

高速ろ過施設における躯体コンクリートのひび割れ制御対策について

— 中部水再生センター高速ろ過施設築造工事 —

Crack Control Measures in Concrete Structures at High-speed Filtration Facilities

北澤英樹*1 福代 敬*2 高野治久*3

概 要

本工事は横浜市中部水再生センター内において、油性スカムの流出対策として高速ろ過施設を築造するものである。本工事は躯体の構築のみを行い、次期工事にて高速ろ過の設備工事が行われる。今回構築する躯体は水槽構造となっているほか、水槽構造に囲まれたバルブ室兼機械室があり高い水密性が求められていることから、ひび割れによる漏水防止対策を実施した。本報告では、①温度応力解析による中庸熱ポルトランドセメントへの変更 ②誘発目地の追加 ③ひび割れ制御鉄筋の追加について報告する。

key words : 高速ろ過施設、温度応力解析、中庸熱ポルトランドセメント、ひび割れ誘発目地、ひび割れ制御鉄筋

1. はじめに

中部水再生センターは、横浜市の中心部である中区の大部分と南区の一部の計画処理面積 942ha、計画処理人口 119,800 人を対象とする計画処理能力 1 日 90,900m³の下水処理場である（写真-1）。

同センターは、昭和 37 年 4 月の横浜市最初の下水処理場として運転を開始した。しかしながら、同センターは、処理区域に横浜中華街が含まれているため（図-1）、油分を多く含む汚水が流入してくる影響で、昭和 60 年から海上保安庁立入調査があり、油性スカム（油などの成分が下水管を流れている間に変形して白いかたまりとなったもの）の流出について指摘を受けた。

海上保安庁の指摘を受け、雨水滞水池の新設や放流口へのオイルフェンス設置対策を行い、油性スカム流出は減少したが、雨天時に処理施設、雨水滞水池で対応できないときは油分を含んだ水を直接海域に放流していた。

更なる対策として、雨天時放流水の粒径 2mm 以下の油性スカム流出削減のため、横浜市として初めて高速ろ過施設を導入することとなった。本工事は、その高速ろ過施設（躯体寸法 56.4m×29.4m 内に 30m²程度の池を 10 池設置、掘削深度：GL-13.4m）を建設する工事である（図-2、3）。

高速ろ過施設は水槽構造であり、それに囲まれたバルブ室兼機械室もまた高い水密性が求められたほか、底版および壁がマスコンクリートとなるため、温度応

力解析の結果をもとに、ひび割れ制御対策を実施することを発注者から強く要望された。



写真-1 現場位置図



図-1 横浜市水再生センター管轄図

*1 Hideki KITAZAWA

東京支社土木支店土木部土木課 副所長

*2 Takashi FUKUYO

東京支社土木支店土木部土木課 作業所長

*3 Haruhisa TAKANO

土木事業本部 技術部

2. マスコンクリートの温度応力解析

2.1 概要

底版(厚さ:1.20m~2.30m)は 80cm を超えており、また下端を拘束された壁(厚さ:0.5m~1.20m)は 50cm を超えており、それぞれマスコンクリート部材となるため温度応力によるひび割れが懸念された。

