

ダックスポールの開発

— 超高強度繊維補強モルタルを用いた塔状構造物の載荷実験 —

技術本部	土木技術第一部	桜田道博
技術本部	土木技術第一部	パンマワン ゴンケオ
技術本部	土木技術第一部	大山博明
技術本部	土木技術第一部	森 拓也

概要：近年需要が高まっている携帯電話のアンテナ塔をターゲットとし、設計基準強度 120MPa の超高強度繊維補強モルタルを使用した塔状構造物(ダックスポール)を開発した。ダックスポールを開発するにあたり、その構造特性を検証するためプレキャストセグメント工法で塔状供試体を製作し、載荷実験を行った。その結果、ダックスポール供試体は十分な耐荷力を有しており、ダックスポールの実用化は十分可能であることが確認された。

Key Words: 超高強度繊維補強モルタル, 塔状構造物, 曲げ破壊実験, ひび割れ耐力, 曲げ耐力, 破壊形態

1. はじめに

近年、携帯電話のエリア拡大、次世代携帯の導入および新規業者の参入、等によりアンテナ塔の需要が増えている。通常のアンテナ塔は、写真-1のとおり鋼製であるが、耐久性、景観性および経済性を考慮するとコンクリートやモルタルなど、セメント系材料を使用したアンテナ塔も有効と考えられる(写真-2)。そこで、設計基準強度 120MPa の超高強度繊維補強モルタル (1),2),3),4),5)を使用した塔状構造物(以降、ダックスポール)を考案し、これを実現するための検討を行った。超高強度モルタル塔は、図-1のように、プレキャストセグメントによる施工が前提となるため、プレキャストセグメント工法で塔状の供試体を製作し、載荷実験を行うことで超高強度モルタル塔の構造特性を検討した。

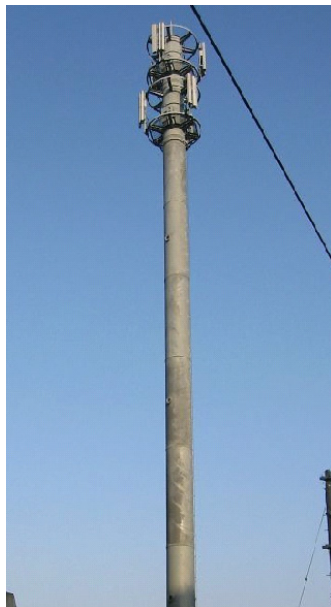


写真-1 鋼製塔



写真-2 ダックスポール(CG)



図-1 構造概念



桜田道博



パンマワン
ゴンケオ



大山博明



森 拓也

2. 実験方法

2.1 供試体

供試体一般図を図-2に示す。供試体は、フーチングおよび3つのプレキャストセグメントからなる高さ7mの塔状とした。セグメントは、鉛直方向のPC鋼棒によりプレストレス(有効緊張力で $6972\text{kN}=581\text{kN}\times 12$ 本)を導入し、一体化した。鉛直方向のPC鋼棒にはプレストレス導入後、すみやかにグラウトを行った。セグメントの断面寸法は高さ30mの塔を試設計した際に想定した実物大とし、1つのセグメントの長さは2mとした。载荷実験時のフーチングの損傷および浮上りを防止するためフーチングには水平方向および鉛直方向にプレストレスを導入した。

2.2 载荷方法

载荷状況および载荷ステップをそれぞれ、写真-3および図-3に示す。荷重は供試体頂部から300mm下の位置に静的に载荷した。载荷方法は、荷重を設計降伏モーメント相当(566kN)まで増加させた後、一度除荷し、残留変位を確認した後、再度、荷重を増加させ、供試体を破壊させる方法とした。

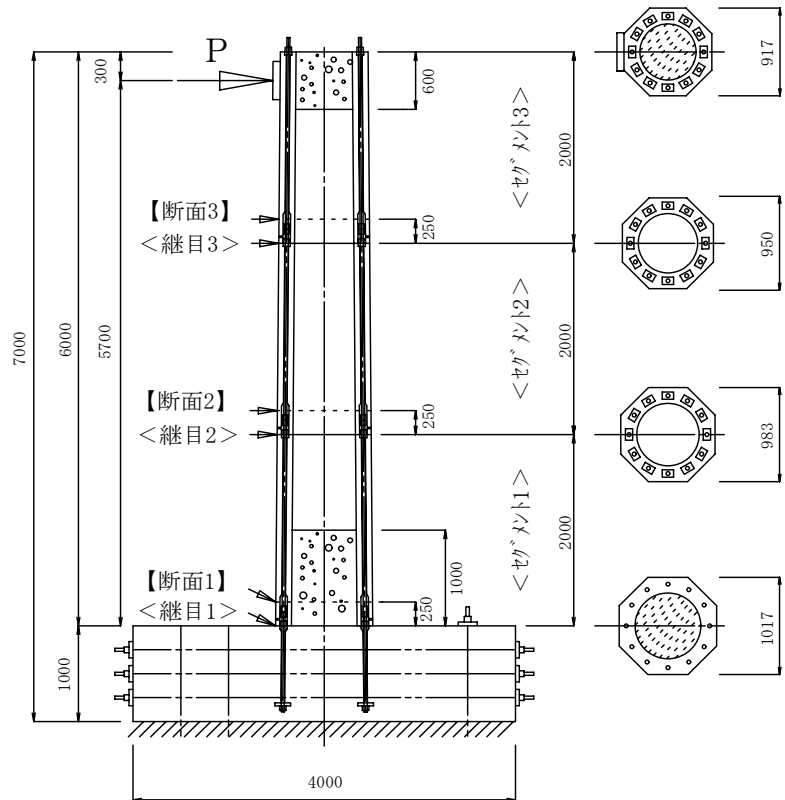


図-2 供試体一般図



写真-3 载荷実験状況

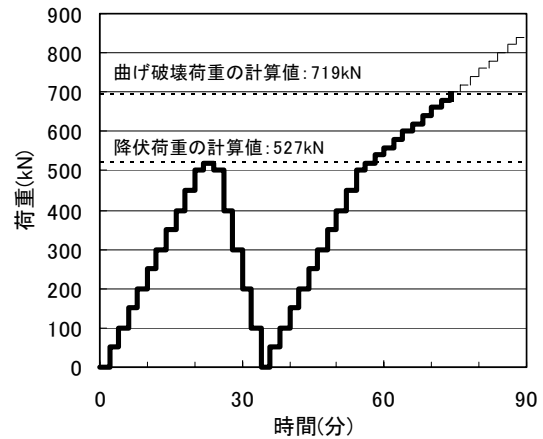


図-3 载荷ステップ

2.3 使用材料

本実験における使用材料、超高強度繊維補強モルタルの示方配合、練混ぜ方法および養生方法をそれぞれ、表-1、表-2、図-4および図-5に示す。また、超高強度繊維補強モルタルのフレッシュ性状および強度性状をそれぞれ、表-3および表-4に示す。

