

耐震補強工事における 技術的課題と対応策について

目 次

1. 工事概要
2. 配水池の構造
3. 本件における技術的課題
4. 課題への対策結果について
5. 今後の維持管理のために…
6. おわりに

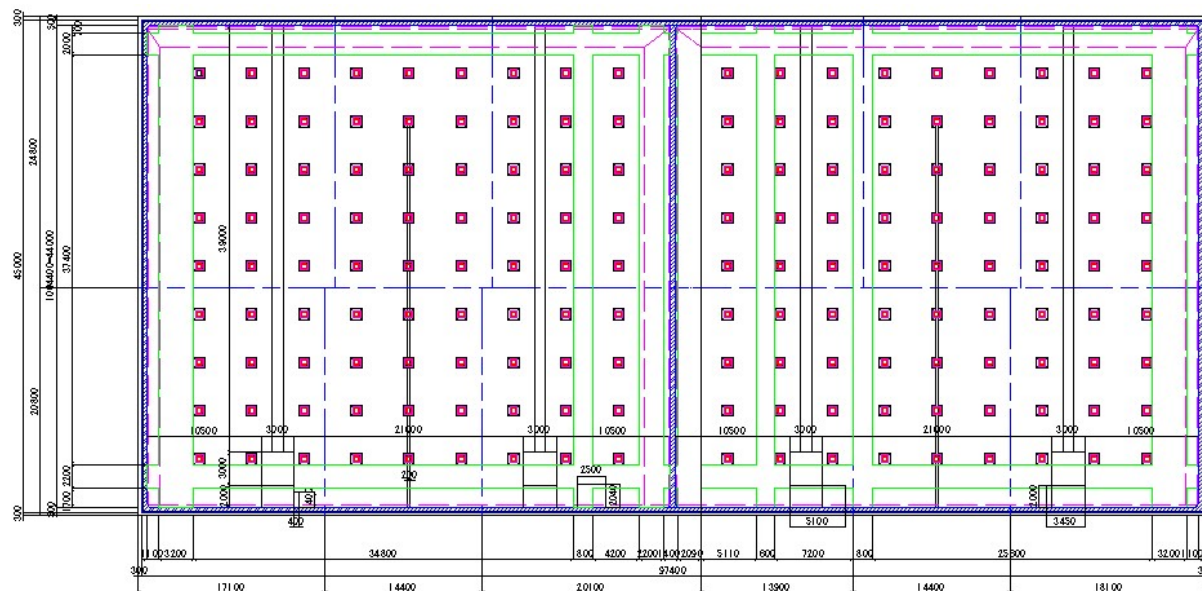


平井工業株式会社

1. 工事概要

- ・工事名・・・平成30年度 [第30-P5422-02号]
静清工業用水道事業 上原配水場 配水池耐震補強工事
- ・工期・・・平成30年11月28日～令和3年8月31日
- ・工事箇所・・・静岡県静岡市清水区上原 地内
- ・発注者・・・静岡県企業局東部事務所長
- ・受注者・・・平井工業株式会社
- ・請負金額・・・544,305,000円
- ・工事内容・・・耐震補強工 1式

コンクリート増厚工 6,716㎡ 他



上原配水池平面図

「静清工業用水道」は、静岡市（旧清水市）静清地区の工場への給水を行う工業用水道管路である。水源は安倍川上流（静岡市門屋）の伏流水であり、管路総延長は46kmに及ぶ。そんな当該管路の歴史は古く、給水の開始は昭和16年にまで遡り、当時から静岡の工業需要を支えていた。

時代が変わり、戦後～高度経済成長期の旧清水市は、清水港を中心に、工業分野において目覚ましい発展を遂げることになる。各種工場の建設ラッシュに伴い、工業用水の需要も急速に高まったことから、昭和38年に「上原配水場配水池」は誕生する。広大な容積を有するこの地下空間は、現在に至るまで各施設への配水を行う重役を担い続けている。

上原配水池は誕生からおよそ60年が経ち、長年にわたり使用され続けてきた鉄筋コンクリート造の躯体の強度の低下や、築造当時よりも厳しい耐震基準に対応するため、大規模な耐震対策を必要としていた。

この工事は、配水池の躯体にせん断補強筋や増厚コンクリートを施工し、耐震性能を飛躍的に向上させることによる、長期的な産業インフラの存続を目的とした工事である。



着手前と完成写真
施設の一部分を撮影した写真だけで、いかに広大な空間であるかが窺える。

2. 配水池の構造

上原配水場は、48.0m×44.0m×有効水深4.8mの鉄筋コンクリート造（フラットスラブ形式）の配水池を2池有しており、2池合わせた有効水量は20,000m³に及ぶ。2つの池は隣接しているが、中央に設けられた中壁によって完全に隔てられている。