そのため、3次元有限要素法(FEM)による温度応力解析を底版・壁・床版と構造別に分けて実施し、適切なひび割れ制御対策の検討を行った。

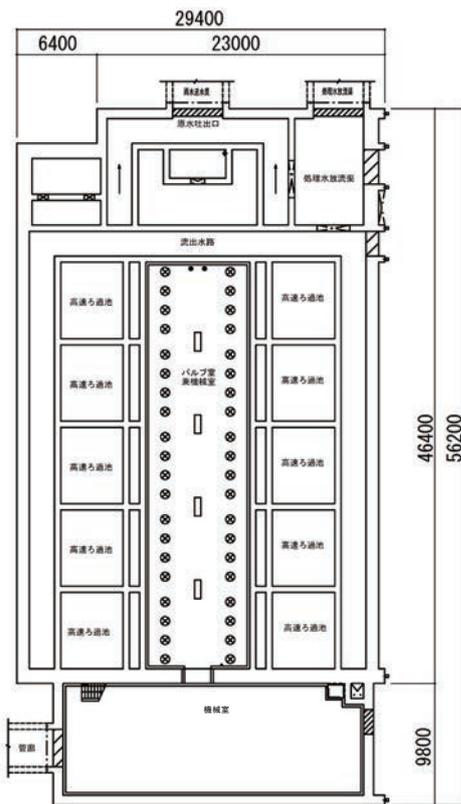


図-2 全体平面図

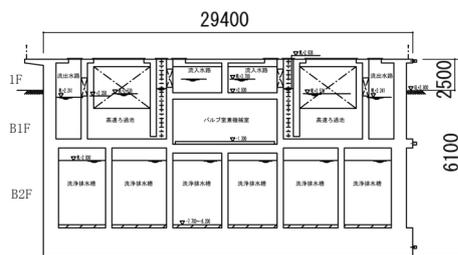


図-3 一般断面図

2.2 ひび割れ対策の目標値

ひび割れに対する対策レベルについては、「ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合」として、ひび割れ発生確率 50%、安全係数(ひび割れ指数) 1.0 以上を目標値とした。ひび割れ幅については、一般に使用される鉄筋量や要求される水密性などから、構造物に許容されるひび割れ幅 0.20mm を限界値とした。

本解析は、発注者との協議により温度応力解析を3次元有限要素法応力解析にCP法を用いるため「コンクリート標準示方書(設計編)2017年度版」²⁾に準拠した。

2.3 解析手順

ひび割れ指数 1.0 以上かつひび割れ幅 0.2mm 以下を満足するために以下の手順により検討を行う(図-4)。

【底版・床版】

- ① 高炉セメントB種を使用し解析
- ② 上記の検討で満足しない場合、中庸熱ポルトランドセメントを使用し解析
- ③ ひび割れ幅が 0.2mm を超える場合は材料特性の見直し

【壁】

- ① 高炉セメントB種を使用しひび割れ誘発目地を設置して、コンクリート打設壁長は、20m→10m→5.0mの順番で解析する。
- ② 上記の検討で満足しない場合は、膨張剤と中庸熱ポルトランドセメントを使用し解析を行う。
- ③ ひび割れ指数 $I_{cr} \geq 1.0$ を満足しているが、ひび割れ幅が 0.2mm を超える場合は材料特性の見直し

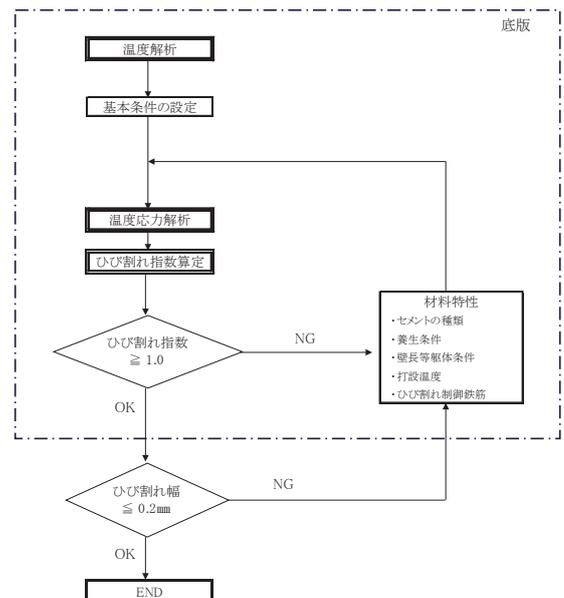


図-4 ひび割れ解析検討手順

2.3 解析条件

(1) コンクリートの配合諸元

コンクリートの配合諸元を表-1に示す。外気温は神奈川県横浜市の月別平均気温の5年平均値を採用し、打込み温度は外気温+5℃として設定した。

表-1 コンクリートの配合諸元

セメント種別		呼び強度 (N/mm ²)	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)
高炉セメントB種	標準	27	52.0	310	161
	夏季		50.5	331	167
中庸熱ポルトランドセメント	標準	27	52.4	302	158
	夏季		50.9	323	164

(2) 解析モデル

底版・壁・床版の解析モデルは躯体形状から1/2モデルとした(図-5~7)。

底版部はコンクリート数量が計2,880m³あるため、コンクリートの打込み工程より6分割とした。また、壁部はコンクリート打込み工程より5分割とし、床版は4分割とした。

