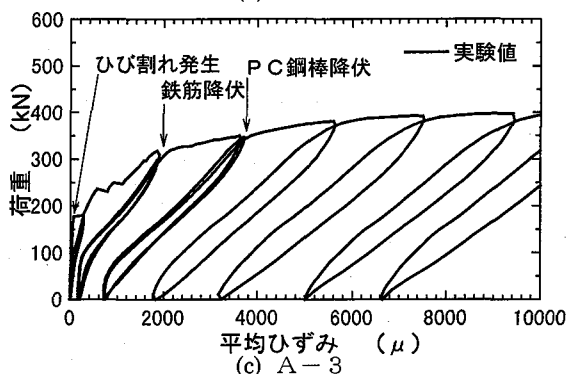
図-4(a)~(g)は、鉄筋が連続し、目地を有しない RC、PC 供試体 (A、B シリーズ) を、図-4(h)、(i)は、鉄筋が連続していない目地を有する PCa 供試体 (C シリ



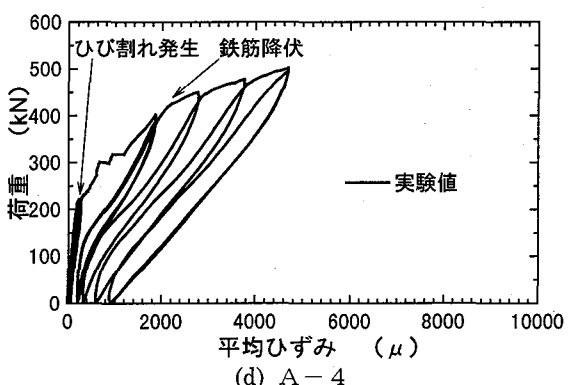
(a) A-1



(b) A-2



(c) A-3



(d) A-4

図-4 荷重-平均ひずみの履歴曲線(その1)

ーズ) 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。ただし、A-4、B-4 供試体では、PC 鋼棒が降伏するまで載荷できなかったため、これらの供試体では、PC 鋼棒が降伏した時点は示していない。

ひび割れが発生した時点は、目視でひび割れが確認さ

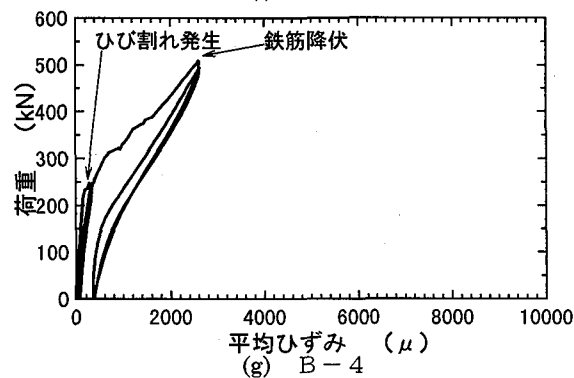
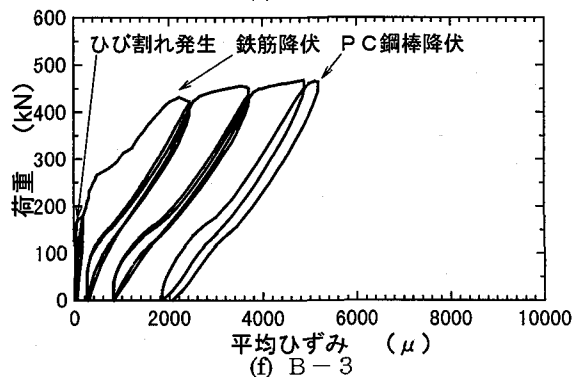
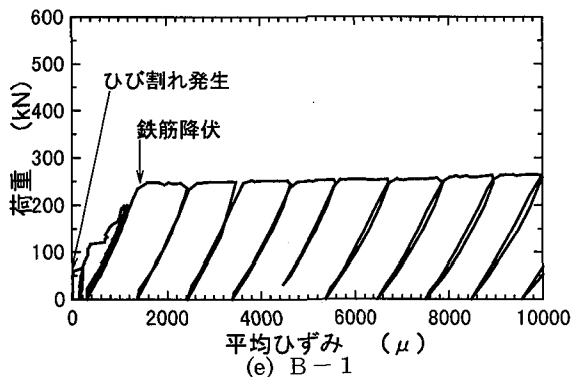


図-4 荷重-平均ひずみの履歴曲線(その2)

