

ダックスポールの設計・施工

— 高強度繊維補強モルタルを使用した塔状構造物 —

九州支店	技術部	香田真生
九州支店	土木工事部	山本博輝
九州支店	久留米工場	内野 修
九州支店	土木工事部	蒲生登美男

概要：高強度繊維補強モルタル(設計基準強度 120N/mm^2)を使用した塔状構造物が、高さ 40.0m の携帯電話アンテナ塔に採用された。本アンテナ塔は、工場で製作した高強度繊維補強モルタル製のプレキャストセグメントを現地で積み上げ、鉛直方向のプレストレスを導入して一体化することで構築した。本文では本アンテナ塔の設計および施工について報告する。

Key Words：高強度繊維補強モルタル，塔状構造物，携帯電話アンテナ塔

1. はじめに

設計基準強度が 120N/mm^2 の高強度繊維補強モルタルを使用した塔状構造物（以降，ダックスポール）が、高さ 40.0m の携帯電話アンテナ塔に採用され、福岡県久留米市に建設された。

携帯電話のアンテナ塔は一般に鋼製とされるが、高強度繊維補強モルタル（以降，ダックスモルタル）を使用することで、鋼製の塔と比較し、耐久性、景観性および経済性の向上が可能となることから採用された。ダックスポールは当社が独自に開発した新しい形式のPC構造物であり、部材の薄肉化、軽量化、施工の省力化、耐震性の向上および鋼製の塔と同程度のスレンダーな形状が可能となる。また、ダックスモルタルは硬化組織が緻密であり、高い耐久性を有していることから、飛来塩分が多い地域などの高い耐久性が要求される環境条件において、ライフサイクルコスト(LCC)の低減が期待できる。

今回施工したアンテナ塔の概略図および完成状況をそれぞれ、**図-1**および**写真-1**に示す。本工事の発注者はボーダフォン(株)（現ソフトバンクモバイル(株)）であり、当社は下請けとして塔体の建設工事を行った。本アンテナ塔は工場で製作した8個のプレキャストセグメント(5.0m /個)を現地において積み上げ、PC鋼棒により鉛直方向のプレストレスを導入して一体化することで構築した。

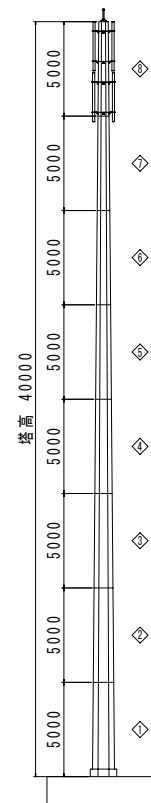


図-1 概略図

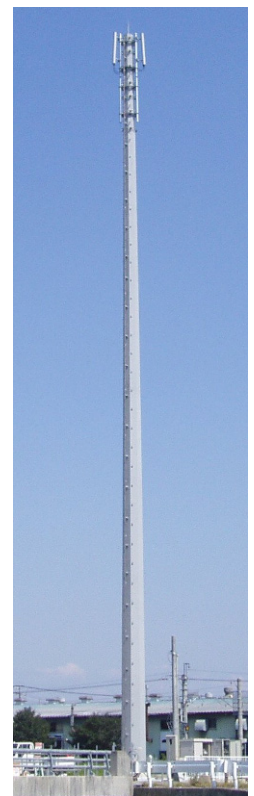


写真-1 完成状況



香田真生



山本博輝



内野修



蒲生登美男

2. 材料の力学的特性および配合

ダックスモルタルの使用材料、示方配合および力学的特性をそれぞれ、表-1、表-2および表-3に示す。ダックスモルタルはシリカフェームセメント、スチールファイバー、細骨材、水および高性能減水剤などから成るセメント系の高強度材料であり、設計基準強度は 120N/mm^2 である (写真-2)。粗骨材を使用しないため、優れた充填性、材料分離抵抗性および高強度が得られる。また、スチールファイバー (写真-3) を混入していることから、自己収縮よるひび割れや高強度材料特有の脆性的な破壊形態も改善できる。一方、本アンテナ塔に使用したPC鋼棒の力学的特性を表-4に示す。PC鋼棒には、B種2号(SWPR930/1180)で直径が26mmのものを使用した。

表-1 ダックスモルタルの使用材料

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
スチールファイバー	SF	OL13/16(ベカルト社製), 引張強度 2340MPa 長さ 13mm , 径 0.16mm , アスペクト比 81, 密度 7.85g/cm^3
細骨材(久留米工場)	S	砕砂, 表乾密度 2.83g/cm^3 , 吸水率 1.03%
高性能減水剤	SP	レオビルド SP-8HU (ポリカルボン酸系)
消泡剤	D	マイクロエア 404(ポリアルキレングリコール誘導体)