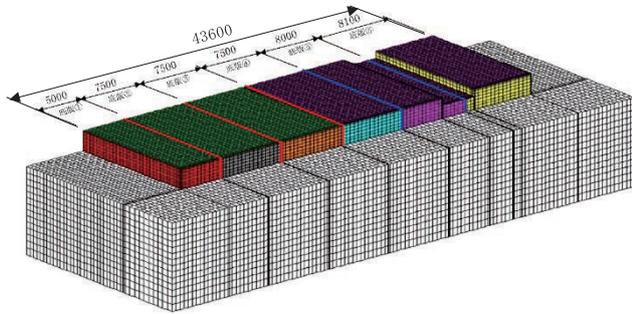


図-5 底版の解析モデル

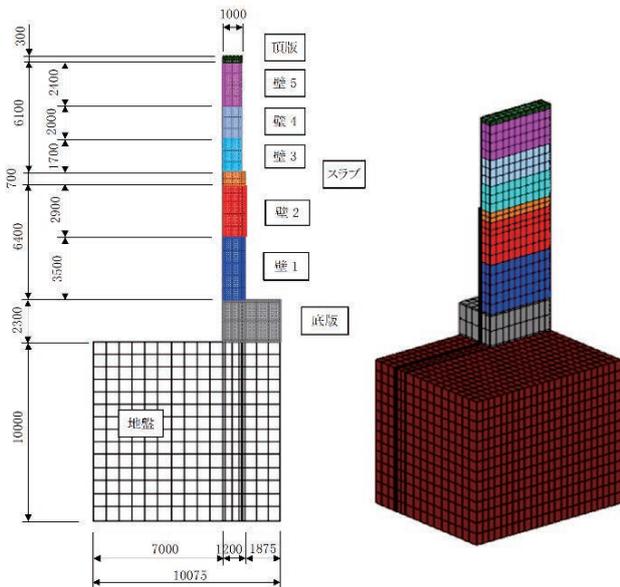


図-6 壁の解析モデル

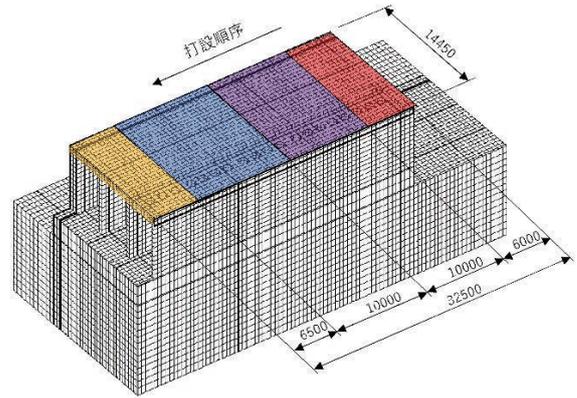


図-7 床版の解析モデル

3. 解析結果

3.1 底版

床版コンクリートの打込み時期は4月下旬~7月中旬とした。

(1) 解析結果

最小ひび割れ指数(I_{cr}) ≤ 1.0 を満足するセメントは中庸熱ポルトランドセメントとなった(表-2、図-8)。

表-2 底版の解析結果

項目		高炉B種セメント		中庸熱ポルトランドセメント	
		最小ひび割れ指数(I_{cr})	判定(≥ 1.00)	最小ひび割れ指数(I_{cr})	判定(≥ 1.00)
底版①	内部	0.94	×	1.33	○
	表面	1.36	○	1.62	○
底版②	内部	0.77	×	1.28	○
	表面	1.08	○	1.06	○
底版③	内部	0.72	×	1.12	○
	表面	0.97	×	1.25	○
底版④	内部	0.84	×	1.29	○
	表面	0.96	×	1.22	○
底版⑤	内部	0.87	×	1.24	○
	表面	1.05	○	1.15	○
底版⑥	内部	0.80	×	1.08	○
	表面	0.89	×	1.42	○
評価		×		○	

