

バイブレータ位置特定技術の開発と現場実証結果の報告

東急建設(株)	正会員	○作田	大幸
東急建設(株)	正会員	金子	龍之介
東急建設(株)	正会員	鎌田	美佳
東急建設(株)	正会員	前田	欣昌

1. はじめに

生コンクリート打設において、バイブレータが正しい位置および深さで使用されていない場合、締固め不足によるジャンカや打重ね位置のコールドジョイントなどの品質不良が生じる恐れがある。特に作業高さが高いほど、コンクリート内に挿入するバイブレータが必要な深さに達しているかを正確に判断することは難しい。このような締固め不足による品質不良を抑制することを目的として、バイブレータ締固めの平面位置および深さをリアルタイムに計測し、その位置をタブレット等で3次元的に表示、確認する方法を開発した(写真-1 参照)。本稿では、技術の概要としてバイブレータ位置特定方法や締固め管理および打重ね管理方法の説明、および実際の現場で実証実験を行った結果を報告する。



写真-1 バイブレータ位置計測システム

2. 開発技術の概要

本技術の概要を以下の3つに分類し、次節以降に詳細を説明する。

- ① バイブレータ位置、コンクリート面の3次元座標の取得
- ② コンクリート締固め完了範囲のモニター表示
- ③ コンクリート締固め後における時間経過のモニター表示

(1) バイブレータ位置、コンクリート面の3次元座標の取得

バイブレータの締固め位置を特定する方法として、a) バイブレータ位置計測用のモーションキャプチャカメラとマーカー、およびb) コンクリート打設面計測用のレーザー距離計を用いた計測システムを開発した。バイブレータ位置計測状況の全体図を図-1に、計測システムの構成を図-2に示す。図-1のように打設範囲の周囲にモーションキャプチャカメラ3台以上を死角なく設置し、さらに球形のマーカーを装着した計測システムをバイブレータのホースに取り付けることで、コンクリート締固め時にマーカーをモーションキャプチャカメラが視認してマーカーの3次元座標を取得するものである。ここで、3次元座標とは型枠のある点を原点に設定した時の相対座標を示す。

バイブレータ位置およびコンクリート面の計測方法を示した概略図を図-3に示す。予め計測システムを取り付けるホースの位置からバイブレータ先端までの距離Aを測っておき、マーカーで取得した座標からAだけ下がった箇所をバイブレータの先端位置として計測することができる。コンクリート面は、計測システムに