表-1 使用材料

材料	記号	摘要
セメント	C	シリカフェームセメント(三菱マテリアル社製), 密度 3.08g/cm^3
鋼繊維	SF	OL13/16(ベカルト社製), 引張強度 2000MPa , 長さ 13mm , 径 0.16mm , 密度 7.85g/cm^3
細骨材	S	砕砂(山形県東根産), 表乾密度 2.57g/cm^3 , 吸水率 2.59% , FM2.95, 最大寸法 5mm
高性能AE減水剤	SP	マイテイ 21WH(花王社製), ポリカルボン酸系
PC鋼棒	-	$\phi 32\text{mm}$, B種1号(SBPR 930/1080) 降伏点強度 1044MPa , 引張強度 1134MPa

表-2 示方配合

W/C (%)	Air (%)	SF量 (vol.%)	単位量(kg/m ³)				SP/C (%)
			W	C	S	SF	
17	2.0	0.5	210	1235	948	40	3.0

表-3 フレッシュ性状

位置	スランブロー (mm)	0打フロー (mm)	空気量 (%)	モルタル温度(°C)
セグメント1,2	730×710	270×270	1.3	10
セグメント3	785×770	280×265	1.1	18

表-4 強度性状(載荷実験直前)

位置	材齢 (日)	圧縮強度 σ_c (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)	曲げ強度 σ_b (MPa)
セグメント1,2	28	192	42.7	15.7
セグメント3	44	189	42.1	15.0

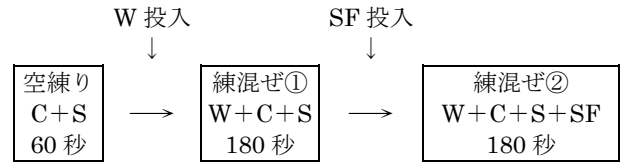


図-4 練混ぜ方法

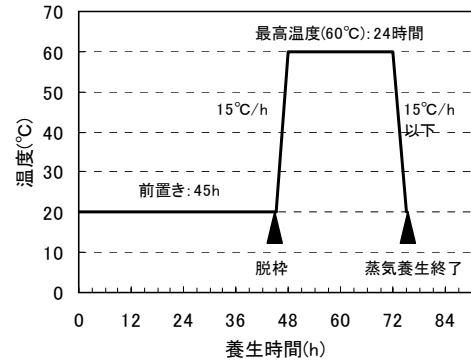


図-5 養生方法

2.4 非線形 FEM 解析

載荷実験にあたり、事前に2次元モデルによる非線形 FEM 解析を実施した。解析は、(株)電算力学研究センターの2D ATENAにより行った。解析モデル、材料の非線形特性および入力値をそれぞれ、図-6、図-7および表-5に示す。なお、解析では供試体とフォーミングが完全に固定されていると仮定し、供試体底面の境界条件は完全固定とした。また、実際の供試体はプレキャストセグメントで製作されているが、本解析では、目地部を剛結とし、目地部の影響を無視した。プレストレスは PC 鋼棒をモデル化したトラス要素に 3300μ の引張ひずみが発生するよう導入した。解析では供試体基部の圧縮ひずみが 3500μ となった時点で終局とした。

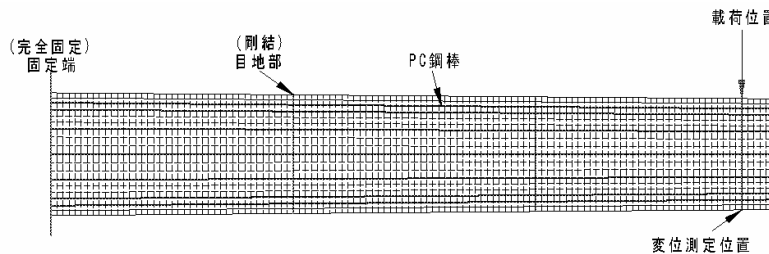
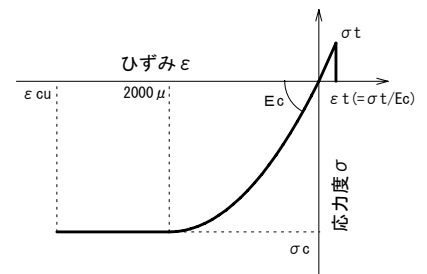


図-6 非線形 FEM 解析モデル

表-5 入力値

材料	項目	記号	特性値	備考
コンクリート (モルタル)	圧縮強度	f_c	190 MPa	試験値
	引張強度	f_t	8.0 MPa	試験値
	ヤング係数	E_c	42 GPa	試験値
PC 鋼材	引張強度	f_{pu}	1080 MPa	公称値
	降伏強度	$0.84f_{pu}$	907 MPa	〃
	降伏強度	$0.93f_{pu}$	1004 MPa	〃
	ヤング係数	E_p	200 GPa	〃

コンクリート



PC鋼材

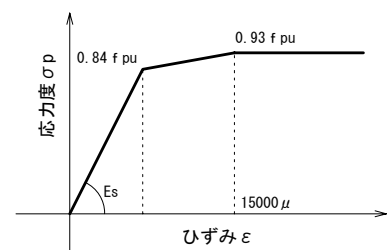


図-7 材料の非線形特性

2.5 供試体の製作

ダックスポール供試体の施工ステップ、製作工程、プレキャストセグメント詳細図および施工状況(セグメント製作時、セグメント組立時)をそれぞれ、図-8、表-6、図-9、および写真-4～写真-23に示す。ダックスポール供試体の製作(セグメントの工場製作、セグメントの施工、等)において、施工上の問題は認められなかった。

