

下水道処理施設 地下躯体での 温度ひび割れ対応事例

勝井建設株式会社 吉廣幸司

目次

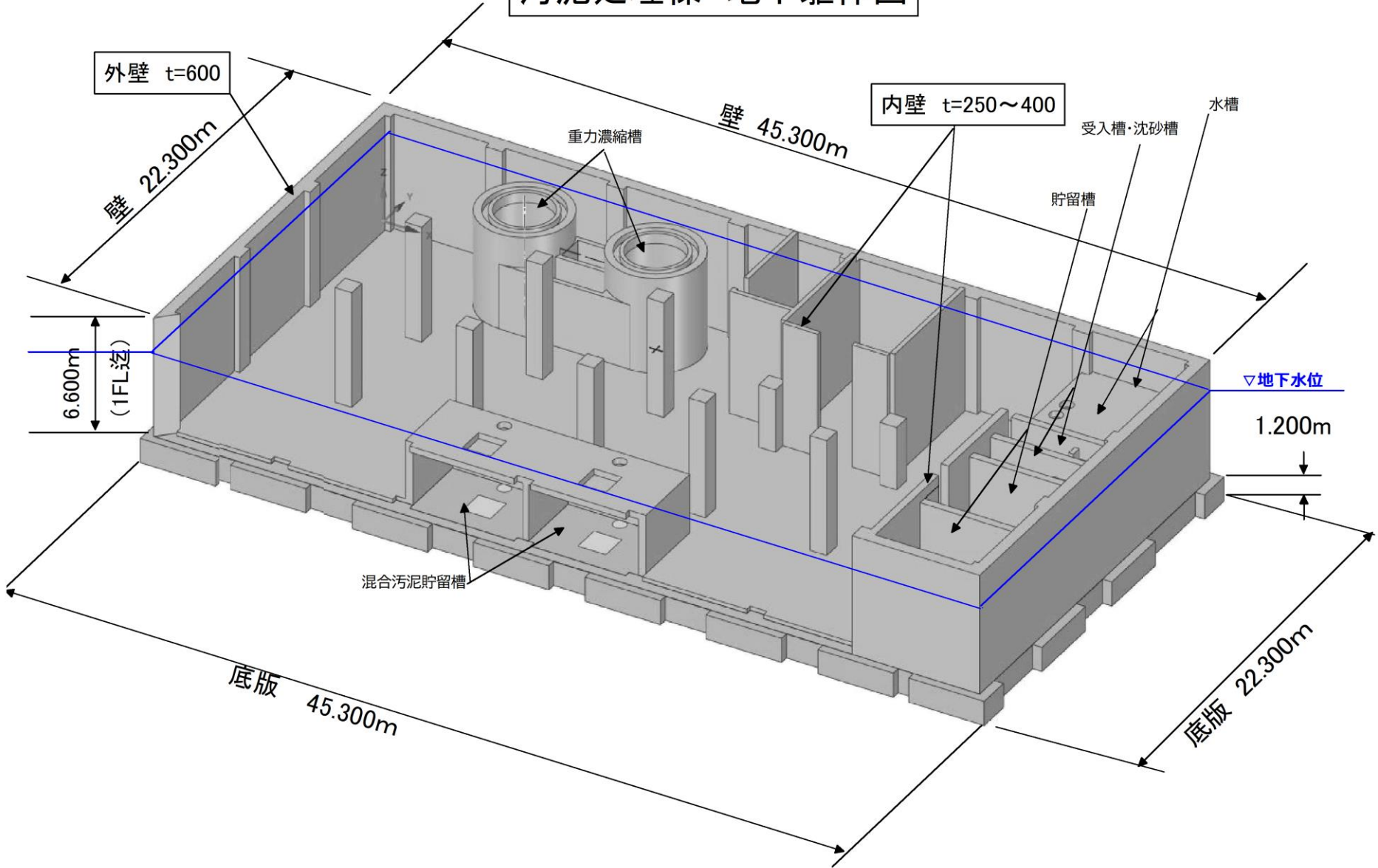
- p.1 1. 工事の概要
- p.2 ~ p.5 2. 躯体サイズ・現場の条件
- 1) 施工する地下躯体の形状・大きさ
 - 2) 地下水位・仮設-仮締め切工（切梁の制約）
- p.6 ~ p.12 3. 打設割について
- p.13~ p.14 4. 解析の適用範囲・発注者の要求・前準備・使用softについて
- p.15~ p.26 5. マスコンクリートの温度応力解析（底版部）
- 1) 解析部位の抽出・解析条件・解析対象部位のモデル化
 - 2) 検討配合の解析結果
 - 3) 各検討配合による解析結果及び照査・決定した対策方法
 - 4) 実施結果について
- p.27~ p.48 6. マスコンクリートの温度応力解析（壁部）
- 1) 解析部位の抽出・解析条件・解析対象部位のモデル化
 - 2) 検討配合の解析結果
 - 3) 各検討配合による解析結果及び照査
 - 4) NG解析結果によるひび割れ制御対策・再解析の検討
 - 5) 再解析結果及び照査・決定した対策方法
 - 6) 実施結果について
- p.49 7. まとめ
- p.50 8. おわりに

- (発注者) 日本下水道事業団
- (工事名) 周南市徳山中央浄化センター建設工事その6
- (工事場所) 山口県周南市晴海町地内
- (施設名) 周南市徳山中央浄化センター
- (対象工事) 土木工事として汚泥処理棟工 一式
建築工事として汚泥処理棟 一式
- (工 期) 令和3年3月25日
～現在建築工事が引き続き施工中の工事

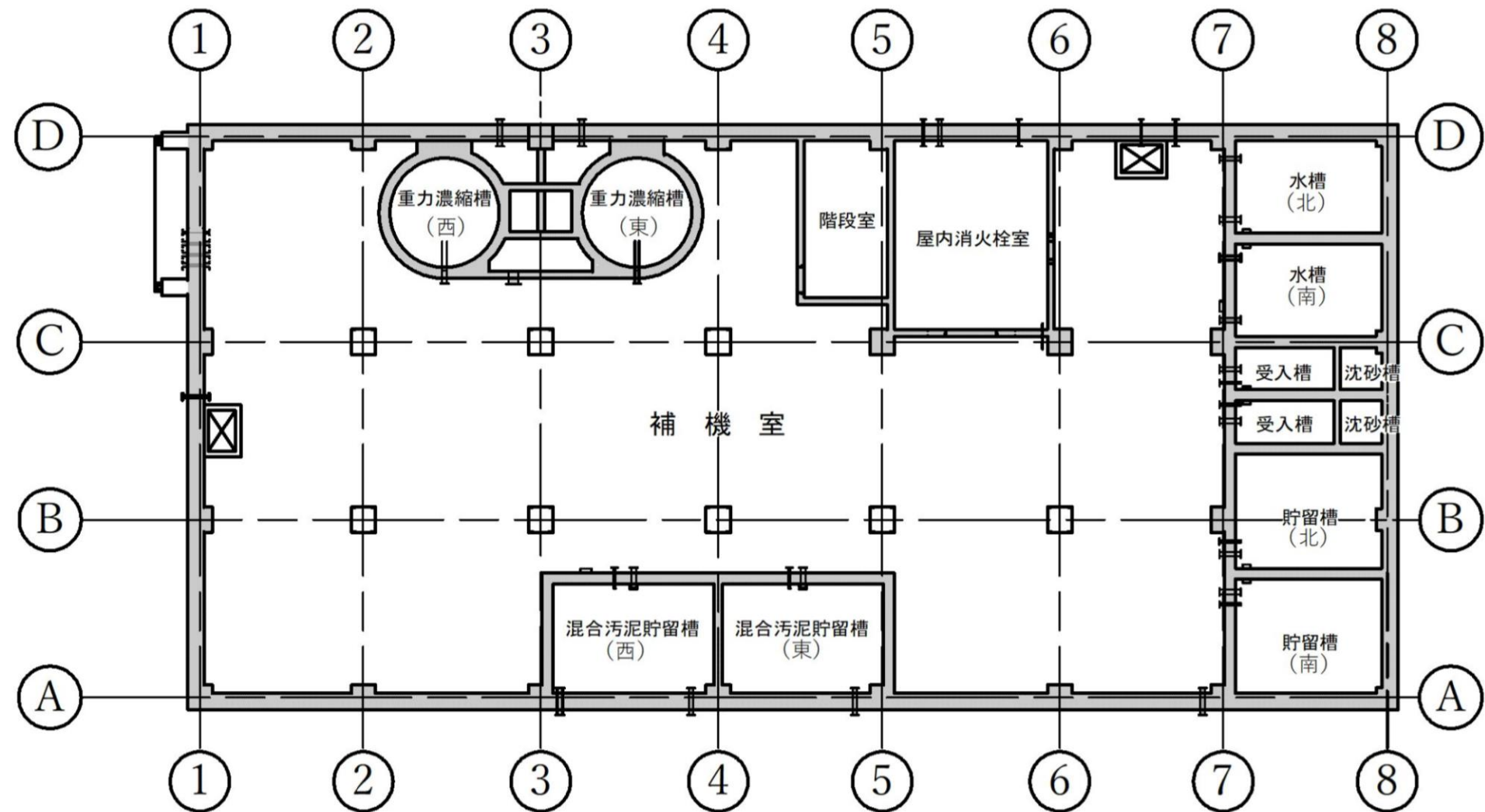
汚泥処理棟は、地下1階、地上2階 延べ面積2631.51m² RC造

-1) 施工する地下躯体の形状・大きさ (地下構造の3D図)

汚泥処理棟 地下躯体図



-1) 施工する地下躯体の形状・大きさ（地下の平面図）

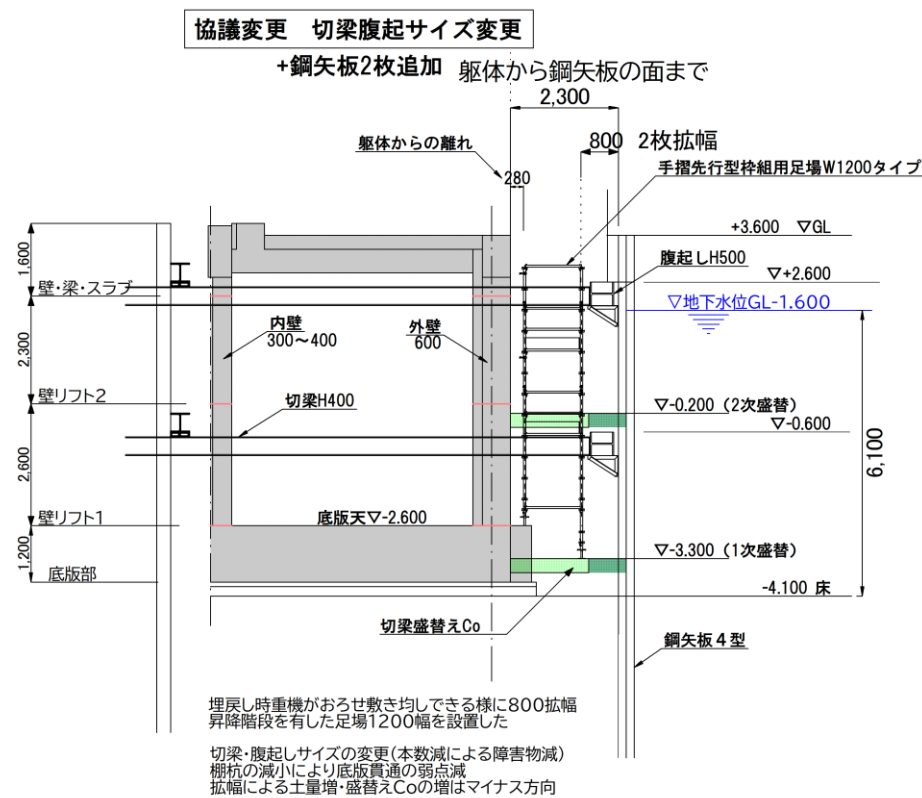
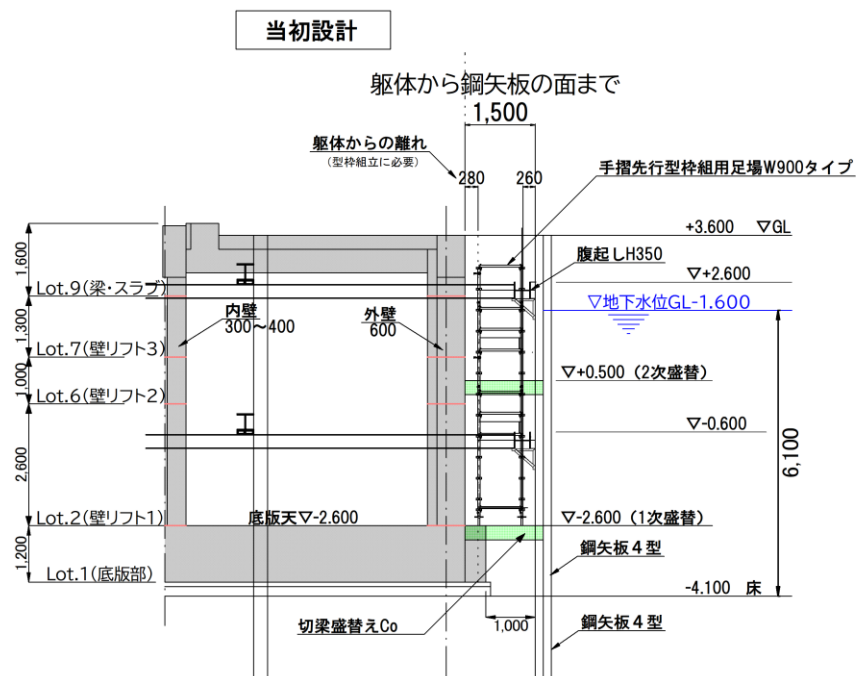


-2) 地下水位・仮設-仮締め切工（切梁の制約）

現場条件

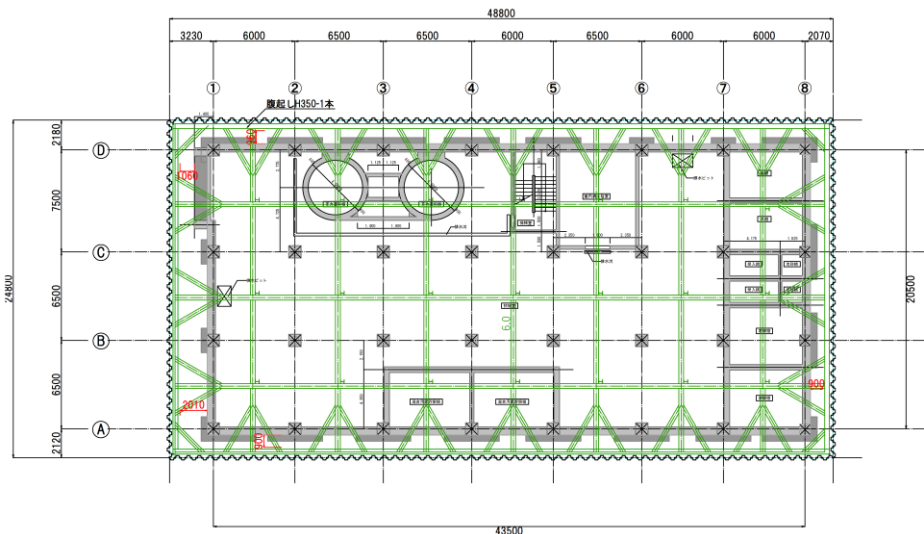
仮締め切工 2段切梁/海岸線から100m以内・地下水位がGL-1.6m、GL～底版下面迄（均し天端）7.4m

地下水位以下の躯体部分が5.8m。 ほぼ地下水位以下に大きな水槽を地下に構築するような躯体でした。

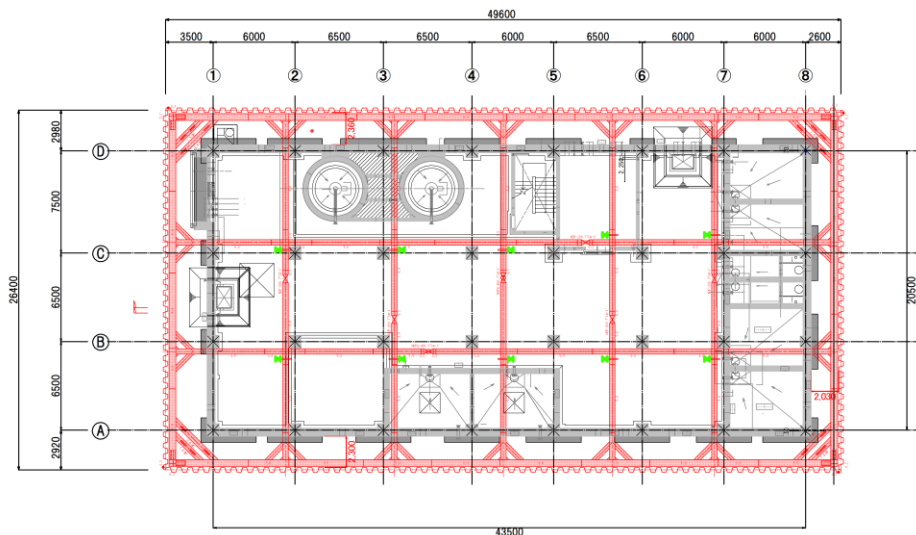


-2) 地下水位・仮設-仮締め切工 (切梁の制約)

仮締め切工の平面図(当初)



仮締め切工の平面図(協議変更図)



当初

躯体壁面から鋼矢板面迄の離隔が1.5mと狭小
(昇降階段を有する足場を設けることが困難)

躯体周囲の埋戻し時に重機がおろせない

切梁を支持する棚杭が各水槽の底にあり底版を貫通させて弱点を作っている 全21本

変更

鋼矢板増やし安全作業ができるよう昇降階段を有した足場を設置

重機も降ろせて埋戻しが可能に

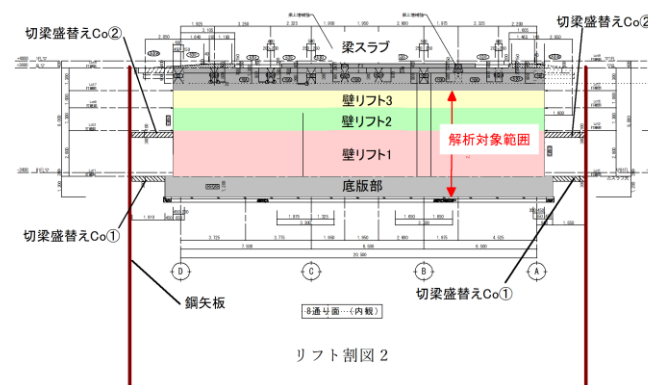
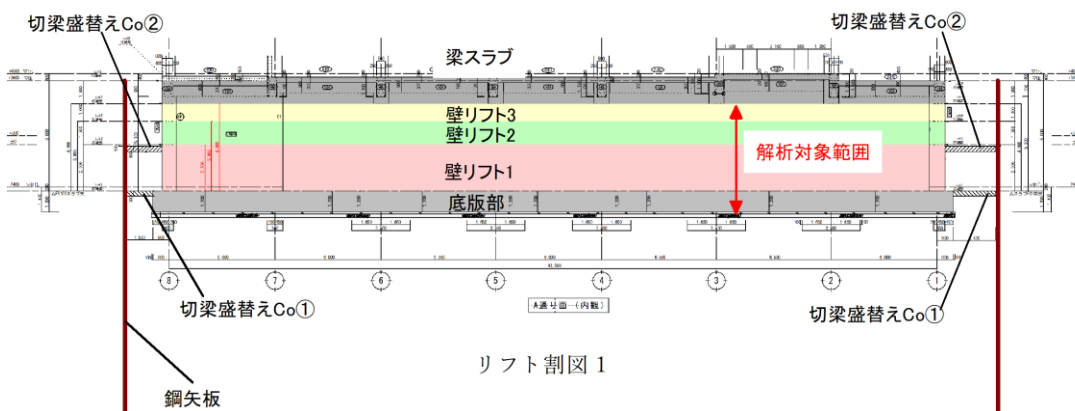
切梁・腹起しの部材を変更し、棚杭本数を減・弱点になる底版貫通箇所の減・水槽の底版貫通を排除 全10本

棚杭の処理を適正に処置するとはいえ水槽の底に穴が開いているのは気持ちよくないですね。気持ちの問題かもしれませんが将来的な弱点の排除に配慮しました。

<打設割>

解析にあたり先ず打設割を考えました。底版1回・壁3回・梁スラブ1回の5回打ちを計画打設割として解析しました。対象範囲は下表①～④になります。

	打設部位	リフト高	対象範囲
①	底版部	1.20m	解析対象範囲
②	壁リフト1（壁部1回目）	2.60m	解析対象範囲
③	壁リフト2（壁部2回目）	1.30m	解析対象範囲
④	壁リフト3（壁部3回目）	1.00m	解析対象範囲
⑤	梁スラブ	1.70m	



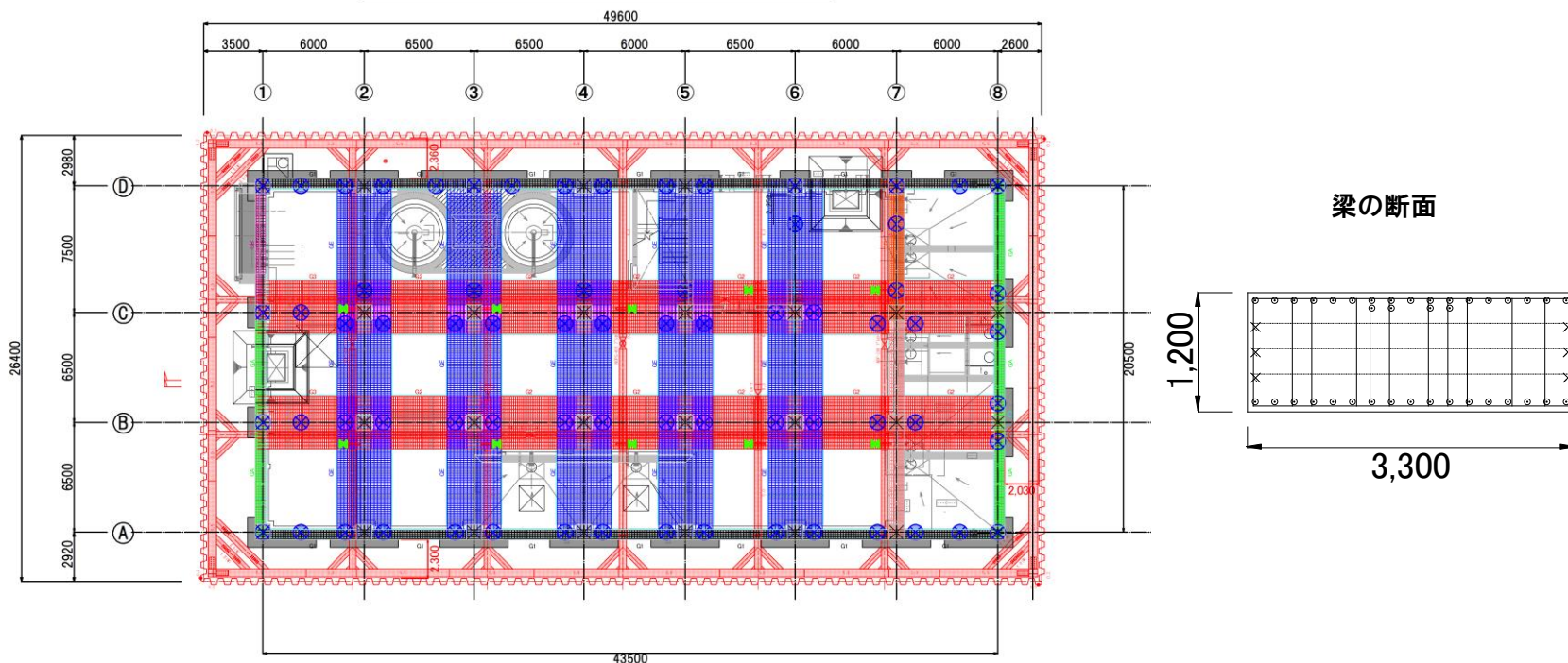
打設割を考えるにあたっての留意点は、弱点を極力作らない方向で！っと考えました。

<底版部>

底版部は、下図の鉄筋配筋図の様に大梁が長手方向・短手方向に入っているため平面的に区分けして打設するとか薄巻きに分割して数日に分け打設を行うなどの弱点を作るような施工は出来ないため、1回で打設としました。

数量は約1200m³あり施工面で実施可能かということも検討しました。

底版部の梁鉄筋の配置平面図



壁部は、切梁の盛替えCo打設で切梁を外しつつリフトする方向で！っと考えました。

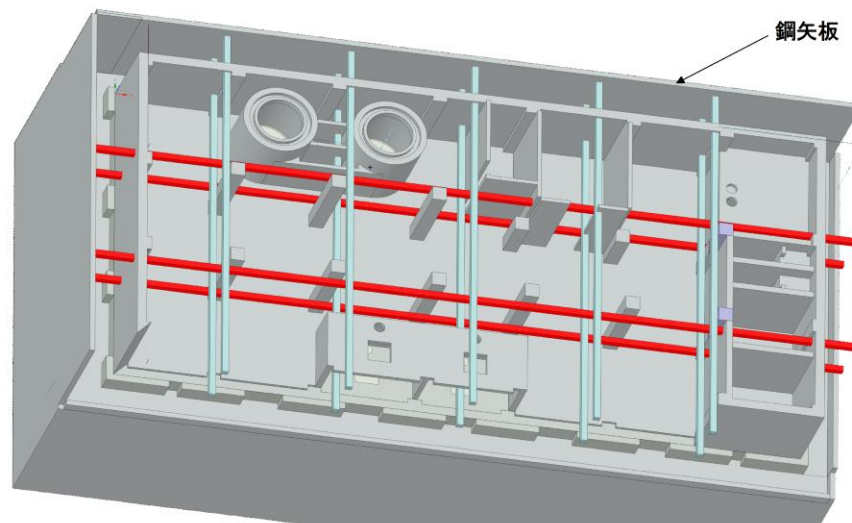
<壁 部>

切梁の取出し用の開口を設けると切梁摘出後にその開口部が弱点にもなりますし、その後の処理にも手間も金もかかるため切梁の開口を開けない方向として打設割を計画。

また、各々違う高さにある中間スラブや、構造物が大きなことから1日に施工可能な打設量と確実に密実に打設できるリフト高・打設予定時期など総合的に考え壁の打設割を決定しました。