表-2 ダックスモルタルの示方配合

W/C (%)	Air (%)	SF 混入率 (vol.%)	単位量 (kg/m^3)				SP/C (%)	D/C (%)	備 考
			W	C	S	SF			
17	2.0	0.5	210	1235	1044	40	1.8	0.08 *	

* $40\text{T}(1\text{TはC}\times 0.002\%)$

表-3 ダックスモルタルの力学的特性

	単位	設計用値	備 考
設計基準強度 f'_{ck}	N/mm^2	120	配合強度 150N/mm^2
弾性係数 E_m	kN/mm^2	37.0	材料特性より
単位体積重量 w	kN/m^3	25.5	材料特性より

表-4 PC鋼棒の力学的特性

	単位	設計用値	備 考
PC鋼棒の種類	—	$\phi 26$	B種2号 (SBPR930/1180)
引張強度 σ_{pu}	N/mm^2	1180	
降伏点応力度 σ_{py}	N/mm^2	930	
弾性係数 E_p	kN/mm^2	200	



写真-2 ダックスモルタル



写真-3 スチールファイバー

3. ダックスポールの設計

3.1 設計の概要

ダックスポールを携帯電話のアンテナ塔に適用するにあたって適用した基準を以下の①～④に示す。また、本アンテナ塔の主な設計条件を表-5に示す。塔体頂部のたわみ角は通信確保のために、搭載アンテナの条件より定まる制限値以内にする必要がある。本アンテナ塔の設計においては、発注者からの指示により塔体頂部のたわみ角を2°以下とした。

- ① 建築基準法同施工令および国土交通省告示
- ② 通信鉄塔設計要領・同解説：建設電気技術協会
- ③ 建築物荷重指針・同解説：日本建築学会
- ④ 塔状鋼構造物設計指針・同解説：日本建築学会

表-5 主な設計条件

	単位	設計用値	備考
塔体高さ	m	40	セグメント 8@5.0m
設計基準風速 V ₀	m/s	34	福岡県久留米市
地表面粗度区分	---	II	風荷重に関する条件
地盤種別	---	II	地震荷重に関する条件
塔頂部のたわみ角	°	2.0	

3.2 ダックスポールの構造

今回施工したダックスポールの構造一般図を図-2に示す。また、塔頂部、セグメント接合部および基部取り付け部の詳細図をそれぞれ、図-3、図-4および図-5に示す。本アンテナ塔は高さが40.0mであり、工場で製作した8個のプレキャストセグメント(5.0m/個)を現地において積み上げ、PC鋼棒により鉛直方向のプレストレスを導入して一体化する構造とした。セグメントを一体化するためのプレストレスは、フーチングに埋め込んだ16本のPC鋼棒により導入した。16本のPC鋼材は2セグメント毎に4本ずつ緊張・定着した。緊張しないPC鋼棒はカップラーにより接続し、緊張箇所まで延長した。

PC鋼棒にはカップリング時の施工性を考慮し、ディビダーク工法用のものを使用した。ディビダーク工法用のPC鋼棒は、ねじ部が特殊な非対称ねじ(図-6)となっており、PC鋼棒間に若干の角度の誤差などが生じてても、容易にカップリングできる特徴を有している。