れた時点、鉄筋が降伏した時点は、鉄筋のひずみが表-2 に示した鉄筋の降伏ひずみに達した時点、P C 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P C 鋼棒に生じているひずみの和が、表-3 に示したP C 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) R C 供試体 (A-1, B-1)

図-4(a), (e)より、R C 供試体(A-1, B-1)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、A-1、B-1 供試体とも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を比較すると、A-1、B-1 供試体とも、ひび割れ発生時で除荷した場合は約 200μ (0.16mm)であり、鉄筋降伏時で除荷した場合は約 300μ (0.24mm)である。これらに対しては、鉄筋量の違いによる影響は顕著には現れていない。

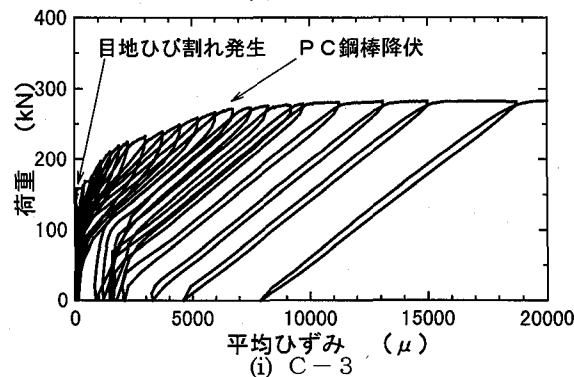
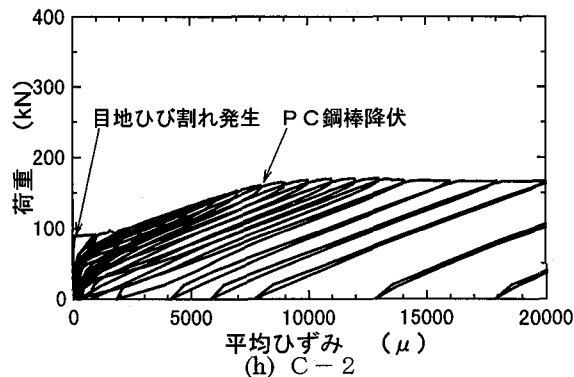


図-4 荷重-平均ひずみの履歴曲線(その3)

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 サイクルの载荷によって供試体で増加させたひずみとはほぼ同じ量のひずみが残留している。例えば、A-1 供試体の鉄筋降伏後の次のサイクルを見ると、载荷により供試体のひずみは、約 $1,700 \mu$ から約 $2,700 \mu$ になり約 $1,000 \mu$ 増加し、この後、除荷すると、供試体に残留するひずみは、約 600μ から約 $1,600 \mu$ になり約 $1,000 \mu$ 増加している。また、B-1 供試体では鉄筋降伏後のサイクルを見ると、载荷により供試体のひずみは、約 $1,400 \mu$ から約 $2,400 \mu$ になり約 $1,000 \mu$ 増加し、この後、除荷すると、供試体に残留するひずみは、約 400μ から約 $1,400 \mu$ になり約 $1,000 \mu$ 増加している。

(2) P C 供試体 (A-2~A-4, B-3, B-4)

図-4(b)~(d), (f), (g)より、P C 供試体 (A-2~A-4, B-3, B-4) では、上述のR C 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、P C 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。

荷重を除荷した場合に供試体に残留するひずみを比較すると、いずれの供試体とも、ひび割れ発生時で除荷した場合は、ひび割れが閉合したため、供試体にひずみは残留していない。また、鉄筋降伏時で除荷した場合は約 200μ (0.16mm)のひずみが残留しており、鉄筋降伏程度のひずみの場合、プレストレス量の違いによる影響は顕著には現れていない。また、鉄筋降伏後については、後述する

(3) P C a 供試体(C-2, C-3)

図-4(h)、(i)より、P C a 供試体(C-2,C-3)では、目地ひび割れ発生時、P C 鋼棒降伏時において、履歴曲線が大きく変曲している。P C 鋼棒降伏後では、C-2、C-3 供試体とも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、C-2、C-3 供試体とも、P C 鋼棒が降伏するまでほとんど生じていない。これは、これらの供試体では、P C 鋼棒のみで接続されているため、目地ひび割れが大きくなると、P C 鋼棒の挙動そのものが供試体の挙動となり、P C 鋼棒が弾性域に存在する場合は、供試体も弾性的な挙動を示し、P C 鋼棒が降伏するまで、供試体にはひずみがほとんど残留しないものと考えられる。P C 鋼棒降伏後は、荷重の増加はあまりなく、荷重はほぼ一定となり、徐々に、供試体に残留するひずみも大きくなっていく。