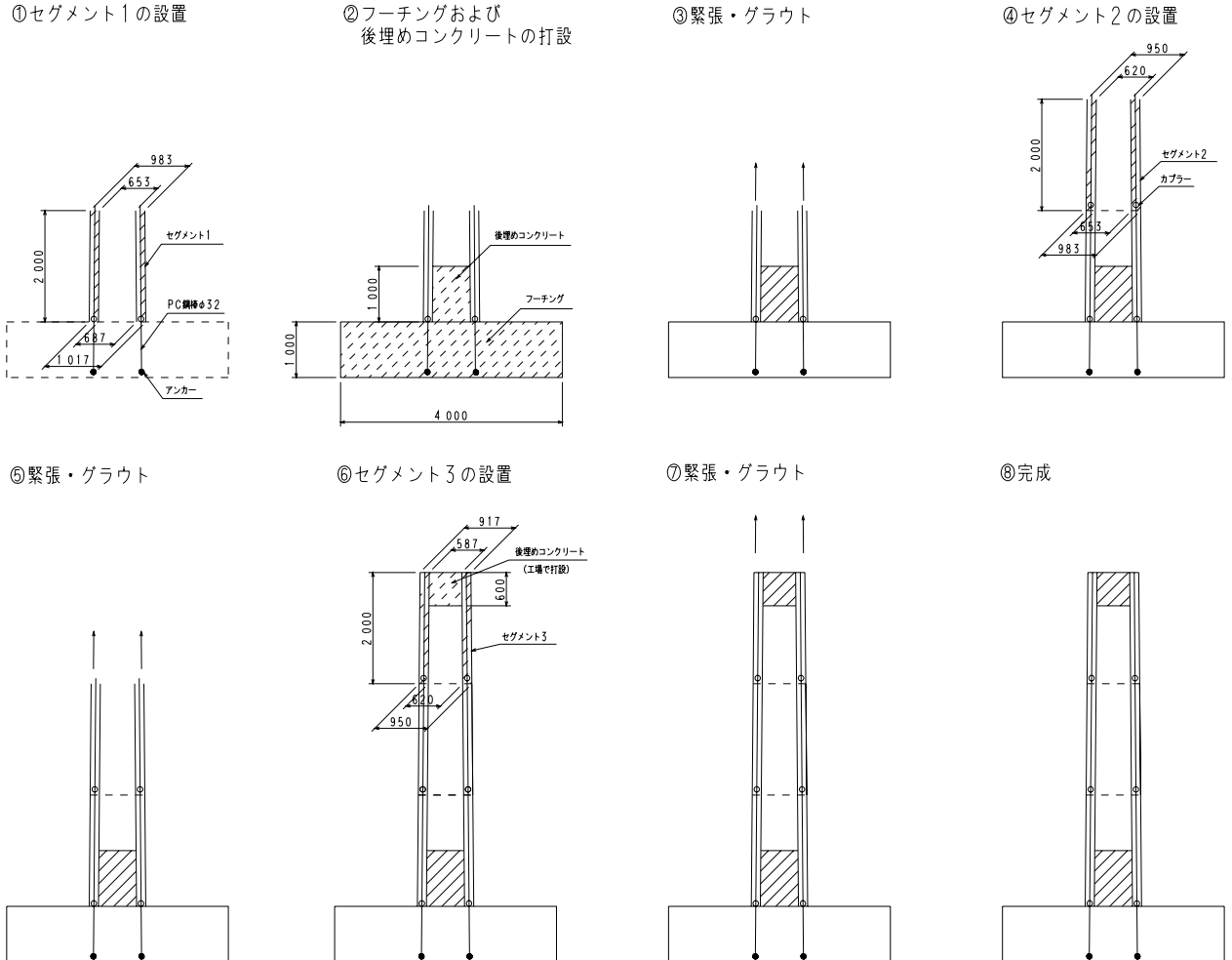


図-8 施工ステップ

表-6 製作工程

工種	11月			12月								
	28月	29火	30水	1木	2金	3土	4日	5月	6火	7水	8木	9金
搬入(セグメント、鉄筋、等)	■											
フーチング製作&基部セグメント設置												
①鉄筋設置	■											
②型枠組立(底版、側枠、固め)	■	■	■									
③足場組立(スリーエス)	■	■	■									
④基部セグメントの設置	■											
⑤打設				●	■	■	■	■	■	■	■	■
⑥養生												
⑦足場組立(スリーエス)												
⑧側枠解体、PC鋼棒緊張												
セグメント組立												
①基部セグメントの緊張・グラウト、第2セグメント設置												
②第2セグメント緊張・グラウト、第3セグメント設置												
③第3セグメント緊張・グラウト												
④載荷ジャッキの取付け												