今回の耐震補強工事は、この2池が施工範囲となる。

耐震補強概要

底版、側壁

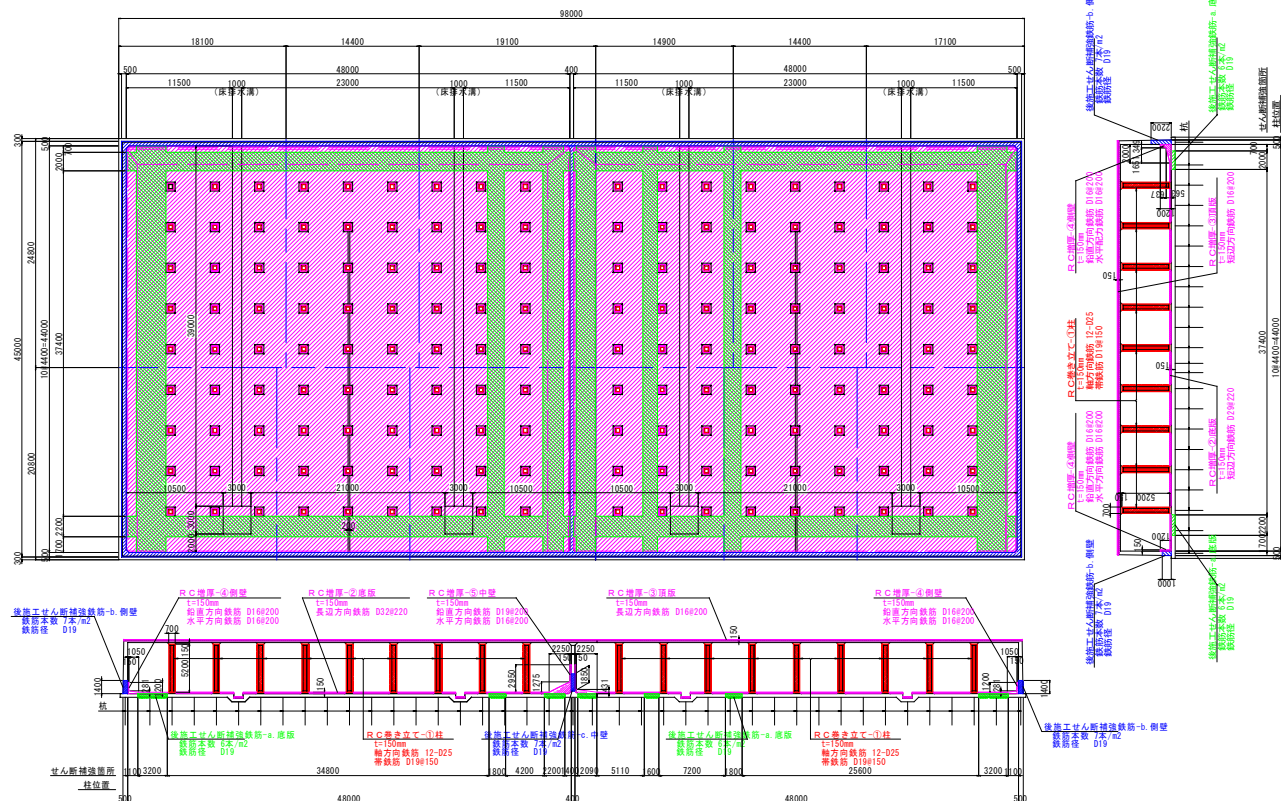


- せん断補強工
- コンクリート増厚工

支柱、頂版



- コンクリート増厚工



3. 本件における技術的課題

耐震補強工事を行う上で、施工計画段階で下記の2つの技術的課題が挙げられた。

- ① 最長50mに及ぶ長距離配管によって打設される増厚コンクリートの品質確保
- ② 頂版部の補強について、頂版上における機械施工の可否

それぞれの課題について、以下のように対策を講じた。

課題① 最長50mに及ぶ長距離配管によって打設される増厚コンクリートの品質確保

①-1 コンクリートの材料分離対策

コンクリート打設方法は、コンクリートポンプ車による打設が計上されており、実際作業も配水池上部にポンプ車を配置し、配水池内部へ配管を延長して打設を行う方法で検討していた。また、支柱に関しては、増厚高さが5m以上あったため、足場の設置や、3段階に分けた打設を計画していた。しかし、配管の高低差が大きいことや、総延長も最高で50m程と長大になることから、圧送途中で材料が分離してしまうことが予想された。

そのため、下記の2点の対策を講じた。

1) 足場の全面ステージ化

ポンプ配管の高低差を最小限に抑えるために、配水池内部全面にフラットなステージ足場を設置した。これにより、搬入口から内部へ降ろした配管を、打設箇所まで水平に延ばすことが可能となった。打設箇所まで50m程の配管距離があっても、ほとんどの距離を水平圧送としたことで、コンクリート打設中の材料分離を低減した。