(4) R C 供試体と P C 供試体のプレストレス量の有無による履歴曲線の特徴

図-5(a)は、R C、P C 供試体における、プレストレスの有無が、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除して無次元化している。

図-5(a)より、R C 供試体である A-1 供試体とプレストレスが 3N/mm^2 導入された A-3 供試体の鉄筋降伏後の挙動を比較すると、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では、供試体に残留するひずみは、A-1 供試体では約 $2,200\mu$ であり、A-3 供試体では約 800μ で、プレストレス導入により復元力が大きくなり、残留ひずみが大幅に小さくなること判る。

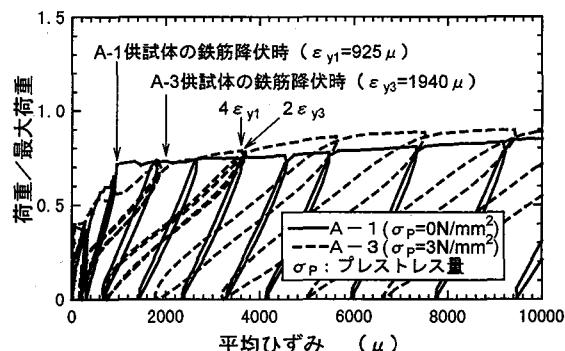
図-5(b)は、プレストレス量の違いが、供試体の履歴曲線に及ぼす影響を検討したもので、プレストレス量の多い A-3 供試体 ($\sigma_p=3\text{N/mm}^2$) の方が、A-2 供試体 ($\sigma_p=1.5\text{N/mm}^2$) より供試体の復元力が大きく、残留ひずみが小さいことが判る。

(5) P C 供試体の鉄筋量の相違による履歴曲線の特徴

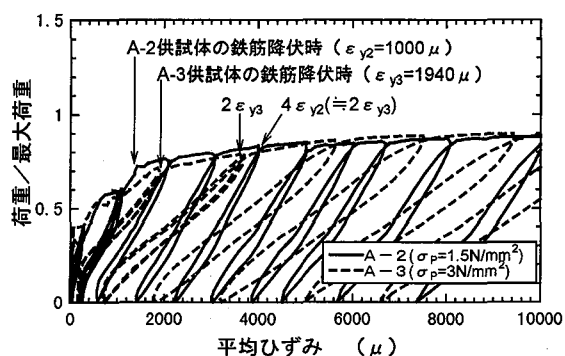
図-6 は、P C 供試体に対する結果であり、プレストレス量が同じ場合の鉄筋量の違いが供試体の履歴曲線に及ぼす影響を検討したものである。A-3、B-3 供試体の軸引張耐力が異なっているため、荷重を実験より得られた鉄筋降伏時の荷重で無次元化している。図中、 A_s/A_c は鉄筋比（鉄筋断面積をコンクリート断面積で除した値）を示す。同図より、A-3、B-3 供試体の履歴曲線には、ほとんど違いは認められず、プレストレス量が同じであれば、この程度の鉄筋量であれば、鉄筋比が異なっても履歴曲線に与える影響は小さいと考えられる。

(6) P C a 供試体のプレストレス量の相違による履歴曲線の特徴

図-7 は、P C a 供試体に対する結果であり、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。C-2、C-3 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



(a) A シリーズ、 $\sigma_p=0$ および 3N/mm^2 とした場合



(b) A シリーズ、 $\sigma_p=1.5$ および 3N/mm^2 とした場合

図-5 荷重/最大荷重—平均ひずみの履歴曲線

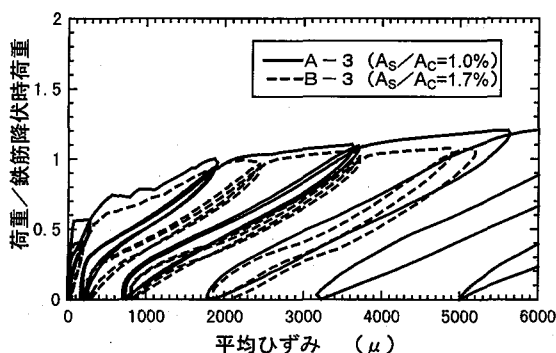


図-6 荷重/鉄筋降伏時荷重—平均ひずみの関係 ($\sigma_p=3\text{N/mm}^2$ とした)