キーワード バイブレータ、位置計測、モーションキャプチャ、締固め管理、打重ね管理

連絡先 〒150-8340 東京都渋谷区渋谷1-16-14 東急建設(株) 土木技術部 TEL03-5466-5274

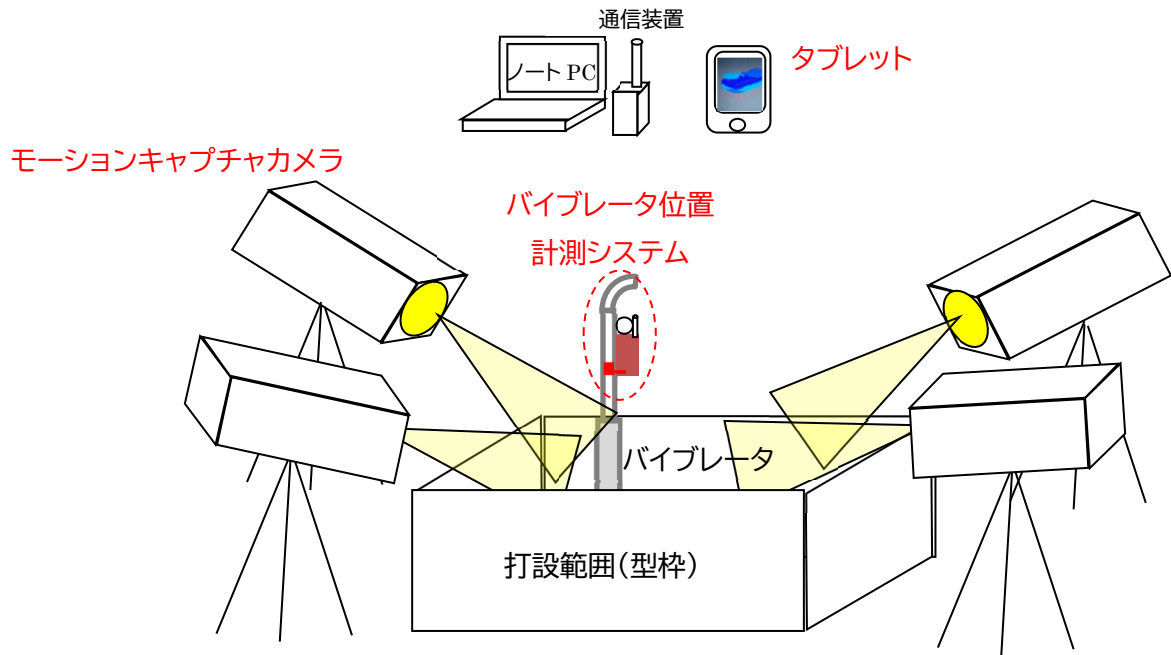


図-1 パイプレータ位置計測状況の全体図

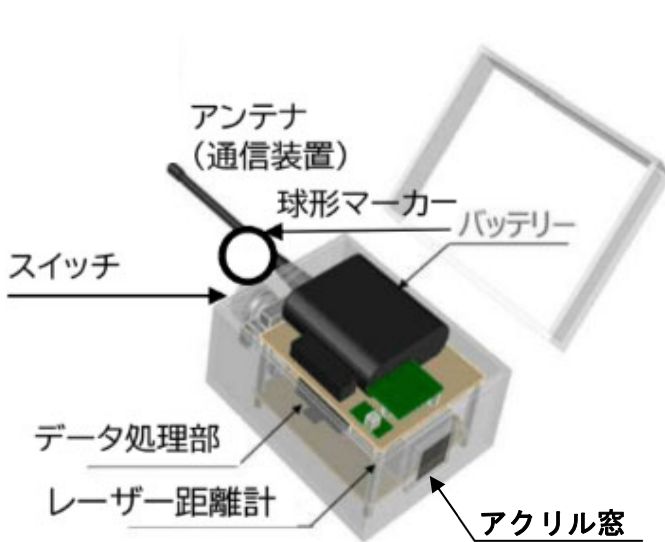


図-2 パイプレータ位置計測システムの構成

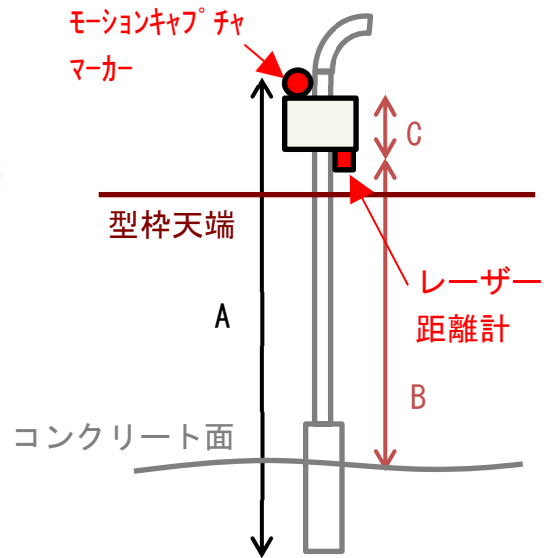


図-3 パイプレータ位置、コンクリート面の計測方法

搭載されているレーザー距離計によりコンクリート面までの下がり量 B を計測することで、コンクリートの打設面の位置を取得することができる。上記の方法で取得したパイプレータ位置、およびコンクリート面の3次元座標データはリアルタイムにPCへ送信、解析されタブレット等のモニターに表示されるようになる。