また、作業員が打設箇所を移る都度、圧送管を持って足場を昇降する必要が無いため、速やかな打設が可能であったことも品質確保に寄与した。



コンクリートポンプ車設置状況



全面ステージ足場



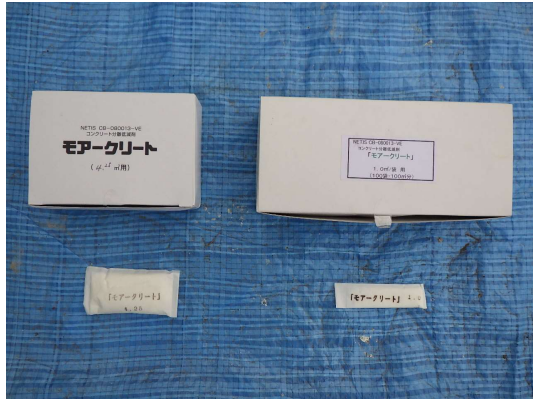
配水池内部の配管



支柱コンクリート打設

2) 材料分離低減剤の使用

コンクリートに材料分離低減剤（モアークリート）を添加することで、圧送途中や型枠内への投入時の材料分離の低減を図った。この添加剤は、下写真のような小袋タイプとなっていて、生コンクリートが現場へ到着した際に、アジテータトラックのミキサー内へ投入し、規定の撹拌を行うことで効果が発揮される。特別な手間を必要としないため、多量の打設を行う場合であっても、作業の進捗に影響を及ぼすことが無く、当工事との相性は非常に良かった。

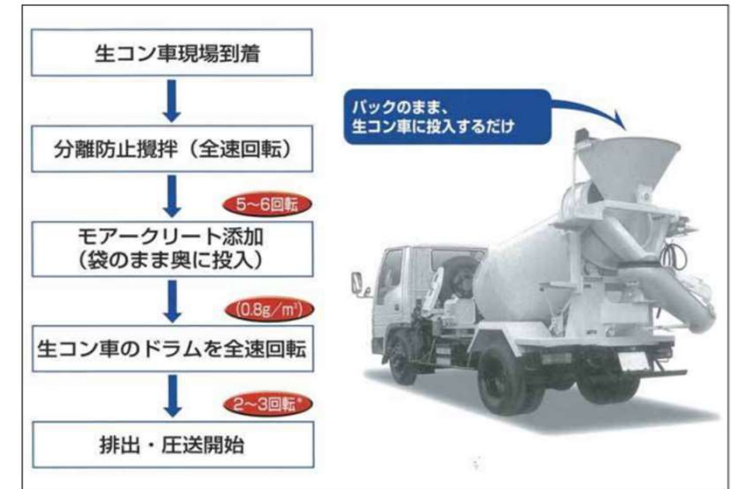


モアークリート

左：4.25m³用 右：1.00m³用

添加量は0.8g/m³と極少量で、大型のアジテータトラック1台（4.25m³）に対しては、写真左側の小袋を1袋投入するだけで済む。打設作業終盤に、コンクリート量を調整して搬入する際は、写真右側の1.00m³用を数量に応じて使用した。

モアークリート添加に際しては、右の図のような規定の撹拌を行う必要があったため、撹拌手順をアジテータトラックの運転手一人一人にプリントして手渡した。現場到着後、打設を行うまでの待機時間中に、モアークリートの投入から撹拌までを実施してもらうことで、滞りなく連続した打設作業を行うことを可能とした。



施工手順（ポンプ打設の場合）



モアークリート投入状況



モアークリート撹拌状況

モアークリートは、材料分離を防止するだけでなく、ブリージング現象の低減によるクラックの発生予防や、ワーカビリティの向上による作業性の改善等の効果も得ることができる。そのため、総合的に見ても、非常に品質の良いコンクリートに仕上げることができた。