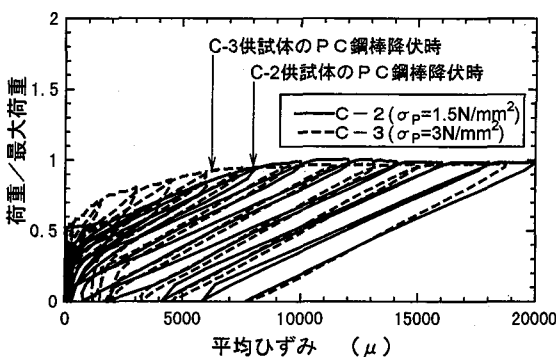


図-7 荷重/最大荷重—平均ひずみの履歴曲線

元化している。図中、 σ_p はプレストレス量を示す。同図より、P C 鋼棒降伏後の C-2、C-3 供試体の履歴曲線には、ほとんど違いは認められない。しかし、目地ひび割れ発生～P C 鋼棒降伏までの履歴曲線を比較すると、C-3 供試体のほうが、C-2 供試体に比べて、履歴曲線が膨らむ傾向にある。これはひび割れ発生荷重の相違によるものと考えられる。

(7) P C 供試体（目地無し）と P C a 供試体（目地有り）の目地の有無による履歴曲線の特徴

図-8 は、P C 供試体（目地無し）と P C a 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。A-2、C-2 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。図中、 σ_p はプレストレス量を示す。同図より、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（目地有り）のほうが、A-2 供試体（目地無し）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（図中の矢印位置）が、ほぼ同じになる時に荷重を除荷した場合では、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。

3.4 残留ひび割れ幅—最大ひび割れ幅の関係

残留ひび割れ幅—最大ひび割れ幅の関係を、図-9 に示す。同図には、載荷装置の都合で最後まで載荷できなかった B シリーズは含まれていない。ここで示す残留ひび割れ幅は、荷重をすべて除荷した時の π ゲージ位置で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-9 より、目地を有しない R C、P C 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 P C a 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

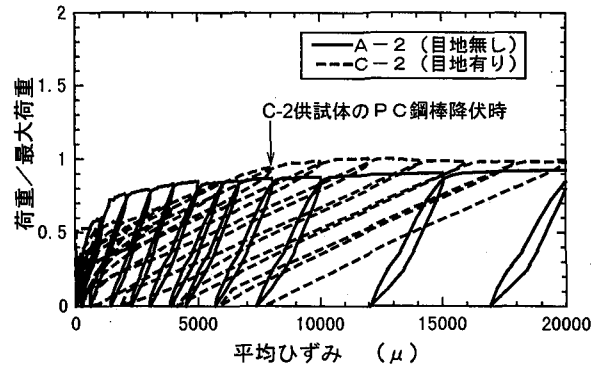


図-8 荷重／最大荷重—平均ひずみの履歴曲線 ($\sigma_p = 1.5 \text{ N/mm}^2$ とした場合)

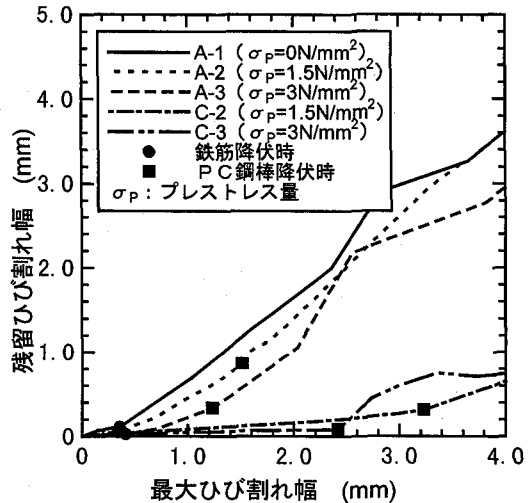


図-9 残留ひび割れ幅—最大ひび割れ幅の関係

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 R C、P C 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くなる。一方、目地を有する P C a 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。

3.5 残留ひび割れ幅—鉄筋または P C 鋼棒ひずみの関係

図-10 に、残留ひび割れ幅—鉄筋または P C 鋼棒ひずみの関係を示す。ここでも同じ理由で B シリーズが含まれていない。ここで示した鉄筋ひずみは、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、そ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。同図には、鉄筋の降伏ひずみを約 1,800 μ として、実線で、P C 鋼棒が降伏した時点を ■ で示している。

図-10 より、目地の有無にかかわらず、鋼材の増加ひずみと残留ひび割れ幅にはほぼ線形の関係が見られ、鋼材の増加ひずみが小さいほど、残留ひび割れ幅が小さいことが判る。また、鋼材の増加ひずみが同じであれば、プレストレスのレベルが高いほど、残留ひび割れ幅は小さい。