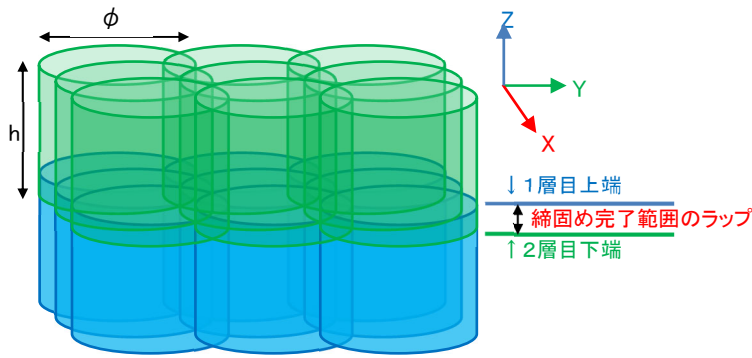


図-4 締固め完了範囲のイメージ図(俯瞰表示例)

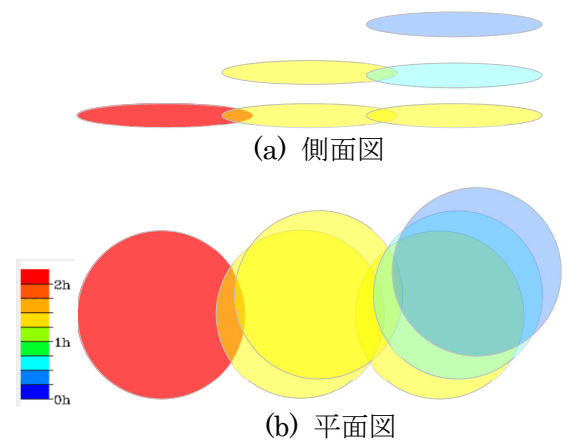


図-5 打重ね管理のイメージ図

(2) コンクリート締固め完了範囲のモニター表示

締固め完了範囲のモニター表示のイメージ図を図-4に示す。モニター表示はいずれもX正面、Y正面、Z正面、および俯瞰表示に変更可能である。締固め完了範囲は図に示すように、バイブレータの締固め位置を基準に有効な締固め直径 ϕ 、締固め高さ h を円柱体（例えば $\phi = 50 \text{ cm} \times h = 50 \text{ cm}$ ）で表示する。締固め完了の判断の流れとしては、所定の位置で締固めを開始して、予め設定した締固め時間（例えば10秒）を、座標誤差水平15cm鉛直10cm以内に収まっている場合に締固め完了と判断されるように設定した。締固め完了範囲は打設リフトごとに異なる色相で、かつ半透明に透過表示される。これにより、打設リフト間の締固め完了範囲のラップによる連続性を一目で確認でき、締固め不良を防止することができる。