支柱コンクリート打設完了

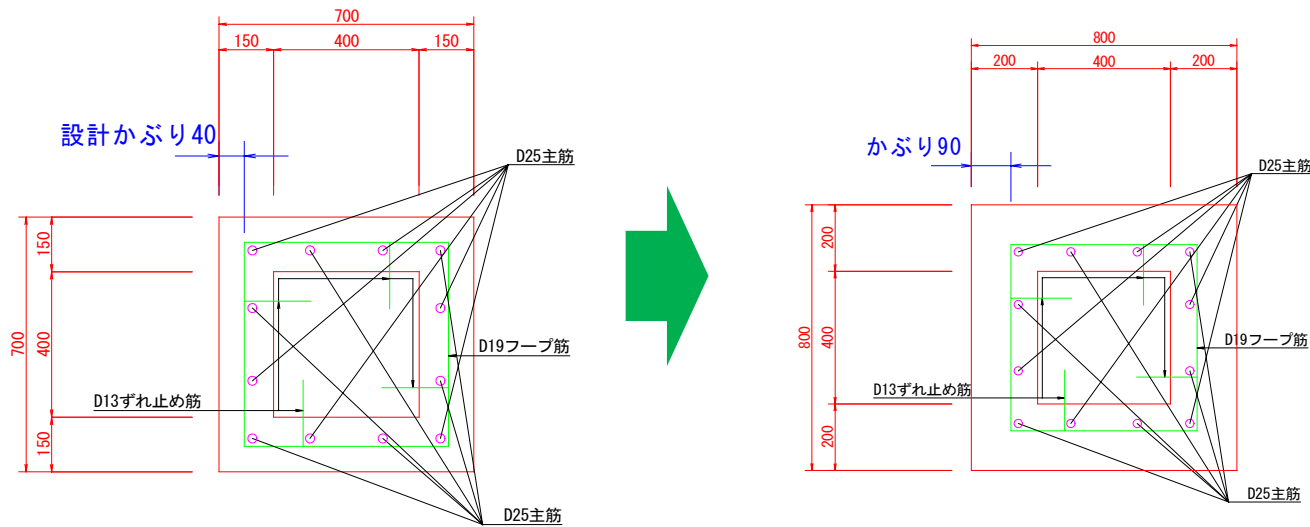


①-2 コンクリートの充填不良対策

今回の工事のように、既設構造物への増厚コンクリート施工を行う場合、鉄筋量に対して増厚が薄い ($t=150\text{mm}$) と、コンクリート打設の際に振動機を型枠内へ上手く挿入することができず、充填不良となる恐れがあった。尚且つ支柱部に関しては、右図のように、3回目の打込み箇所が底版から4.75mと高い位置であり、頂版から50cm程度の隙間に筒先を挿入することから、施工の難易度が高かった。

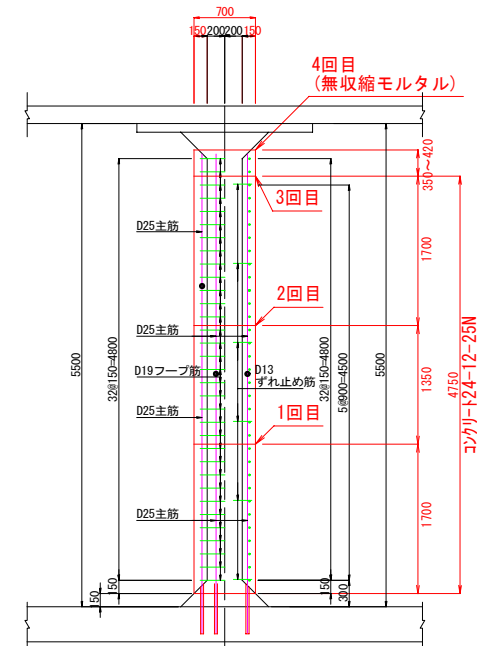
そこで、振動機の挿入幅が十分に確保されるように、発注者と協議を行い、貯水量には影響を及ぼさないことを確認した上で、増厚を $t=150\text{mm}$ から $t=200$ に増大して施工を行った。これにより、打込み高さのある打設であっても、振動機を容易に最下点まで挿入することが可能となり、確実な充填を行うことができた。

また、副次的な要素として、鉄筋かぶりを確実に確保できる効果も得られた。耐震補強工事の特性として、既設構造物に合わせて施工を行わなければならないという点が挙げられる。この事例でいえば、D25主筋を建込む際の既設支柱への削孔位置が、内部の既設配筋の位置によっては、設計位置よりも外側へずらさざるを得ない状況が考えられる。しかし、下図のように増厚寸法を $t=200\text{mm}$ に増大したことで、鉄筋かぶりに余裕が生まれ、予測ができない配筋のずれにも対応することが可能となった。



当初：支柱部コンクリート増厚平面図

変更：支柱部コンクリート増厚平面図



支柱部コンクリート増厚断面図



鉄筋かぶり確保の状況

課題②【設計変更】

頂版部の補強について、頂版上における機械施工の可否

頂版部には右写真のように芝が張られており、その下が $t=400$ 程の土層となっていた。そのため、耐震補強施工に先立ち、土層を掘削し、頂版部を露出させる必要があった。頂版部の施工は、内部の耐震補強が完了してから行う工程であったが、内部補強のみ完了している条件で、頂版部が載荷に耐えられる重機の大きさは、設計段階では判明していなかった。そこで、発注者との協議の上で「三次元シェル要素を用いたFEM解析」を行い、使用可能な重機の選定及び、それを踏まえた頂版部の工程の作成を行うこととした。

②-1 FEM解析による施工機械の選定

1) バックホウ、ダンプトラックの組合せケース

作業量から考慮し、使用する可能性があるバックホウとダンプトラックの組合せを5ケース用意した。また、解析には右図の頂版部解析モデルを使用した。

	油圧ショベル	ダンプ	敷鉄板
case1	0.16 m ³	2 t	なし
case2	0.16 m ³	2 t	①
case3	0.20 m ³	4 t	②
case4	0.28 m ³	4 t	③
case5	0.45 m ³	4 t	③