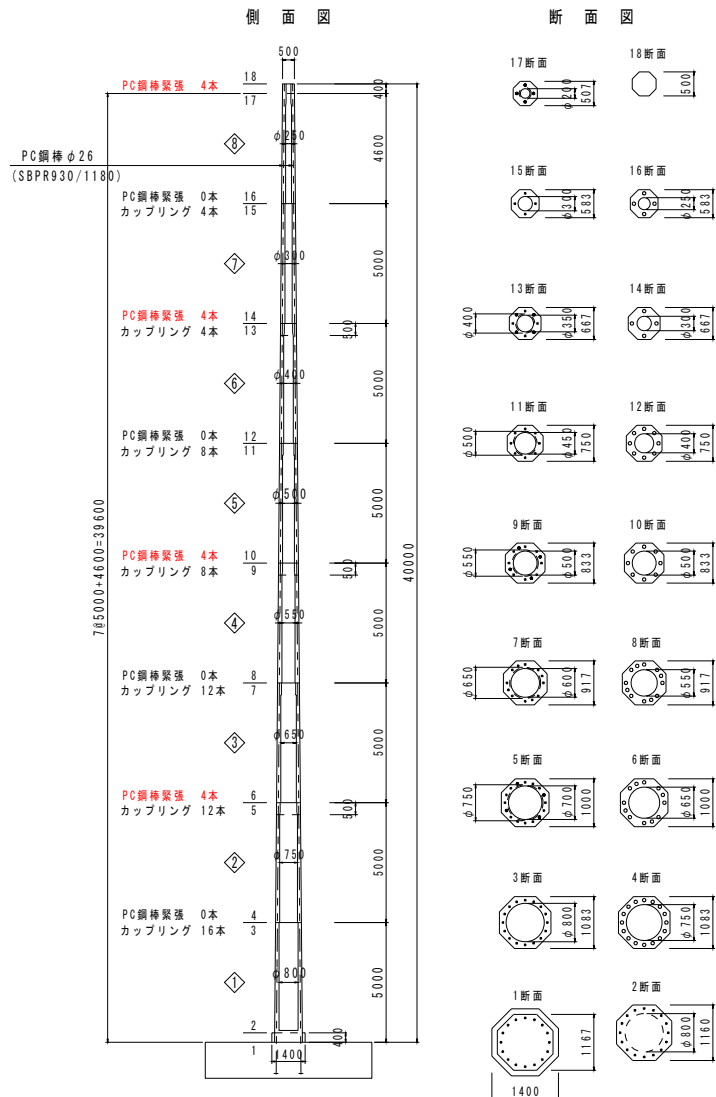


図-2 構造一般図

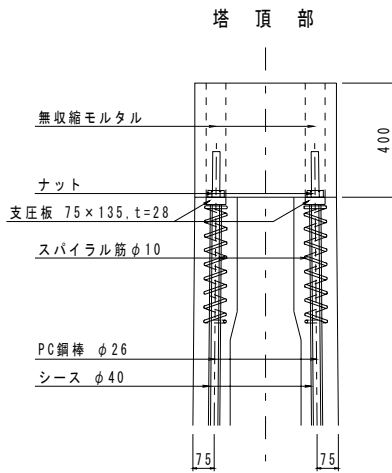


図-3 塔頂部

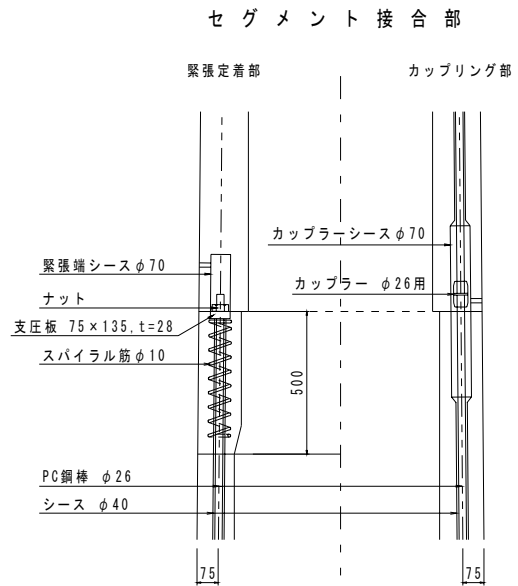


図-4 セグメント接合部

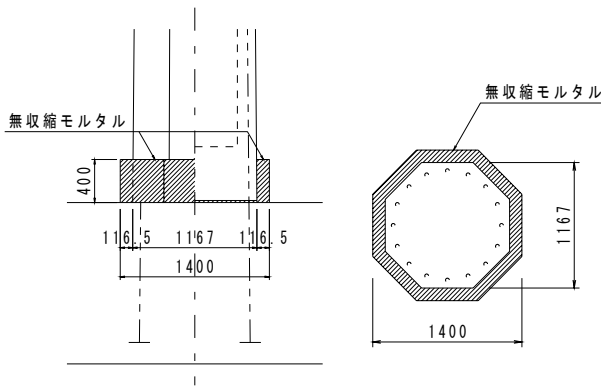


図-5 基部取付け部

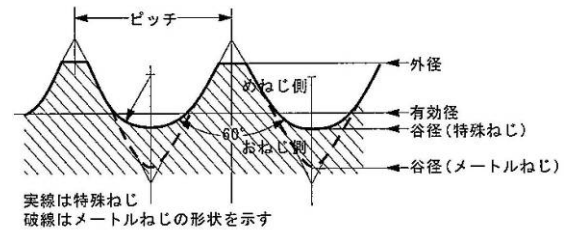


図-6 特殊ねじ

3.3 部材の検討

本アンテナ塔の設計は、風荷重および地震荷重が作用する場合について検討した。荷重および検討項目に関する設計方針を表-6に示す。

表-6 設計方針

荷重の種類	荷重レベル	荷重 ※	制限値または許容応力度
風荷重	稀に発生する暴風 (再現期間 100 年)	G+P+W	短期許容応力度以下 ①モルタルの曲げ圧縮応力度 $\leq 80\text{N/mm}^2(=2/3 \times f'_{ck})$ ②PC鋼材の引張応力度 $\leq 837\text{N/mm}^2(=0.9 \sigma_{py})$
	極めて稀に発生する暴風 (再現期間 300 年)	G+P+ 1.42W	Mu(曲げ破壊耐力) 以下 Su(せん断耐力) 以下
地震荷重	稀に発生する地震	G+P+K _{0.2} (C ₀ =0.2)	短期許容応力度以下 ①モルタルの曲げ圧縮応力度 $\leq 80\text{N/mm}^2(=2/3 \times f'_{ck})$ ②PC鋼材の引張応力度 $\leq 837\text{N/mm}^2(=0.9 \sigma_{py})$
	極めて稀に発生する地震	G+P+K _{1.0} (C ₀ =1.0)	Mu(曲げ破壊耐力) 以下 Su(せん断耐力) 以下