(3) コンクリート締固め後における時間経過のモニター表示

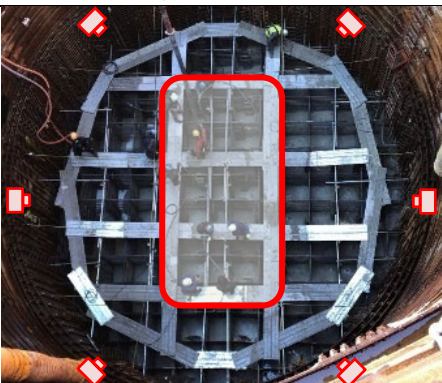


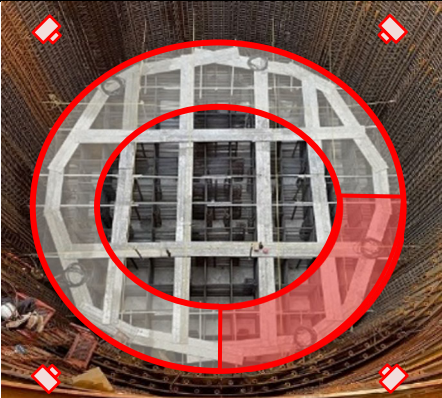


打重ね管理のモニター表示によるイメージ図を図-5に示す。打重ね管理画面では、締固め完了と判断されたコンクリート打設面を円形で表示し、締固め完了直後は青色で表示される。その後、時間経過とともに寒色系から徐々に暖色系に色が変わり、許容打重ね時間となる2時間を超過すると赤色で示すようになる。時間経過によって色が変わっている箇所の上に新規のコンクリートが締固められると色の変化が停止する。この円形の締固め範囲が許容打重ね時間を超過する赤色で表示されなければ、許容時間内に打ち重ねられていることを示す。実際の打設時では、暖色系に色が変わったら許容打重ね時間を超過する警告であり、当該箇所を優先して打ち重ねることで品質不良を防止することができる。

3. 大口径深礎での実証実験

(1) 実験概要

計測システムの実用化に向けて抽出した課題を検証するため、大口径深礎を対象に実証実験を実施した。対象の深礎基礎の直径は14m、打設高さは2mで、50cmを4層に分けて打設した。実証実験は日にちを分けて2回行っており、1回目の実験結果をもとに2回目の実験内容を修正した。1回目と2回目の実験内容の比較を表-1に示す。1回目は使用カメラとしてPrimeX13（アキュイティー株、視認距離12.2m）計6台を、打設範囲全体を俯瞰で見下ろすように設置し、マーカータイプは球体マーカーを使用した。この条件でデータの取得可否を事前に確認したところ、外周部にてマーカーの検知が難しい箇所が確認されたことから、1回目の実験では中央部を対象に計測を行った。2回目の実験では外周部での計測が可能となるように、より視認距離の長いPrimeX41（視認距離40m）計4台に変更、および自発光タイプのマーカーに変更して計測を行った。自発光マーカーは自ら赤外線を照射しそれをモーションキャプチャカメラが視認するため、球体マーカーよりも認識されやすい特徴がある。

表-1 対象エリア，使用カメラ，およびマーカの比較

	計測範囲	対象エリア，およびカメラ配置	使用カメラ	使用マーカ
1 回 目	大口径深礎 中央部		PrimeX13×6台  視認距離12.2m	・球体マーカ 
2 回 目	大口径深礎 外周の一部		PrimeX41×4台  視認距離40m	・自発光マーカ 

(2) 実験結果

実証実験で計測した結果を図-6～図-9に示す。図-6、図-8に表示されている円柱体のサイズは、実際に使用されたパイプレータの振動部φ43のサイズを基に、半径φ=430 mm、高さh=396 mmと設定している。

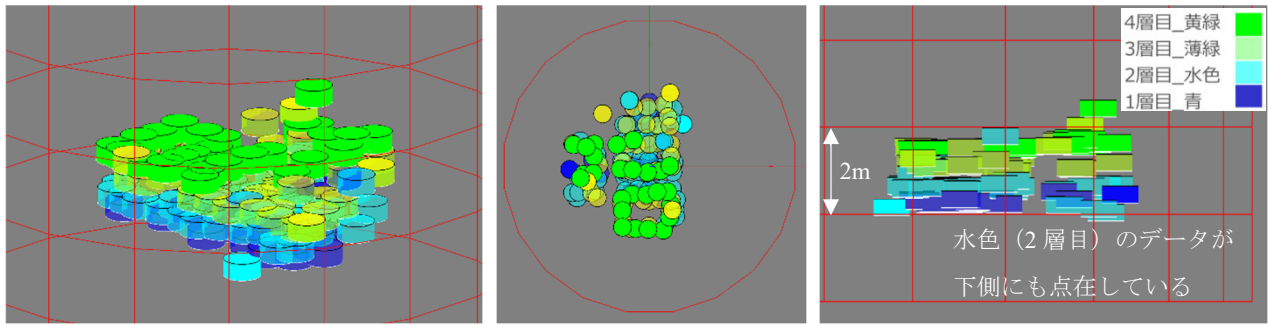
図-6の1回目の締固め管理結果より、基本的には下から順番に1層目～4層目で色分けされた円柱体が並んでいるものの、主に2層目（水色）の円柱体は1層目より下にも点在している。これは、1層目、2層目、3層目と打設層が上がるごとにAの値が変化し、その値を都度Aの値を再入力する必要があるが、1層目から2層目に切り替わる際にその再入力を失念してしまったためである。それ以外で明らかに高い位置にある円柱体は、まれに太陽光による反射体をマーカと誤認するケースがありその影響と考えられる。