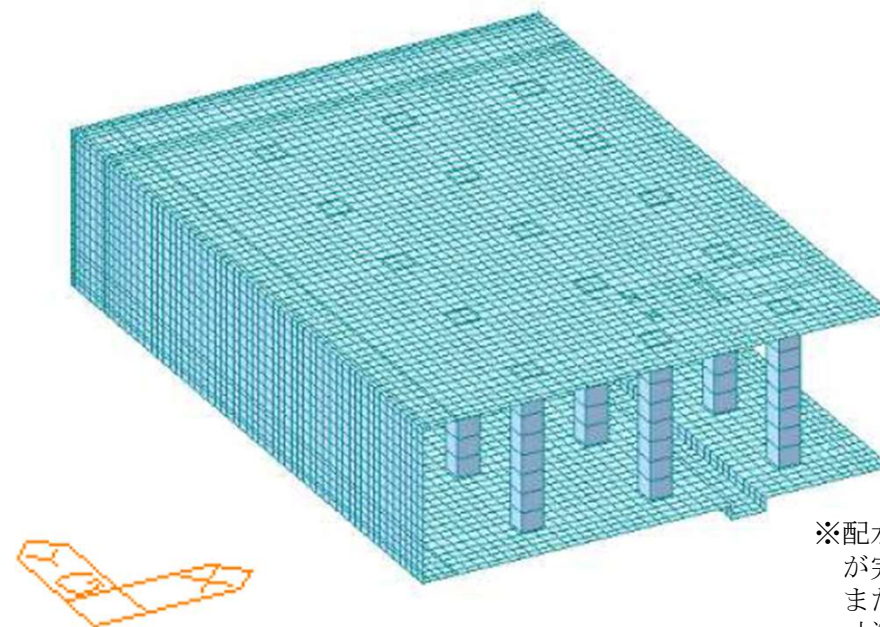
バックホウとダンプトラックの組合せケース

	厚さ×幅×長さ (mm)	質量 (kg)
①	22×1,219×2,438	513
②	22×1,524×3,048	802
③	22×1,524×6,049	1,604

敷鉄板寸法、質量



頂版部の芝及び土層



頂版部解析モデル

※配水池内部の補強が完了した状態。また、支柱の増厚寸法は $t=200$ mmとしている。

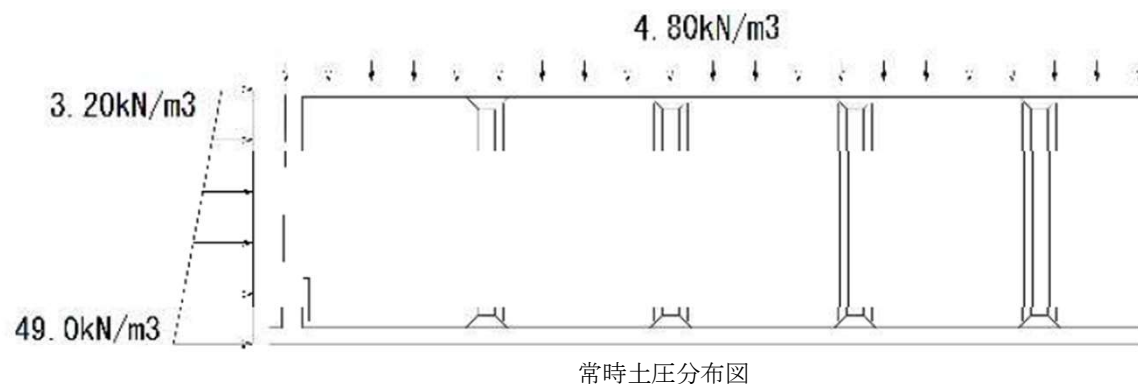
2) 荷重条件

頂版部に掛かる総合的な荷重の算定式は下記の通りである。

$$\text{総合荷重} = \text{常時土圧} + \text{移動荷重}$$

常時土圧は、施工機械の大きさにかかわらず、常に頂版が受けている決まった大きさの土圧である。対して移動荷重（機械荷重）は、各ケース毎の機械の組み合わせ、荷重を受ける頂版の部位によって変動する流動的な荷重である。

常時土圧の分布を右図に示す。また、case2の機械の組合せを参考にした、移動荷重の例を下表に示す。



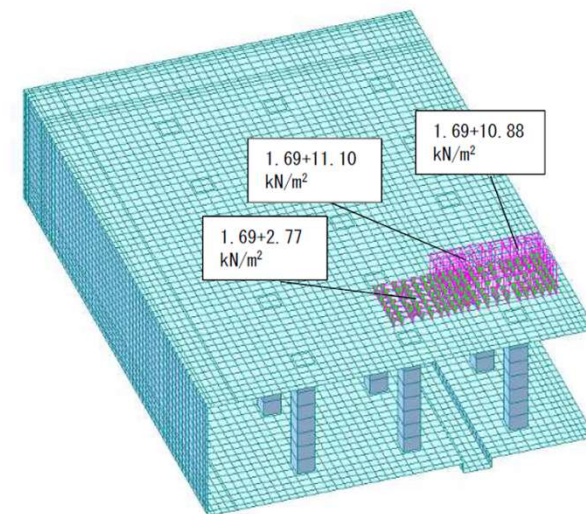
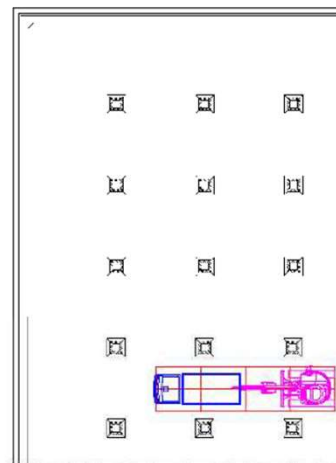
	車両重量 (kg)	運転手 (kg)	積載物 (kg)	総重量		敷鉄板		衝撃荷重	敷鉄板にかかる 接地圧（前輪側） (kN/m²: 1枚当たり)	敷鉄板にかかる 接地圧（後輪側） (kN/m²: 1枚当たり)
				(kg)	(kN)	幅 (m)	長さ (m)			
2tダンプ	4960	55	2000	7015	68.7	1.22	2.44	1.2	2.77	11.10