目地の有無については、同じ鋼材増加ひずみで、同じプレストレス量の場合、鉄筋が連続していない目地を有する部材の方が、残留ひび割れ幅が大きい。これはひび割れが目地に集中して、ひび割れ本数が少ないためと考えられる。

鋼材の増加ひずみが鉄筋の降伏ひずみまでであると、その場合の残留ひび割れ幅は 0.1mm 程度(A-1 供試体)である。地震後の要求性能としての液密性は、一時的な緊急用水の確保であり、この程度の残留ひび割れ幅による、にじみ出る程度の僅かな漏水は機能上問題ないと考えられ、許容残留ひび割れ幅として十分満足できるものと考えられる。表-5 に、図-10 より読み取った、残留ひび割れ幅-鋼材増加ひずみの関係を示す。

4.まとめ

P C タンク指針の耐震設計に反映するために、P C 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、P C 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) 荷重-ひずみ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)鉄筋量、プレストレス量および目地の有無にかかわらず、すべての供試体が高い軸引張じん性を示した。
(b)鉄筋が連続した、目地を有しない供試体では、ひび割れ発生時および鉄筋降伏時に、鉄筋が連続していない、目地を有する供試体では、ひび割れ発生時およびP C 鋼材降伏時に、顕著な軸剛性の低下が見られた。

(c)R C 供試体の鉄筋降伏後の残留ひずみは、載荷によって供試体に増加させたひずみと、ほぼ同量であった。P C 供試体のひび割れ発生後の残留ひずみは、プレストレスの量が多いほど小さかった。また、鉄筋が連続しない目地を有する供試体では、P C 鋼材が降伏するまで残留ひずみはほとんど生じなかった。

(2) 残留ひび割れ幅、最大ひび割れ幅および鉄筋またはP C 鋼棒増加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)鉄筋が連続した、目地を有しない供試体の場合、鉄筋が降伏しなければ残留ひび割れ幅は小さく、鉄筋降伏後は、プレストレス量が多いほど残留ひび割れ幅は小

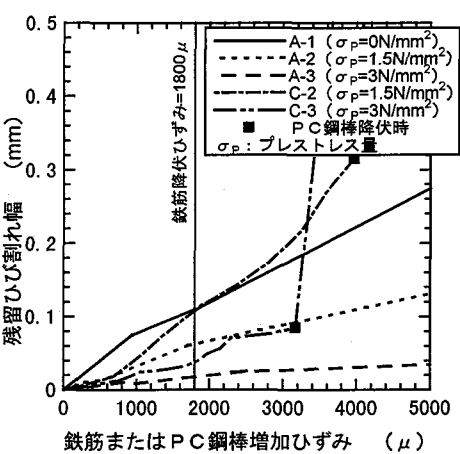


図-10 残留ひび割れ幅-鉄筋またはP C 鋼棒増加ひずみの関係

さい。

(b)鉄筋が連続していない、目地を有する供試体の場合、P C 鋼棒が降伏するまで、残留ひび割れ幅は小さく、P C 鋼材降伏後は、プレストレス量が多いほど残留ひび割れ幅は小さい。

(c)目地の有無にかかわらず、鋼材の増加ひずみと残留ひび割れ幅にはほぼ線形の関係が得られ、鋼材の増加ひずみが小さいほど残留ひび割れ幅は小さい。また、鋼材の増加ひずみが同じであれば、プレストレスの量が多いほど残留ひび割れ幅が小さい。

(3) 本論では巨大地震時における応答鋼材ひずみと残留ひび割れ幅について論じたが、P C タンクが地震後に液密性を保持すべきという性能を照査するためには、本来さらに残留ひび割れ幅と液密性について論ずるべきで、今後の研究課題と考えている。

表-5 残留ひび割れ幅-鋼材増加ひずみの関係

残留ひび割れ幅	鋼材増加ひずみ(×10 ⁻⁶)				
	A-1	A-2	A-3	C-2	C-3
0.06mm	700	1,700	* ¹⁾	1,200	2,000
0.08mm	1,000	2,400	*	1,600	2,800
0.10mm	1,800	3,600	*	1,800	*

1) *: P C 鋼材が降伏しないこと

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「P C 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。

参考文献

- 1)日本水道協会;水道用プレストレストコンクリート標準仕様書,1980年3月
- 2)日本水道協会;水道用プレストレストコンクリート設計施工指針・解説,1998年

(1998年9月18日受付)