図-7の1回目の打重ね管理結果では、図中右に表示しているコンターの凡例のように、概ね1h～1.5hの範囲で表示されている。なお4層目の最上層についてはそれ以降打ち重ねられることはないため、2h超えの赤色で表示されている。ここで4層目より上側に円形が多数推移しているが、これはレーザー距離計のレーザーが透過されるアクリル窓がコンクリートで汚れていたことにより、コンクリート打設面までの距離が実際よりも近い位置にあると誤認識されたもので、その影響が反映されたものと考えられる。

締固め管理、打重ね管理それぞれに生じた課題を整理すると以下のとおりである。

- ・打設層ごとの高さ設定の変更し忘れにより、円柱体が表示される高さがずれる
- ・太陽光による反射体をマーカと誤認することにより、別の場所に円柱体が表示される
- ・レーザー距離計のアクリル窓に汚れが付着することにより、打設面が実際より高い位置に表示される

2回目の実証実験では1回目で得られた課題に対して可能な限り対策を講じたうえで実験を行った。1回目の実証実験で得られた課題と2回目に行った対策の一覧を表-2に示す。

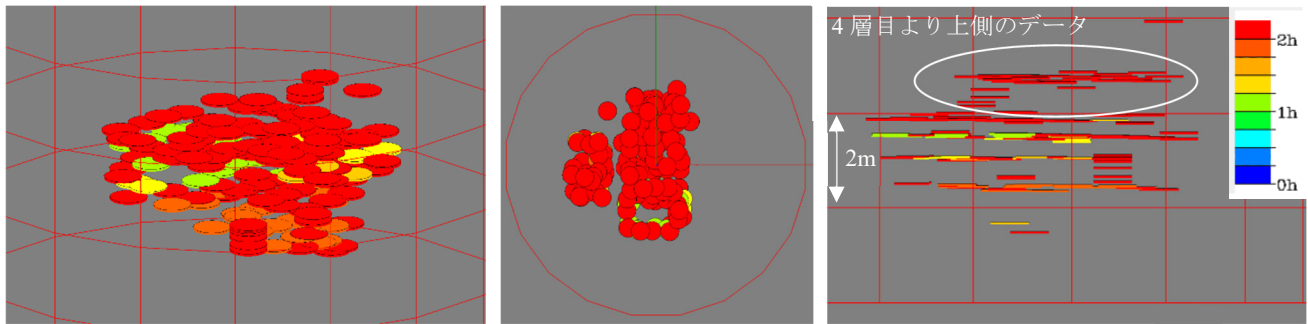


(a) 俯瞰図

(b) 平面図

(c)側面図

図-6 締固め管理結果 (1回目)