	運転手 (kg)	積載物			機械重量		総重量 (kN)	敷鉄板		衝撃荷重	敷鉄板にかかる 接地圧（油圧ショベル） (kN/m²: 1枚当たり)
		単位体積重量 (kN/m³)	バケット容量 (m³)	重量 (kN)	(kg)	(kN)		幅 (m)	長さ (m)		
0.16油圧ショベル	55	18	0.16	2.88	5200	51.0	53.9	1.22	2.44	1.2	10.88

敷鉄板	質量	幅	長さ	接地圧
	(kg)	(m)	(m)	(kN/m²)
① 22*4*8	513	1.219	2.438	1.69

移動荷重の例（case2の場合）

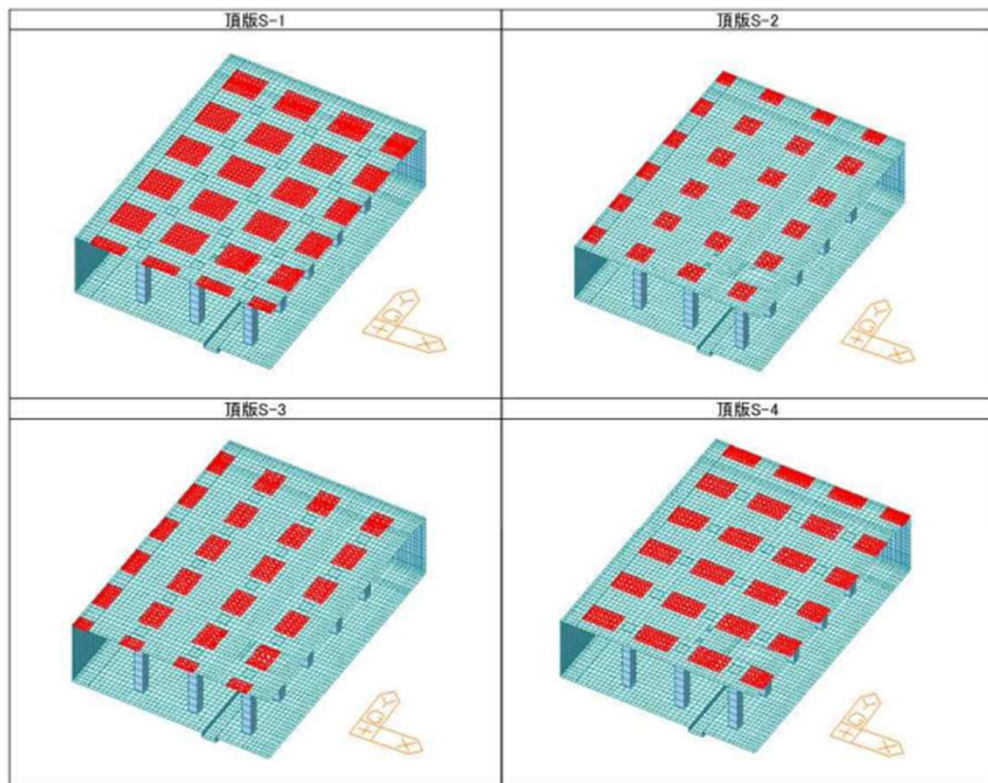
(2) case2



荷重位置の例（case2の場合）

3) 照査位置の詳細

配水池内部の支柱の位置や頂版の厚さ、配筋状況によって、頂版部の耐力が変わってくるため、同様の耐力を持つ部位毎に4パターン(S-1～S-4)に分けて、解析を行った。下図の赤く表示している部位が、パターン毎に荷重を受ける部位を示している。



部位パターン図

4) 解析結果

下表が解析を行った結果である。

case1～case3までは、頂版のいずれの部位であっても該当機械の荷重を加えることが可能であったが、case4及びcase5に関しては、部分的にNG箇所が存在することが判明した。

よって、頂版部の施工を行う際に、使用することが可能な機械の最大の組合せは0.20m³バックホウ+4tダンプトラックということになる。

	判定	NG部位
case1	○	無し
case2	○	無し
case3	○	無し
case4	NG	s-2・s-3
case5	NG	s-2・s-3

使用可能な最大の組合せ
0.20m³バックホウ
 +
4tダンプトラック

以上の結果から、施工に必要な日数を算出すると下記のようになる。

掘削土量	・・・1,740m ³
4tダンパー車の積載量	・・・2.5m ³
1車積み込み、搬出、戻りにかかる時間	・・・1時間
1車/日の搬出量	・・・2.5m ³ ×8回=20m ³
使用可能なダンプトラック台数	・・・4台
1日の搬出土量合計	・・・20m ³ ×4台=80m ³
掘削、搬出に必要な日数	・・・1,740m ³ ÷80m ³ =21.75日≒ 22日