※ G: 固定荷重, P: 載積荷重, W: 風荷重, K: 地震荷重

3.3.1 風荷重

風荷重は通信鉄塔設計要領・同解説に準拠し、以下の式(1)により算出した。風荷重に対する検討は、再現期間100年の稀に発生する暴風時および300年の極めて稀に発生する暴風時の作用荷重に対して安全となるよう行った。ここで、再現期間100年および300年の風荷重は式(1)における β をそれぞれ、1.0および1.42として求めた^{1),2)}。なお、暴風時等でも通信機能を確保しなければならないことを考慮して、速度圧の下限值は2350(N/m²)とした¹⁾。

再現期間100年の風荷重に対しては、ダックスモルタルおよびP C鋼棒の応力度が短期許容応力度以下となることを照査した。再現期間300年の風荷重に対しては、設計断面に作用する曲げモーメントおよびせん断力がそれぞれ、曲げ破壊耐力およびせん断耐力以下となることを照査した。

$$Q = q_z \cdot C_f \cdot A \cdot \beta = 0.6 \cdot E \cdot V_0^2 \cdot k_z \cdot C_f \cdot A \cdot \beta \quad \dots (1)$$

Q: 風荷重 (N), q_z : 当該部分の速度圧 (N/m²), C_f : 風力係数, A: 受風面積 (m²), β : 荷重割増係数
E: 建築物の高さと地表面粗度区分に応じた係数, V_0 : 設計基準風速 (m/s), k_z : 当該部分の係数

3.3.2 地震荷重

地震荷重は通信鉄塔設計要領・同解説に準拠し、以下の式(2)により算出した。地震荷重に対する検討は、稀に発生する地震時および極めて稀に発生する地震時の作用荷重に対して安全となるよう行った。ここで、稀に発生する地震荷重および極めて稀に発生する地震荷重は式(2)における標準せん断力係数 C_0 をそれぞれ、0.2および1.0とすることで求めた^{1),3)}。

稀に発生する地震に対しては、ダックスモルタルおよびP C鋼棒の応力度が短期許容応力度以下となることを照査した。極めて稀に発生する地震に対しては、設計断面に作用する曲げモーメントおよび作用せん断力がそれぞれ、曲げ破壊耐力およびせん断耐力以下となることを照査した。なお、本アンテナ塔の設計は、高さが40mであるため、式(2)により地震荷重の算出を行ったが、高さが60mを越えるような大型の塔では動的解析を行うことが標準とされている¹⁾。

$$Q_i = W_i \cdot Z \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0 \quad \dots (2)$$

Q_i : i層の地震時層せん断力 (kN), W_i : i層以上の建物重量 (kN), Z: 地域係数, R_t : 振動特性係数,
 A_i : i層の層せん断力係数の分布係数, C_0 : 標準せん断力係数

3.3.3 照査結果

(1) 曲げモーメントに対する照査

稀に発生する暴風時および稀に発生する地震時に生じる荷重がアンテナ塔に作用する際の、ダックスモルタルおよびP C鋼棒応力度の照査結果をそれぞれ、図-7および図-8に示す。ダックスモルタルの曲げ圧縮応力度およびP C鋼棒の引張応力度は平面保持の仮定に準拠して求めた。図-7および図-8より、ダックスモルタルおよびP C鋼棒の応力度は全て短期許容応力度以下となっており、稀に発生する暴風時および稀に発生する地震時における許容値を満足した。