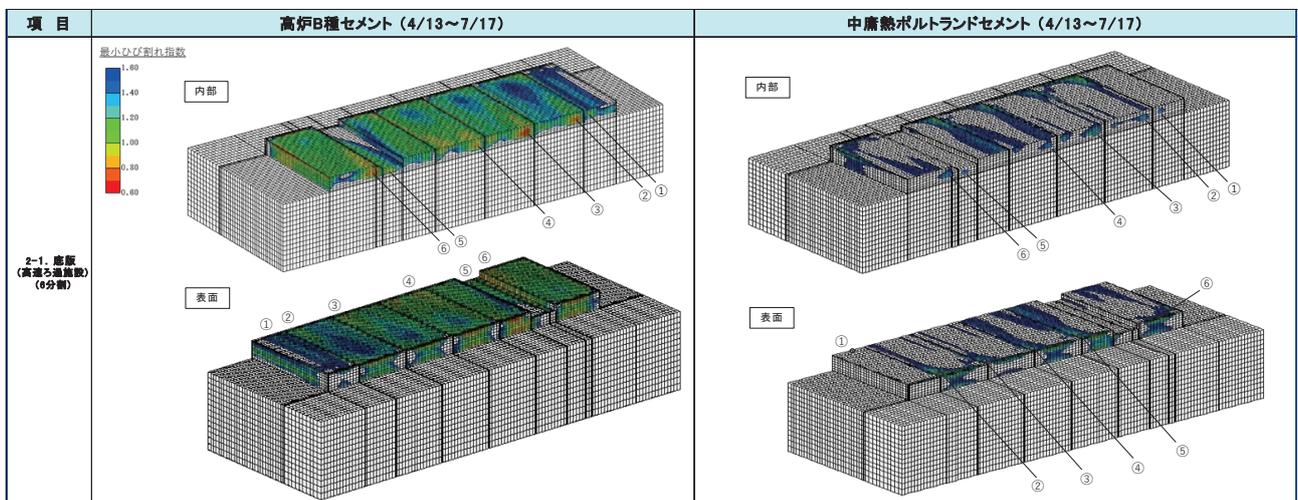
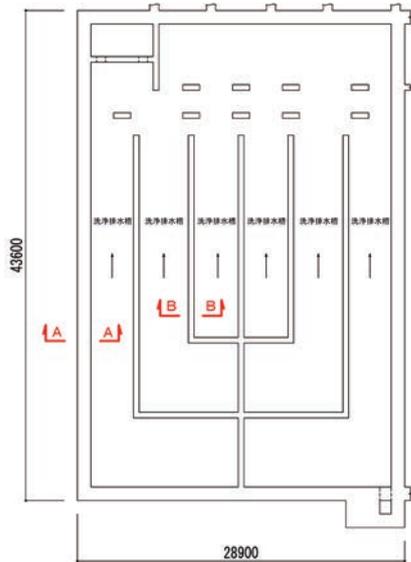


図-8 解析結果分布図(底版)

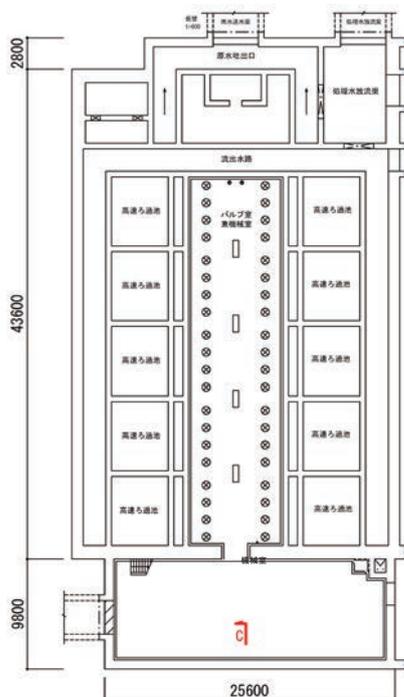
3.2 壁

壁コンクリートの打込み時期は最も気温が高く施工条件が厳しい8月上旬とした。

検討断面は図-9のA-A断面(外壁)、B-B断面(内壁)、C-C断面(機械室外壁)とし、セメントの種別は高炉セメントB種、高炉セメントB種+膨張剤、中庸熟ポルトランドセメントの3ケースとした。



B2F



B1F

図-9 解析位置(平面図)

(1) 解析結果

解析結果および経済比較から、外壁、内壁、機械室外壁は中庸熟ポルトランドセメント、壁長は10mが最も経済的に優れているとなった(表-3、図-10)。

表-3 壁の解析結果および経済比較

項目	高炉セメントB種				高炉セメントB種+膨張材			中庸熟ポルトランドセメント				
	壁長(m)	5.0		5.0		10.0						
部位	鉄筋比(%)	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定		
①壁1	0.53	0.97	0.13	×	1.13	0.14	○	1.09	0.15	○		
②壁2		1.02	0.11	○	1.14	0.14	○	1.21	0.13	○		
③壁3	0.64	0.97	0.09	×	1.05	1.12	○	1.20	0.10	○		
④壁4		0.95	0.10	×	1.03	1.12	○	1.20	0.10	○		
⑤壁5		1.12	0.07	○	1.29	0.09	○	1.49	0.06	○		
判定	×				○			○				
経済比較	-				高炉セメントB種	2,405千円	膨張材	507千円	誘発目地	728千円	合計	3,640千円
評価	×				○			◎				
	ひび割れ指数1.0以上を満足しない				中庸熟よりコストは高い			最もコストは低い				