各中間スラブがの高さがバラバラな複雑な構造であったため計画時は、初操作となる解析ソフトの操作も考慮して壁リフトを3回として考え解析を行っています。

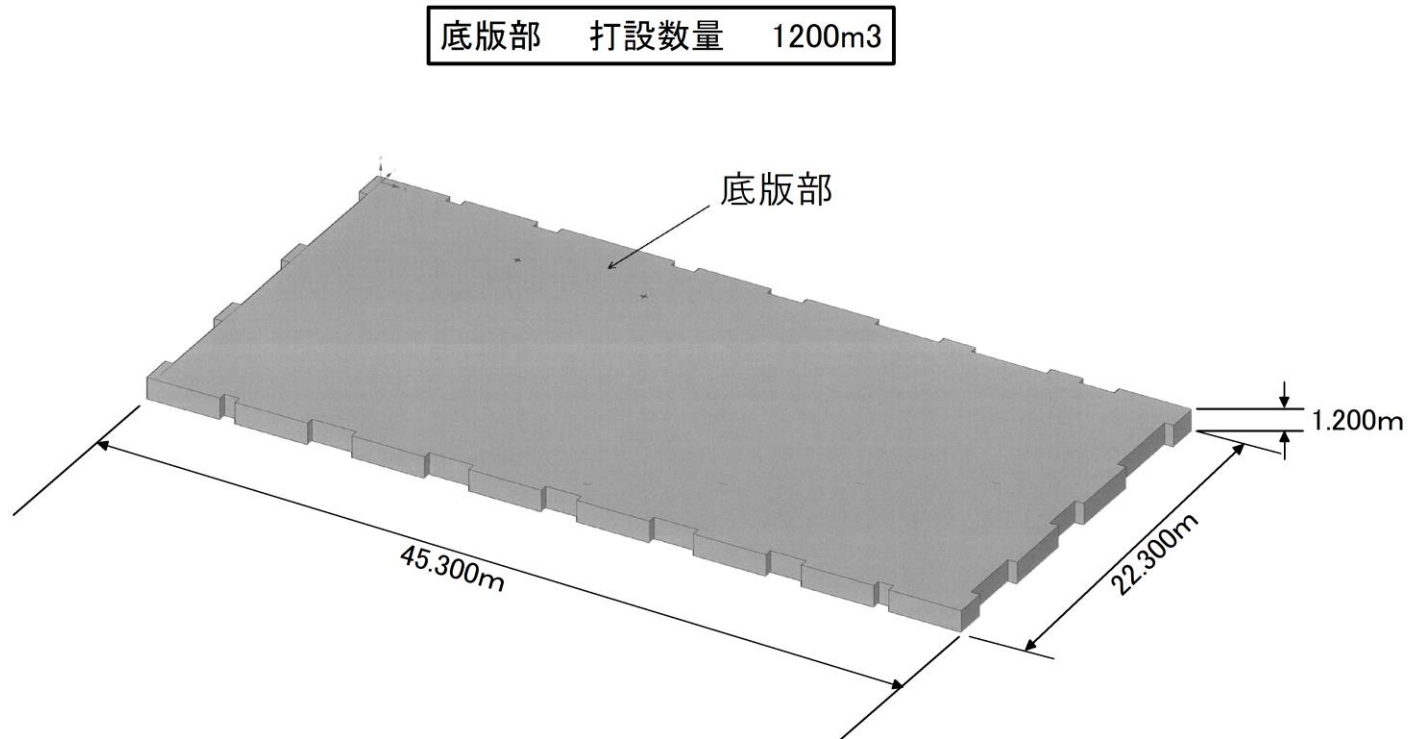
仮締め切工の立体図(協議変更図を基に)



棚杭が水槽底部を回避する方向で弱点を減らしたが、切梁を撤去後に壁をリフトしないと、水槽となる構造物に弱点を作る施工となる。

打設割のイメージ

-1) 底版部

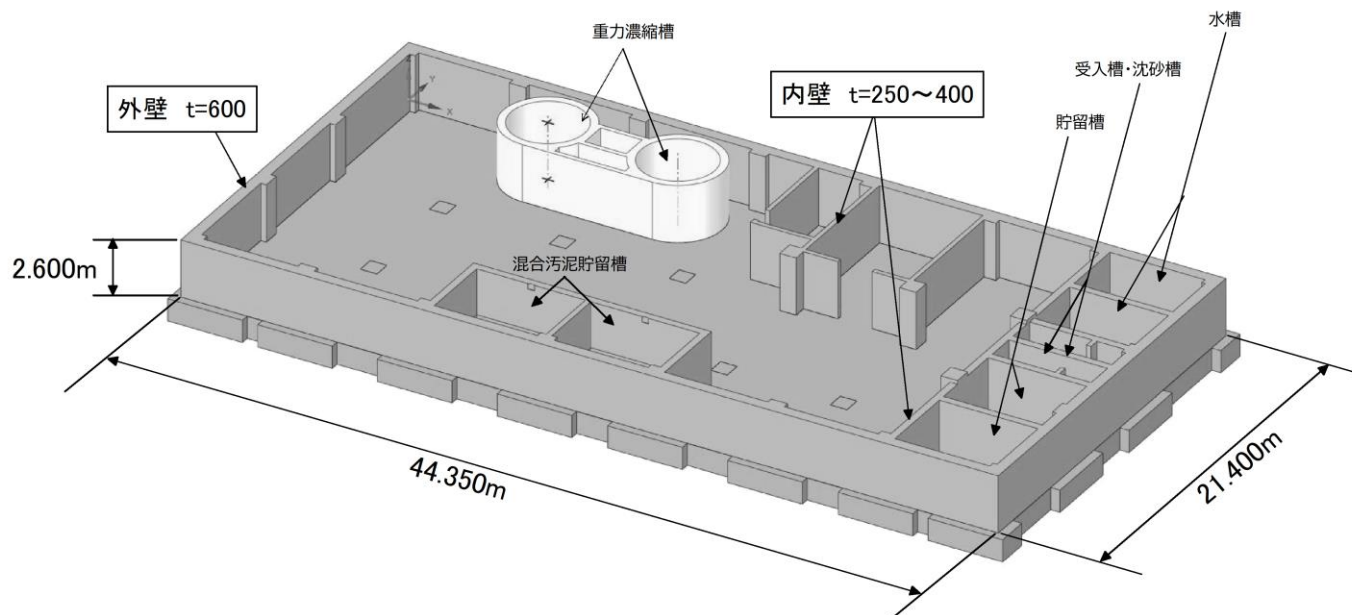


底版部は基礎補強部が出っ張っており、素直な形状ではありませんが、延長方向45.3m 幅22.3m 厚さ1.2mの約1200m³

打設割のイメージ

-2) 壁リフト1

壁リフト1(外壁・内壁)
 リフト高H=2.600m 壁延長 約250m 打設数量 340m³



外壁は外側は土に接する部分になり、内壁は各水槽の隔壁であったり、ただの仕切り壁であったりするものになります。外壁厚さは600mm、内壁(水槽隔壁)は厚さ400mmが多く300mm厚の箇所もあり。内壁(仕切り壁)は厚さ250mmとなっていました。壁としての延長は約250m程ありました。

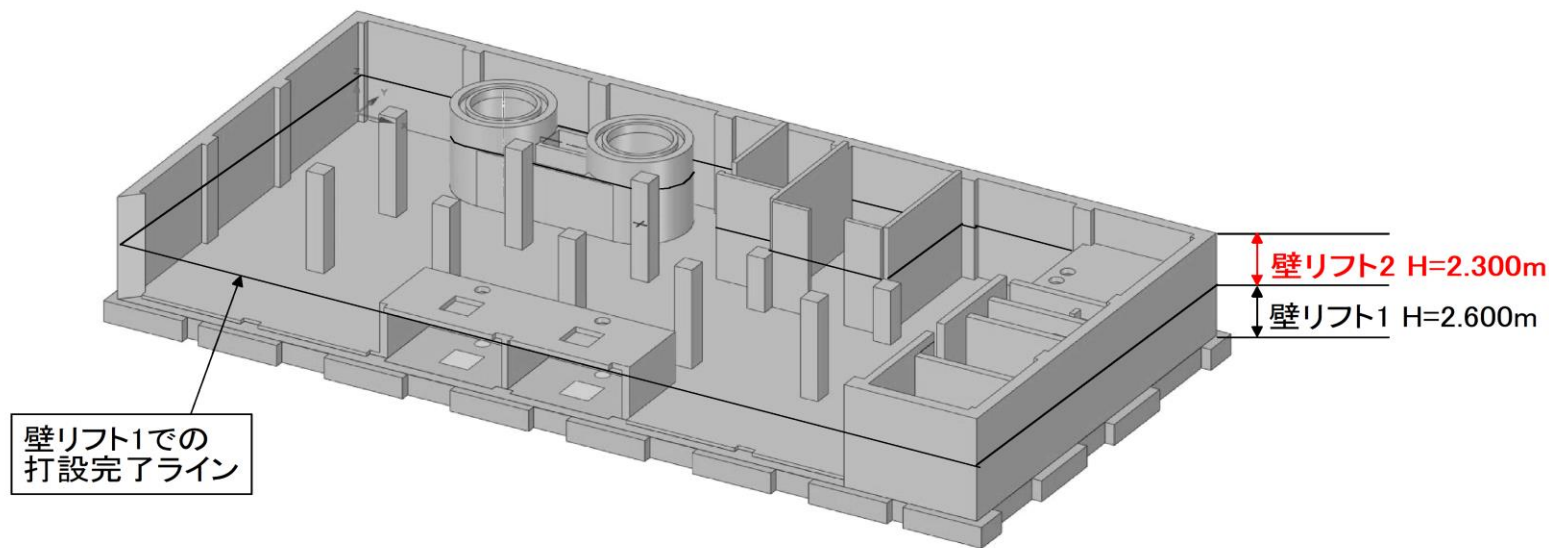
壁リフト1は外壁・内壁・階段共に底版部から2.6mリフトする打設割としました。

打設するにあたり切梁等制限により抜差しの移動時間を要するため1日にしっかりと打設できる量も考慮しました。

打設割のイメージ

-3) 壁リフト2

壁リフト2(外壁・内壁) 中間スラブあり
リフト高H=2.300m 壁延長 約250m 打設数量 350m³



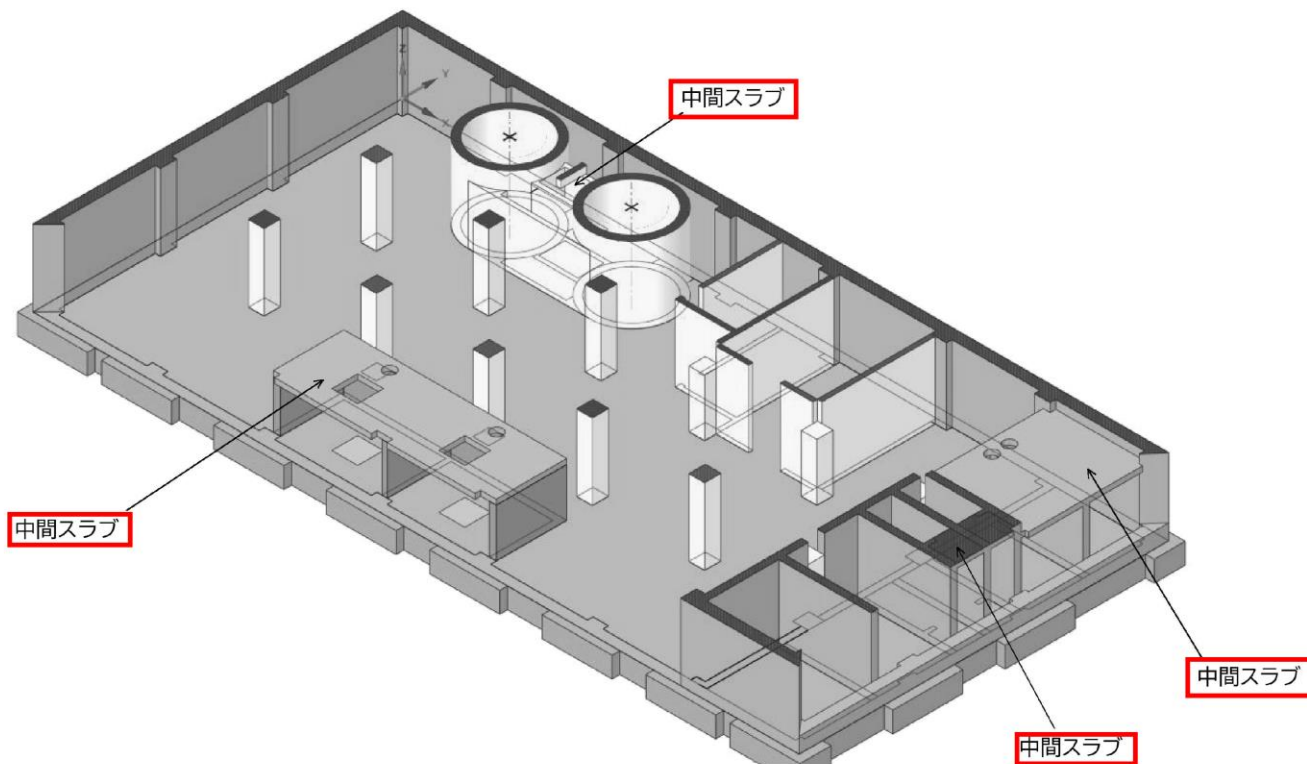
壁リフト2部分には高さの違う中間スラブがあり、当初2回に分けて打設予定でした。また、解析ソフトのモデル化の操作の関係で後で分割することが困難なこともあるためリフトを分けて解析しました。

解析時の打設割は、まちまちな中間スラブ等の関係もあり壁リフト1から1.3mのリフト次に1.0mのリフトと図の壁リフト2の2.3mを2回に分けて解析を行いました。(解析範囲は壁リフト2迄)

打設割のイメージ

-3) 壁リフト2

壁リフト2(外壁・内壁) 中間スラブあり
リフト高H=2.300m 壁延長 約250m 打設数量 350m³



実際に施工した壁リフト2は2.3mとして、外壁・内壁・階段・中間スラブと壁リフト1から2.3mリフトする打設割とし施工しています。この壁リフト2の次の打設として梁スラブを打設し土木範囲は完了しています。

<解析の適用範囲>

この度の該当範囲は、工事特記仕様書に記載があり日本下水道事業団の内部資料になる【コンクリートひび割れ解析に関する設計資料(案)】に準拠して解析を行う。

検討対象とするマスコンクリートは、厚さ80cm以上のスラブ状部材（底版含む）及び、厚さ50cm以上の壁部材とする。となっていましたので底版部・外壁部を対象としています。

<発注者の要求>

温度ひび割れの標準的な検討手順に従い3次元有限要素法を用い解析。

目標ひび割れ指数は1.60以上・内部拘束力が卓越する部材の場合のひび割れ指数は1.00以上。

許容ひび割れ幅（水密性の確保の観点から0.20mm）。

（壁部）

最大ひび割れ幅（温度ひび割れ幅の予測値）が許容ひび割れ幅0.20mm以下であることを照査する。

（底版部）

ひび割れ幅とひび割れ指数の関係が不明であるため、解4.3.4式は適用しない。

$$w_c = \gamma_a \left(\frac{-0.141}{p} + 0.0938 \right) \times (I_{cr} - 1.965)$$

マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016 p 57（解 4.3.4）（JCI）

＜解析前の準備＞

解析するにあたって共通で準備が必要となるものは以下になります。

- ・ 打設を検討する配合計画書
- ・ 打設する場所に近い過去3年分程度の気温データ・日平均気温（気象庁HPよりDLできます。）
- ・ 計画工程表（予定打設日・養生方法・養生期間がわかるもの）
- ・ 打設割計画図（打設リフトのわかるもの）
- ・ 各部材の鉄筋比（ ρ ）
- ・ 関係する書籍
マスコンクリートのひび割れ制御指針（日本コンクリート工学会 以下JCI）
コンクリート標準示方書 設計編（土木学会）
その他発注者独自の仕様書

＜解析に使用したソフト＞

日本コンクリート工学会マスコンクリートソフト作成委員会により開発された3次元温度応力解析プログラム JCMAC3 Version4.6.2 Post-processor Version22.0.9 を使用し解析を行いました。

（公益社団法人 日本コンクリート工学会）

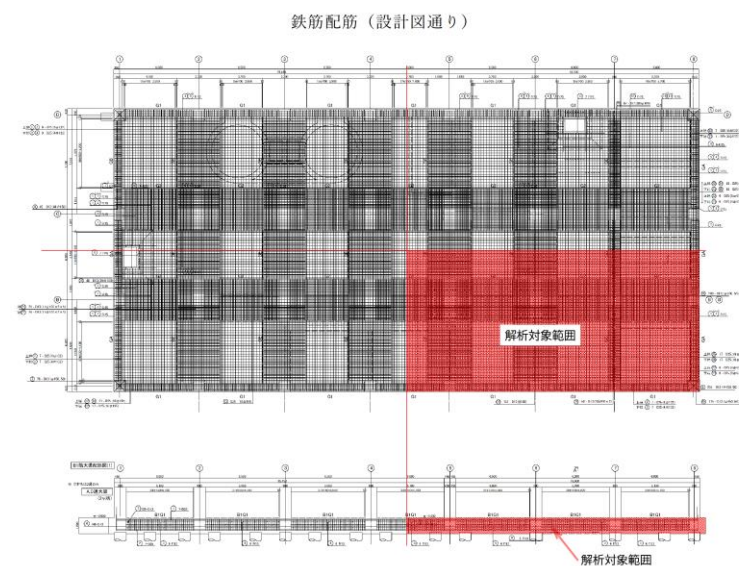
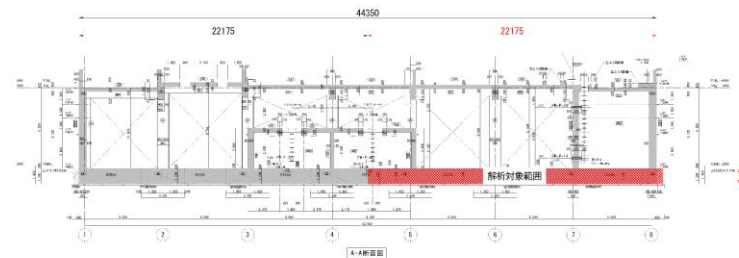
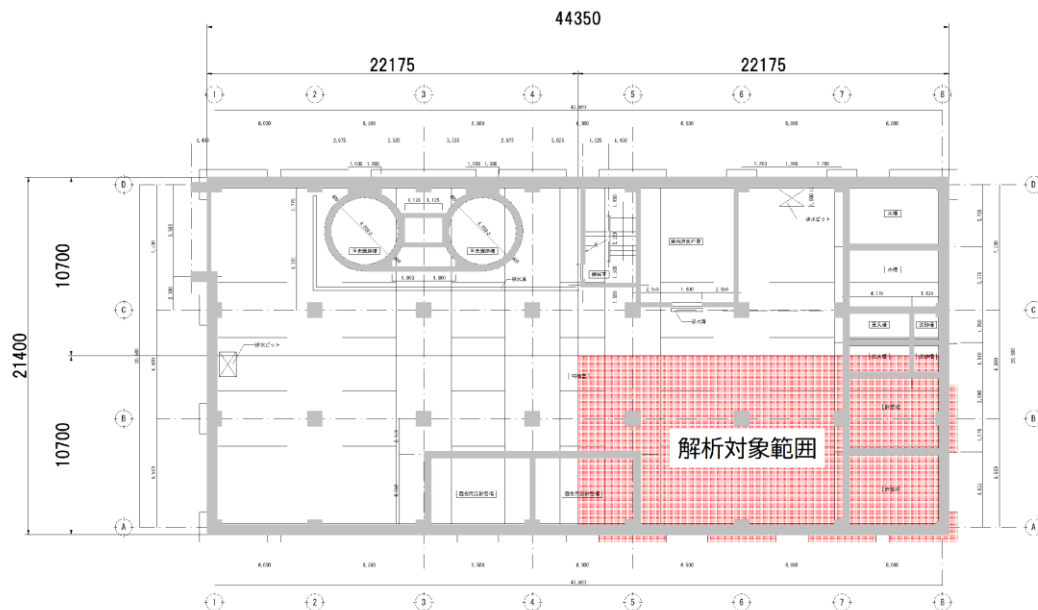
<解析対象部位の抽出>

解析対象部位の抽出範囲については徳山工業高等専門学校、土木建築工学科 准教授 温品達也先生に相談し、指導していただきモデル化しています。モデル化は形状の異なる部材ごとに行い、相似した形状の部位についてはひび割れ発生に不利な条件となる部材について解析を行い予測するようにしました。

・解析対象部位：底版の 1/4 モデルとする。

底版部 長さ L=22.175m 奥行 D=10.700m 高さ（厚さ）H=1.200m

図 3-1-1 構造物の形状寸法及び解析対象範囲（平面図）



底版モデルは着色部を対象として抽出しモデルの作成を行ないました。

<解析条件>

配合

コンクリートの設計基準強度は 24N/mm^2 （保証材齢 28 日）となっている。

底版部	配合	W/C	C	対策混和剤		JIS有無	備考
設計	24-12-20BB	58%	273kg			有	水セメント比の関係でNG
配合①	27-12-20BB	53%	310kg			有	
配合②	27-12-20N	54%	308kg			有	
配合③	27-15-20N	55%	295kg	高性能AE減水剤		有	
配合④	27-15-20N	55%	295kg	高性能AE減水剤	膨張材	無	
配合⑤	27-12-20N	55%	308kg		膨張材	無	
配合⑥	27-12-20N	55%	291kg	高性能AE減水剤	膨張材	無	

以上、配合①～⑥で実際の工程や打設時期など施工条件に沿って解析する。

解析条件値の設定値

予定工程や養生方法による解析ステージの設定を下表に示す。

ステージ	開始日	終了日	到達 リフト	日数	部位	養生方法			
						【表 面】	熱伝達率 η ($\text{W/m}^2\text{C}$)	【側 面】	熱伝達率 η ($\text{W/m}^2\text{C}$)
1	2021/4/28	2021/5/6	1	8	底盤	水中ポンプを止めて完全に灌水養生	8	水中ポンプを止めて完全に灌水養生	8
2	2021/5/6	2021/5/9	1	3	底盤	養生マット+散水	8	型枠あり	8
3	2021/5/9	2021/7/1	1	53	底盤	養生終了・墨出し・露出	14	型枠バラシ・露出	14

各検討解析条件の設定として次ページに設定値を示す。

打設温度は打込み月 4 月の平均気温に $+5\text{C}$ と設定されているため底版部においては

19.2C となっている。

＜解析対象部位のモデル化＞ 底版モデルになります。

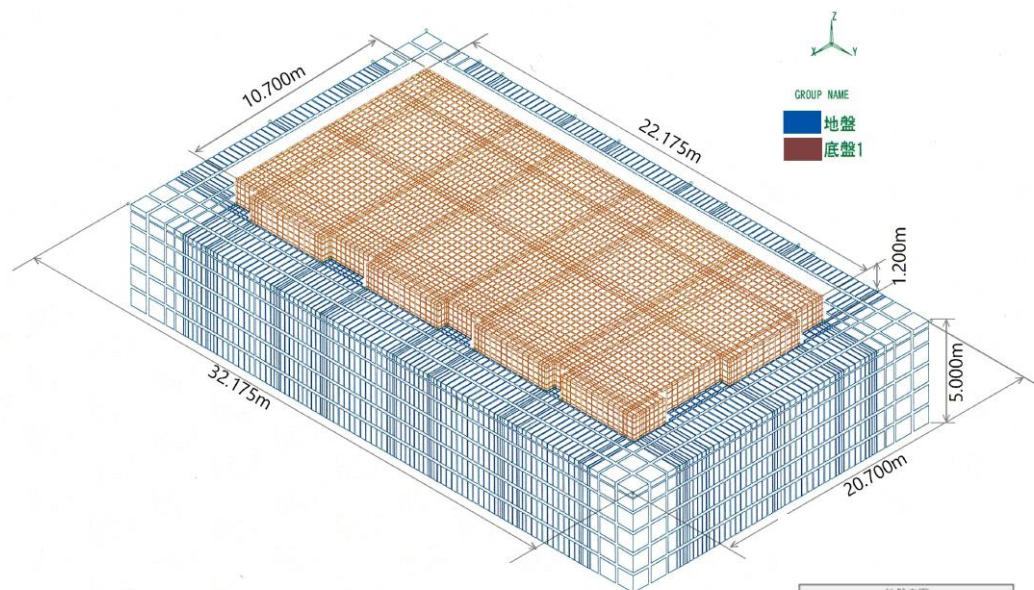
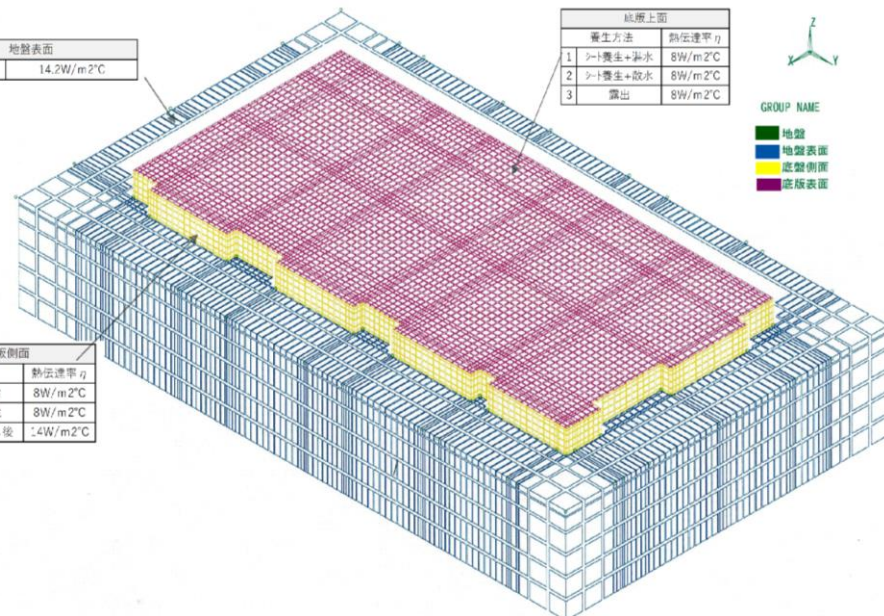