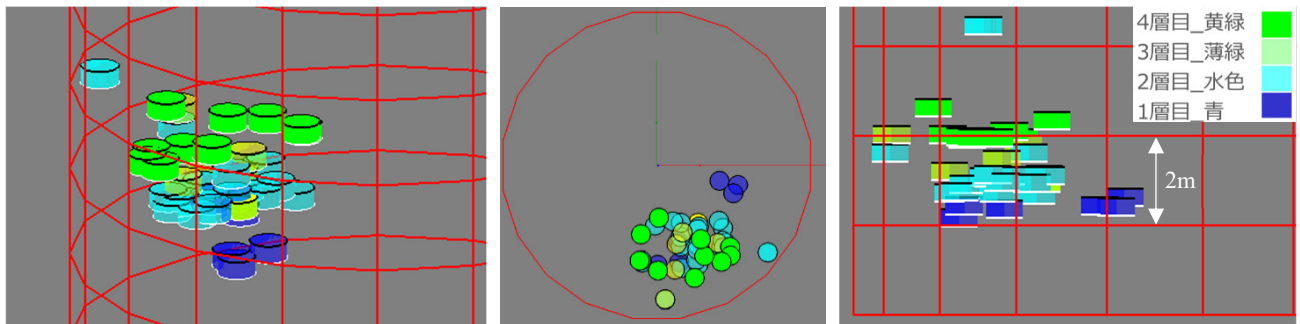


(a) 俯瞰図

(b) 平面図

(c)側面図

図-7 打重ね管理結果 (1回目)

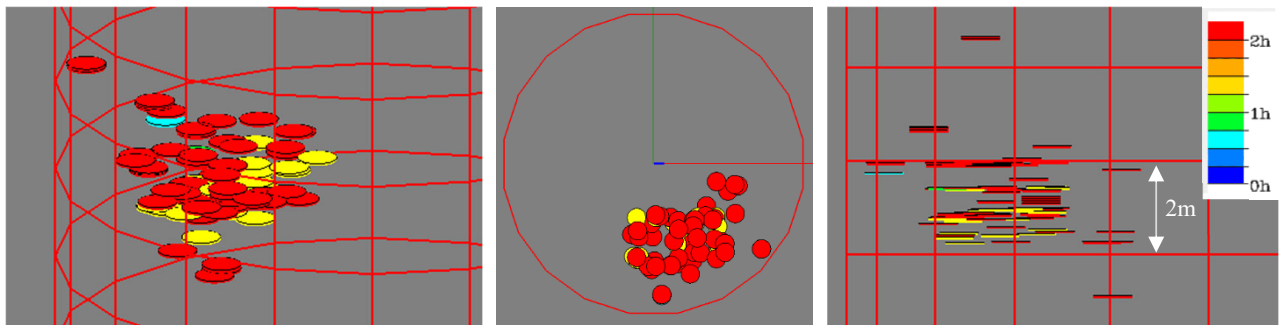


(a) 俯瞰図

(b) 平面図

(c)側面図

図-8 締固め管理結果 (2回目)



(a) 俯瞰図

(b) 平面図

(c)側面図

図-9 打重ね管理結果 (2回目)

表-2 1回目の課題と2回目の対策および効果

No.	1回目の課題	課題の詳細	2回目の対策	対策の効果
1	カメラのスペックとマーカーの組合せ	外周でマーカーが視認できない	カメラの種類 マーカータイプ変更	外周部にて視認可能
2	計測システム 取付位置の設定	打設層ごとの取付位置の設定変更し忘れ	打設層ごとのチェック	不具合の解消
3	レーザー距離計	計測距離にエラーが生じる アクリル窓の汚れ (距離が短く計測される)	打設中こまめに清掃	目立って短い計測結果はなし
4	マーカーの誤認識	太陽光による反射物の影響でマーカーを特定できない	—	—

図-8による2回目の締固め管理結果では、一部水色の円柱体が突出しているものの、全体的には1層目～4層目の下から順番に締め固められている。ここで、同じ打設層でも円柱体の高さにはばらつきがあるのは、作業員のバイブレータの挿入深さが一定でないためと考えられる。

図-9による2回目の打重ね管理結果では、4層目以外の中間層で主に黄色の円形が存在しており、実際の打設時間も概ね1時間から1.5時間で打ち重ねていることからデータとの整合性が取れている。1回目の課題に対する対策として打設層ごとの高さ設定を確認しながら計測を行うことで、1回目の打重ね管理結果と比べると比較的赤色が少ないデータが得られた。

4. 技術の改良

大口径深礎の実証実験を経て計測システムの更なる改良として以下2点の改良を行った。

(1) 作業支援ツールの追加

計測機器にLEDランプを追加し、計測時の条件によって以下3種類の色で点灯させる機能を追加した。

- ①赤色：遮蔽物によりカメラがマーカーを視認できないケース
- ②橙色：バイブレータが動いて許容範囲外に移動したケース
- ③緑色：①②の問題が発生せずに締固め時間が経過したケース