項目	高炉セメントB種				高炉セメントB種+膨張材			中庸熟ポルトランドセメント				
	壁長(m)	5.0		5.0		10.0						
部位	鉄筋比(%)	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定		
①内部	0.77	1.03	0.08	○	1.49	0.04	○	1.17	0.08	○		
⑥表面	0.46	1.98	0.01	○	2.63	0.01	○	1.50	0.10	○		
②壁2	0.77	1.29	0.06	○	1.33	0.06	○	1.03	0.08	○		
③壁3		1.27	0.06	○	1.45	0.05	○	1.70	0.02	○		
④壁4		1.21	0.07	○	1.38	0.05	○	1.67	0.03	○		
⑤壁5		1.33	0.06	○	1.56	0.04	○	1.97	0.01	○		
判定	○				○			○				
経済比較	-				高炉セメントB種	1,088千円	膨張材	0千円	誘発目地	330千円	合計	1,418千円
評価	○				△			◎				
	中庸熟よりコストは高い				最もコストは高い			最もコストは低い				

項目	高炉セメントB種				中庸熟ポルトランドセメント							
	壁長(m)	5.0		10.0								
部位	鉄筋比(%)	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅(mm)	判定					
①壁3	0.63	0.94	0.13	×	1.19	0.10	○					
②壁4		1.14	0.11	○	1.73	0.03	○					
判定	×				○							
経済比較	-				高炉セメントB種	-千円	膨張材	-千円	誘発目地	-千円	合計	-千円
評価	×				◎							
	ひび割れ指数1.0以上を満足しない				最もコストは低い							

※経済性が劣る膨張材は検討から除外

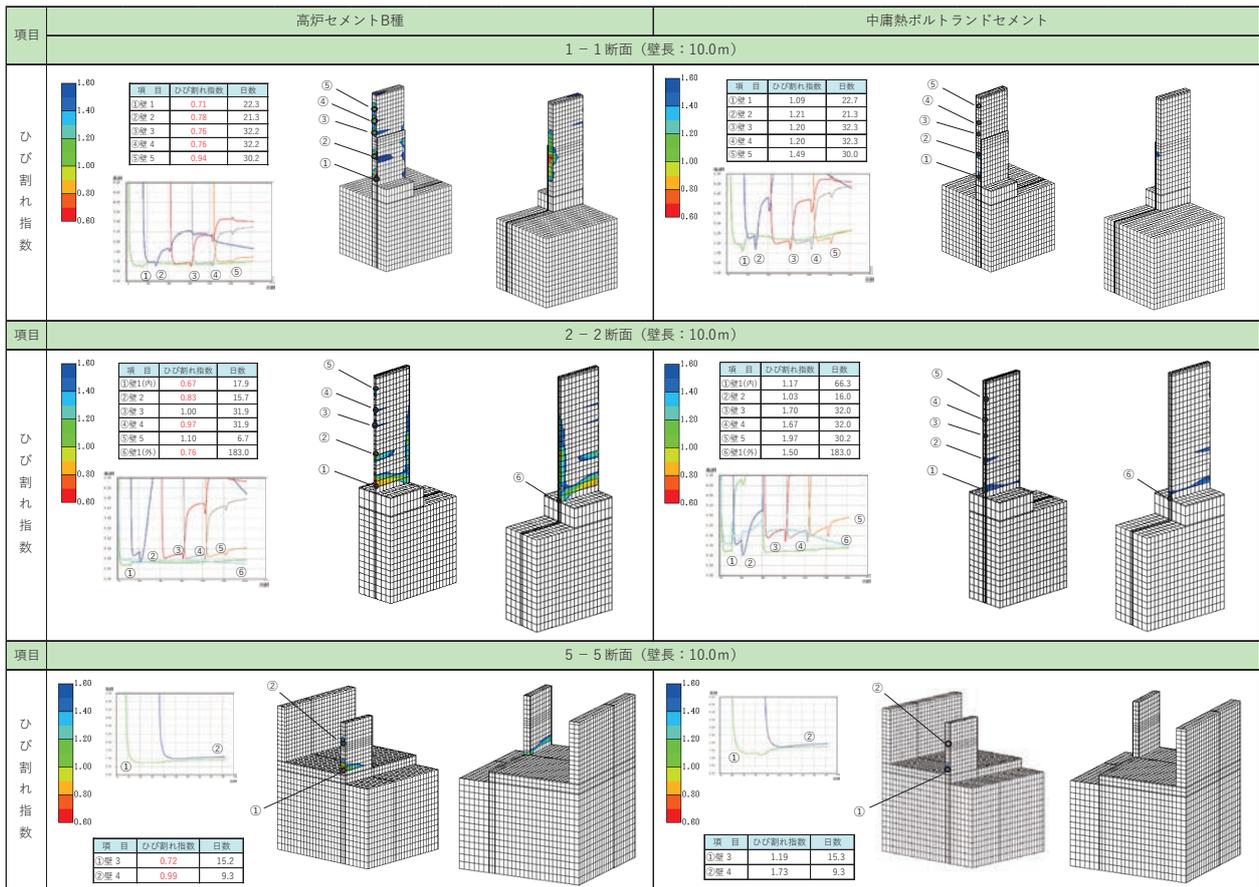


図-10 解析結果分布図 (壁)