図-3.3.1 解析モデル

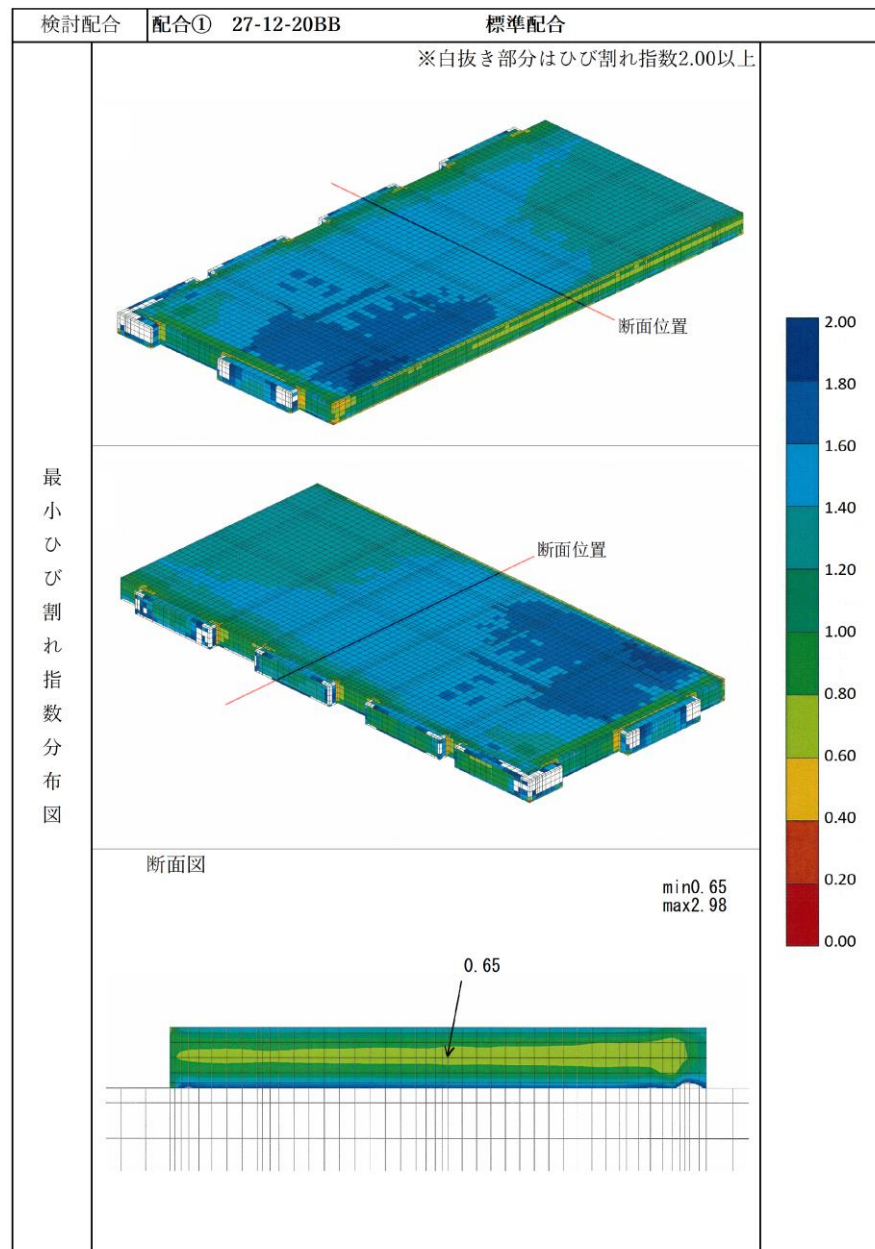
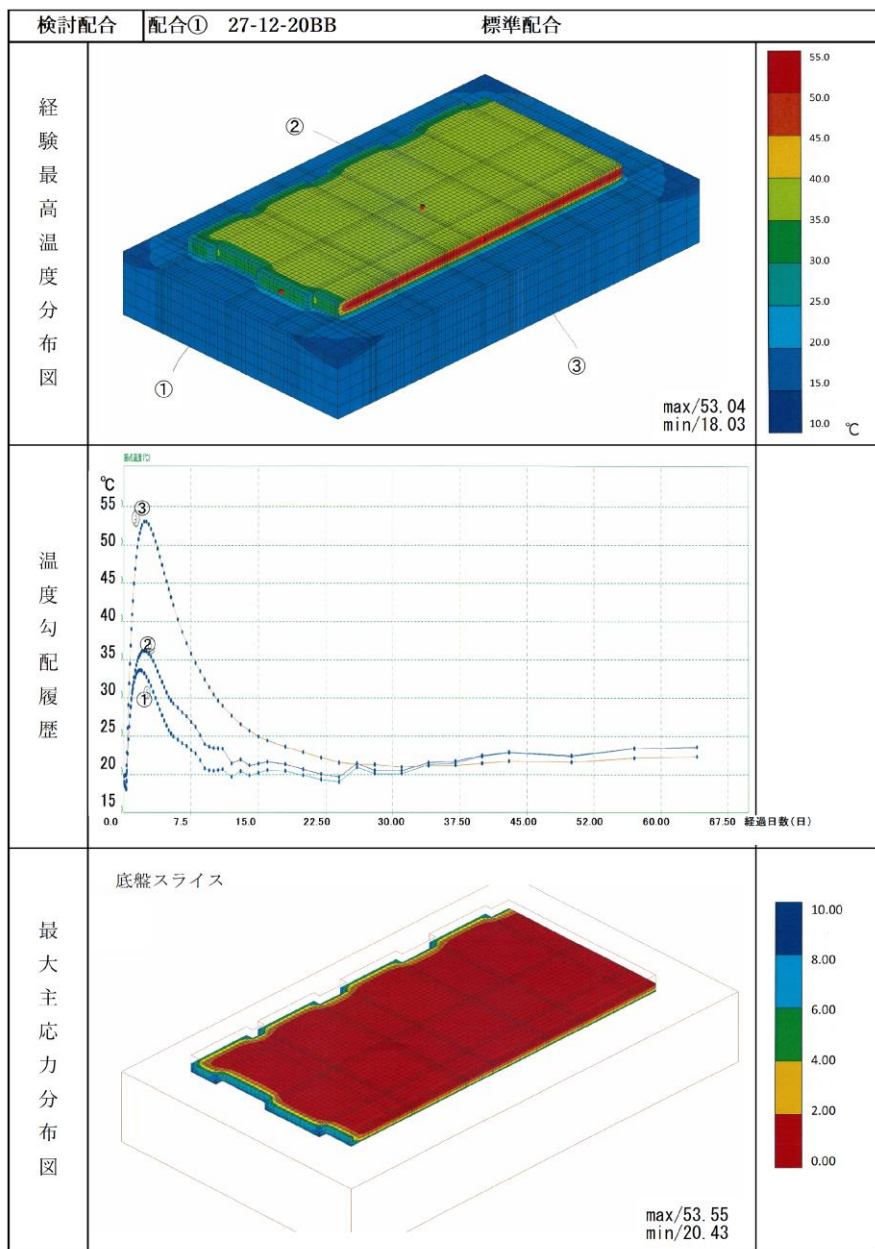
地盤表面	
熱伝達率 η	14.2W/m ² C

底版上面	
養生方法	熱伝達率 η
1 シート養生+排水	8W/m ² C
2 シート養生+放水	8W/m ² C
3 露出	8W/m ² C

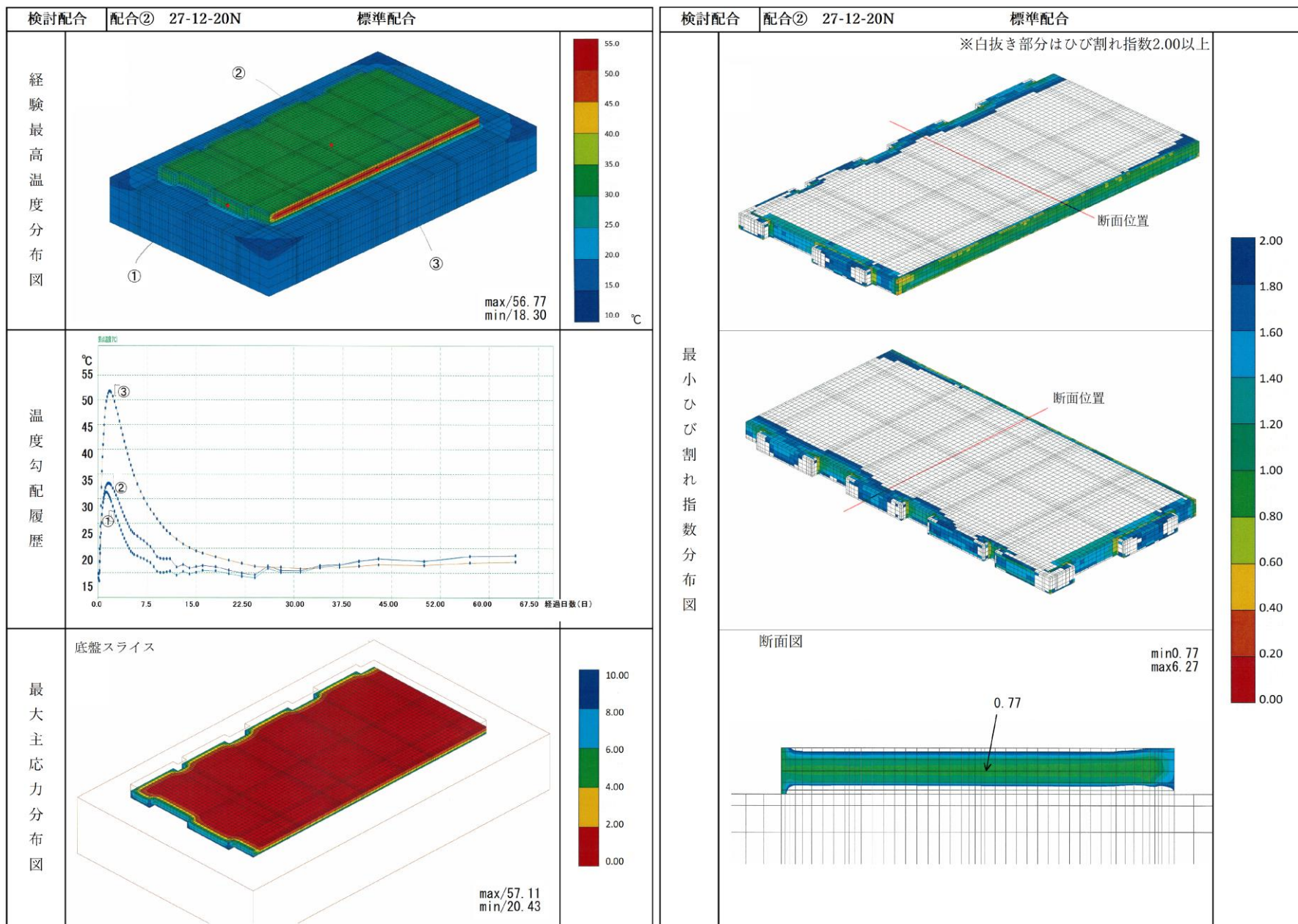
底版側面	
養生方法	熱伝達率 η
1 排水養生	8W/m ² C
2 放水養生	8W/m ² C
3 型枠取外し後	1.4W/m ² C



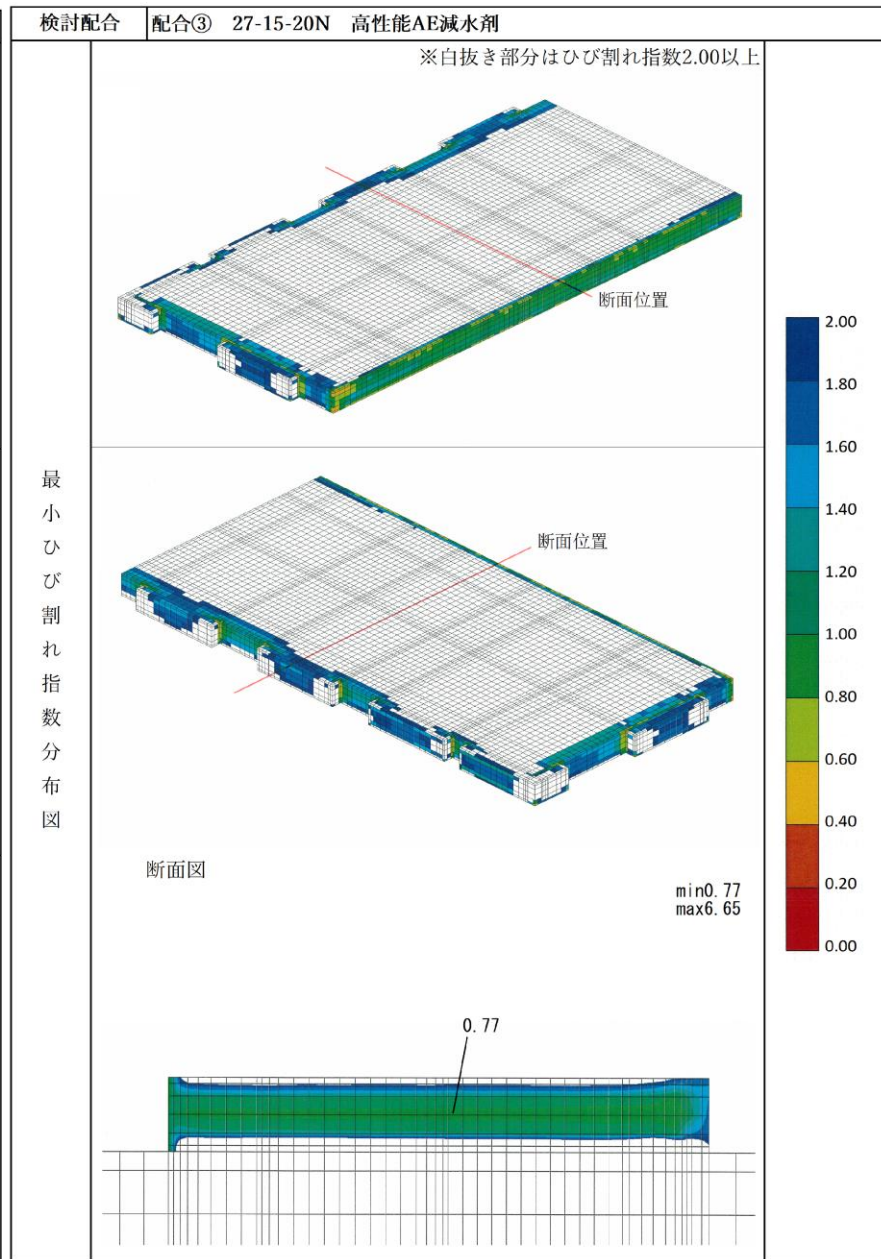
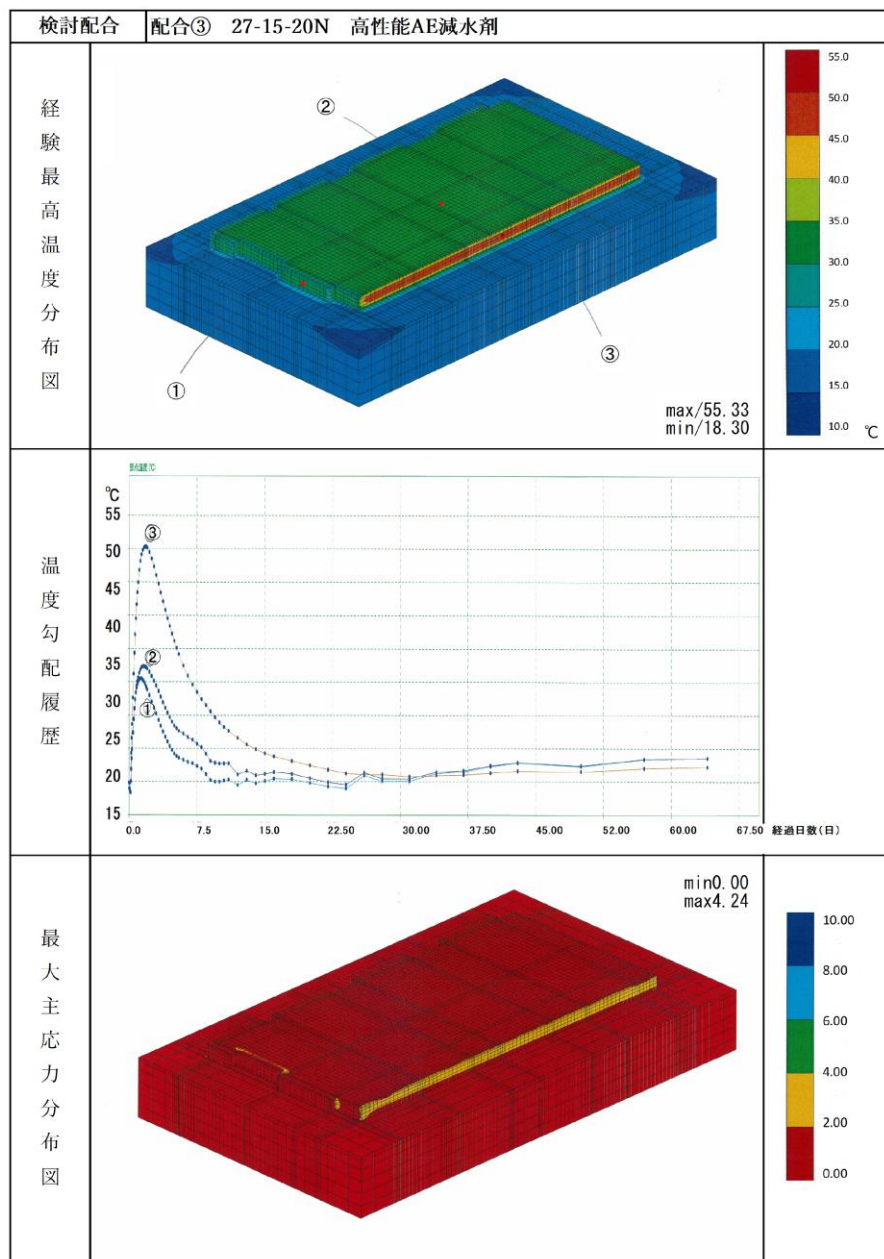
<検討配合の解析結果> 底版モデル 解析結果 検討配合①



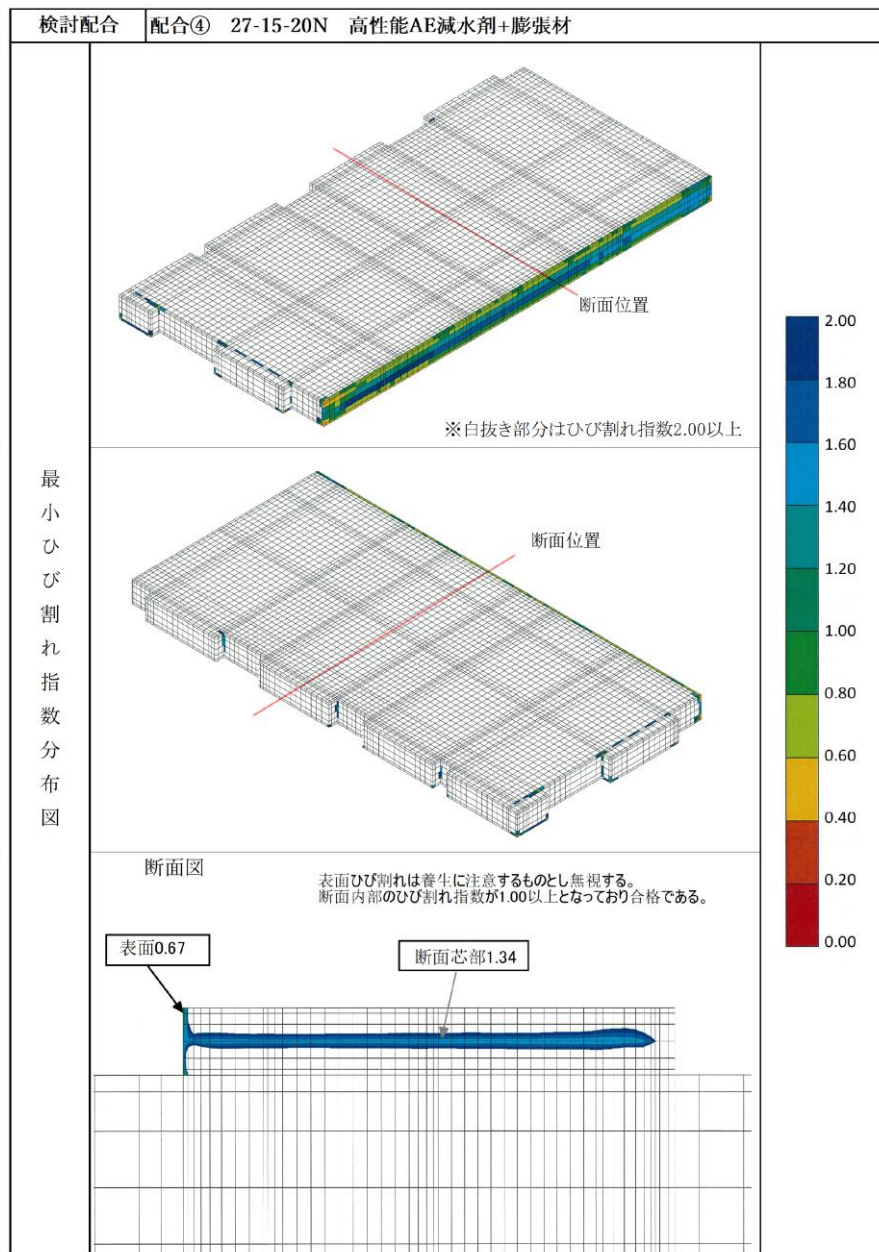
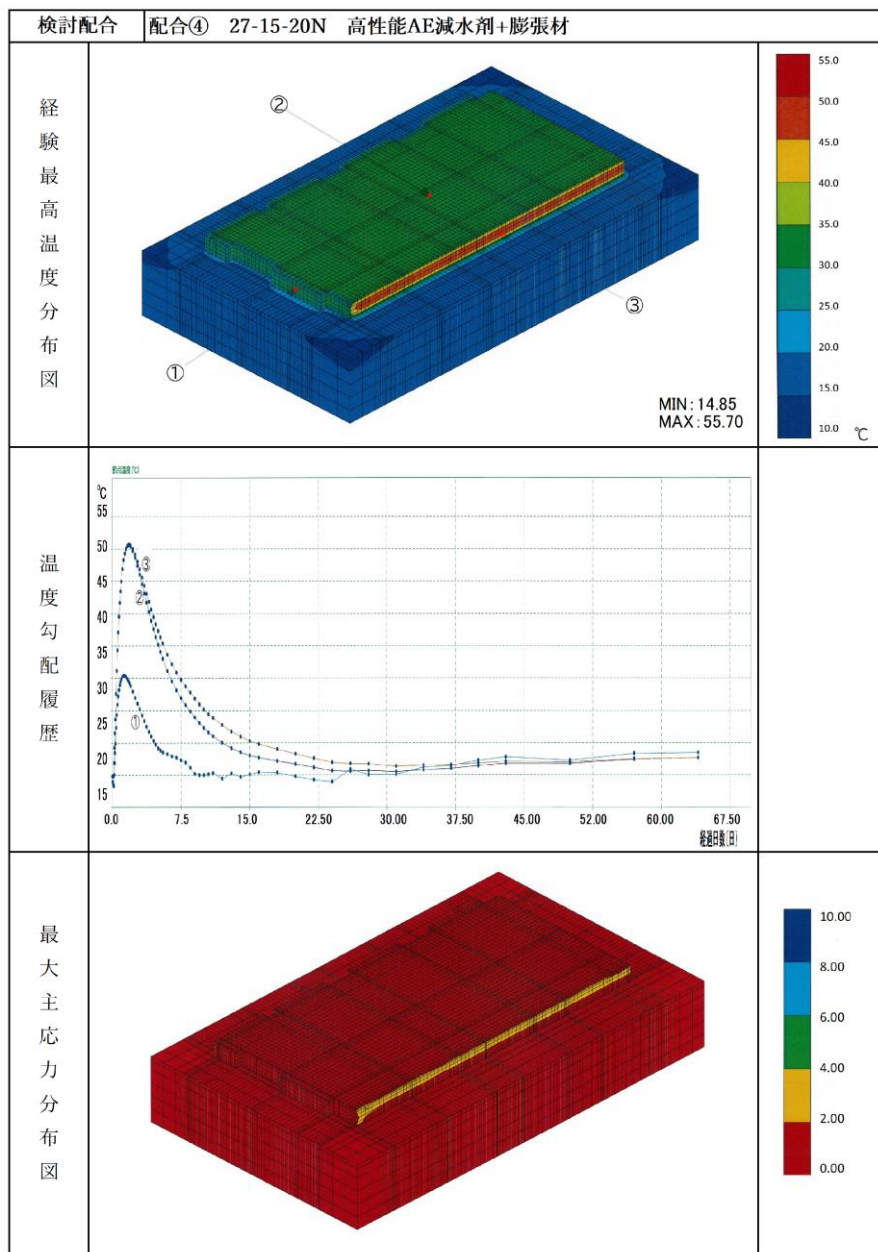
<検討配合の解析結果> 底版モデル 解析結果 検討配合②