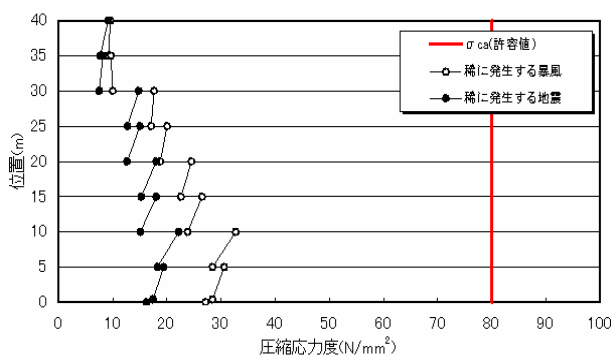


図-7 ダックスモルタルの曲げ圧縮応力度

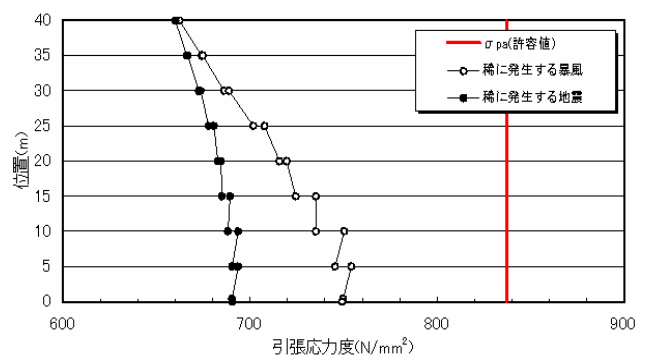


図-8 P C鋼材の曲げ引張応力度

極めて稀に発生する暴風時および極めて稀に発生する地震時における曲げモーメントの照査結果を図-11に示す。曲げ破壊耐力は平面保持の仮定に準拠し、ダックスモルタルおよびP C鋼材の応力-ひずみ曲線をそれぞれ、図-9および図-10のように仮定して算出した。なお、曲げ破壊耐力を算出する際のダックスモルタルの終局ひずみは 3500μ とした⁴⁾。図-11のとおり、すべての断面において作用曲げモーメントが設計曲げ耐力以下になっており、制限値を満足した。

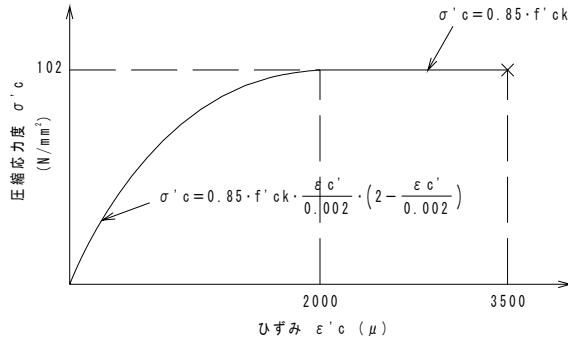


図-9 ダックスモルタルの応力-ひずみ曲線

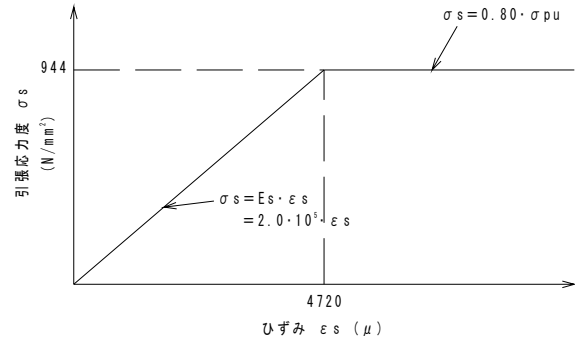


図-10 P C鋼棒の応力-ひずみ曲線

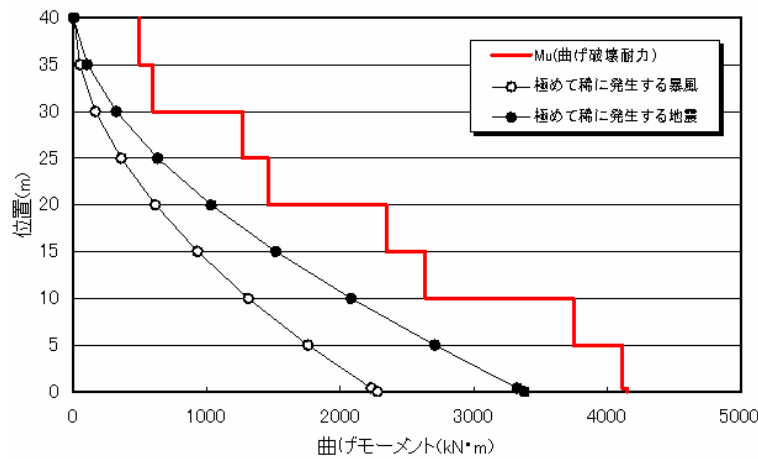


図-11 曲げ破壊耐力照査結果

(2) せん断力に対する照査

極めて稀に発生する暴風時および極めて稀に発生する地震時におけるせん断力の照査結果を図-12に示す。設計せん断耐力は土木学会発刊のコンクリート標準示方書[構造性能照査編]に準拠し、スチールファイバーおよび鉄筋が負担するせん断力を無視し、ダックスモルタルのみがせん断を負担するものとして算出した。なお、設計せん断耐力の計算に用いる断面諸定数は、8角形断面の外郭に内接する円と等価な正方形断面に換算して算出した。図-12のとおり、すべての断面において作用せん断力が設計せん断耐力以下になっており、制限値を満足した。