(2) 誘発目地の追加

横浜市下水道施設(水再生センター・ポンプ場等)耐震設計指針(案)第3章 土木構造物 8・9 マスコンクリート(5)³⁾では「適切な施工計画立案後に、誘発目地の配置を見直す作業をおこなわなければならない」と記載されている。施工計画立案後、温度応力解析の結果をもとに誘発目地を追加設置することとした。

外壁・内壁・機械室外壁は、中庸熱ポルトランドセメントを使用し、ひび割れ誘発目地を10m間隔で設置して、ひび割れ指数1.0以上ひび割れ幅0.2mm以下を確保した(写真-2、3)。

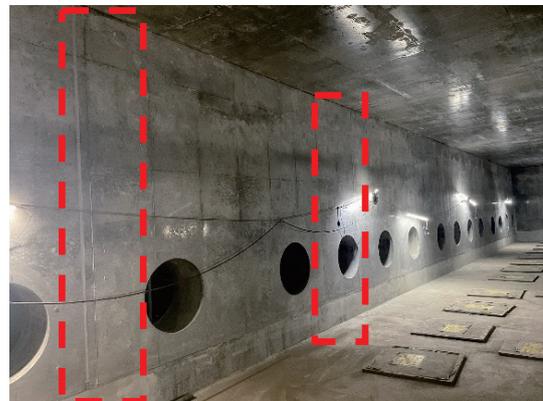


写真-3 誘発目地設置状況 (打込み後)



写真-2 誘発目地設置状況 (打込み前)

3.3 床版

コンクリートの打込み時期は、B1床版の実工程に合わせて10月中旬~3月下旬、1F床版、機械室の床版は打込み時期は最も気温が高く施工条件が厳しい8月上旬とした。

(1) 解析範囲

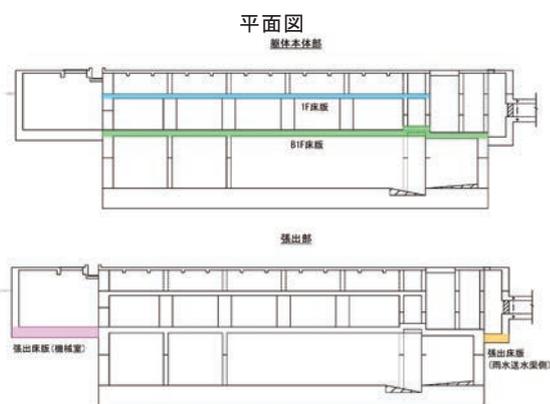
床版の解析範囲は、外壁および内壁により長手方向および短手方向の両方から拘束される範囲とした(図-11)。

(2) 打込み方法

コンクリート打込み方法として、「床版のみ」、「床版と壁を一体」の2タイプについて検討を行った(図-12)。



写真-4 B1F 床版



側面図

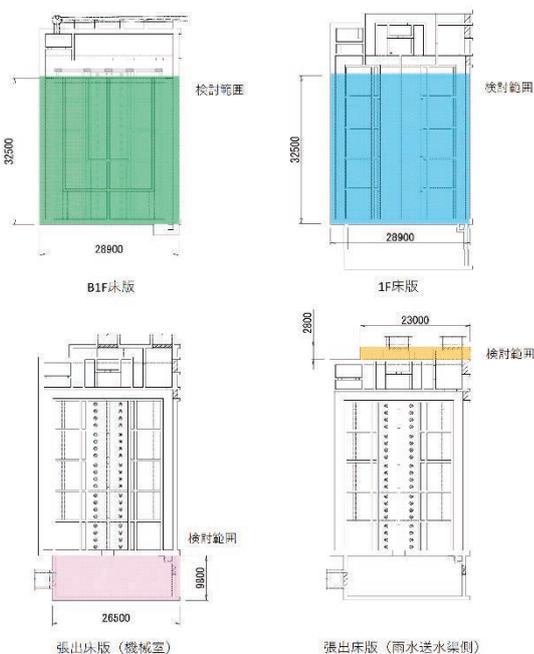
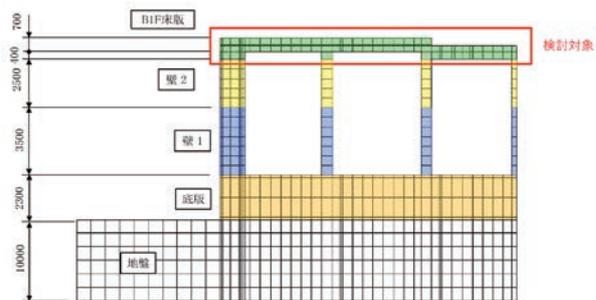