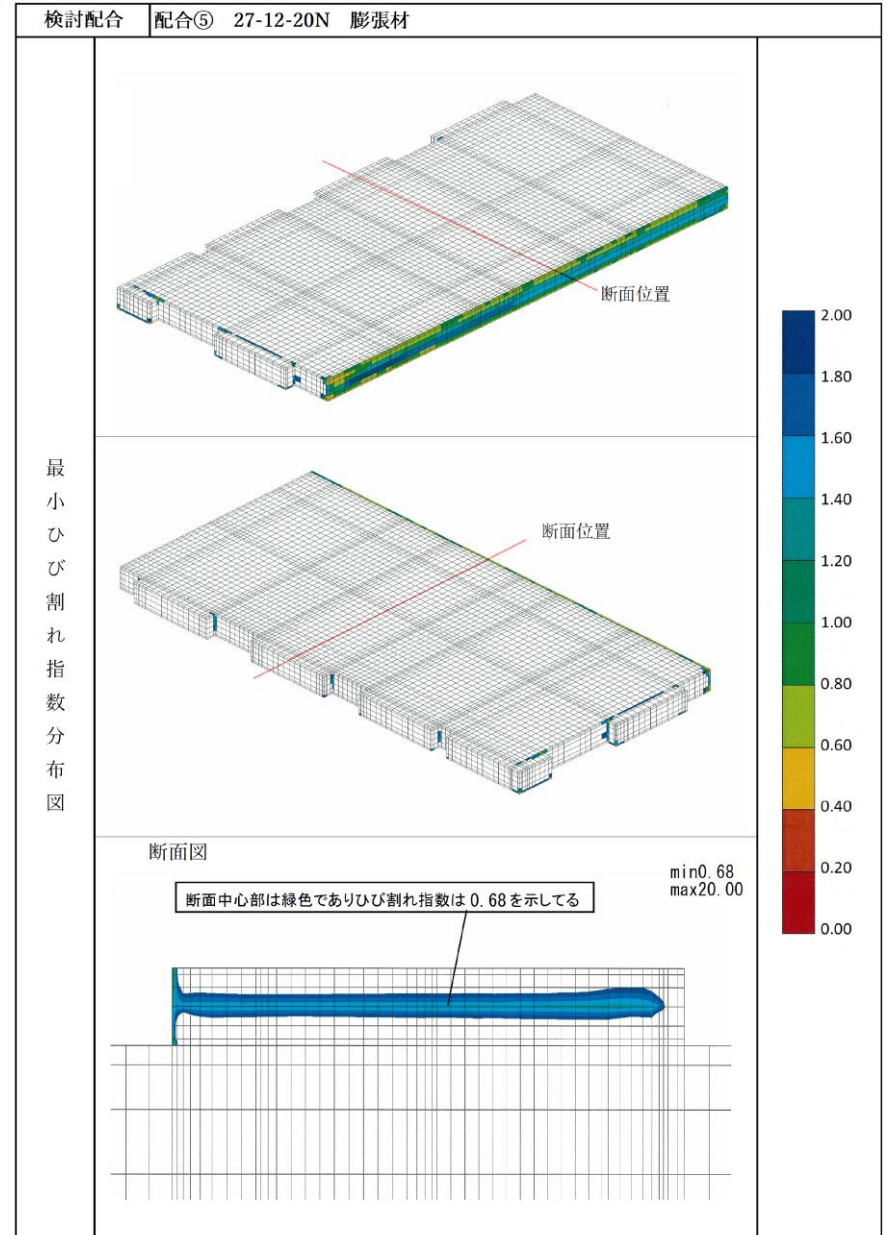
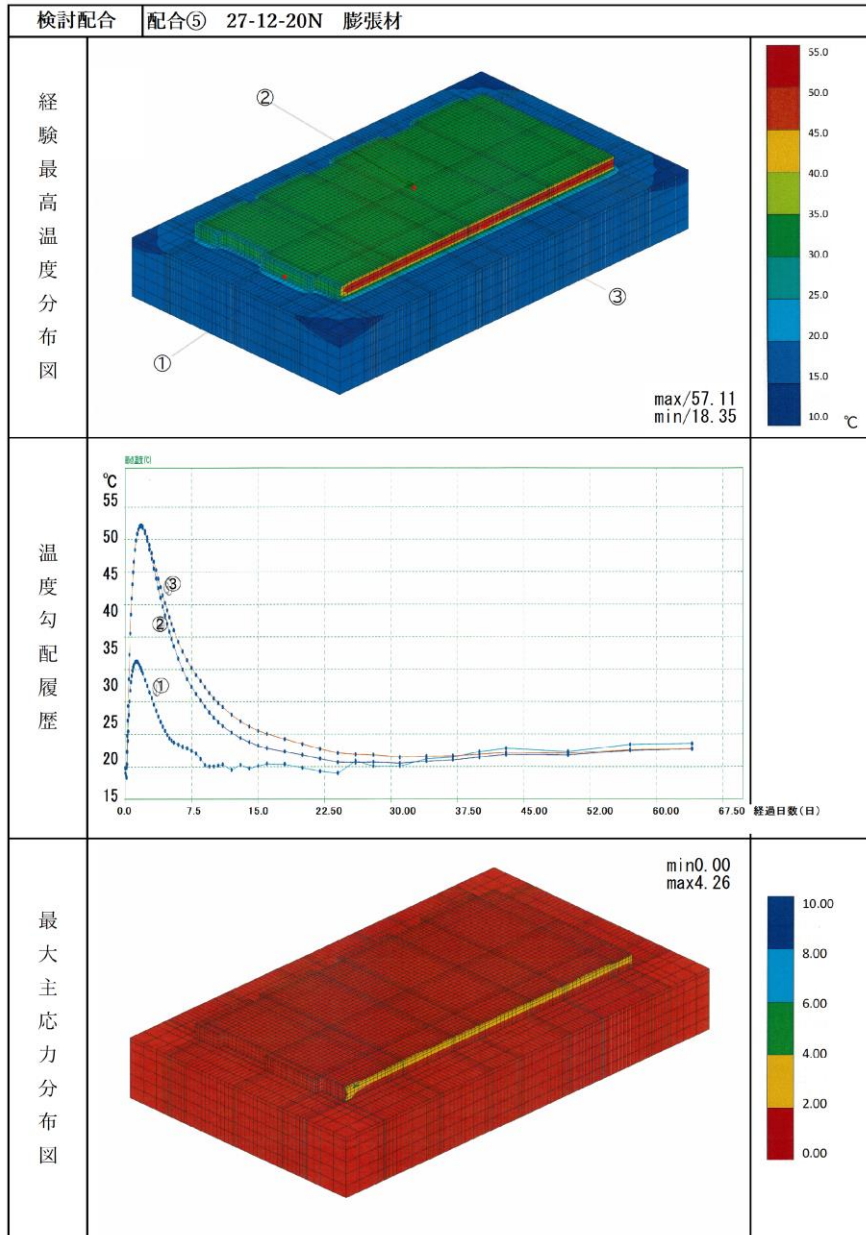
<検討配合の解析結果> 底版モデル 解析結果 検討配合③



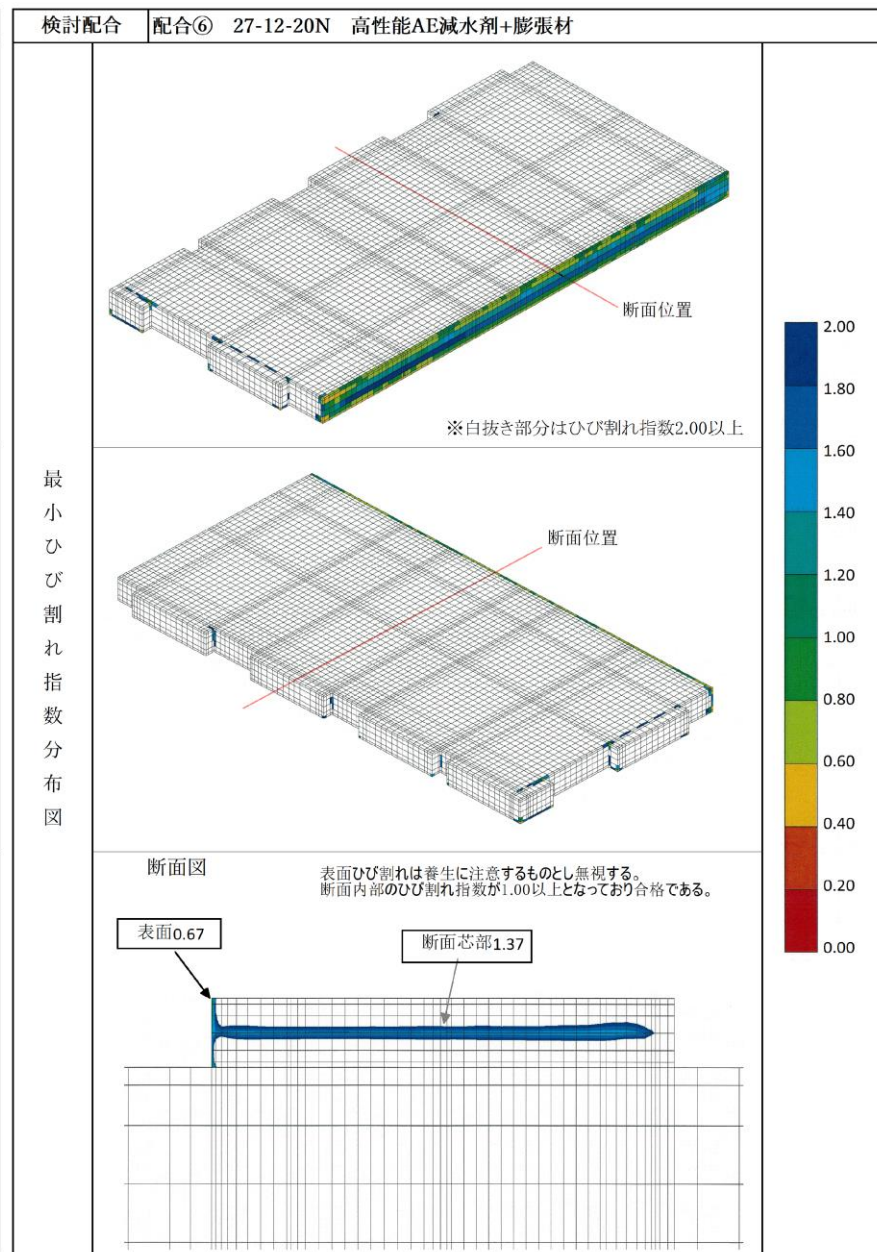
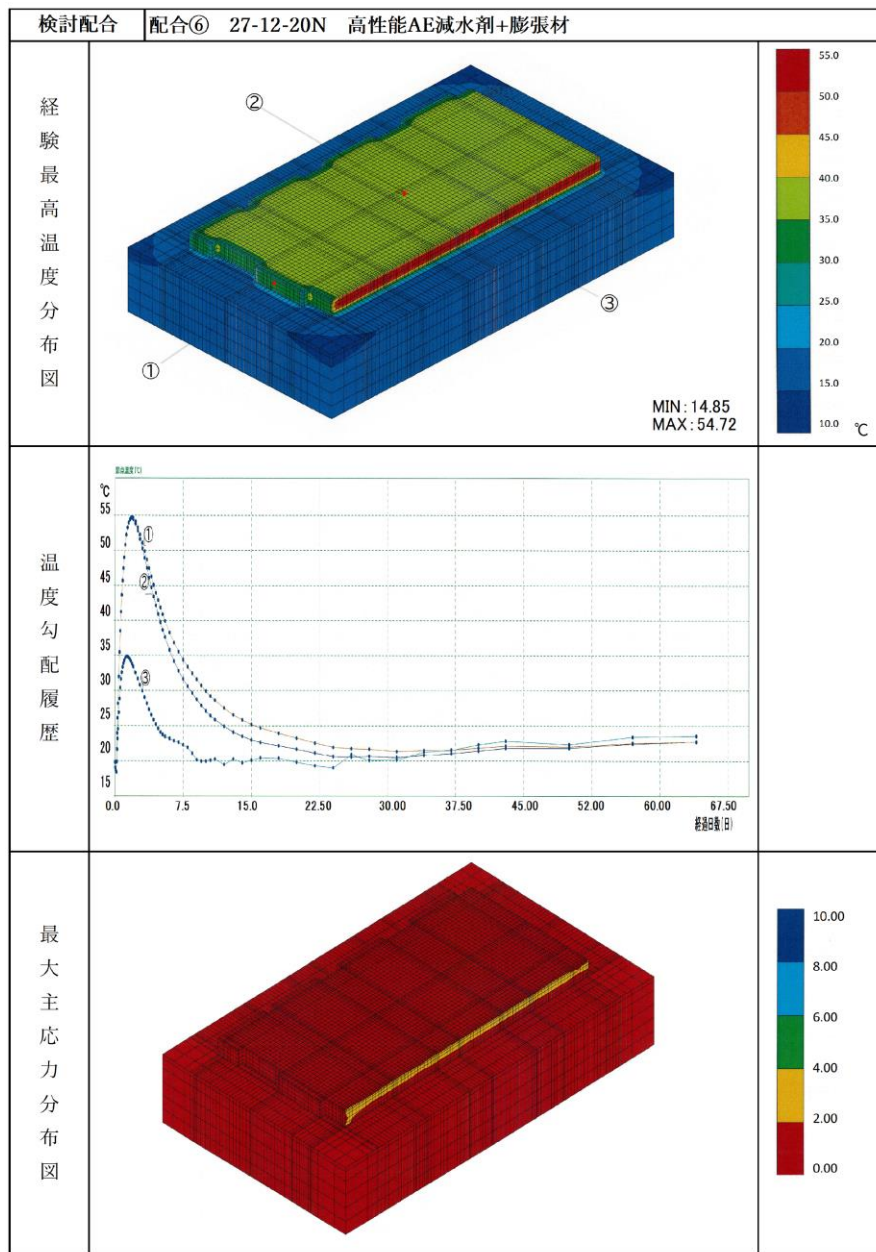
<検討配合の解析結果> 底版モデル 解析結果 検討配合④



<検討配合の解析結果> 底版モデル 解析結果 検討配合⑤



＜検討配合の解析結果＞ 底版モデル 解析結果 検討配合⑥



＜各検討配合による解析結果及び照査・決定した対策方法＞

解析結果

No	配合	W/C (%) C (kg)	ひび割れ指数 lcr	説明
-	24-12-20BB JIS 設計配合	58% 273kg	-	水セメント比55%以下の規定によりNG
①	27-12-20BB JIS	53% 310kg	0.65	高炉セメントBBで検討養生期間を工程を圧迫する養生方法シート・湛水養生の熱伝達率8w/m ² Cの養生を15日間継続するも0.65となった。
②	27-12-20N JIS	54% 308kg	0.77	普通ポルトランドセメントで検討、シート養生+湛水養生期間を工期一杯の11日間とし解析。BBよりも表面ひび割れ指数は大幅に改善するも断面内部の最小ひび割れ指数は0.77となった。
③	27-15-20N JIS 高性能AE減水剤	55% 295kg	0.77	②配合より高性能AE減水剤で単位セメント量を落とし、2工場供納品時に差が少ない各工場の標準配合で検討するも、単位セメント量が13kg減った恩恵を受け最高発熱温度が1度程度下がったがひび割れ指数は変化なし。
④	27-15-20N JIS外 高性能AE減水剤+水和熱抑制型膨張材	55% 295kg※	1.34	③配合に膨張材(水和熱抑制型)を入れて検討。JIS外となる。表面ひび割れ指数・断面においてのひび割れ指数が大きく改善し最小ひび割れ指数1.34となっている。
⑤	27-12-20N JIS外 水和熱抑制型膨張材	55% 308kg	0.66	②配合に、膨張材(水和熱抑制型)のみを入れて検討。JIS外となる。表面・断面においてのひび割れ指数が改善するが中心部の最小ひび割れ指数は0.68、単位セメント量大のため指数改善が届かないとみられる。
⑥	27-12-20N JIS外 高性能AE減水剤+水和熱抑制型膨張材	55% 291kg※	1.37	②配合に高性能AE減水剤と膨張材(水和熱抑制型)を入れて検討。JIS外 表面・断面においてひび割れ指数が大きく改善し断面中心部の最小ひび割れ指数が1.37となっている。

6つの検討配合の温度応力解析による照査結果により構造物の要求性能とされるひび割れ指数を満足する配合

以下④と⑥の2つとなりました。合格配合（ひび割れ指数 lcr ≥ 1.00）

＜各検討配合による解析結果及び照査・決定した対策方法＞

合格配合（ひび割れ指数 $I_{cr} \geq 1.00$ ）

・ 27-15-20N（工場標準配合に水和熱抑制型膨張材の使用）

・ 27-12-20N（JIS 外配合に水和熱抑制型膨張材の使用）

W/C $\leq 55\%$ 単位セメント量 295kg（275kg+20kg）

W/C $\leq 55\%$ 単位セメント量 286kg（266kg+20kg）

高性能 AE 減水剤・膨張材（水和熱抑制型膨張材）ハイパーエクспан M 20kg/m³

高性能 AE 減水剤・膨張材（水和熱抑制型膨張材）ハイパーエクспан M 20kg/m³

以上の2つの合格配合より、底版は1回打設であり、2社供納品により生コンの供給を行い1日で打設を行う。各生コンプラントによる施設規模による差などからくる品質差を最小限にするため、また、確実なコンクリート充填のため各工場の標準配合である27-15-20N（高性能 AE 減水剤）に膨張材（ハイパーエクспан M（水和熱抑制型膨張材））を使用した以下配合を決定配合とした。

決定配合

27-15-20N W/C $\leq 55\%$ C=295kg（275+20）

高性能 AE 減水剤+膨張材（水和熱抑制型膨張材）ハイパーエクспан M 20kg/m³ 使用

生コン会社（2社供納）

コーウン産業株式会社 生コン部（太平洋セメント系）練混水：工業用水または上澄水

周南共同生コン株式会社（太平洋セメント系）練混水：スラッジ水2%以下

<実施結果について> 底版部

底版部にひび割れは発生しませんでした。

単位セメント量の減・水和熱抑制型膨張材の効果

や養生方法・期間の設定の大きかったと思います。



上面の被膜養生剤散布（フィニッシュコート）



底版部湛水養生
(養生期間中水替えの停止)

底版（Lot.1）熱電対による計測結果

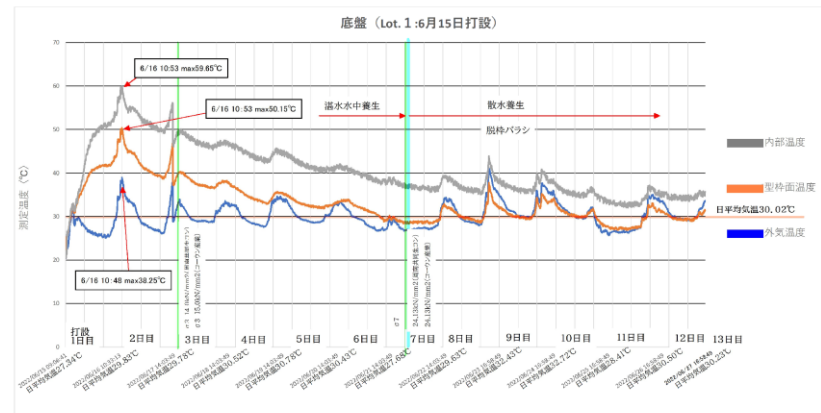
解析打設計画

計画解析時は 4/28 を予定していた。4 月の日平均気温 14.2℃ 解析打設温度 14.2℃ +5.0℃=19.2℃、配合は解析時に計画した高性能 AE 減水剤+水和熱抑制型膨張材入りの 27-15-20N (C275kg+20kg・W/C≦55%)

実施打設

6/15 打設 熱電対計測期間 2022.6/15~2022.6/27 13 日間 配合は計画時と同じ。
27-15-20N (C275kg+20kg・W/C≦55%) 高性能 AE 減水剤+水和熱抑制型膨張材

受入時温度	Lot.							平均	備考
	頻度	1	2	3	4	5	6		
周南共同生コン	生コン温度	28℃	23℃	26℃	-	-	-	25.7℃	打設温度/解析時との差
	外気温度	28℃	20℃	24℃	-	-	-	24.0℃	25.7℃ +6.5℃
コーワン産業	生コン温度	23℃	25℃	26℃	27℃	27℃	26℃	25.7℃	外気温度/解析時との差
	外気温度	21℃	20℃	21℃	24℃	22℃	22℃	21.7℃	22.8℃ +8.6℃



計測期間中の日平均気温

1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目	11日目	12日目	13日目	日平均気温
27.34℃	29.83℃	29.78℃	30.52℃	30.78℃	30.43℃	27.68℃	29.63℃	32.43℃	32.72℃	28.41℃	30.50℃	30.23℃	30.02℃

各熱電対の最高計測温度は、内部温度(部材芯)計画時 51.6℃に対し実施 59.65℃の +8.05℃、型枠面温度、計画時 32.06℃に対し実施 50.15℃の +18.09℃、日平均気温は計画時 14.2℃に対し 30.02℃の +15.82℃であった。打設時期が4月末から6月中頃となったため各計測時の温度も大きく影響を受け計画時より各温度が高くなった。このため事前解析では底版天端より高くした型枠に水をためる湛水養生を8日間+脱型後に養生マット散水養生を3日間予定していたが、計測温度が各々高いため、湛水養生方法を仮締切内全体の湛水とし6日間の底版を水中養生とした。7日目より散水養生に切り替え12日目迄養生を続けた。打設温度は計画解析時より高かったが配合による温度応力ひび割れ対策や打設した箇所全体を水中につける養生方法が功を奏しひび割れ発生は見受けられなかった。

<解析対象部位の抽出>

壁部は底版の上の部位を対象範囲として抽出しモデル化しました。（外壁部60cm/内壁部40cm）

・解析対象部位：壁部モデル

壁部 長さ L = 13.40m 奥行 D = 4.5m 高さ H = 4.9m

赤色着色部分の壁部

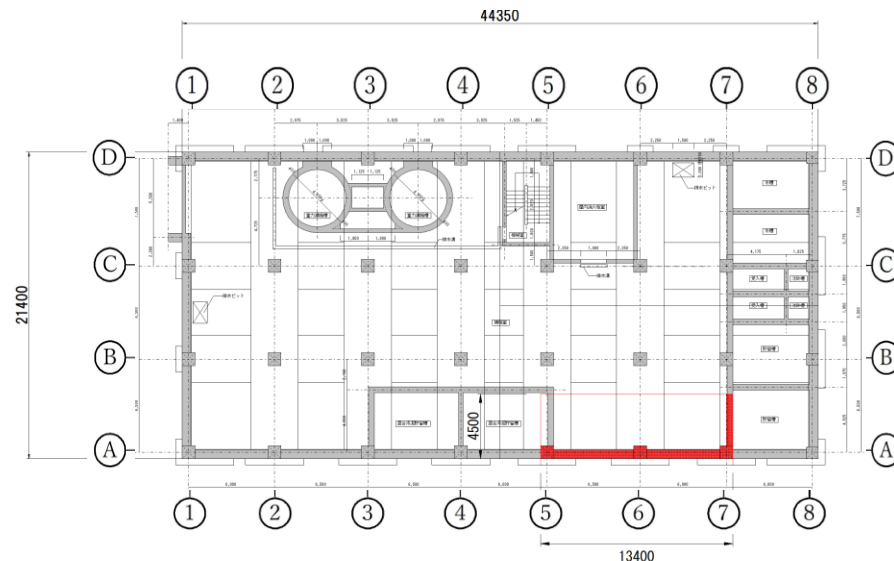
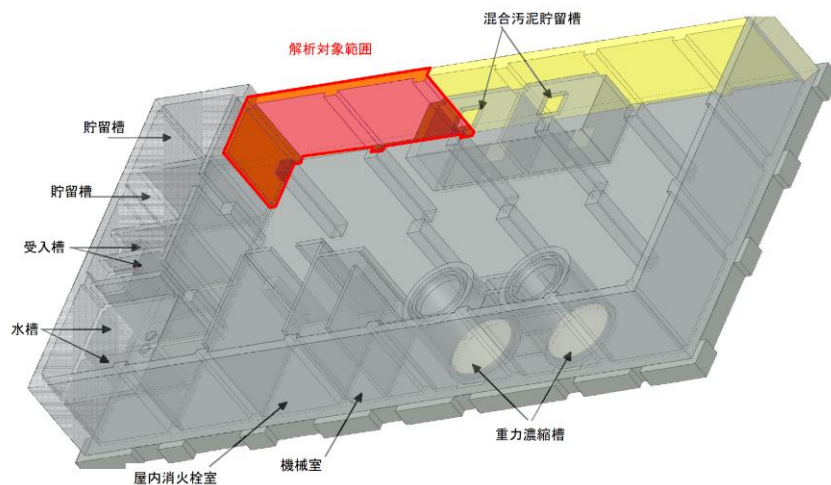