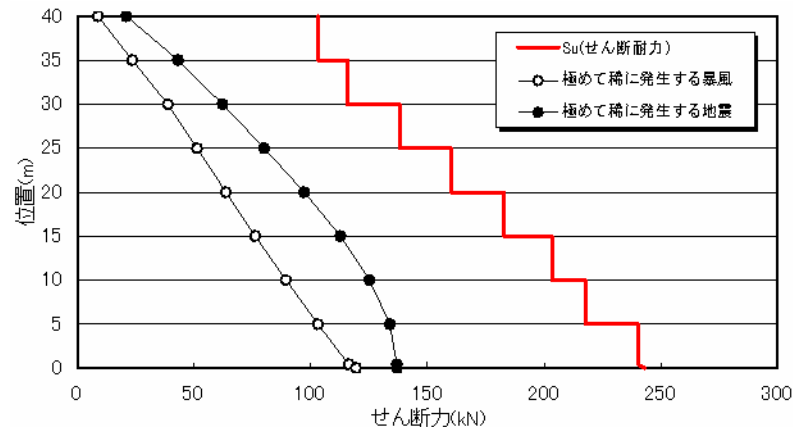


図-12 せん断耐力照査結果

4. セグメントの製作

本アンテナ塔のセグメント製作は、当社の久留米工場で行った。セグメントの製作工程を図-13に示す。部材の製作日数は型枠組立からプレキャストセグメントが完成するまで約2週間であった。

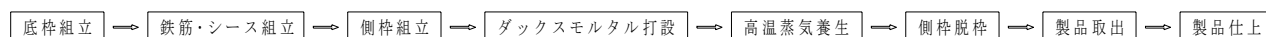


図-13 セグメントの製作工程

(1) 型枠組立

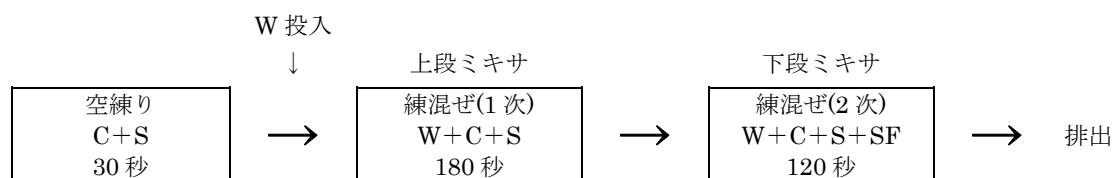
型枠組立完了時の全景を写真-4に示す。型枠は全長40.0mを横置きし、5.0m毎に仕切り板を設置した。



写真-4 型枠全景

(2) ダックスモルタルの製造および打設

ダックスモルタルの練混ぜは、図-14のとおり行った。スチールファイバーの投入状況および打込み時の状況をそれぞれ、写真-5および写真-6に示す。ダックスモルタルは優れた流動性および材料分離抵抗性を有しているため、振動締固めを行わなくても充填性が良好であり、脱枠後のセグメントにひび割れや充填不良などの不具合は認められなかった。なお、充填を目的とする振動締固めを行うと、スチールファイバーが沈降し、その均一性が失われることが懸念されたため、振動締固めは行わなかった⁵⁾。また、打重ね部や合流部はスチールファイバーの連続性が確保できなくなる可能性があり、弱点部になりやすいので、一区画内は連続打設を行った⁵⁾。



* W : 水, C : セメント, S : 細骨材, SF : スチールファイバー

図-14 練混ぜ方法



写真-5 スチールファイバー投入状況



写真-6 打込み状況

(3) 養生

ダックスモルタルの養生方法を図-15に示す。モルタル打設後から3日程度（1次養生：20℃×45時間，2次養生：60℃×24時間）の蒸気養生を行った。高温蒸気養生を行うことにより、養生後の硬化組織がより緻密化し、高強度を発現するとともに、収縮やクリープが大幅に低減し、耐久性も向上すると考えられる⁵⁾。蒸気養生の状況および脱枠直後の状況をそれぞれ、写真-7および写真-8に示す。

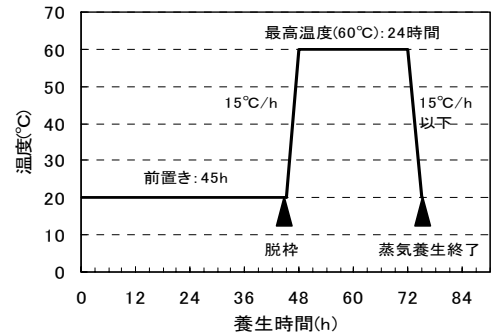


図-15 養生方法



写真-7 養生状況



写真-8 脱枠状況

(4) 品質管理

ダックスモルタルを製造する際の品質管理項目は、モルタルフロー、単位水量、空気量、モルタル温度、塩化物量および圧縮強度とした。ダックスモルタルは高強度材料であり、厳密な品質管理が要求されるため、モルタルフローに関しては全バッチ試験を行った。品質管理試験の結果はすべて基準値を満足しており、安定した品質のモルタルを製造することができた。