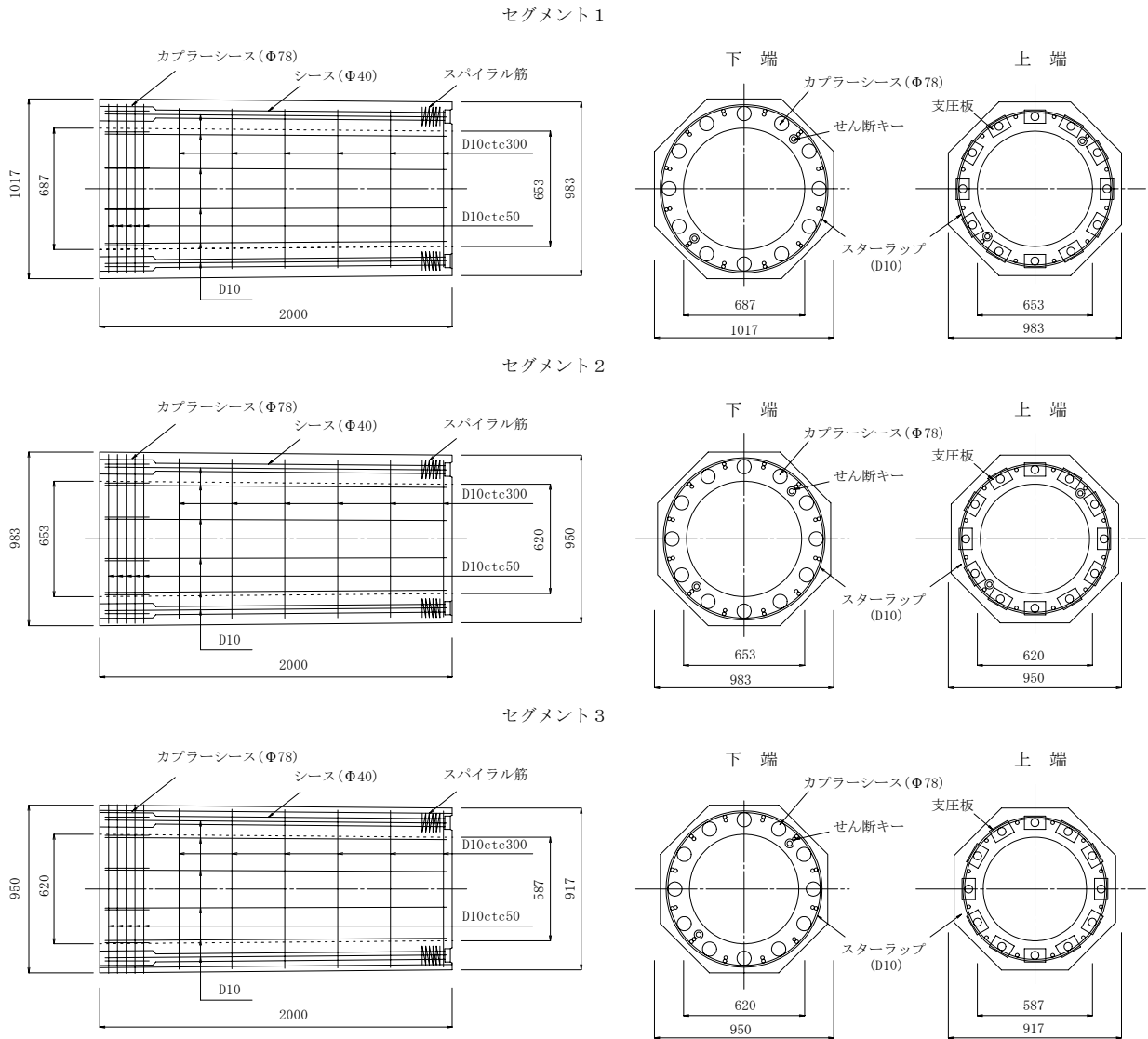


図-9 プレキャストセグメント詳細図

1) セグメントの型枠組立状況



写真-4 鉄筋組立・シース配置状況

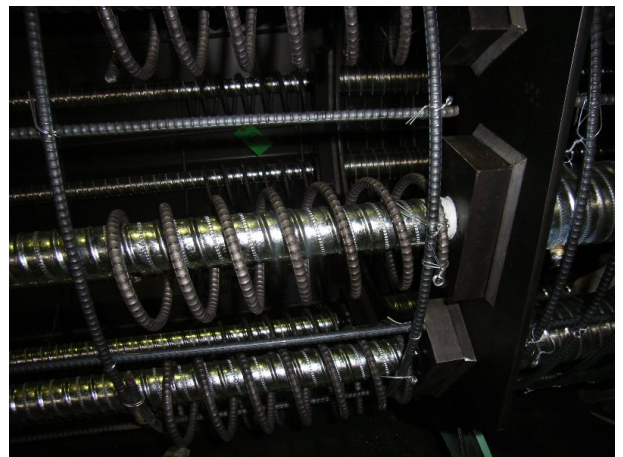


写真-5 定着部

2) セグメント打設状況・出来形



写真-6 打設状況



写真-7 打設状況



写真-8 出来形



写真-9 出来形

3) フーチング型枠・鉄筋組立



写真-10 底板組立



写真-11 鉄筋組立

4) 基部セグメント(セグメント1)の設置



写真-12 PC 鋼棒アンカー



写真-13 基部セグメント設置

5) フーチング打設・出来形



写真-14 フーチング打設状況



写真-15 フーチング出来形

6) 緊張・グラウト

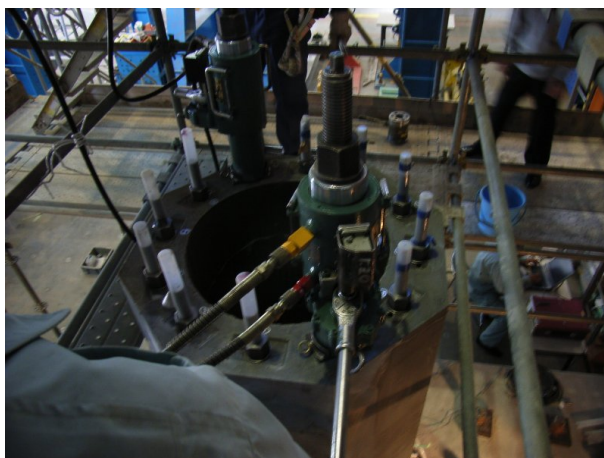


写真-16 緊張状況



写真-17 グラウト状況

7) 新セグメントの設置



写真-18 旧セグメント天端



写真-19 新セグメント設置



写真-20 PC鋼棒のカプリング



写真-21 新セグメント設置

8) 完成



写真-22 完成供試体(全景)

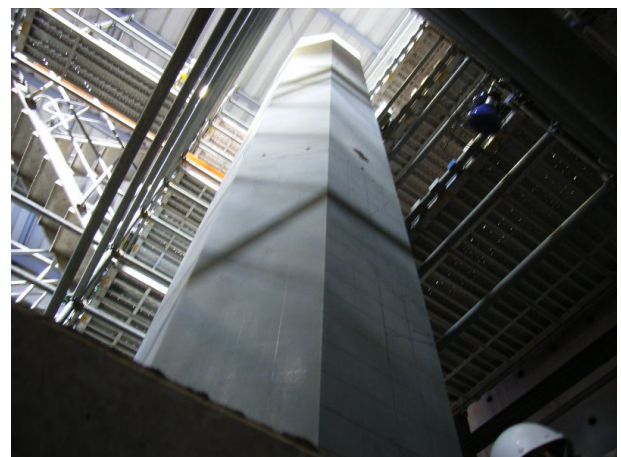


写真-23 完成供試体(下方側面より)