図 4-1-1 構造物の形状寸法及び解析対象範囲（平面図）

内壁部40cmとしている箇所は対象範囲ではありませんでしたが
せっかくなので興味でモデル化した部位になります。

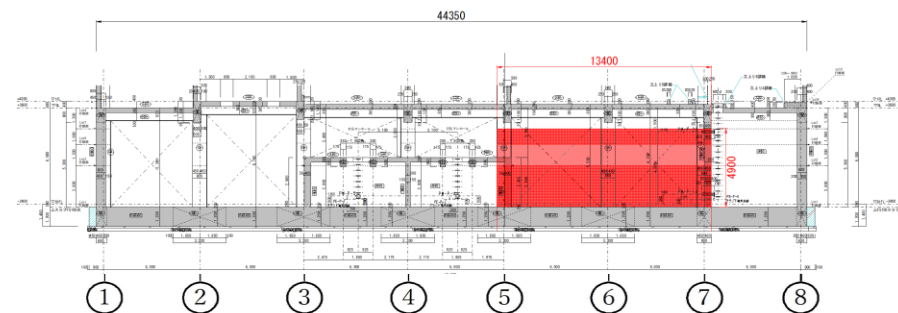
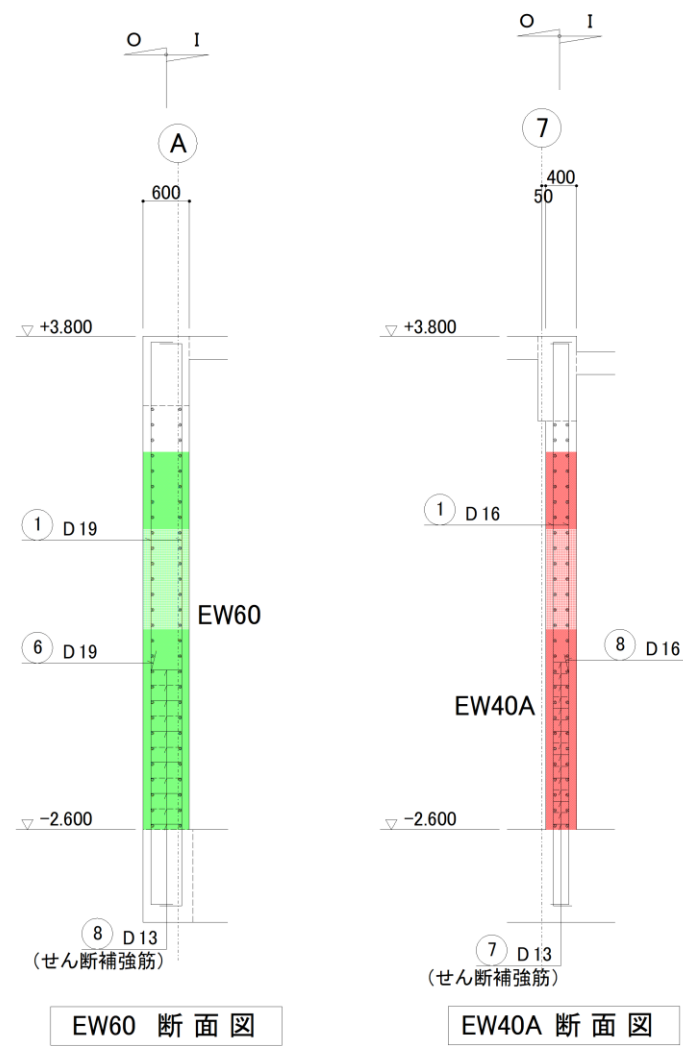
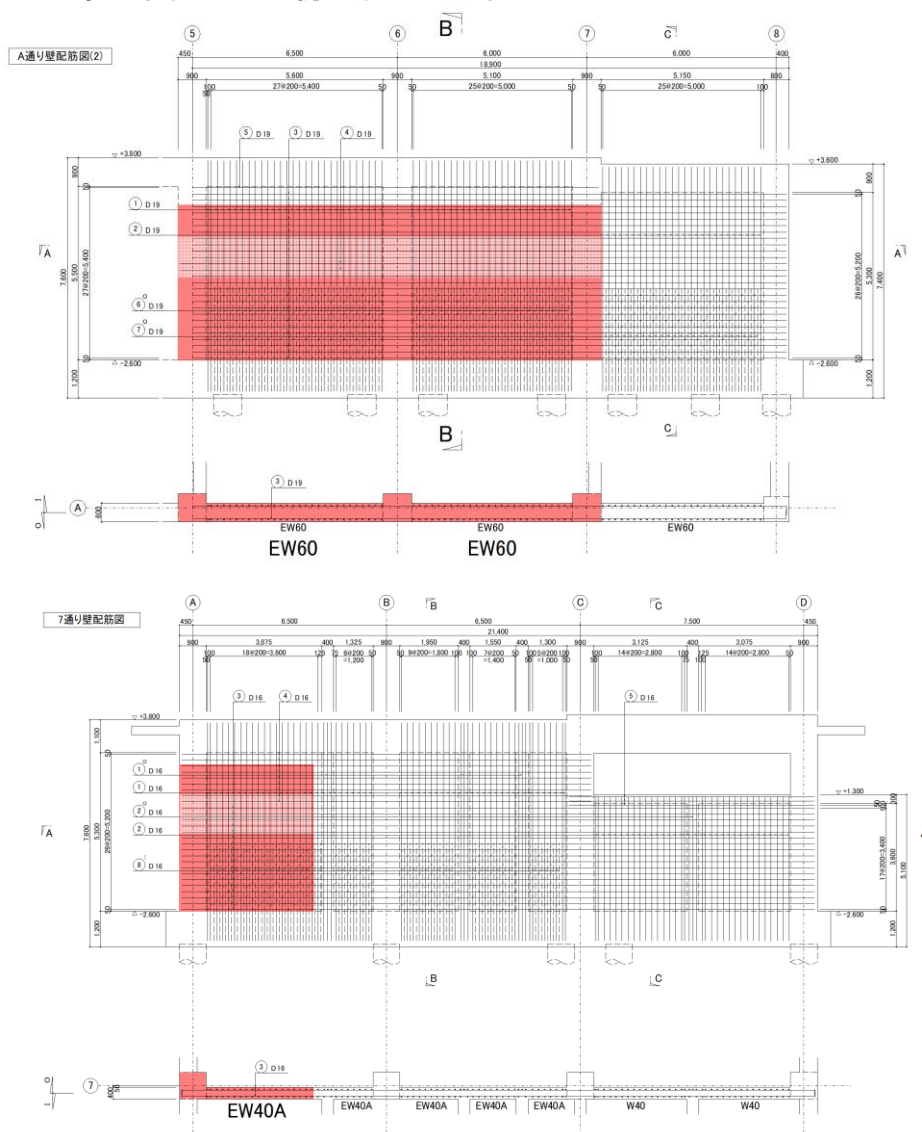


図 4-1-1 構造物の形状寸法及び解析対象範囲（断面図）

<解析対象部位の抽出>

壁部対象範囲の当初配筋図です。



鉄筋配筋（設計図通り）

＜解析条件＞

配合検討

コンクリートの設計基準強度は24N/mm²（保証材齢28日）W/C≤55%となっている。

壁部	配合	W/C	C	対策混和剤		JIS有無	備考
設計	24-12-20BB	58%	273kg			有	水セメント比の関係でNG
配合①	27-12-20BB	53%	310kg			有	
配合②	27-12-20N	54%	308kg			有	
配合③	27-15-20N	55%	295kg	高性能AE減水剤		無	

以上、①～③の配合で実際の工程や打設時期など施工条件に沿って解析する

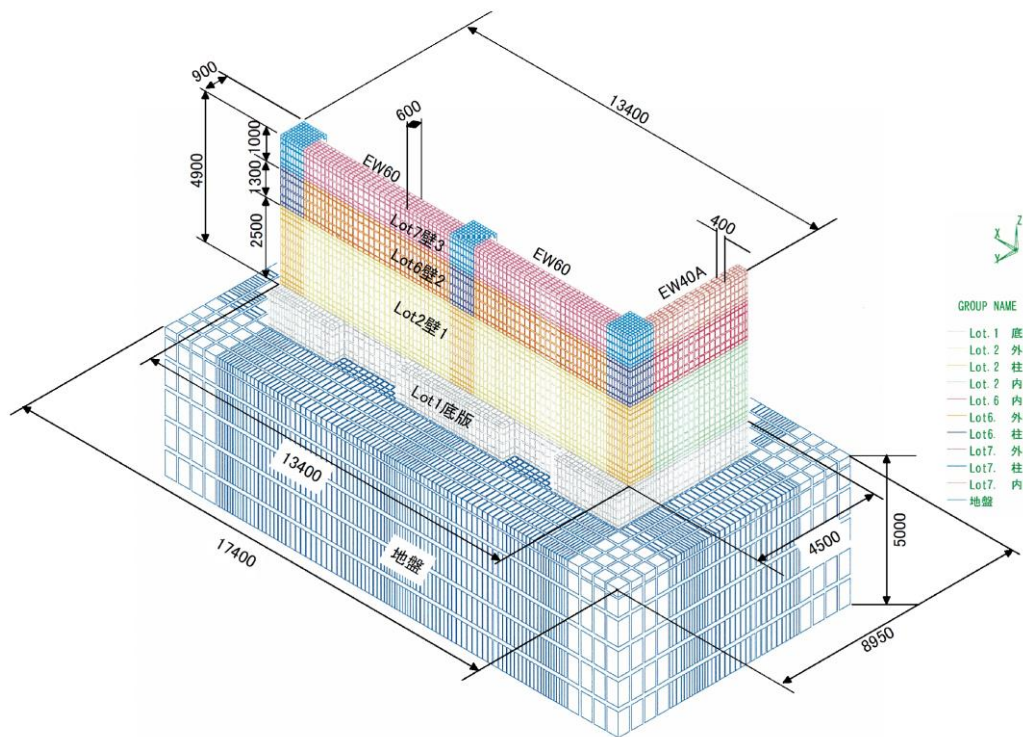
解析条件値の設定

壁部における予定工程や養生方法による解析ステージの設定を下表に示す。

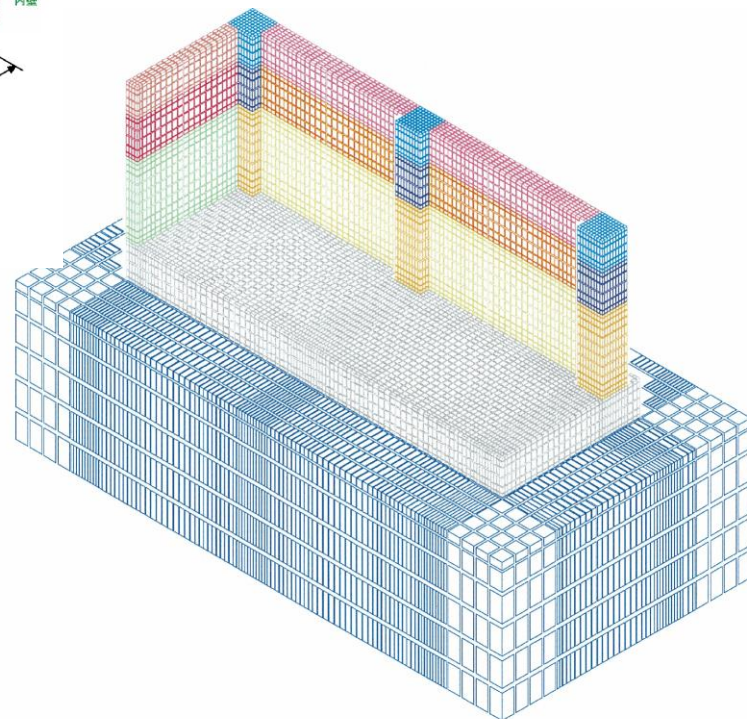
ステージ	開始日	終了日	到達 リフト	日数	部位	養生方法			
						【表 面】	熱伝達率 κ (W/m ² °C)	【側 面】	熱伝達率 κ (W/m ² °C)
4	2021/7/1	2021/7/8	2	7	壁①Lot.2	天端より散水	8	型枠あり	8
5	2021/7/8	2021/7/11	2	3	壁①Lot.2	露出	14	型枠バラシ+ 壁張付養生	6
6	2021/7/11	2021/8/30	2	50	壁①Lot.2	露出	14	養生終了・埋戻し水中土中	14
7	2021/8/30	2021/9/4	3	5	壁②Lot.6	天端より散水	8	型枠あり	8
8	2021/9/4	2021/9/6	3	2	壁②Lot.6	露出	14	型枠バラシ+ 壁張付養生	6
9	2021/9/6	2021/9/21	3	15	壁②Lot.6	露出	14	養生終了・埋戻し水中土中	14
10	2021/9/21	2021/9/26	4	5	壁③Lot.7	天端より散水	8	型枠あり	8
11	2021/9/26	2021/9/28	4	2	壁③Lot.7	露出	14	型枠バラシ+ 壁張付養生	6
12	2021/9/28	2021/10/17	4	19	壁③Lot.7	露出	14	養生終了・埋戻し水中土中	14

打設温度は壁部の打込み月の7月の平均気温に+5°Cと設定されているため壁部においては25.9°C+5°Cの30.9°Cとした。

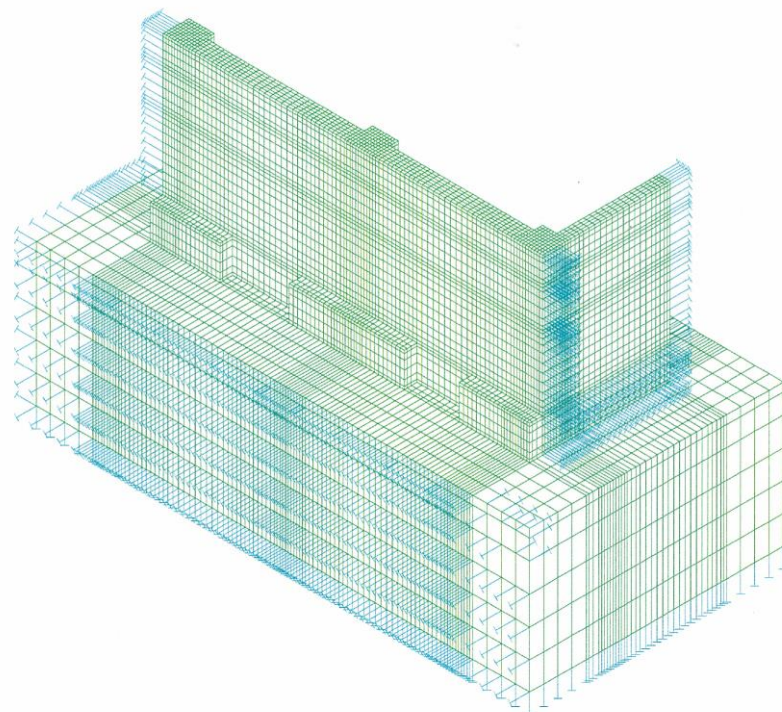
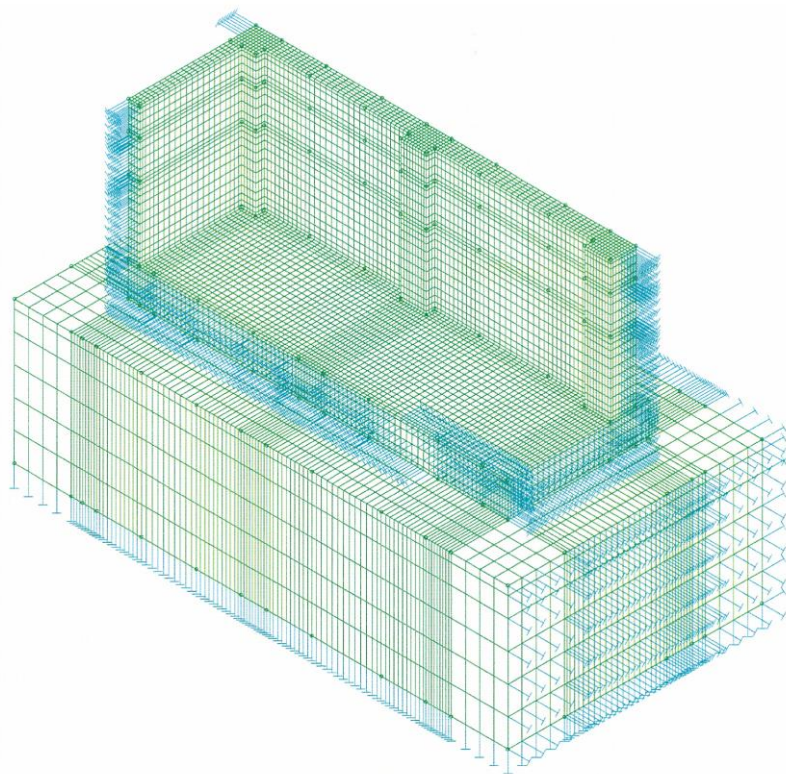
＜解析対象部位のモデル化＞



- GROUP NAME
- Lot.1 底盤
 - Lot.2 外壁
 - Lot.2 柱
 - Lot.2 内壁
 - Lot.6 内壁
 - Lot.6 外壁
 - Lot.6 柱
 - Lot.7 外壁
 - Lot.7 柱
 - Lot.7 内壁
 - 地盤



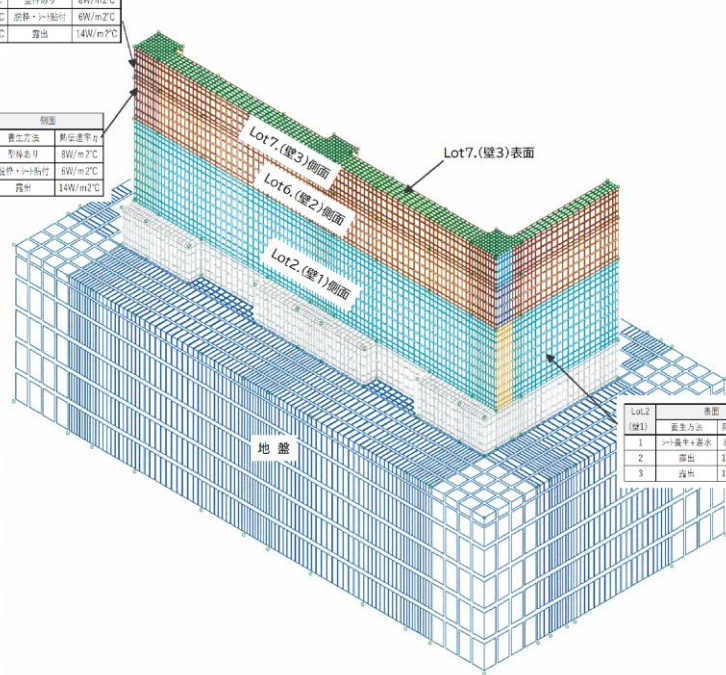
<解析対象部位のモデル化>



<解析対象部位のモデル化>

Lot.7 (壁3)	表面		側面	
	養生方法	熱伝達率 α	養生方法	熱伝達率 α
1	→+養生+防水	8W/m ² C	型枠あり	8W/m ² C
2	露出	14W/m ² C	型枠+→+防水	8W/m ² C
3	露出	14W/m ² C	露出	14W/m ² C

Lot.6 (壁2)	表面		側面	
	養生方法	熱伝達率 α	養生方法	熱伝達率 α
1	→+養生+防水	8W/m ² C	型枠あり	8W/m ² C
2	露出	14W/m ² C	型枠+→+防水	8W/m ² C
3	露出	14W/m ² C	露出	14W/m ² C

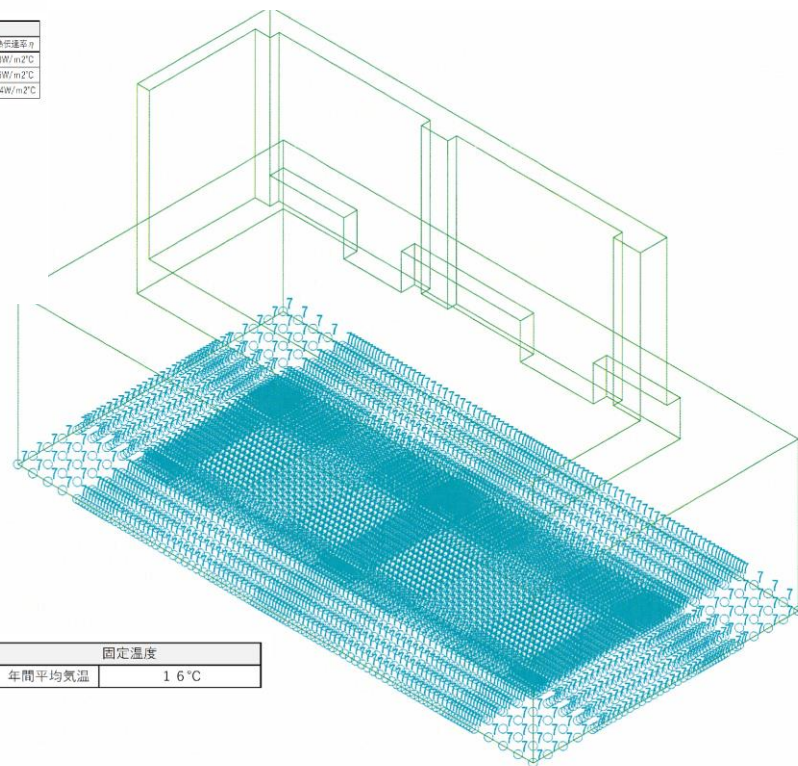


Lot.5 (壁1)	表面		側面	
	養生方法	熱伝達率 α	養生方法	熱伝達率 α
1	→+養生+防水	8W/m ² C	型枠あり	8W/m ² C
2	露出	14W/m ² C	型枠+→+防水	8W/m ² C
3	露出	14W/m ² C	露出	14W/m ² C



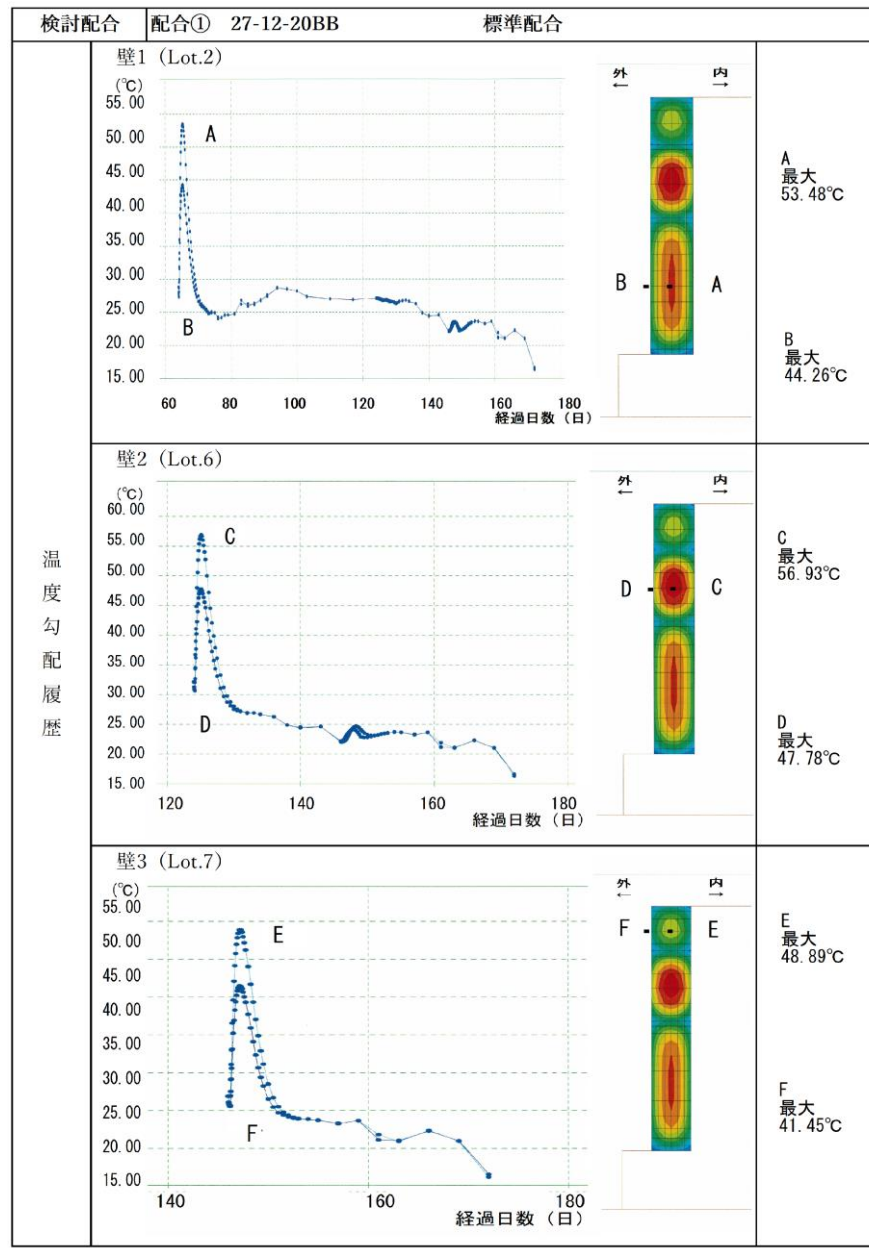
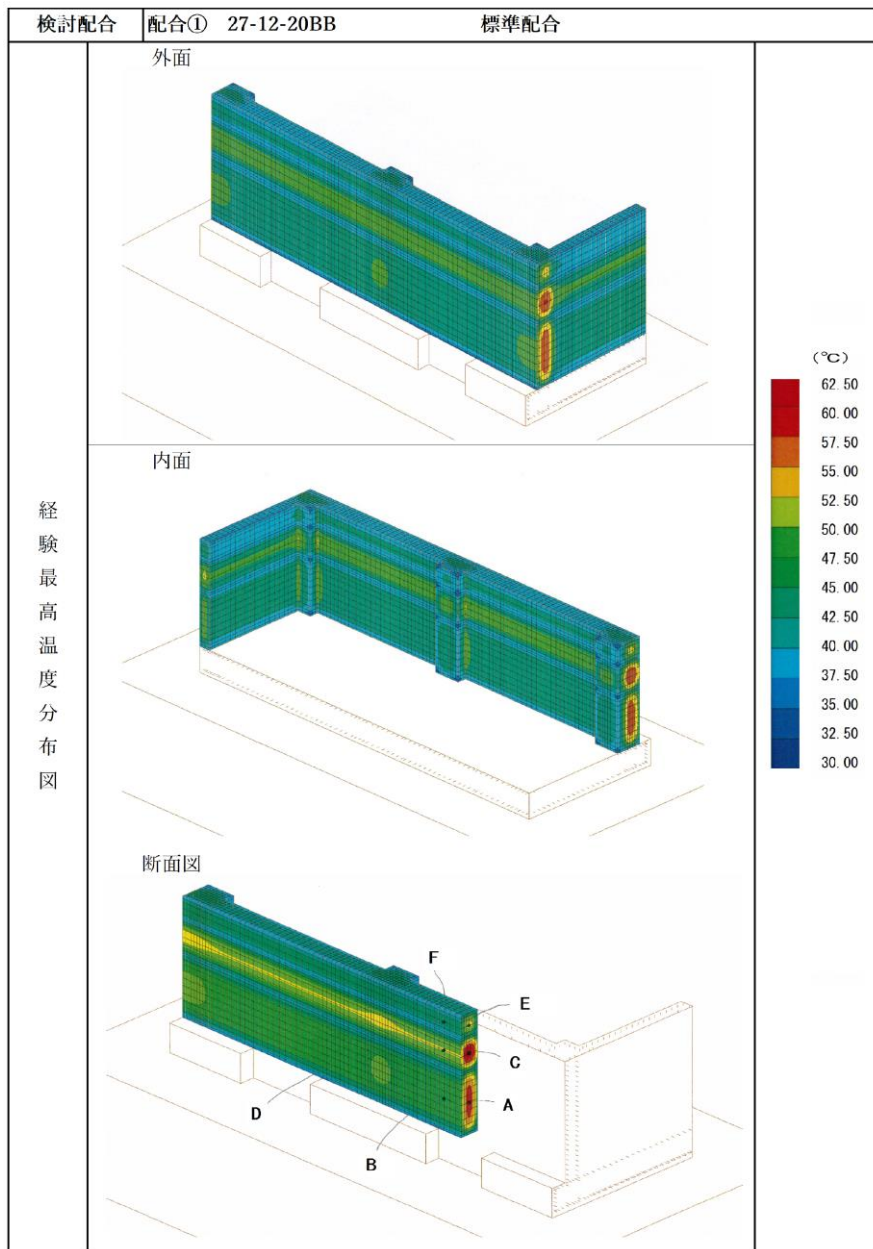
GROUP NAME