(5) 完成

セグメントの出荷前の完成状況をそれぞれ、写真-9および写真-10に示す。本アンテナ塔の建設場所は見通しの良い平地であるので、周辺環境との調和を図る必要があったことから景観性を考慮し、表面の塗装を行った。なお、塗装の色は(社)日本塗装工業会で定められているCN-65とした。



写真-9 完成状況(斜方向より)



写真-10 完成状況(正面より)

5. ダックスポールの施工

本アンテナ塔の施工ステップおよび施工工程をそれぞれ、**図-16**および**図-17**に示す。施工ステップ図における、ステップ1からステップ8までの施工状況を**写真-11**～**写真-24**に示す。セグメントの組立は50tラフタークレーンを使用し、横向きに架台の上に仮置きしたセグメントを、1セグメント毎に親子で鉛直に起こし、所定の位置へ建て込んでいった。プレストレスの導入は、偶数セグメント(2セグメント毎)において、PC鋼棒を4本緊張し、鉛直方向のプレストレスを導入した。

当社は塔体の施工を担当しており、フーチングは他業者による施工であったため、フーチング内に埋め込むアンカーの設置からフーチングが完成するまで、2週間程度の作業できない期間があったが、その後の作業は**図-17**の施工工程のとおり連続して行うことができた。

本工事における施工上の工夫および留意点は以下のとおりである。

- ①足場はブラケット足場とし、セグメントを仮置きしている段階で地組しておく方法とした(**写真-13**)。
- ②所定の位置に建て込んだセグメントは、緊張するまでの間は仮留めのプレートで固定しておき、上のセグメントの作業へ進む方法とした(**写真-18**)。
- ③PC鋼棒は同一箇所でも4本の緊張とし、緊張による偏圧を作用させないために、ジャッキ2台を対称に配置して同時に緊張した(**写真-19**)。
- ④グラウトは鉛直方向の注入であるので超低粘性タイプのもので、混和剤にはポゾリス GF-1820を使用した。グラウトの充填は5m毎に設けた排出口により確認した。
- ⑤施工は高所作業が主となるため、墜落災害防止および落下物防止に特に注意を払った。安全帯は昇降用および作業用の2丁掛けとし、掛替えの際においても必ず安全帯が機能するようにした。さらに、資材の上げ下ろしなどは、袋およびかごを必ず使用して、不注意による物の落下がないようにした。