3. 実験結果および考察

3.1 破壊に至るまでの過程

破壊に至るまでの過程を表-7に示す。柱供試体は、載荷荷重 499kN でひび割れが発生し、597kN で PC 鋼材が降伏、899kN で曲げ破壊した。

表-7 破壊に至るまでの過程

載荷荷重(kN)	変 状	備 考
499	曲げひび割れ発生(基部から 1m の位置)	曲げひび割れ荷重の計算値：404kN
566	曲げひび割れ発生(基部から 0.4m の位置)	
0	ひび割れ消滅，残留変位 1.3mm	除荷
597	PC 鋼材降伏(断面 1：柱供試体基部付近)	PC 鋼材降伏荷重の計算値：527kN
803	PC 鋼材降伏(断面 2：基部からの高さ 2m 付近)	
827	フーチング天端にひび割れ発生	
830	曲げひび割れ発生(基部から 2.45m 付近) 斜めひび割れ発生(継目 2) フーチング天端のコンクリートに剥離発生	
899	曲げ破壊(曲げ引張破壊)	基部圧縮縁の圧壊

3.2 荷重と変位との関係

荷重と変位との関係および実験値と計算値との比較をそれぞれ、図-10および表-8に示す。ここでの変位は、載荷点位置の変位であり、フーチングの回転、基部セグメントの浮上りおよびセグメント継目の目開きの影響を計算で除いた値である。ひび割れ発生荷重の計算値は、供試体引張縁の応力度が引張強度 8MPa に達する荷重で、曲げ破壊荷重の計算値は圧縮側の応力度を 2 次曲線と仮定し、破壊抵抗曲げモーメント⁶⁾より算出した荷重である。図-10より、曲げひび割れ発生荷重、PC 鋼材降伏荷重および曲げ破壊荷重はすべて、計算値を上回っており、ダックスポール供試体は十分な耐荷力を有していることが確認された。また、ひび割れが発生するまで、実験値は弾性理論値とよく一致しており、たわみの計算に弾性理論を適用できることも確認された。実験値と非線形 FEM 解析の結果とを比較すると、ひび割れが発生後、両者の差が大きくなっている。これは、非線形 FEM 解析において、モルタル中の鋼繊維を考慮していないこと、等が原因と考えられる。

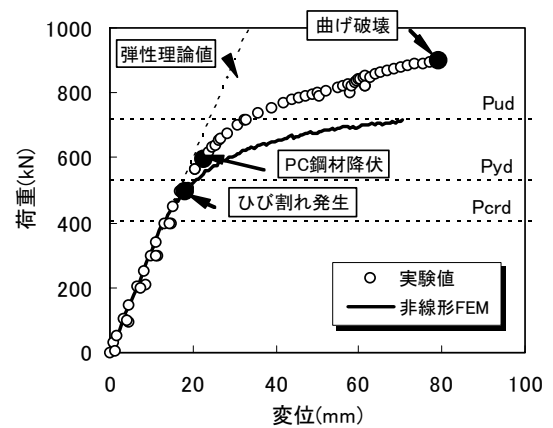


図-10 荷重-変位曲線の結果

表-8 実験値と設計値との比較

	実験値 (kN)	計算値 (kN)	比
ひび割れ発生荷重 P_{crd}	499	404	1.24
PC 鋼材降伏荷重 P_{yd}	597	527	1.13
曲げ破壊荷重 P_{ud}	899	719	1.25

3.3 破壊形態

供試体の破壊状況および撮影方向をそれぞれ、写真-24および図-11に示す。破壊形態は、PC 鋼材が降伏した後に部材の圧縮縁が圧壊する曲げ引張破壊であった。また、圧縮縁側において、断面全体が破壊するような脆性的な破壊は認められなかった。鋼繊維を 0.5vol.% 添加することで、高強度コンクリート特有の脆性的な破壊を防止できることが確認された。

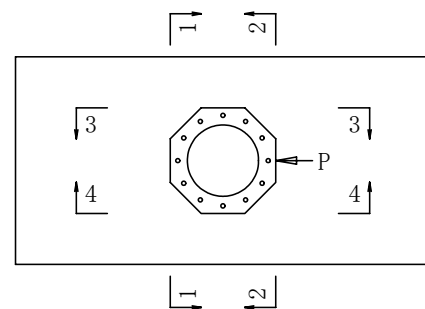


図-11 写真撮影方向

1-1(圧縮側)



2-2(引張側)



3-3



4-4



写真-24 破壊状況(基部拡大)

3.4 ひび割れ発生状況

供試体のひび割れ発生状況を図-12に示す。既往の研究^{4),5)}で、超高強度繊維補強モルタルを使用したPC部材はひび割れ間隔が小さいことが確認されているが、今回の載荷実験ではひび割れの間隔が400～600mmで大きい傾向にある。この原因として、プレキャストセグメント構造の影響やPC鋼棒の付着が異形鉄筋やPC鋼より線に比べ小さいこと、等が考えられる。ひび割れの間隔は大きい傾向にあったが、ひび割れが発生した箇所には写真-25のように複数のひび割れが発生しており、ひび割れが1箇所集中し、ひび割れ幅が過度に大きくなることはなかった。