- Lot.1 底盤
- Lot.2 側面
- Lot.2 表面
- Lot.2 柱
- Lot.6 表面
- Lot.6 柱
- Lot.6 側壁
- Lot.7 表面
- Lot.7 側壁
- Lot.7 柱
- 地盤

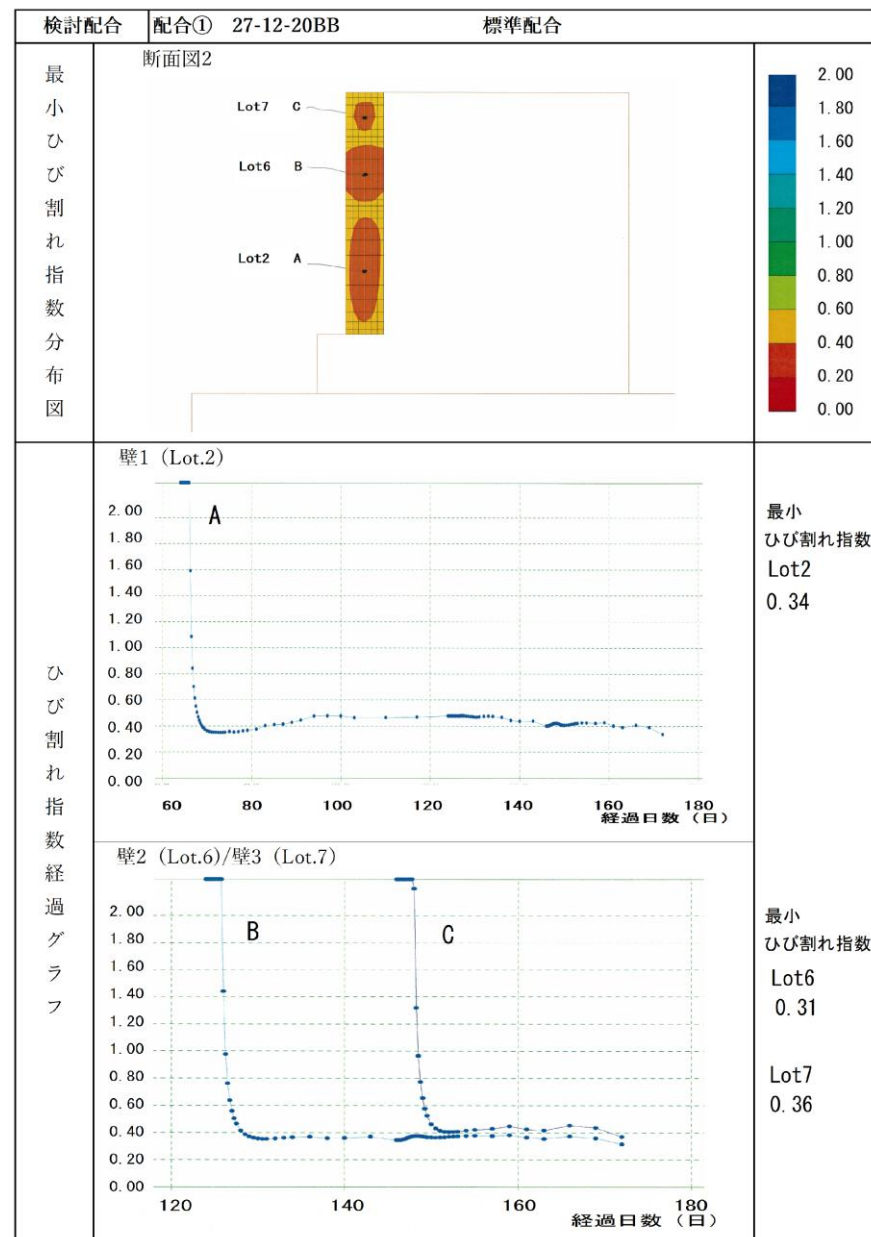
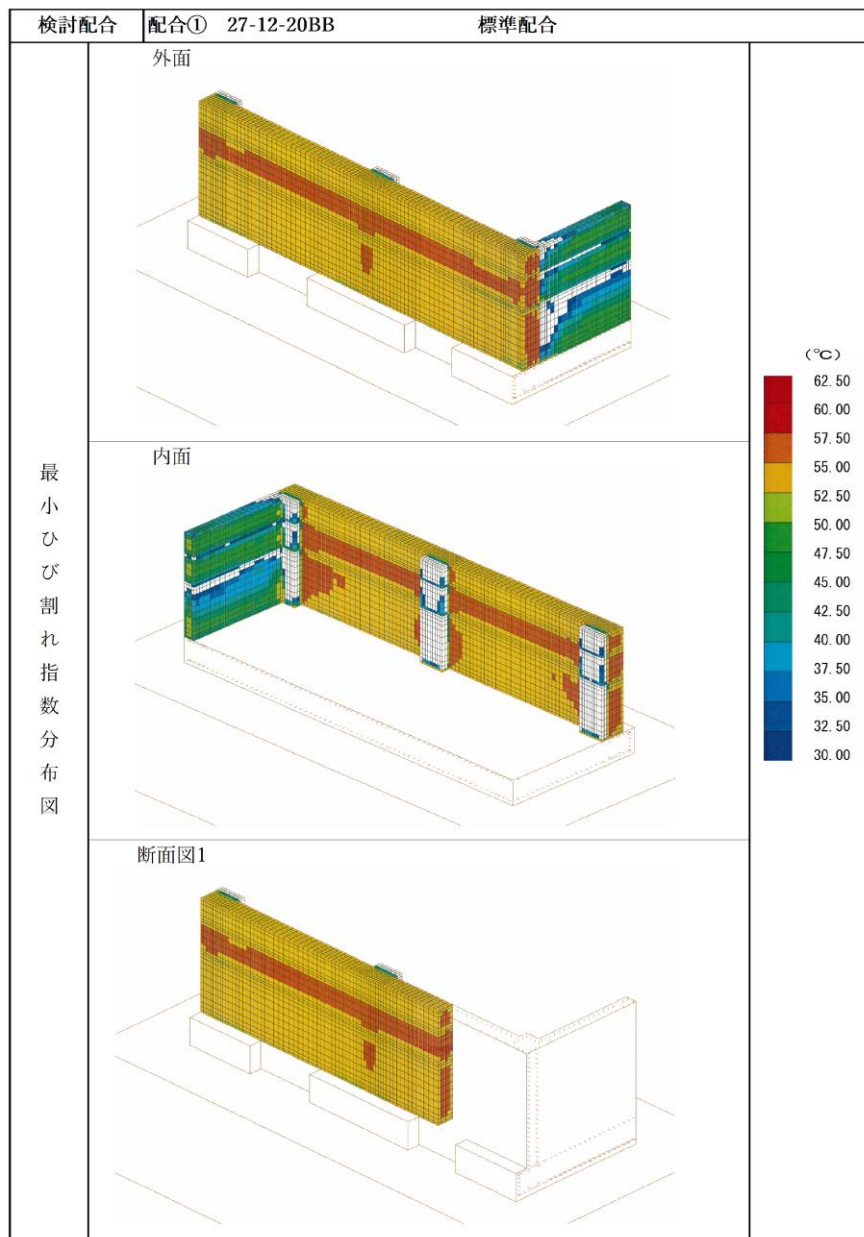


固定温度	
年間平均気温	16°C

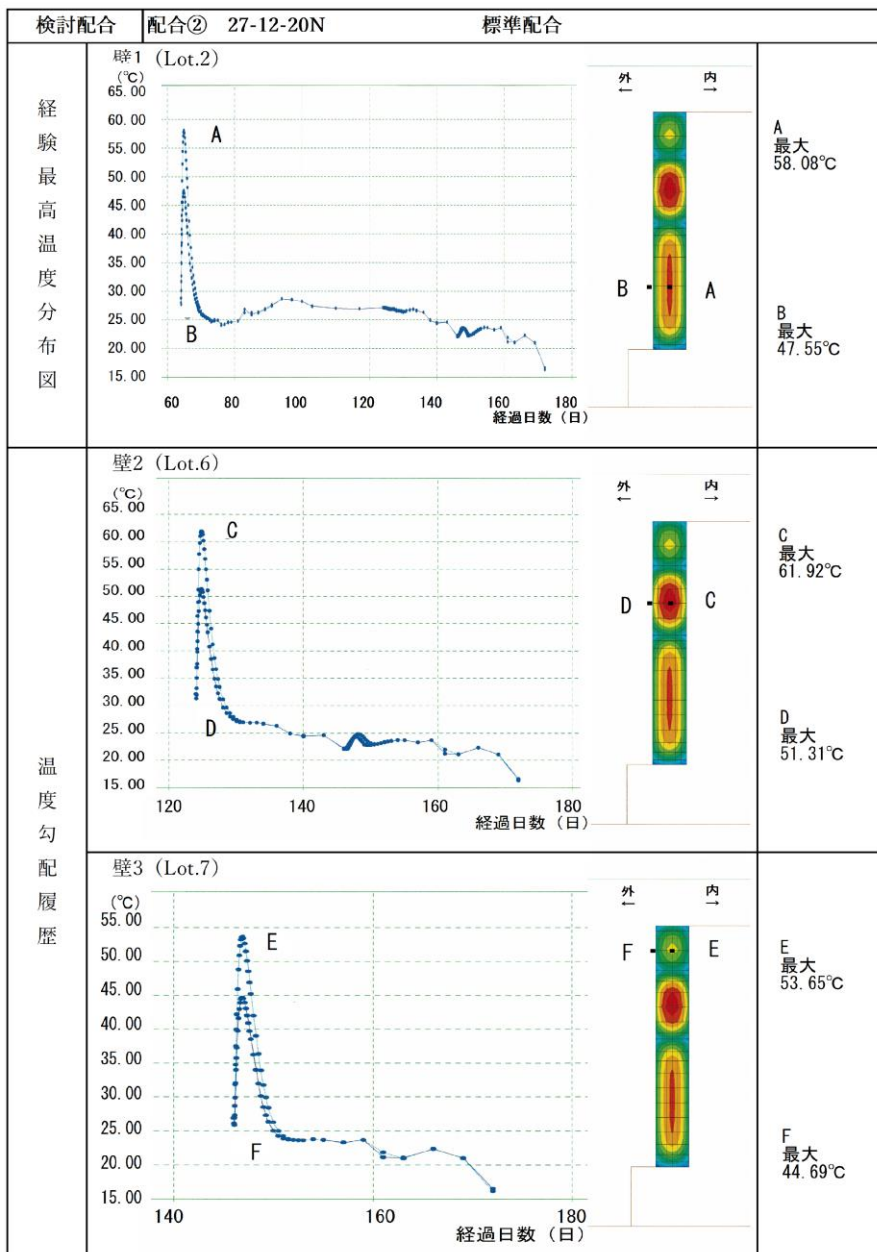
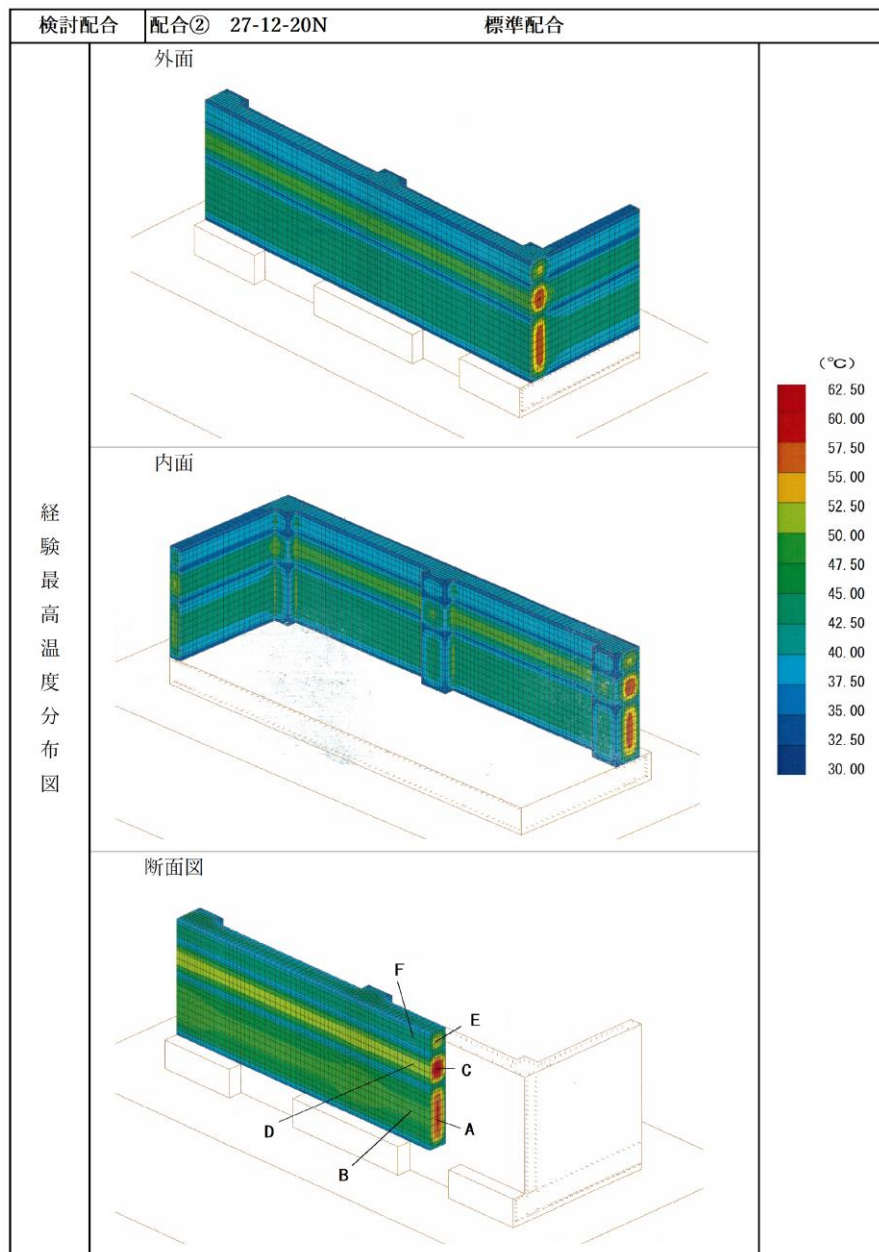
＜解析対象部位のモデル化＞ 壁部モデル 解析結果 配合① 27-12-20BB



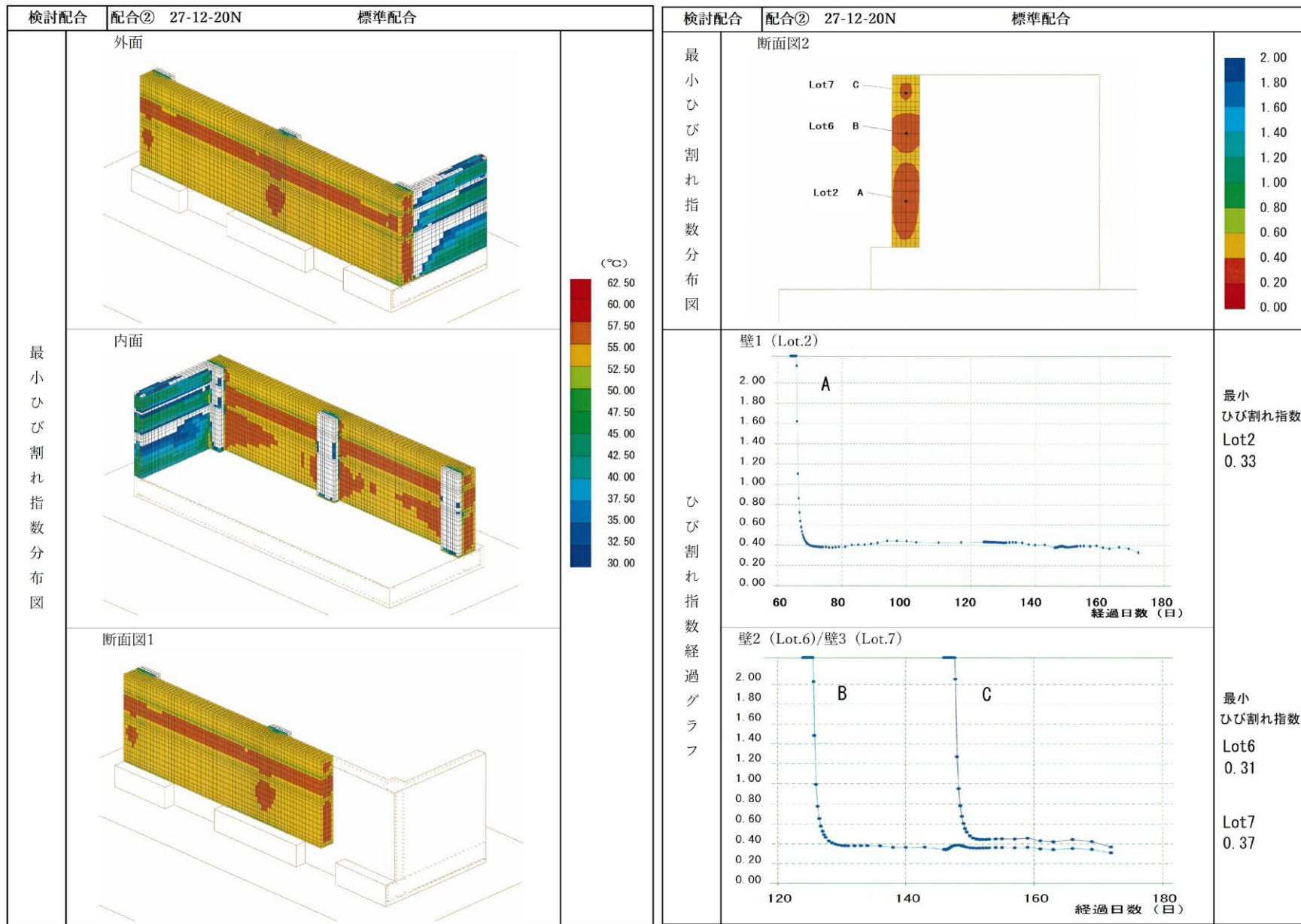
＜解析対象部位のモデル化＞ 壁部モデル 解析結果 配合① 27-12-20BB



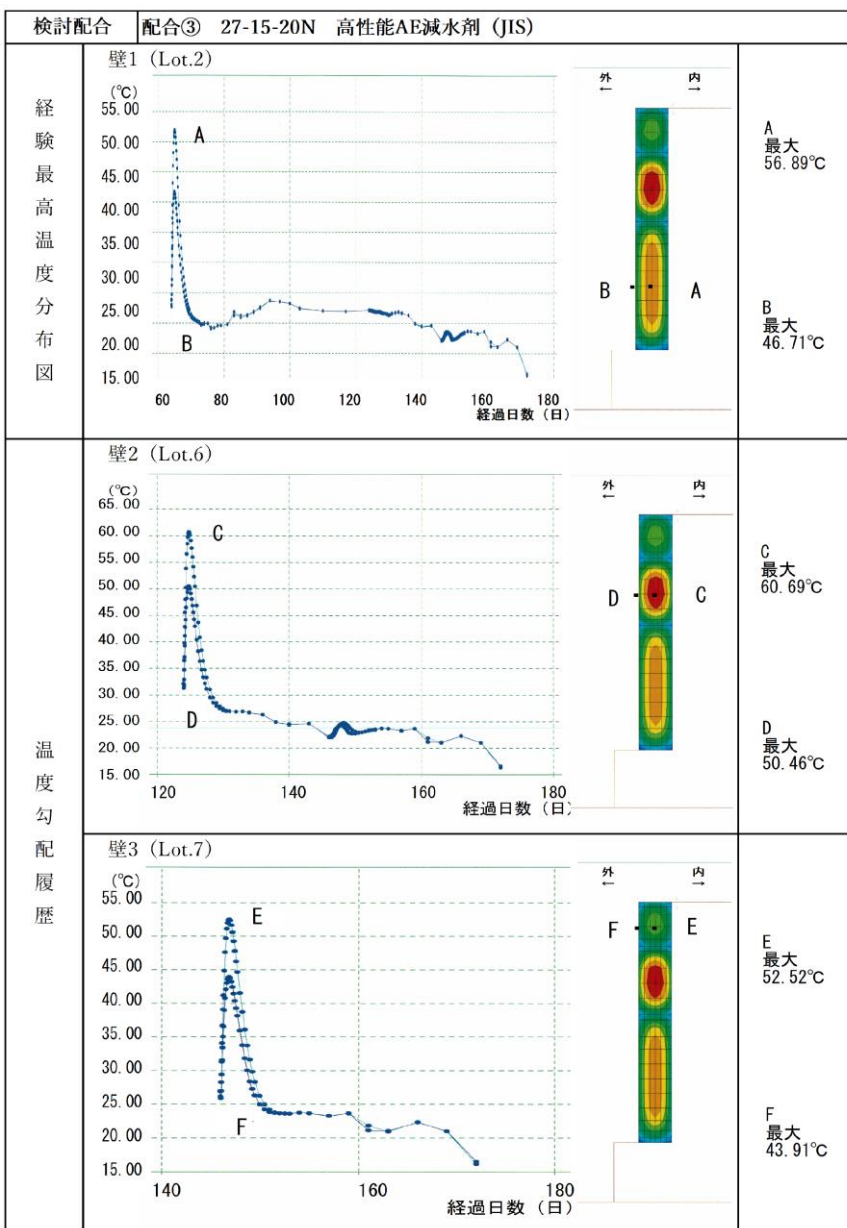
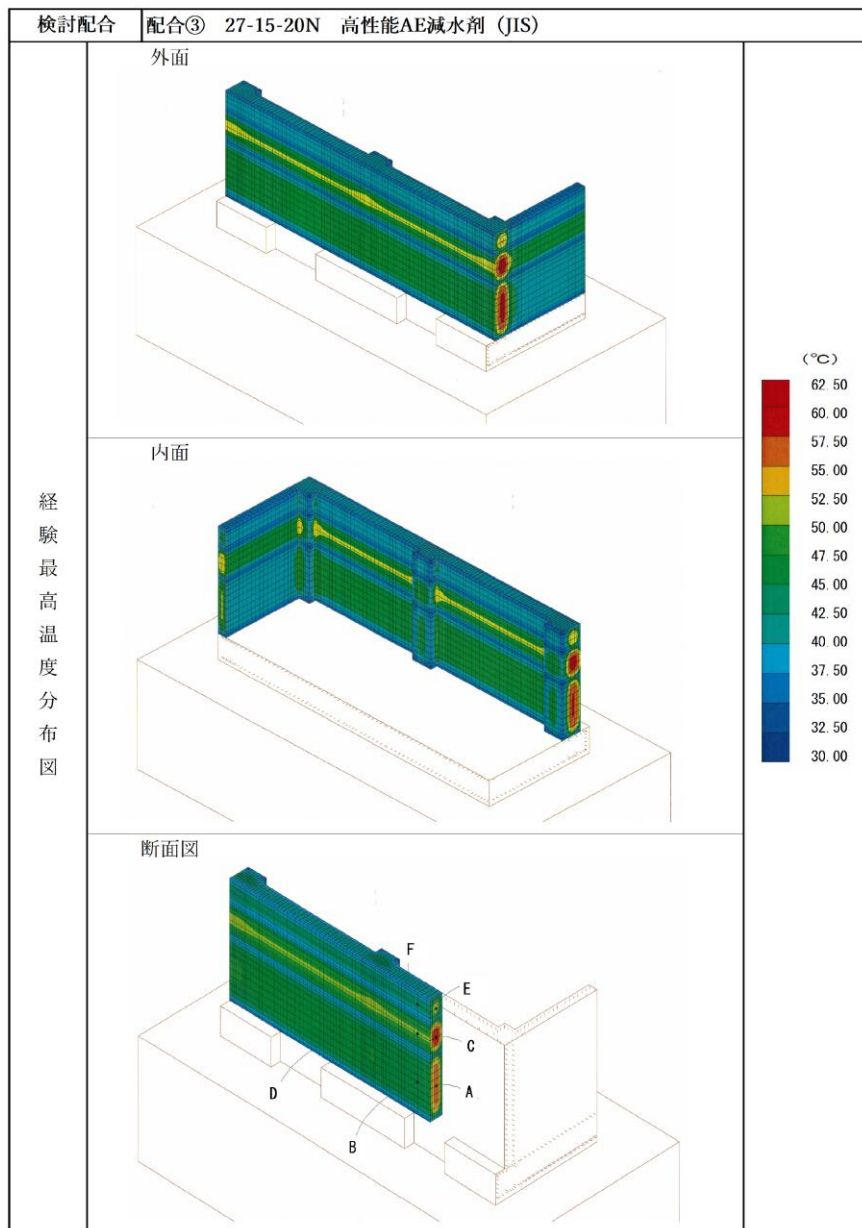
<解析対象部位のモデル化> 壁部モデル 解析結果 配合② 27-12-20N