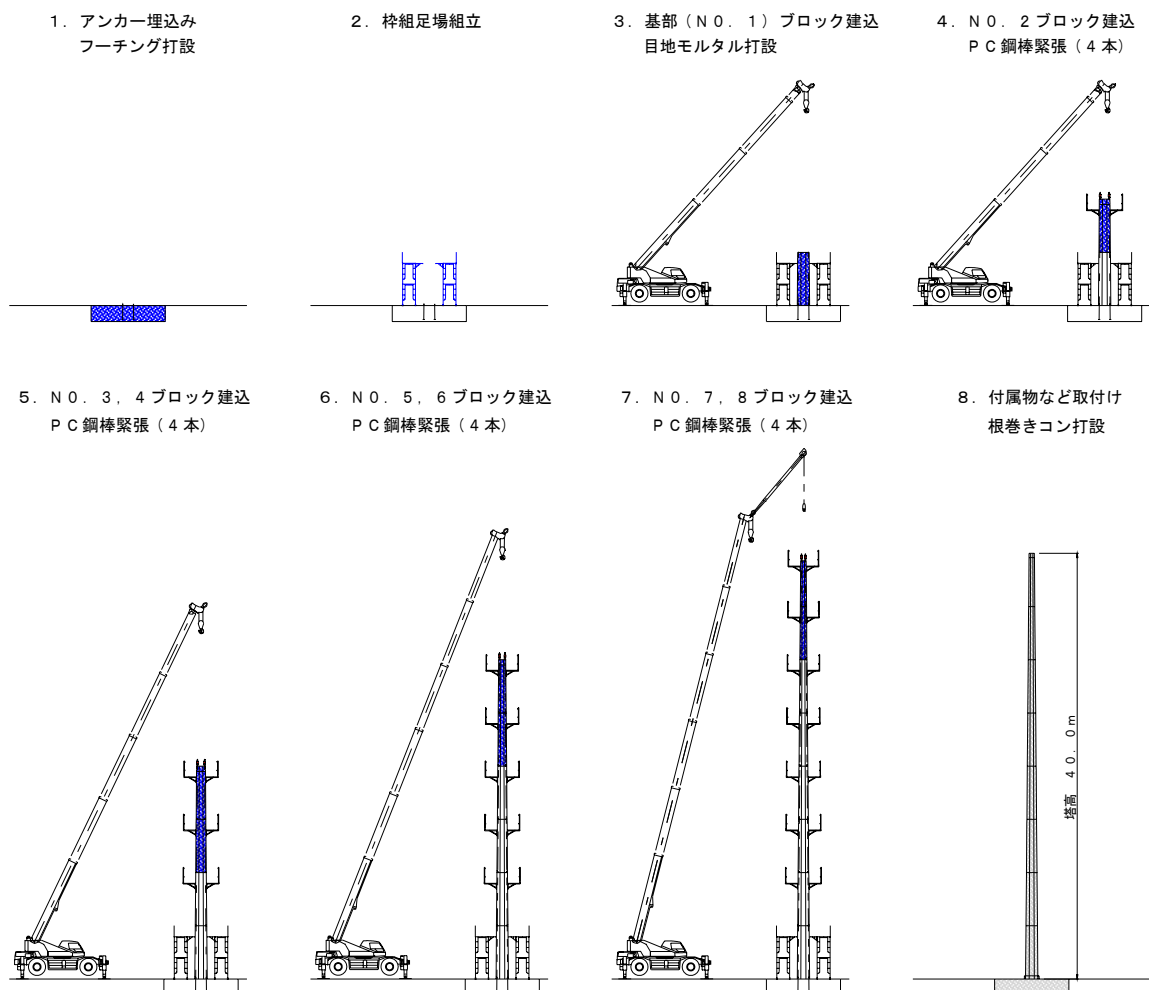


図-16 施工ステップ図

工種	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目
枠組足場組立	■							
部材搬入	■							
基部BL建込み		■						
目地モルタル打設		■						
2~4 BL建込み			■					
5~6 BL建込み				■				
7~8 BL建込み					■			
P C 鋼 棒 緊 張			■	■	■	■		
グ ラ ウ ト						■		
根 巻 き 工							■	
避 雷 針 取 付 け							■	
足 場 解 体								■
片 付 け								■

※ P C 鋼 材 の 緊 張 は、 偶 数 セ グ メ ン ト (2 セ グ メ ン ト 毎) に お い て 行

図-17 施工工程



写真-11 アンカー設置



写真-12 枠組足場組立



写真-13 セグメント仮置き



写真-14 No.1ブロック建込み



写真-15 PC鋼棒接続 (基部)



写真-16 無収縮モルタル打設 (基部)



写真-17 No.2ブロック建込



写真-18 仮留めプレート取付け



写真-19 PC鋼棒緊張



写真-20 No.4ブロック建込み



写真-21 No.6ブロック建込み



写真-22 No.8ブロック建込み



写真-23 付属物など取付け



写真-24 根巻きコンクリート

本工事の施工体制は、元請がサンワコムシスエンジニアリング株式会社であり、当社は下請けとして施工を行った。参考までに当社が行った施工範囲を表-7に示す。

表-7 当社の施工範囲

施工業者	施工箇所	備考
ピーエス三菱	埋込みアンカー	フーチング内
他業者	フーチング	設計基準強度 30N/mm ²
ピーエス三菱	ダックスポール(塔体)	
ピーエス三菱	昇降設備	
ピーエス三菱	避雷針	
ピーエス三菱	金物取付け	アンテナ取付け用など
他業者	アンテナ取付け	
他業者	その他通信設備	

6. まとめ

本工事は、初めてのダックスポールの施工であったが施工性に問題はなく、安全に施工を完了することができた。また、懸念事項であったPC鋼棒のカップリングに関しても、ディビダーク工法用のPC鋼棒を使用することで、手間取ることなく順調に施工できた。

ダックスポールは高強度材料を有効に活用した新しい形式のPC構造物であり、本アンテナ塔の実績により、その有効性および将来性などが評価され、プレストレストコンクリート技術協会賞(技術開発部門)を受賞した。ダックスポールは鋼製の塔に比べ、耐久性、景観性および経済性の面で優れており、プレストレストコンクリートの新たな市場が広がると期待される。今後は、アンテナ塔に限らず、空港や高速道路における照明塔などへ、適用を拡大したいと考えている。

謝辞

本アンテナ塔の計画から完成までには、営業、設計、製作および施工と多方面に渡って多くの方々にご協力を頂いた。ここに、ご協力頂いたすべての関係各位に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 通信鉄塔設計要領・同解説 (社)建設電気技術協会, pp.46-63, 2003年
- 2) 建築物荷重指針・同解説 日本建築学会, p.16, 2004年
- 3) 建築基準法施工令 第88条
- 4) 桜田道博, パンマワン ゴンケオ, 大山博明, 森拓也: 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—, ピーエス三菱技報, 4号, pp.11-14, 2006年
- 5) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案) 土木学会, pp.63-65