天候等の影響を考慮すると、頂版部を露出させるだけで、約1ヶ月を要する工程となり、土量に対する作業効率が悪いだけでなく、その後の作業に大幅な遅れが生じることが予想される結果となった。

②-2 FEM解析による頂版部補強の再解析

これまでの施工の中で様々な協議と設計変更を行い、支柱の増厚寸法のみならず、柱の延伸、底版や取合い部の鉄筋量の増加など、補強のグレードアップを図ることができた。また②-1の検討の際にも、当初計画と比べ全体的な耐震性能が高まっていることが判明した。下部構造のせん断破壊抵抗性が向上していれば、頂版の増厚補強の軽減が可能となる。頂版部の荷重の低減は、地震時の躯体への負荷低減にも繋がる。

このように頂版部の補強を当初よりも簡易的な形へ変更し、施工量を減量することで、工程短縮とコスト削減を実現する可能性が見出された。これにより、支柱部の増強など変更した躯体形状についての「**地盤-構造物連成二次元FEM解析**」を行い、構造物の耐震性能の再解析を行った。

1) 主要な解析条件

当該配水池の規模、立地等を考慮し「施設重要度区分」は**ランクA1**に設定した。

ランクA1 → 代替施設が存在しない、重大な二次災害が生じる恐れが高いもの

また、再解析を行う上で設定した目標耐震性能は、以下の通りである。

- ・ レベル1地震動耐震性能・・・耐震性能Ⅰ（無害又はひび割れるが漏水は無い）
- ・ レベル2地震動耐震性能・・・耐震性能Ⅱ（軽微な漏水はあるが早期に修復可能）

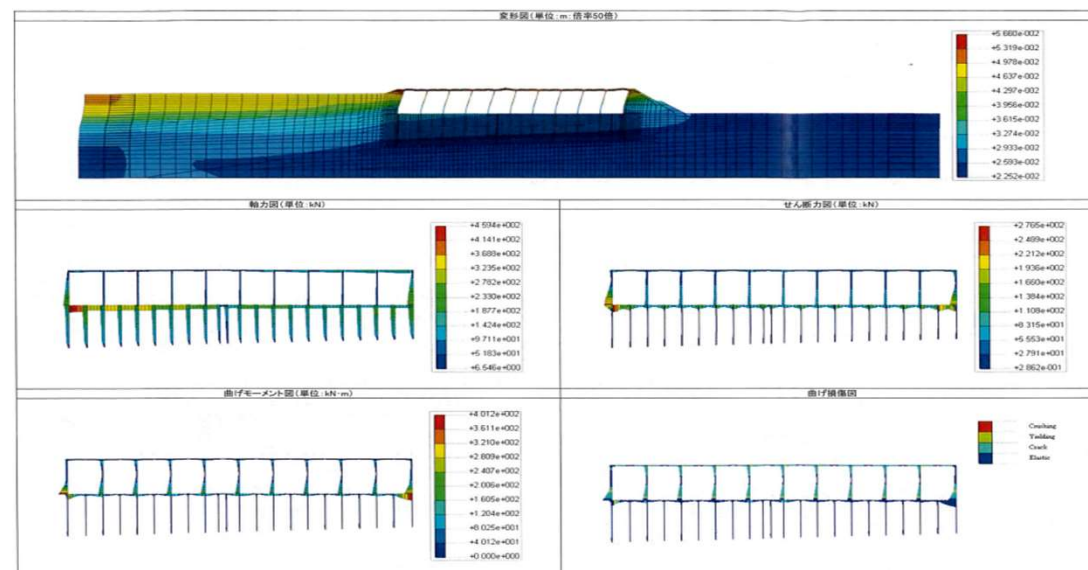
2) 解析結果

解析を行ったところ、**頂版部が未施工の状態、レベル1地震時、レベル2地震時ともに耐力を満足している**ことが判明した。

ひとえに支柱部の増厚を増強したことに起因する診断結果であったが、再解析結果を基に発注者と協議を行い、頂版部については耐震補強施工を行う必要が無いとの結論に至った。

頂版部施工の工程では、施工機械の選定及び頂版部補強に関する再解析業務の時間を必要としたが、工事を施工しない分、半年以上の工期短縮を実現した。またコストにおいても、解析費用は掛かったもののトータルコストの大きな削減を達成した。

また、使用可能な施工機械を選定するために行った解析結果のデータは、今後の施設の維持修繕に活用してもらおう、発注者に納品した。



解析結果一覧（レベル2地震動の場合）

4. 課題への対策結果について

それぞれの課題への対策結果をまとめると右表のようになる。

どちらの項目の対策も設計変更を伴うものであったため、日々の現場管理業務をこなしつつ、これらの変更に係る調査や資料作成を行うことは、非常に負担の大きいものであった。