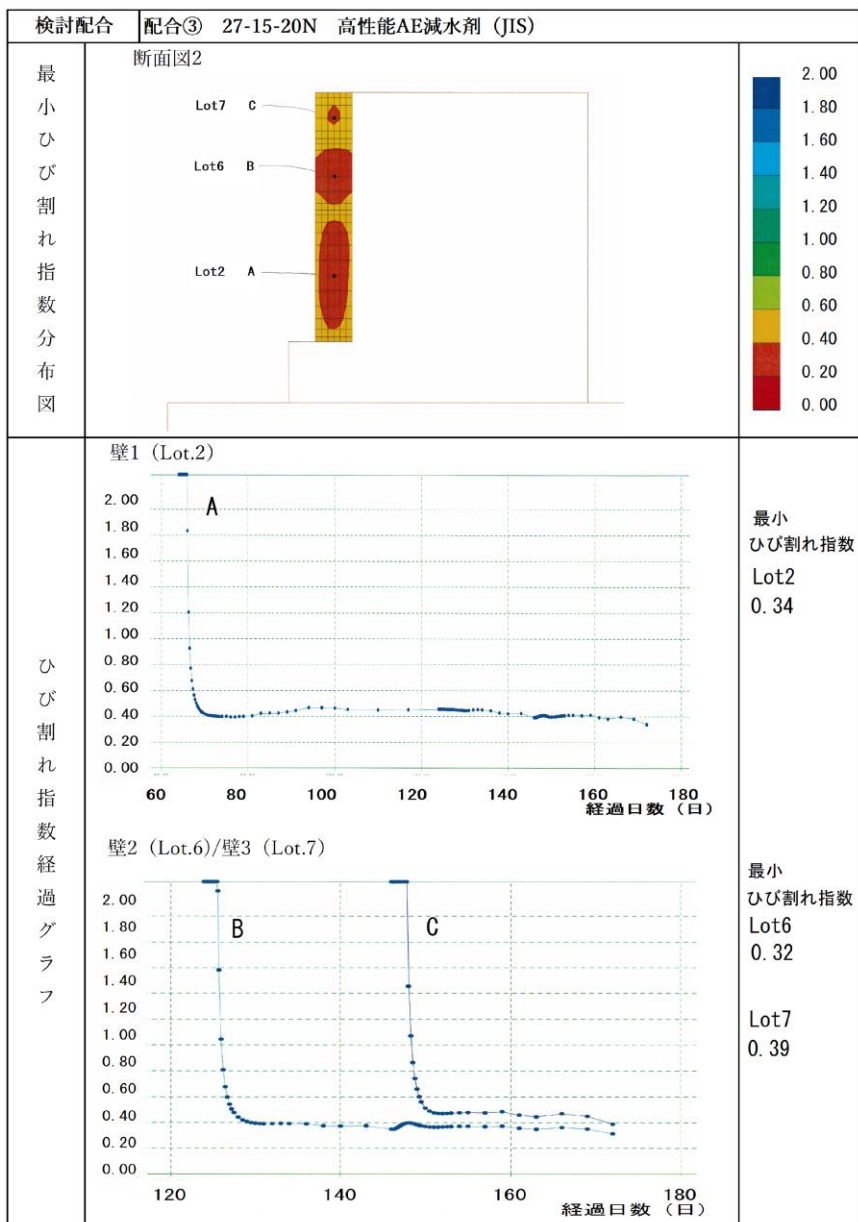
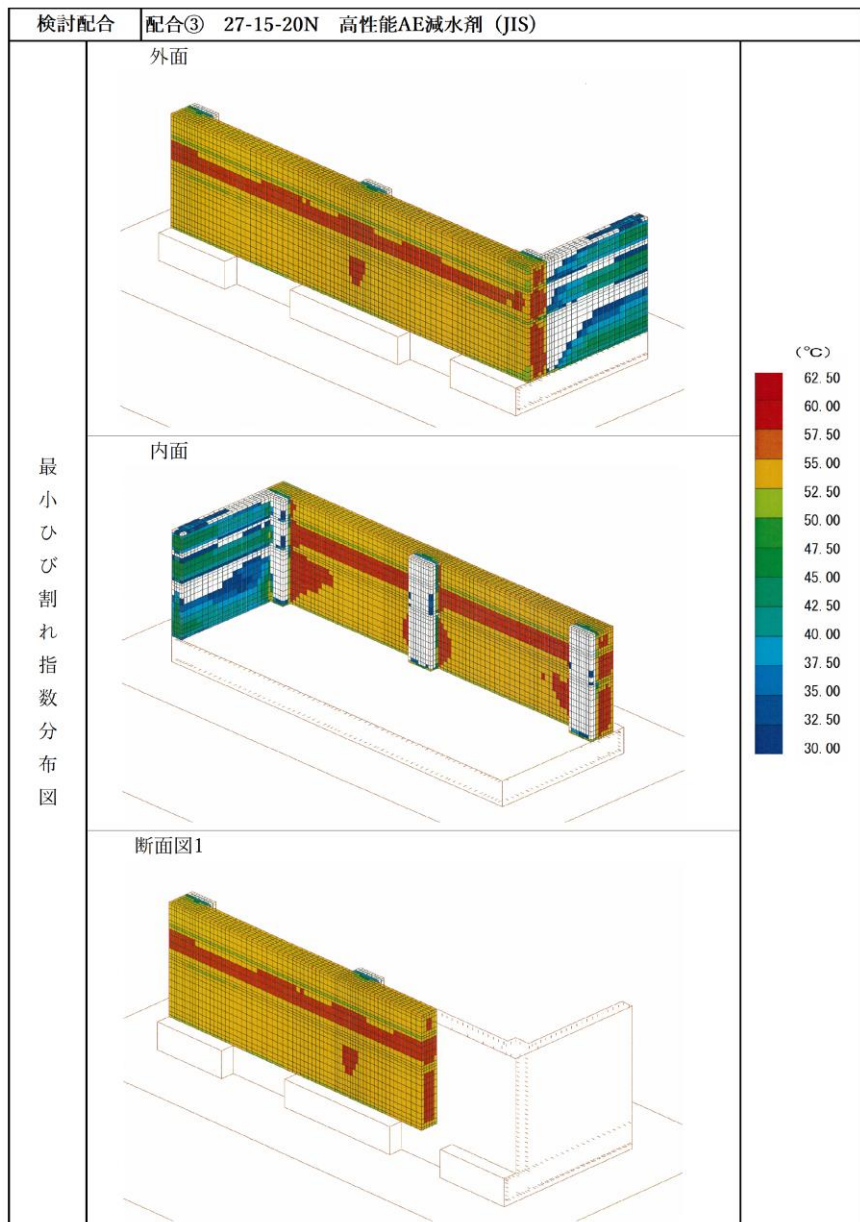
＜解析対象部位のモデル化＞ 壁部モデル 解析結果 配合② 27-12-20N



＜解析対象部位のモデル化＞ 壁部モデル 解析結果 配合③ 27-15-20N 高性能AE減水剤(JIS)



<解析対象部位のモデル化> 壁部モデル 解析結果 配合③ 27-15-20N 高性能AE減水剤(JIS)



<各検討配合による解析結果>

1) 配合

検討配合		設計	配合①	配合②	配合③
配合		24-12-20BB	27-12-20BB	27-12-20N	27-15-20N
混和剤					高性能AE減水剤
混和材					
使用セメント	種類	BB	BB	N	N
単位セメント量	kg/m ³	273kg	310kg	308kg	295kg
水セメント比	W/C	58%	53%	54%	55%
管理材齢	日	28			
JIS有無		標準配合			

2) 解析結果

解析結果まとめ					
設 計					
目標ひび割れ指数・許容ひび割れ幅	$lcr \cdot w a$	1.6以上 または 0.2mm以下			
設計鉄筋比	p	0.478			
解析結果 最小ひび割れ指数	lcr	-	0.31	0.31	0.32
最大ひび割れ幅の予測値	wc	-	0.33	0.33	0.33
判定	OK/NG	W/CでNG	NG	NG	NG

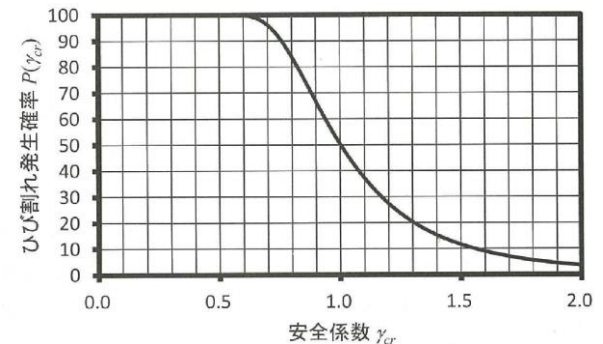


図 2.1.1 安全係数 γ_{cr} とひび割れ発生確率
(コンクリート標準示方書 2017 年制定設計編 P322 より)

設計配合・3つの検討配合の温度応力解析による照査を行なった結果、ひび割れ指数0.3程度・最大ひび割れ幅の予測値が0.33mmとなる結果であった。ひび割れ幅の予測値は簡易式：解4.3.4式により算出しています。

最小ひび割れ指数0.5以下ですので、解析上では発生確率100%で0.33mm幅程度のひび割れが発生することになり、許容ひび割れ幅の0.20mmを超えているため対策が必要となりました。

（発注時点では構造的にはOK鉄筋配筋ですがマスコンの制御対策としてはNG設計を認知の状態での発注とされていました）

＜NG解析結果によるひび割れ制御対策＞

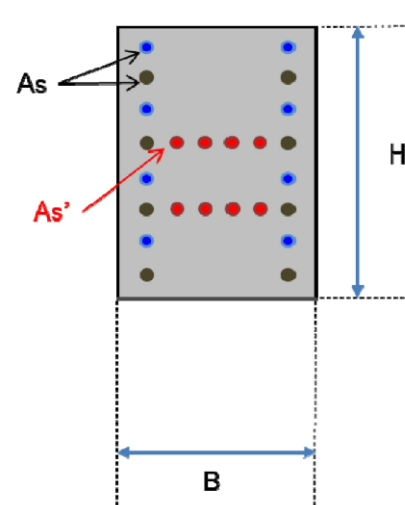
検討配合3種類の解析結果がNGであったため、ひび割れ制御対策を行いました。

ひび割れ制御対策は、地下水位が高い大きな水槽のような構造物でしたのでひび割れ制御鉄筋の配置による対策にしました。誘発目地は設置に手間がかかるし工程面や工費面でも厳しいことから誘発目地の設置は考えず、ひび割れ幅を低減させるためひび割れ制御鉄筋の配置を検討する方向で対策としました。

ひび割れ制御鉄筋の配置方法は山口県のコンクリート構造物品質確保ガイドを参考にしながら鉄筋組立やコンクリート打込みにおいて施工が難しくなることが懸念されるため鉄筋比を確保させる配置を徳山高専の温品先生と協議しながら鉄筋配置を検討しました。（発注者仕様書に鉄筋比 ρ の規定あり）

図 3.3.15 に鉄筋比算出方法を、図 3.3.16 に鉄筋比算出例を示す。

現在のひび割れ制御鉄筋の配置の考え方として、より有効な配置が明確に定まっているものではなく、リフト毎の鉄筋比 ρ によりひび割れ幅の照査結果が求まるものであるため鉄筋比 ρ を確保して、予想されるひび割れ発生に対して現在有効とされるひび割れ制御鉄筋の配置を決定しました。参考にしたのは(山口県のコンクリート構造物品質確保ガイド2020.P53～P61)



$$\rho = \frac{n \times As + n' \times As'}{B \times H} \times 100$$

ここに

ρ :鉄筋比 (%)

As :タイプB(配力筋も含む)鉄筋断面積 (mm^2)

As' :タイプA鉄筋断面積 (mm^2)

n :タイプB(配力筋も含む)鉄筋本数 (本)

n' :タイプA鉄筋本数 (本)

B :厚さ (mm)

H :リフト高さ (mm)

図 3.3.15 鉄筋比の算出方法

<ひび割れ制御鉄筋の配置位置の検討>

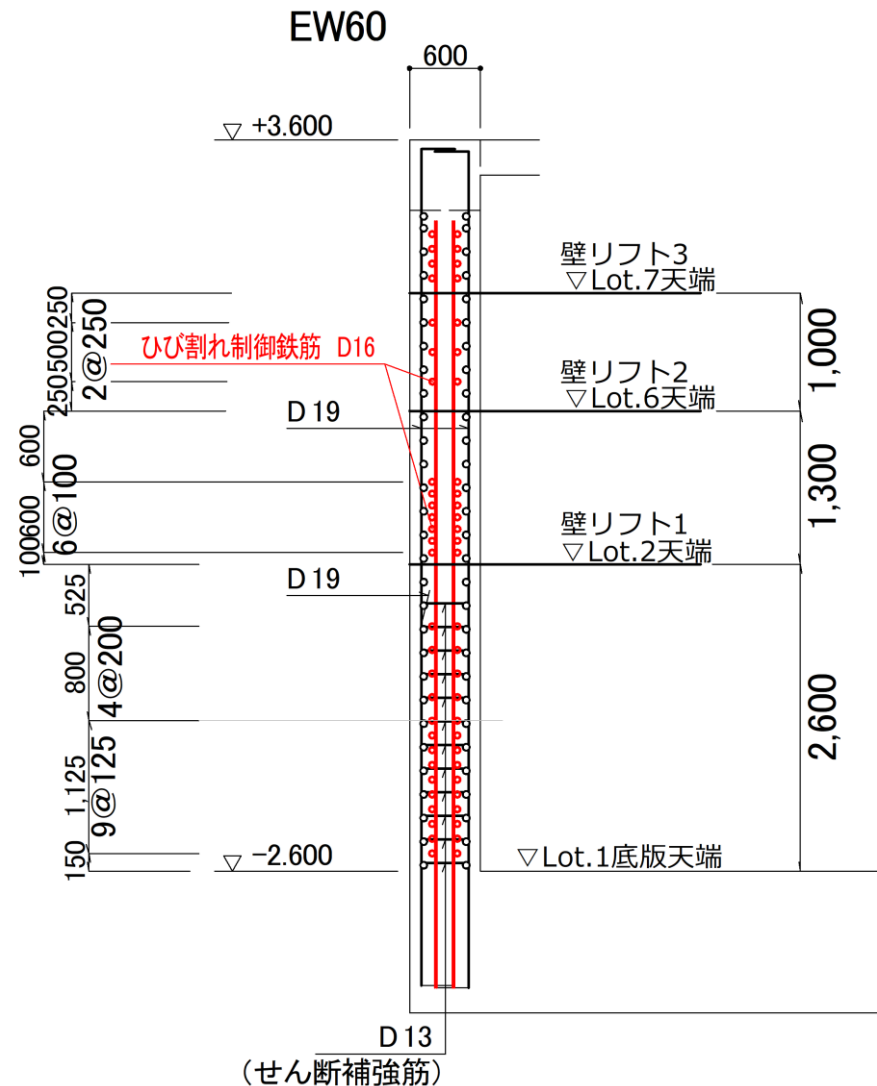
制御鉄筋の配置は右図の様に配置しました。

壁部は外部拘束によるひび割れが基部付近より上方に向けての発生が予測されることから制御鉄筋D16をリフト配力鉄筋方向に配置し、鉄筋比pの条件値の0.9%以下で本数を確保するよう検討して配筋としました。

制御鉄筋の配置は現設計の鉄筋径を太くして鉄筋比を確保する方法もありますが、発注者がその方法についてNGとしたため、新たに配筋する方向にしました。

表面付近のひび割れを抑制することが耐久性の面で大事ですが通常設計の配力筋の間に制御鉄筋を配置となると鉄筋の空きが60~80mm程度と狭くなることと他鉄筋の組立が難しくなること、打設時に鉄筋が茶こしようになって材料分離してしまうのではないかと考えました。

それらも考慮し、壁部材の中央に組立用の鉄筋組立迄をも行いひび割れ制御鉄筋を配置したのは、通常の鉄筋配筋よりも部材芯に近いところに配置するひび割れ制御鉄筋で熱を全体に放熱分散できることで有効になるかもと考えた事もあり、また施工面で確実に打込みが可能な配置としての理由です。



箇所	鉄筋比 p	下側だけ	上側だけ
壁3/Lot.7	0.87	-	-
壁2/Lot.6	0.87	1.21	0.48
壁1/Lot.2	0.83	1.02	0.64

下部：制御鉄筋が密に配置されているとこ

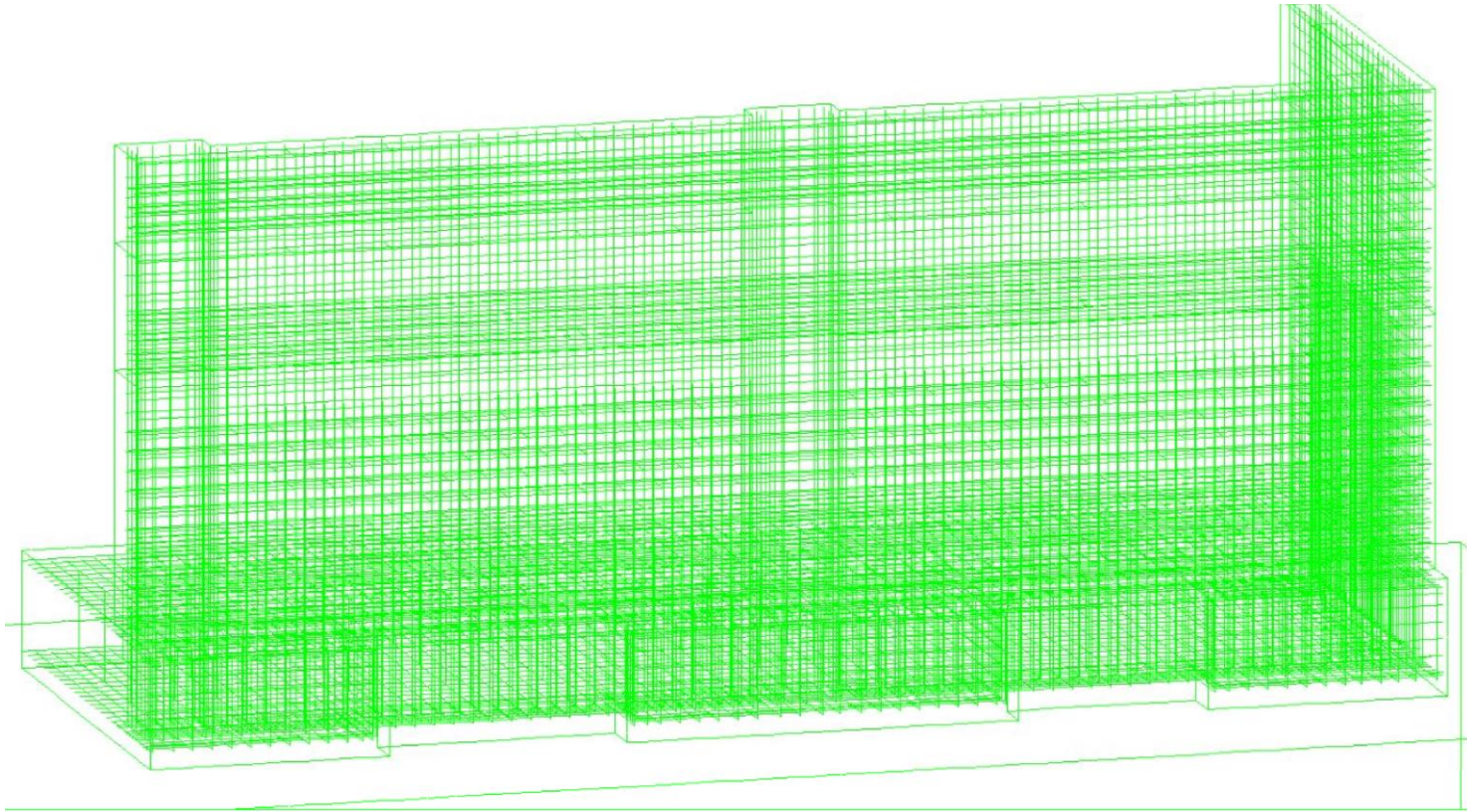
上部：制御鉄筋の配置がすくないとこ、または無いとこ

<ひび割れ制御鉄筋の配置のモデル>

制御鉄筋を配置した解析モデルを作成し解析を行ないました。

（透視モデル）

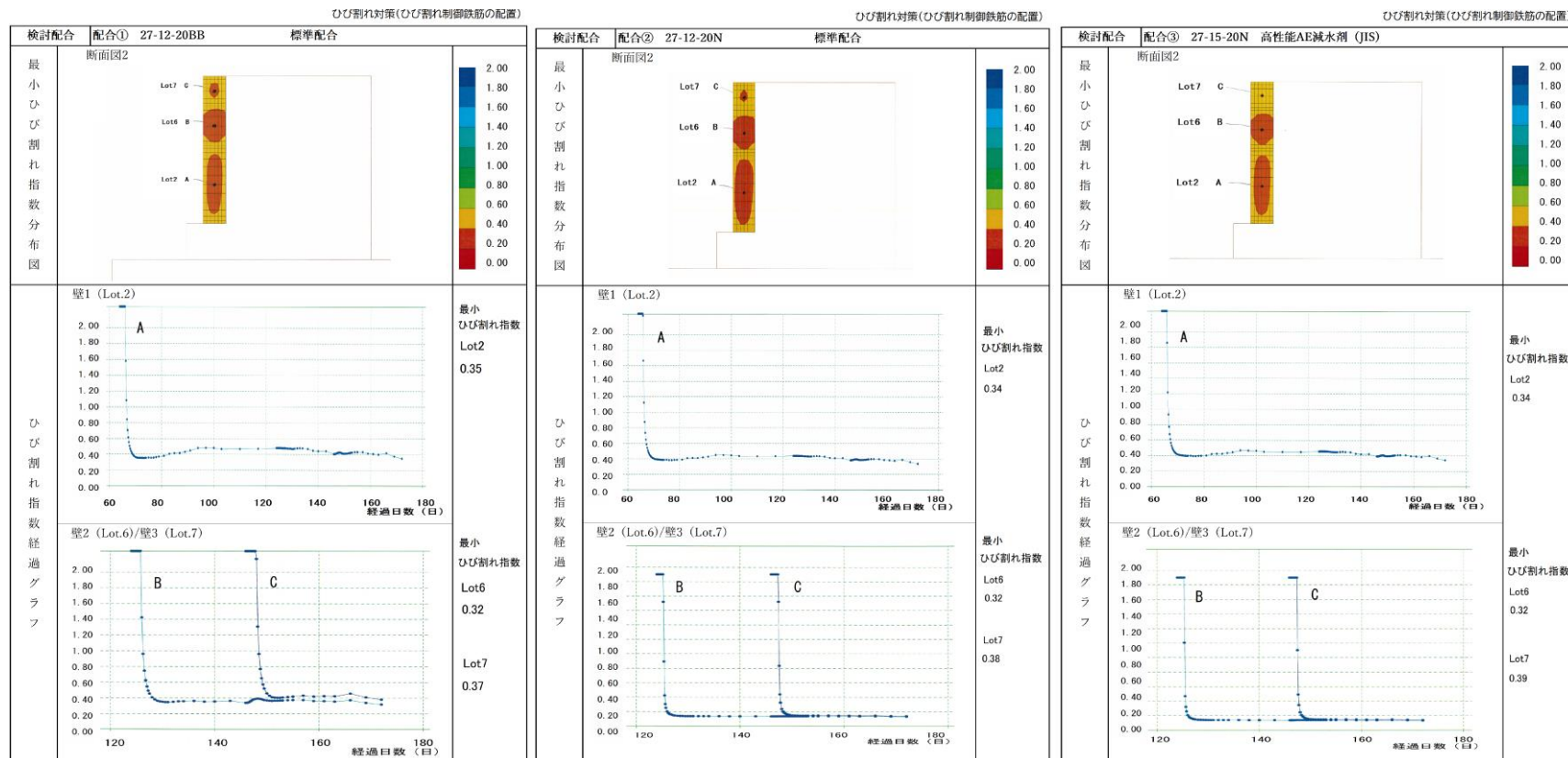
当初設計の鉄筋配筋に制御鉄筋を配置したのになります。



とても手間のかかる作業です

<ひび割れ制御鉄筋の配置の温度応力解析結果>

解析結果の揭示



箇所	ひび割れ指数
壁3/Lot.7	0.37
壁2/Lot.6	0.32
壁1/Lot.2	0.35

箇所	ひび割れ指数
壁3/Lot.7	0.38
壁2/Lot.6	0.32
壁1/Lot.2	0.34

箇所	ひび割れ指数
壁3/Lot.7	0.34
壁2/Lot.6	0.32
壁1/Lot.2	0.39

<ひび割れ制御鉄筋の配置の温度応力解析結果>

温度応力解析では、ひび割れ制御鉄筋を配置し検討した場合においても最小ひび割れ指数はほとんど変化なくひび割れ指数1.60以上を満足することが出来ませんでした。（使用ソフトではひび割れ指数の改善はなかった）
このため、解析結果値 l_{cr} を基に以下の式を用い、最大ひび割れ幅が許容ひび割れ幅以下となるかを照査しました。