LEDランプ点灯により状況を通知することで、マーカーを視認できていないなど計測時のエラーを減らすことができ、また緑色の締固め完了の合図を点灯させることで作業者が次の締固め箇所へ移動するための判断がしやすくなる。



図-10 LEDランプの追加

(2) 計測システムのサイズ縮小

よりコンパクトで軽量となるように、ケースの寸法：幅128mm×高さ148mm×奥行き88mmから幅を108mmに縮小した他、アンテナを内部に収納してより取り扱い易くするようにケースを改良した。

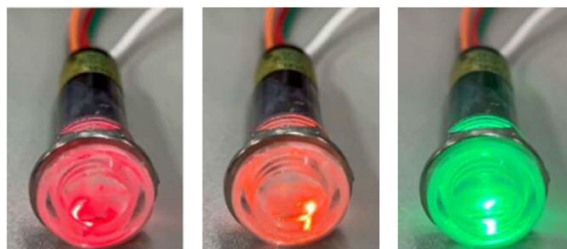


図-11 ランプの点灯状態(左から赤、橙、緑)

5. U型擁壁での実証実験

(1) 実験概要

新たに追加した機能の実証と、計測を行った構造物の使用実績を増やすため、U型擁壁の壁部を対象に実証実験を実施した。構造物の一般図を図-12に示す。壁厚400mm、延長13.25m、高さは最大2.8mで天端は一部勾配が付いており、打設リフトは6層（5層×50cm+30cm）で施工を行った。図-12(a)平面図にカメラの設置位置を示しており、使用カメラはPrimeX13×1台とPrimeX41×2台を左右それぞれに計6台とした。使用するマーカーは自発光マーカーとした。

(2) 実験結果

実験結果の締固め管理図を図-13に、打重ね管理図を図-14に示す。表示されている円柱体は半径 $\phi=500\text{mm}$ 、高さ $h=500\text{mm}$ である。図-13の締固め管理結果より、1層目の青色から6層目の黄色まで、大きなばらつきもなく下からほぼ均等に円柱体の締固め範囲データを取得できていることが分かる。一方で計測データの分布に着目すると、計測できている箇所は壁の両端部で多く、中央より右側はデータが一部抜けている箇所がある。これは、壁の両端部より外側にそれぞれカメラ設置していたため、カメラから遠い中央部分ではマーカーの視認が不利であったことが考えられる。事前確認では壁中央位置の計測は確認できていたが、図-15に示すような中央位置を超える状況では、左側カメラからは距離が遠く右側カメラからは作業員が死角となり視界が悪いという条件から、マーカーがさらに視認されづらい状況であった。LEDランプを追加したものの、マーカーが認識できていないという理由で打設時の時間的制約がある中で作業をやり直すことが難しいことから、一部計測データに空白箇所がある結果となった。中央右側の空白箇所以外にもデータが抜けている箇所がいくつかあるが、これは晴天時にマーカー以外の反射体を誤認しマーカーが判別できない状況があったためである。