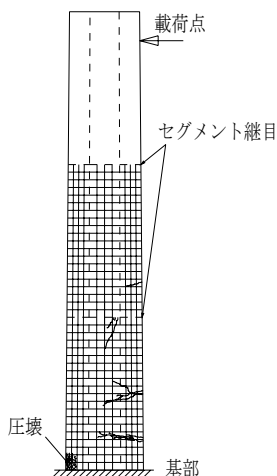


図-12 ひび割れ発生状況

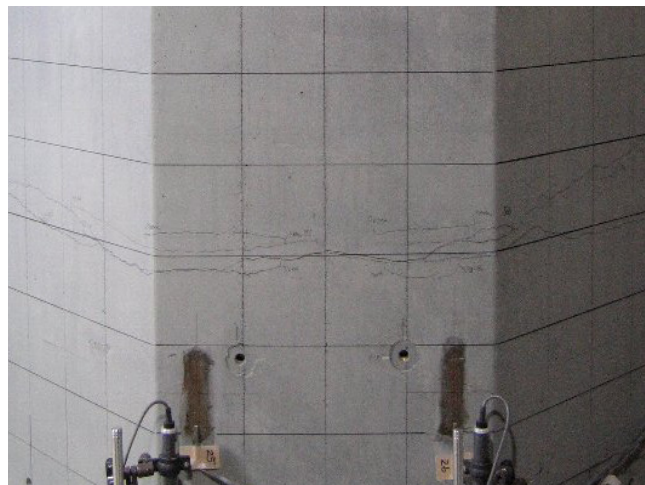


写真-25 ひび割れ部の拡大

3.5 終局ひずみの検討

荷重と圧縮縁ひずみとの関係を図-13に示す。ここでのひずみは、供試体基部(継目1)から250mm上方の圧縮ひずみである。供試体破壊時の圧縮縁のひずみは3750 μ であり、通常のコンクリートの終局ひずみ3500 μ を上回っている。既往の研究⁹⁾では、超高強度繊維補強モルタルの終局ひずみは4000 μ を超える結果となっているが、プレストレスによる圧縮ひずみ分(380 μ)を考慮すると今回の実験でも終局ひずみは4000 μ 程度となる。したがって、ダックスポールにおいて曲げ耐力を算出する際は、プレストレスによる圧縮ひずみを考慮し、終局ひずみを3500 μ とすることで曲げ耐力を安全側に評価できると考えられる。

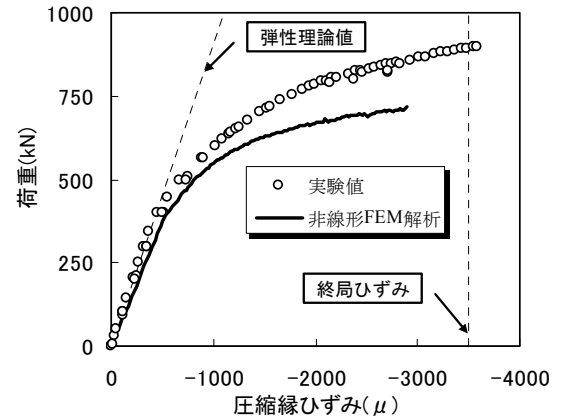


図-13 荷重と圧縮縁ひずみとの関係

3.6 平面保持の検討

柱供試体基部付近(断面1)における軸方向ひずみの分布を図-14に示す。ひび割れ発生から終局に至るまで、引張縁以外のひずみは直線となっており、平面保持の仮定が成立していることがわかる。引張縁のひずみが直線にならないのは、セグメント継目が引張応力を伝達しないこと、およびひび割れ発生により部材引張縁の応力が開放されたためと考えられる。

ひび割れ発生直前(450kN)における各断面の軸方向ひずみ分布を図-15に示す。図中の断面1、断面2および断面3はひずみを計測した位置で、それぞれ継目1、継目2および継目3から250mm上方の断面である。計算値は弾性理論に基づき平面保持の仮定に準じて算出した値である。図-15より、各断面の実験値と計算値はよく一致しており、計測したすべての断面において平面保持の仮定は成立していることがわかる。このことから、プレキャストセグメント工法で製作したダックスポールにおいても、通常のコンクリート部材と同様、平面保持の仮定に準拠して縁応力度を算出できることが確認された。

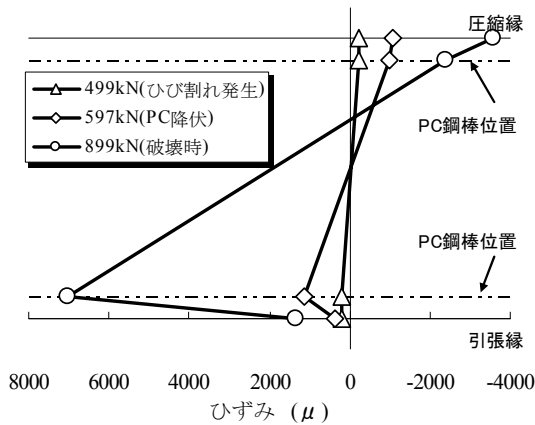


図-14 断面1における軸方向ひずみ分布

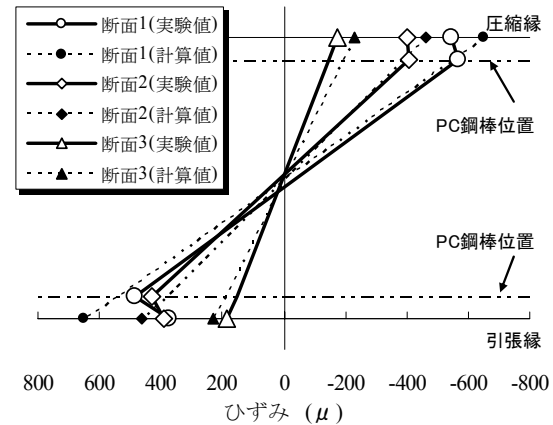


図-15 各断面の軸方向ひずみ分布(450kN時)

3.7 残留変位と目開きの検討

降伏モーメント相当の荷重(566kN)まで載荷した後、荷重を除荷した際の荷重と変位の関係およびセグメント継目の目開き量をそれぞれ、図-16および図-17に示す。

除荷時の載荷点位置の残留変位は1.3mmであり、わずかな値となっている。また、セグメント継目部の目開きも除荷後には完全に閉じていることが目視で確認されている。これらの結果より、ダックスポールは、降伏モーメント相当の荷重が作用した後でも除荷すれば、ほぼ元の状態に戻ることが確認された。ダックスポールの設計では、短期荷重時(地震、強風、等)におけるPC鋼材の引張応力度を降伏強度の0.9倍以下に抑えることとしている。したがって、地震(レベルI)や暴風などの短期荷重が作用した場合でも、その後のダックスポールの使用性能にはほとんど影響しないと考えられる。