解析結果

ひび割れ制御対策（ひび割れ制御鉄筋）						
検討配合		設計	配合①	配合②	配合③	配合④
配合		24-12-20BB	27-12-20BB	27-12-20N	27-15-20N	27-15-20N
混和剤		-	-	-	高性能AE減水剤	-
単位セメント量	kg/m ³	273kg	310kg	308kg	295kg	321kg
水セメント比	W/C	58%	53%	54%	55%	54%
目標ひび割れ指数・許容ひび割れ幅	$l_{cr} \cdot w_a$	1.6以上 または 0.2mm以下				←
鉄筋比（ひび割れ対策あり）	p	0.83~0.87				←
解析結果 ひび割れ指数	l_{cr}	-	0.32	0.32	0.32	0.31
ひび割れ制御対策ありでの解析結果		▶	NG	NG	NG	NG
4.3.4式を用いて最大ひび割れ幅の予測値の照査						
$w_c \leq w_a$ w_c ：最大ひび割れ幅 w_a ：許容ひび割れ幅（0.20mm） γ_a ：安全係数、一般的に1.0		$w_{cat} = \gamma_a \left(\frac{-0.141}{p} + 0.0938 \right) \times (I_{cr} - 1.965)$ （土木学会）コンクリート標準示方書【設計編】p323（解2.2.1） （JCI）マスコンクリートのひび割れ制御指針2016 p57（解4.3.4）				
最大ひび割れ幅の予測値（mm）▶	w_c	-	0.12	0.12	0.12	0.12
判定	OK/NG	W/CでNG	OK	OK	OK	OK

発注者の基準は0.20mm以下でしたが、地下水位が高いため漏水の抵抗を考慮して0.15mm以下となるようにしました。
鉄筋比をあげるだけです。数本の鉄筋を配置させるだけで違いがでるならと0.2mmを狙わず0.15mm以下を狙いました。
配合④は高性能AE減水剤無しを追加、配合①～③の結果を確認後、 l_{cr} は低いですが鉄筋比により w_c を調整できるならと高性能AE減水剤を外し追加解析しました。

以上照査により、各リフトにおいて鉄筋比を確保し、配合は現場条件を勘案して27-15-20Nを採用し施工しました。

この度の解析上では、ひび割れ制御鉄筋の配置は同リフト内で配置する位置を変更しても鉄筋径・本数を確保すれば、ひび割れ指数 l_{cr} は変化しないことがわかりました。スランプ15にした理由は打継部という重要な箇所に打設を行う際、通常より過密に配筋されることとなりますので締固めによる材料分離を発生させない様、コンシステンシーが大きい配合が必要として変更しました。

＜実施結果について＞60cm厚の壁リフト1

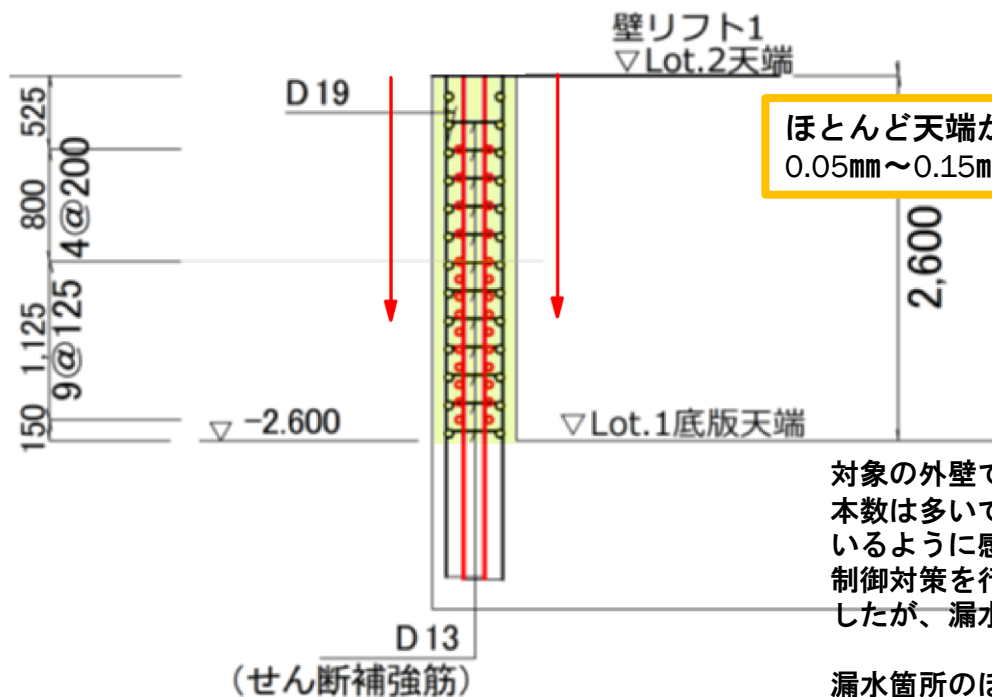
壁リフト1 (Lot.2)	
制御鉄筋の配置	下部集中型
実施打設日/打設時の月平均気温	9月8日 / 24.3°C
壁リフト1の解析打設日/解析時の月平均気温	7月1日 / 25.9°C
リフト高さ (h)	2.6m
鉄筋比 (p)	0.83 (下1.02/上0.64)

マスコンクリートの対象範囲の壁リフト1のひび割れ発生状況はほとんどが0.06mm～0.15mm幅で、初期は天端付近から1.7m程度がおおく発生していました。基部付近から上方向へのひび割れは全く発生していませんでした。基部付近に密に配置した効果が見られたと感じています。

その後の調査では、上から下までひび割れが伸びていたものがほとんどでした。

1回目のひび割れ調査時期は打設2週間後に調査

2回目のひび割れ調査時期は打設1.5ヶ月後に調査



ほとんど天端から発生
0.05mm～0.15mmが多数・約1.7m程度の物が多かった

対象の外壁で105本(外壁－外64本/内壁41本)発生していました。本数は多いですがひび割れ制御鉄筋の配置により細く多く分散されているように感じました。(発生箇所 p 48参照)
制御対策を行った範囲では0.20mmを超えるひび割れは発生しませんでした。漏水を伴うひび割れ箇所は8ヶ所という結果でした。

漏水箇所のほとんどは0.15mm以下で補修対象外ではありましたが幅に関係なく止水処理済み。

<実施結果について>60cm厚の壁リフト2

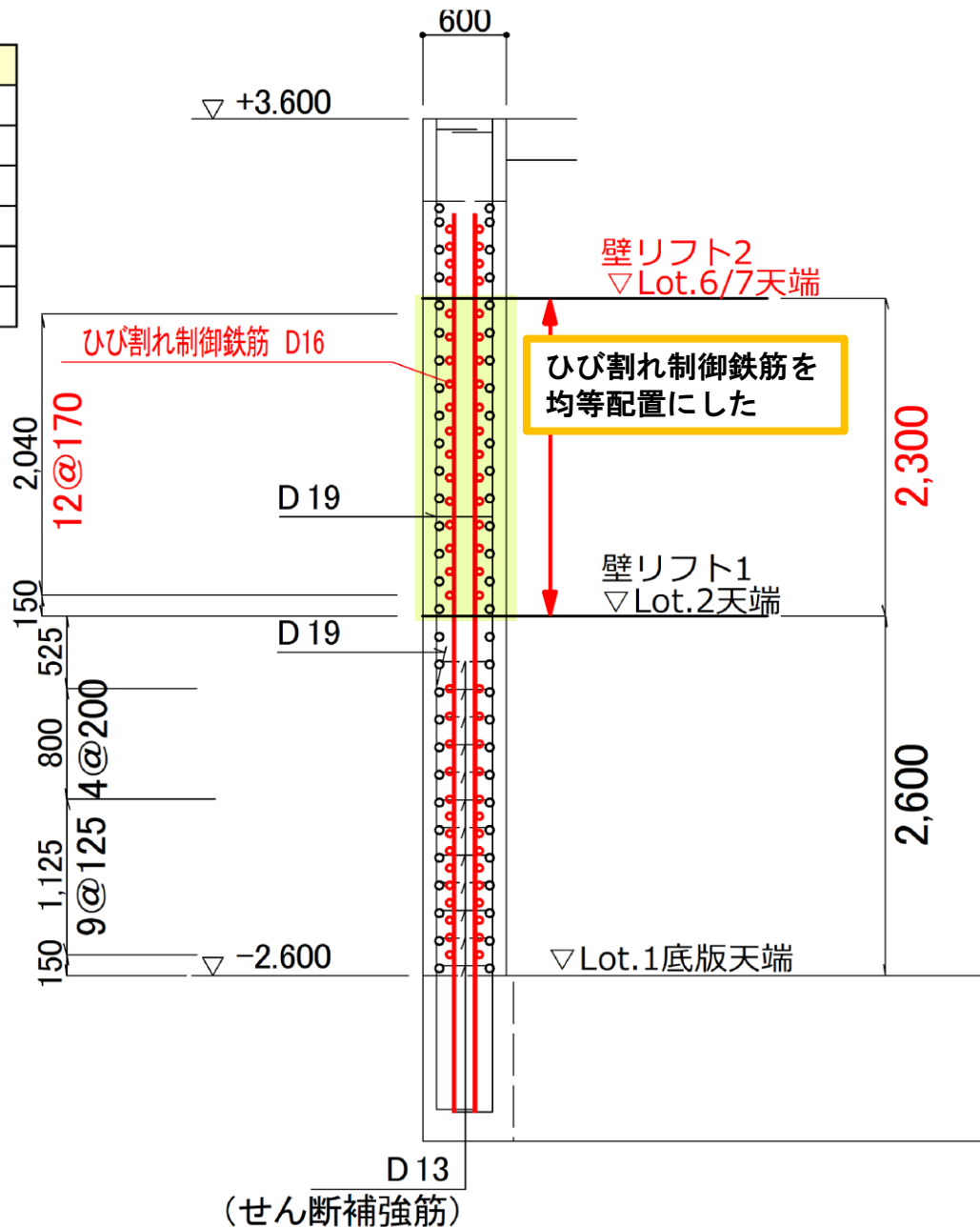
壁リフト2 (Lot.6/7 解析時の壁リフト2と3)	
制御鉄筋の配置	均等配置型
実施打設日/打設時の月平均気温	12月2日 / 8.0°C
壁リフト2の解析打設日/解析時の月平均気温	8月30日 / 28.2°C
壁リフト3の解析打設日/解析時の月平均気温	9月21日 / 24.3°C
リフト高さ (h)	2.3m
鉄筋比 (p)	0.87

解析時には2回打設とした部分で打設時期は8月末と9月末がとなっていた。実際は1回打設の12月初旬の施工。

12月と寒い時期の施工により、コンクリートの温度上昇が抑えられた事、制御鉄筋をリフトに対し均等配置にしたことが関係するのか壁リフト2は、壁リフト1に対し本数がとても少ない発生となりました。発生も上から下にとか下から上などの規則性はなかったように感じています。

打設2週間後のひび割れ調査では0.1mm以下が33本確認
打設4か月後のひび割れ調査では全体で0.06mm~0.18mmが41本（内漏水箇所が7か所）という結果でした。

漏水箇所については幅に関係なく止水処理済。



<実施結果について>40cm厚のマスコン対策対象外の壁

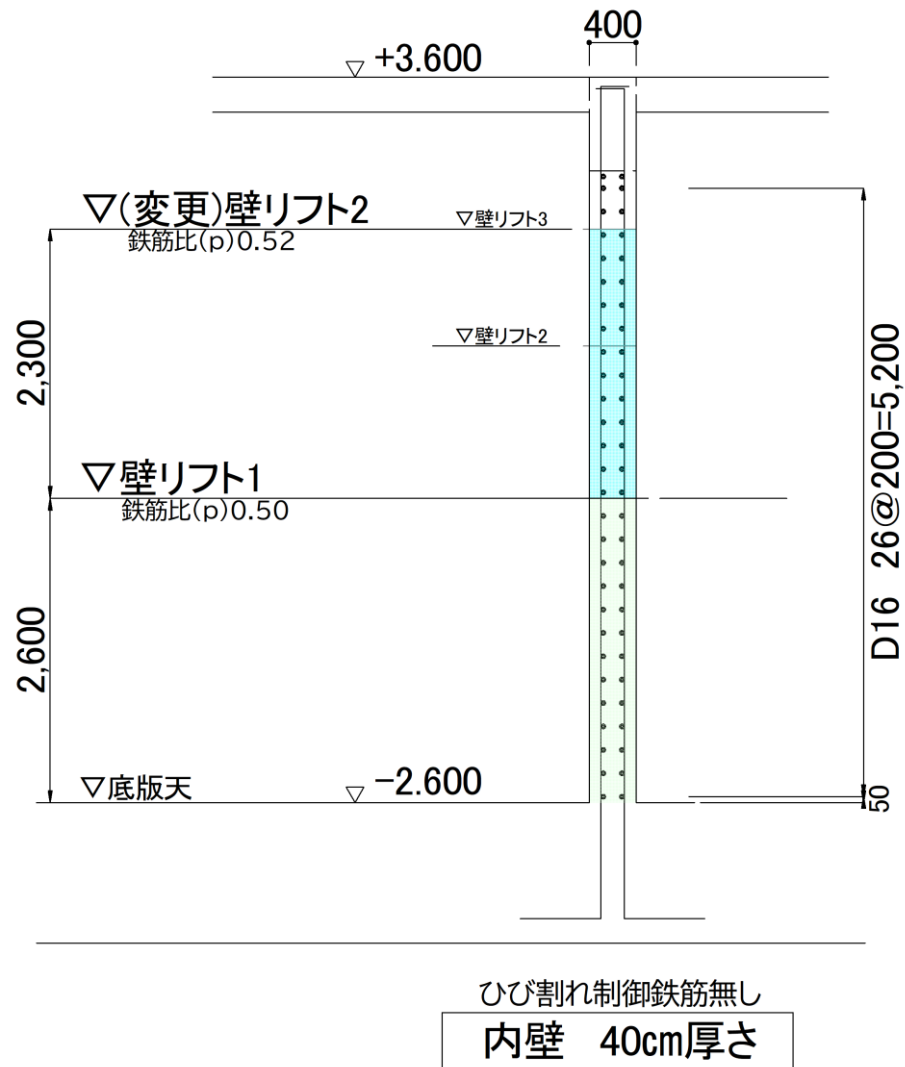
40cm厚の壁/マスコン対象外		
制御鉄筋の配置なし	壁リフト1	壁リフト2
リフト高さ (h)	2.6m	2.3m
鉄筋比 (p)	0.5	0.52
解析時のひび割れ指数(Icr)	0.6	0.6~0.8
実施工における最大ひび割れ幅	0.35	0.3

興味で解析した40cm厚さの壁の結果になります。
発注者にここも対策したほうが良い旨を伝えましたがマスコンクリートの対象にはならないので、ひび割れ制御対策の必要はないと言われ設計通り施工しました。

結果は外部拘束によるひび割れが多く本数は少ないですが0.20~0.35mmのひび割れが発生しました。
多くは貫通であり水槽の隔壁ですので水張り試験時には盛大に漏水することになりました。

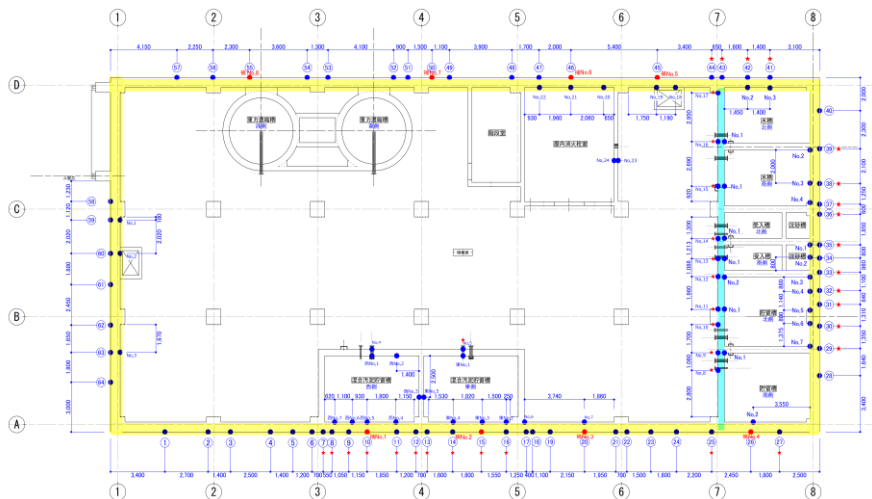
0.20mmを超えると無条件でそれは要補修となり費用は自費になると思いますので、金銭的にみれば自主で制御鉄筋を入れるように施工したほうが0.2mm以下に分散させられる可能性があるのもそのほうが良かったのかもしれない。ひび割れ幅を分散させ0.20mm以下の例えば0.1mmとしても漏水は発生するとは思いますが、ひび割れの補修基準以下となる可能性が分散のほうが吉かもしれません。
ひび割れの幅に関係なく漏水を伴うひび割れの補修は発注者によって補修対象になる場合もあるので難しいところです。

対策をしていない40cmの壁をみて、対策をした60cmの壁をみると、ひび割れ制御鉄筋の配置による効果は大きく有効であったと私は感じました。

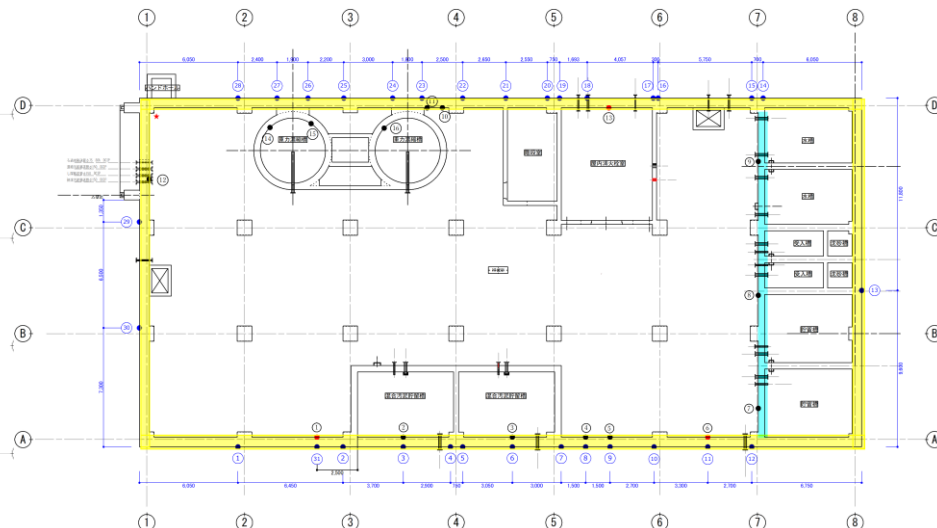


＜実施結果 発生箇所＞

壁リフト1



壁リフト2



共通して、柱と壁の断面替わりの入隅部・壁部の真ん中付近とその間その間に多く発生していました。

ひび割れ幅が0.10mm以下でも漏水でエフロレンスがでていたところも多数ありました。

漏水はありましたが、マスコン対象外となって何も対策できなかった40cm厚の壁と比べると、鉄筋比を確保した制御鉄筋の効果は大きかったと思います。

この度は山口県の品質確保ガイドのひび割れ制御鉄筋の考え方でいう補強鉄筋タイプA・タイプBでもA+Bでもありませんでしたが、補強鉄筋の配置方法は全部を参考にしました。特にP56は参考になり、有効な配置位置や打込み時の施工性に難がある鉄筋間隔などはとても参考になりました。打込み時期の調整は工期が関係するので難しいですが、夏を外した寒すぎない時期に施工するほうが、壁リフト1と2を比べて良いと感じました。

暑い外気温の高い時期に打設すると後から発生するひび割れの数が多い様に感じました。(P45~47関連)

まとめ

※W/C≦55%以下の規定によりNG

部材	部材寸法 厚さ	打設時期			温度応力解析 JCMAC3	対 策	ひび割れ	
		箇所	解析計画日	実施打設日				
底版	1.20m	底版部	4月28日	6月15日	実施6パターン	①生コンの配合変更 設計： 24-12-20BB W/C≦58%※ C=273kg 採用： 27-15-20N W/C≦55% C=295kg (高性能AE減水剤+水和熱抑制型膨張材) ②湿潤養生期間の延期 当初： 湛水養生8日間+散水養生3日間 実施： 全体湛水養生6日間+散水養生6日間	無し	
壁部①	0.60m 外壁	壁リフト1	7月1日	9月8日	実施3パターン	①生コンの配合変更 設計： 24-12-20BB W/C≦58%※ C=273kg 採用： 27-15-20N W/C≦54% C=321kg ②ひび割れ制御鉄筋の追加 リフト1： 基部付近によせて配置 リフト2： リフト全体に均等配置	【リフト1】 微細のみ64本 (0.05~0.15mm) 漏水8箇所	
		壁リフト2	8月30日	12月2日			【リフト2】 微細のみ41本 (0.06~0.18mm) 漏水7箇所	
		壁リフト3	9月21日					
壁部② (参考)	0.40m 内壁	壁リフト1	7月1日	9月8日	興味本位で実施	①生コンの配合変更 設計： 24-12-20BB W/C≦58%※ C=273kg 採用： 27-15-20N W/C≦54% C=321kg ②ひび割れ制御鉄筋の追加 (提案したが) 対策は無し	本数は少ないが 0.20~0.35mmの 外部拘束ひび割れが 複数発生	
		壁リフト2	8月30日	12月2日				
		壁リフト3	9月21日					

上記表以外の間接的な対策

- ・仮設工の変更(切梁・棚杭)/撤去用の開口なし。中間杭本数減、底版の貫通を減らした。(特に各水槽部の下)
- ・仮設工(仮締切)や現場の状況・打設数量などを考慮した打設割の検討を実施。
- ・実施養生期間は、底版部・壁部共に熱電対で外気温・部材芯・部材表面(型枠面)などの計測を行い脱型日・養生期間を調整。
- ・配合や養生方法、養生期間、制御鉄筋の有無など条件を変え、日の目をみることは出来なかったが壁部は26パターンの解析を実施。

この度の現場は土木工事ではありましたが、建築工事のような複雑な形状でとても大きい構造物でした。私としてはこれほど大きなコンクリート構造物を施工することも温度応力解析を行う事も初めてでした。

何でもですが良い物を作るためには十分な計画と段取りが必要だと思います。今回はコンクリートの施工でしたので直接的には、計画工程・打設割の計画、いろんな検討・対策、間接的には、仮設計画など。それらを実行するための段取りでは、打設計画・生コン会社との連携、配車計画・打込み順の計画・打設前の周知会(事前・直前)など色々あります。実施ではあたり前のことをあたり前には行い、追加で必要なことを多々行っていきますがこれからも、これらは基本だと思っていますので続けていきたいと思っています。

山口県では温度応力解析に頼らず類似構造物の設計データと施工後ひび割れ発生の有無から鉄筋量でコントロールするようになってきていると思います。私はとてもいいと思います。温度応力解析はとても負担が大きく時間と労力がかかります。

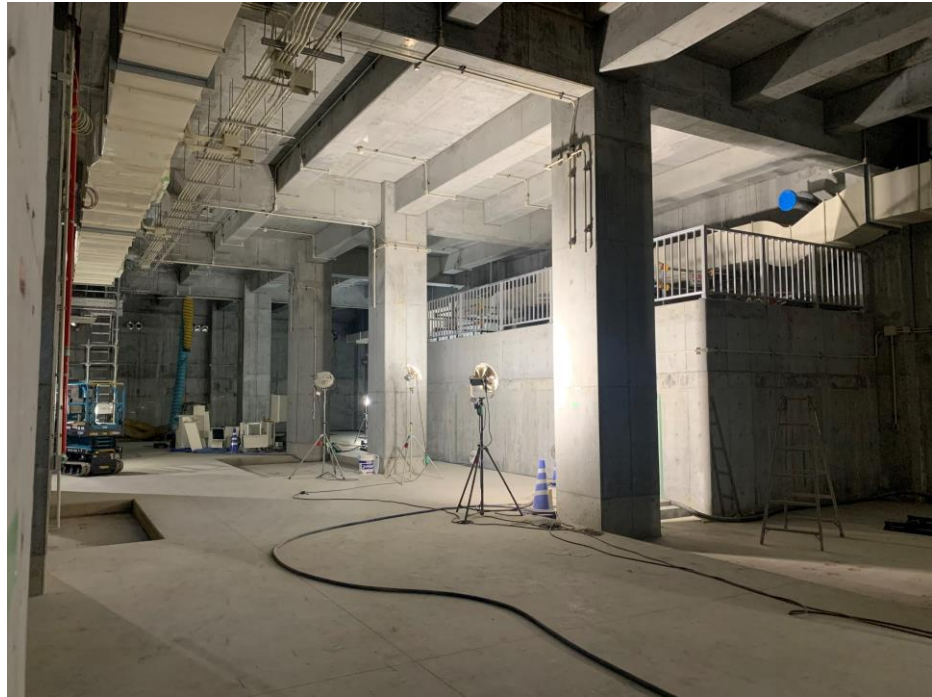
外注すれば検討数によって費用が嵩みますし、報告書のための物になって実のある結果にならない可能性があります。施工業者がそれをするのではなく、工事発注前の設計段階で既にNGがわかっているはずで、発注前の設計段階で図面に織り込んで発注すべきではないかと私は思っています。

ひび割れを完全に無くすというのは難しいと思いますが、発生確率を下げひび割れ幅を抑制するという事は、この度の現場で可能だと感じました。ただ、ひび割れ制御鉄筋の配置についてはより有効な配置という確立されたものは未だない様です。例えになります。空気の力(ダウンフォース)を利用したレーシングスポーツカーが世に出てきたのが1966年頃、これがレースカーにおける空力の鍵を開けました。色々あって進化を遂げ技術が確立されて、市販車レベルに空力を多く反映されてきたのが最近。車関係のほうはその技術を考える人の分母が大きいとは思いますがザクっと50年くらいです。

コンクリートのひび割れ制御に対してこの業界の歴史には明るくありませんが、沢山の技術者の知恵と経験により、いつの日かパターン別にでも、より有効なひび割れ制御鉄筋の配置というものが確立されればよいと思っています。

地下躯体内の写真

(施工中)



ご清聴ありがとうございました。