図-11 検討部位図



床版のみ (第1案、第2案)



床版と壁を一体 (第3案)

図-12 打込み方法

(3) 解析結果

経済比較から、中庸熟ポルトランドセメントを使用し、床版と壁を一体として打込む第3案が最も経済的に優れている結果となった。

B1F 床版 (開口部あり) の結果を示す (表-4、図-13)。

表-4 B1F 床版の解析結果および経済比較

項目	1案 高炉セメントB種			2案 中庸熟 ポルトランドセメント			3案 中庸熟 ポルトランドセメント (壁一体)				
	鉄筋比 (%)	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅 (mm)	判定	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅 (mm)	判定	最小ひび割れ指数	ひび割れ幅 (mm)	判定	
Zロケット ↑ Zロケット ↓	0.41	①内部	0.68	0.32	×	1.04	0.23	△	3.50	0.01	○
		②開口部	0.50	0.37	×	0.98	0.25	×	3.40	0.01	○
		③外面	0.82	0.29	×	1.56	0.10	○	4.10	0.01	○
		④内部	0.89	0.27	×	1.96	0.01	○	2.00	0.01	○
		⑤開口部	0.50	0.37	×	0.67	0.32	×	0.8*	0.29	×
		⑥外面	0.77	0.30	×	1.38	0.15	○	1.80	0.04	○
経済性	高炉B:	14,150 千円	中庸熟:	15,563 千円	中庸熟:	15,563 千円					
	主鉄筋:	7,490 千円 (50.44)	主鉄筋:	5,722 千円 (38.53)	主鉄筋:	4,234 千円 (28.51)					
評価	配力筋:	7,981 千円 (53.89)	配力筋:	4,511 千円 (30.38)	配力筋:	3,129 千円 (21.07)					
	開口部:	1,785 千円 (12.02)	開口部:	1,785 千円 (12.02)	開口部:	1,322 千円 (8.90)					
	開口部:				開口部:	97 千円 (0.65)					
	合計:	31,406 千円	合計:	27,581 千円	合計:	24,345 千円					
*最もコストが高い ・床版全体で、ひび割れ指数が1.0を大きく下回っている ・コストは高炉B種より低い ・床版内部で0.2mmを超えるひび割れが発生する ・開口部全ての割れ指数が1.0未満となる ・最もコストが低い ・打継目付近の開口部のみ、ひび割れ幅が0.20mmを超えるため、ひび割れ新設鉄筋の追加が必要											