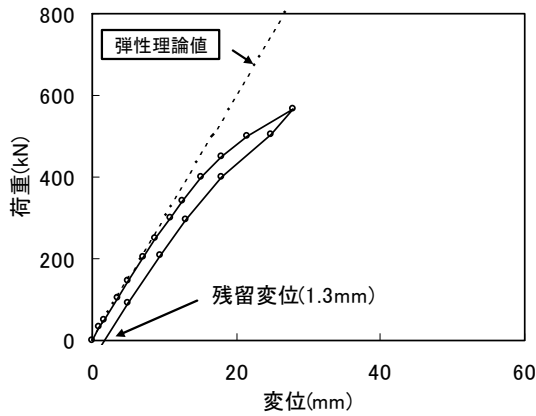


図-16 残留変位

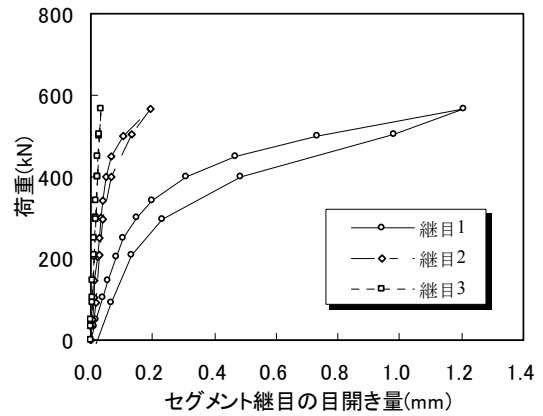


図-17 セグメント継目の目開き量

3.8 主応力度の検討

供試体図心位置における荷重と主応力度との関係を図-18に示す。主応力度は、最大主応力度 σ_1 、最小主応力度 σ_2 および主せん断応力度 τ_{max} でありこれらの実験値は、供試体図心位置に貼り付けた3軸ゲージにより計測し、それぞれ式(1)、式(2)および式(3)により算出した。その際、ヤング係数には載荷実験前に行った実測値(42GPa)を、ポアソン比は通常のコンクリートと同様の0.167を使用した。また、主応力度の計算値(σ_1 、 σ_2 および τ_{max})は、式(4)により算出した。

$$\sigma_1 = \frac{E}{2(1-\nu^2)}(\epsilon_1 + \nu \cdot \epsilon_2) \quad \dots (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{2(1-\nu^2)}(\epsilon_2 + \nu \cdot \epsilon_1) \quad \dots (2)$$

$$\tau_{max} = \frac{E}{2(1+\nu)}\gamma_{max} \quad \dots (3)$$

ここに、

$$\gamma_{max} = \sqrt{2\{(\epsilon_a - \epsilon_b)^2 + (\epsilon_b - \epsilon_c)^2\}}$$

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2}[(\epsilon_a + \epsilon_b) + \gamma_{max}]$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{2}[(\epsilon_a + \epsilon_b) - \gamma_{max}]$$

ϵ_a : 水平方向ひずみ, ϵ_b : 45° 方向ひずみ, ϵ_c : 鉛直方向ひずみ, E : モルタルのヤング係数
 ν : ポアソン比

$$\tau_{max} = \sigma_1 = -\sigma_2 = G \cdot S / (I \cdot b) \quad \dots (4)$$

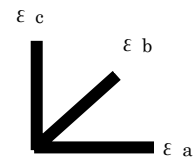
ここに、

τ : 図心位置のせん断応力度

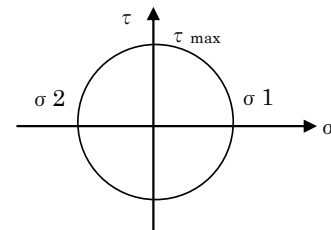
G : 図心位置に関する断面1次モーメント

S : 作用せん断力, I : 断面2次モーメント

b : 図心位置の部材幅



3軸ゲージ



図心位置の主応力度

断面2および断面3に関しては、ひび割れ発生荷重500kNまで、主応力度(最大主応力度 σ_1 、最小主応力度 σ_2 および主せん断応力度 τ_{max})の実験値は、計算値とほぼ一致している。このことから、プレキャストセグメント工法で製作したダックスポールにおいても、通常のPC部材と同様の方法で主応力度(斜引張応力度)を算出できることが確認された。断面1に関しては、最大主応力度、最小主応力度および主せん断応力度のすべてが複雑な挙動を示している。これは、計測位置が固定端である柱供試体基部から250mmしか離れておらず、局部応力の影響を受けたためと考えられる。