しかしながら、どれも工程の短縮や、構造物の品質の向上等の重点要素に直結するものであったことを考えれば、十分に有益な対策が行えたといえる。

	課題	対策
①	長距離配管によって打設される増厚コンクリートの品質確保	<ul style="list-style-type: none"> ・全面ステージ足場の設置 ・分離低減剤の使用 ・増厚寸法の変更
②	頂版部の補強について、頂版上における機械施工の可否	<ul style="list-style-type: none"> ・再解析による機械、補強方法の検討

5. 今後の維持管理のために…

着工前と完成時に、SLAM技術を搭載したレーザースキャナーで配水池内部をスキャンして、出来形の可視化を図った。この技術は、当社が平成30年度産学共同研究委託事業において、精度検証に取り組んでいたものであり、その実用性も確認されている。

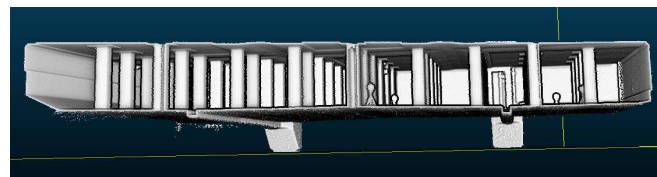
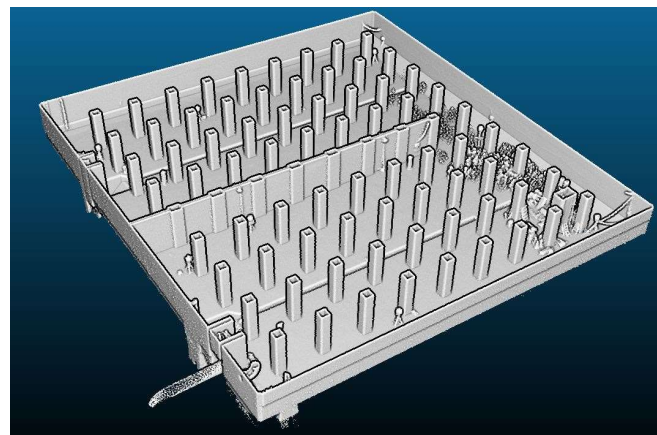
GPSを必要としないこの技術は、定置型レーザースキャナーと違い、スキャナーを持って場内を歩くだけで、複雑な配水池内部の状態を3次元点群データとして捉えることができる。

普段は貯水されているため、内部を確認することが容易ではないこの施設の構造も、3次元のデータにすることで、いつでも電子機器上で確認することができる。

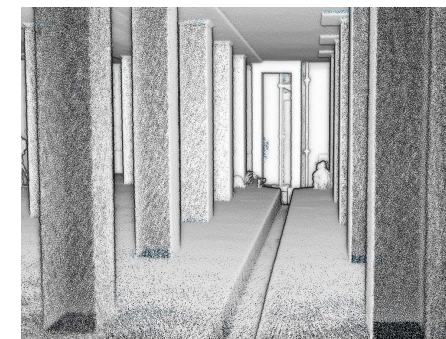
このデータは、今後の施設維持管理に活用できるものである。



左：レーザースキャン状況 右：レーザースキャナー



レーザースキャナーにより作成した3次元点群データ



10分程度の作業で配水池内全体をスキャンできた。3次元点群データであるため、写真のように任意の角度、視点、大きさと内部の構造を確認することができる。

今後増加するであろう維持管理工事において、活躍の場が見込まれる技術である。

6. おわりに

冒頭の略述にもあるが、「上原配水場配水池」は築造から約60年が経過した構造物であり、当時その築造に携わった先人たちは、おそらくほとんどが現役を退いているか、既に故人であろう。それほどまでに長い年月を経ているにもかかわらず、工事を進めていると、度々当時の築造風景の一片が垣間見られることがある。それらは土木技術者として非常に興味を引き付けられると同時に、往々にして同情に似た感情を抱くものである。先人たちの苦悩の痕跡を見つける度に、理想と実情の間で煩悶する技術者の姿は、もはや脈々とした伝統のように受け継がれているものなのだろうと確信していた。

今回課題として挙げた内容は、そんな「苦悩」の一角に過ぎず、大抵はどんな工事でも大なり小なり枚挙に暇がない程発生する。無論この工事においても、思い返せばほぼ連日のように心労にさらされていた気がする。もっともそれは私自身の経験や力量不足を原因としたものも多かったはずだが、とにかく寝つきの悪い夜は多かった。

しかしながら、「苦悩」を一つ一つの確に対処することで、逆にそれらが「功績」へと変貌を遂げていく様は、実に痛快であり、施工管理のそんな一面に魅了された技術者は、決して少なくはないはずである。今回の耐震補強工事のように、既に完成された構造物に手を加えるという行為は、想像以上に融通が利かないものである。それ故に設計を根底から覆さなければならないような状況もあったが、そんな困難に直面しても「功績」を得るチャンスと捉えることで、自身の技術力を進歩させる好機となるのではないだろうか。

日進月歩の土木技術に遅れをとらないためにも、進んで「苦悩」を受け入れ、またそれを「功績」として自らの糧とする。堅実ながらも前衛的な、そんな技術者の姿に近づきたい。