※壁一体の高炉セメントB種は事前解析から最小ひび割れ指数が1.0を下回るため検討から除外

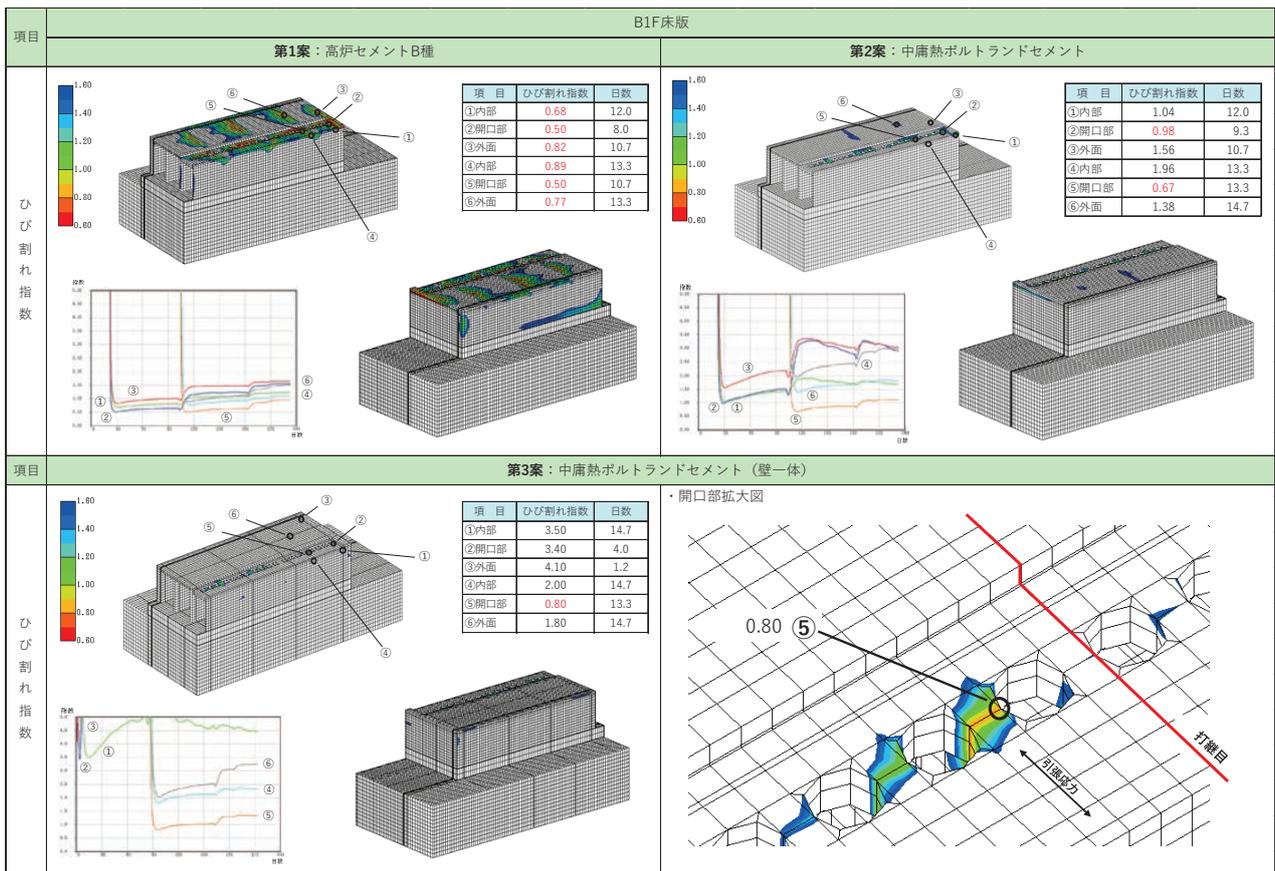


図-13 解析結果分布図（床版）

(4) ひび割れ制御鉄筋の追加

応力が集中する開口部では最小ひび割れ指数を 1.0 以下にすることは難しいため、ひび割れ幅が 0.2mm 以下となるように開口部補強鉄筋の追加を行った。

鉄筋比で 0.6%程度を配置することでひび割れ幅を 0.2mm 以内に制御することができた（図-14）。

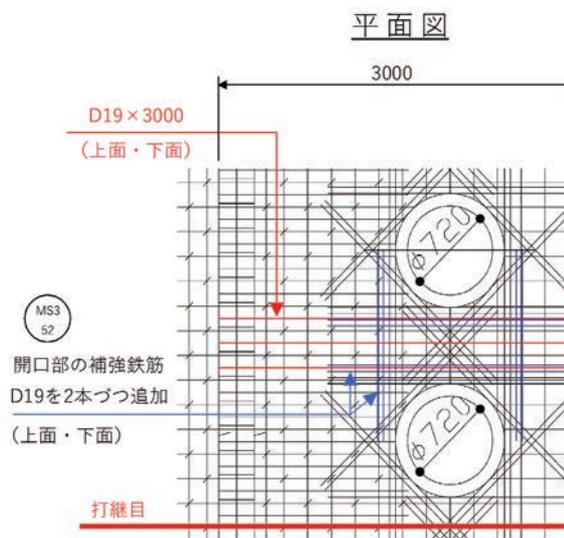


図-14 ひび割れ制御鉄筋

4. おわりに

本報告では、高速ろ過施設築造に伴うマスコンクリートの温度応力度解析ならびにひび割れ制御対策について述べた。その結果、0.2mmを超える有害なひび割れは発生していない。

中庸熱ポルトランドセメントとひび割れ誘発目地の適切な配置、開口部の補強鉄筋の追加はひび割れ制御に効果があったと考える。

【謝辞】

本工事では発注者の横浜市下水道河川局の職員の方々をはじめ、本社技術部や東京支社土木支店、また当現場の担当職員、施工を担当した協力企業の方々に多大な協力や支援をして頂き、ここに深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) コンクリート標準示方書【施工編】2017年版
- 2) コンクリート標準示方書【設計編】2017年版
- 3) 横浜市耐震設計指針(案)平成27年版
- 4) 横浜市下水道施設(水再生センター・ポンプ場等)耐震設計指針(案)
- 5) マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016年版