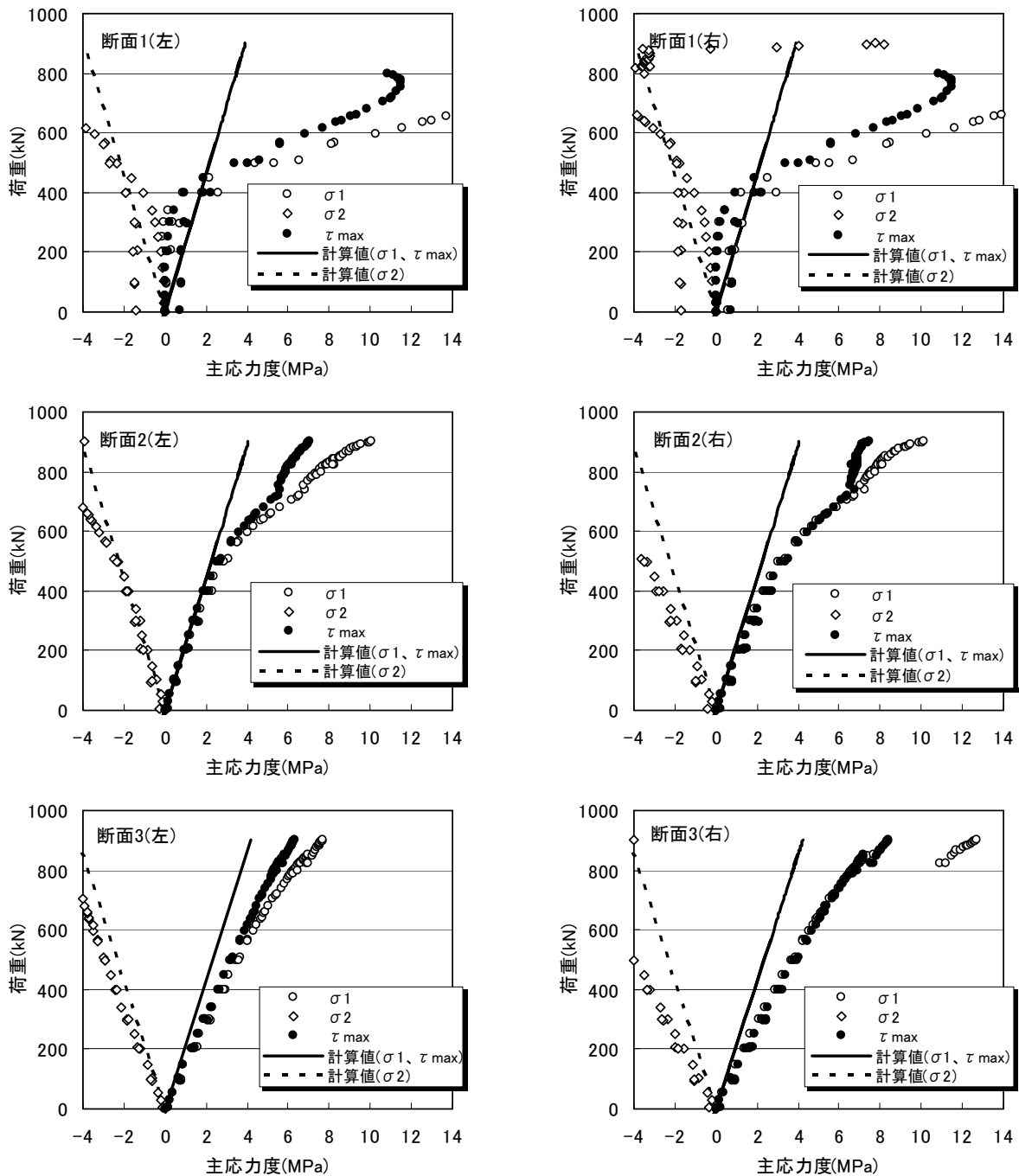


図-18 主応力度

4. まとめ

超高強度繊維補強モルタルを使用し、プレキャストセグメント工法で施工したダックスポール供試体の載荷実験より、以下の知見が得られた。

- (1) ダックスポール供試体のひび割れ耐力、PC鋼材の降伏耐力および曲げ耐力はすべて、計算値を2割程度上回っており、所要の耐荷力を有していた。ひび割れ耐力や曲げ耐力は、平面保持の仮定や破壊抵抗モーメントで安全側に評価できることが確認された。
- (2) 供試体の降伏耐力および曲げ耐力が計算値を上回ったのは、鋼繊維が引張鋼材として寄与したためと考えられる。
- (3) 変位の実験値は、ひび割れが発生するまで計算値とよく一致しており、たわみの計算には通常のPC部材と同様、弾性理論を適用できると考えられる。
- (4) 破壊形態は、PC鋼材が降伏した後、モルタルの圧縮縁が圧壊する曲げ引張破壊であった。

- (5) 鋼繊維の添加量が 0.5vol.%であったが、圧縮縁の爆裂など脆性的な破壊は認められなかった。
- (6) ひび割れ間隔は 0.4~1.0m と大きかったが、ひび割れが発生した箇所には複数本のひび割れが発生し、ひび割れ幅が過大になることはなかった。ひび割れ間隔が大きくなったのは、プレキャストセグメントの継目における目開きや PC 鋼棒の付着が異形鉄筋や PC 鋼より線に比べて小さいためと考えられる。
- (7) 降伏モーメント相当荷重の載荷後、除荷した際の残留変位はごくわずかであった。また、載荷した際に発生したひび割れおよびセグメント継目の目開きは、除荷時には完全に閉じており、地震や暴風などの短期荷重が作用した後もダックスポールの使用性への影響はほとんどないと考えられる。
- (8) 超高強度繊維補強モルタルの終局ひずみは 3750μ で通常のコンクリートと比べ同等以上であった。
- (9) 平面保持の仮定は成立することが確認された。
- (10) 断面図心位置の主応力度(最大主応力度, 最小主応力度, および主せん断応力度)は計算値とほぼ一致し、通常の PC 部材と同様に斜引張応力度を算出できることが確認された。

以上より、プレキャストセグメント工法で施工されたダックスポールの構造特性は、通常の PC 部材と同様であり、同様の手法で構造設計できることが確認された。施工性についても供試体製作時の施工性実験で問題がないことが確認されており、ダックスポールの実用化は十分可能と考えられる。

謝辞

載荷実験にあたっては東京工業大学大学院の二羽教授より貴重な助言を頂いた。ダックスポール供試体の製作にあたっては、神町工場の星川技師、PC 土木部の佐々木副参事、機構部の堀主任および技術研究所の服部 GL に多大なご協力を頂いた。ここに、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 桜田道博, 雨宮美子, 渡辺浩良, 大浦隆: 超高強度・高じん性材料およびそれを用いた低桁高 PC 橋の開発, ピーエス三菱技報, 1号, pp.38-39, 2003.5
- 2) 桜田道博, 雨宮美子, 渡辺浩良, 大浦隆: 超高強度高じん性複合材料を用いた低桁高 PC 橋の試設計, 土木学会年次学術講演会概要, Vol.58, No.5, pp.1115-1116, 2003.9
- 3) 雨宮美子, 桜田道博, 渡辺浩良, 森拓也: 超高強度繊維補強モルタルの性状とそれを用いた低桁高 PC 橋の試設計, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.13, No.1, pp.585-588, 2004.10
- 4) 雨宮美子, 桜田道博, 森拓也, 二羽淳一郎: 超高強度繊維補強モルタルを用いた PC 梁の性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1657-1662, 2005.6
- 5) 桜田道博, 雨宮美子, 渡辺浩良, 森拓也: ダックスビーム工法(超高強度低桁高 PC 橋)の開発, ピーエス三菱技報, 3号, pp.2-3, 2005.10
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書【構造性能照査編】, 平成14年版, 2002.3