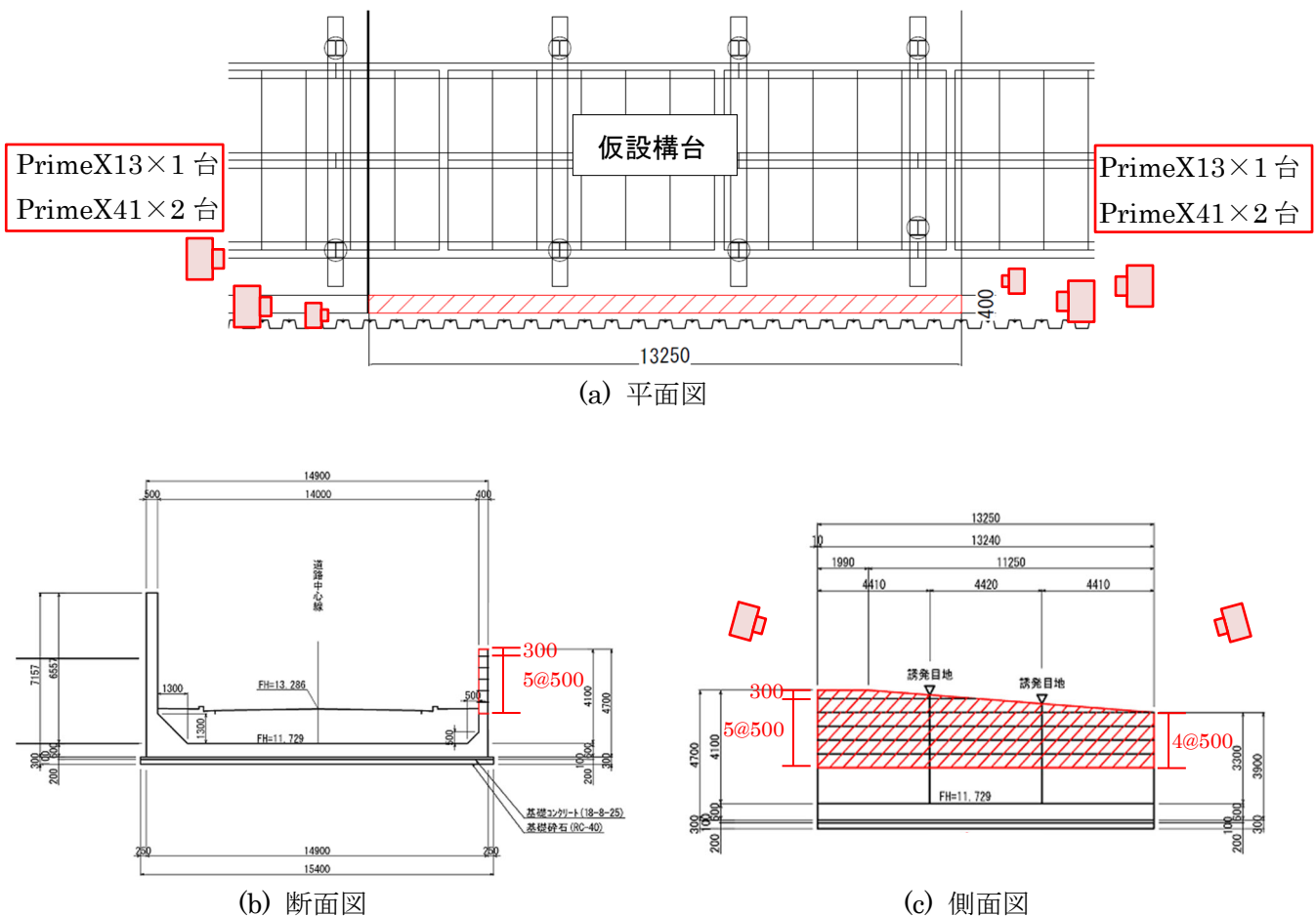


図-12 構造一般図・打設リフト

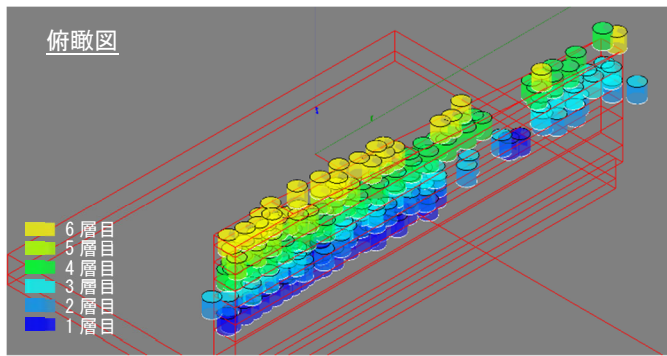


図-13 締固め管理結果

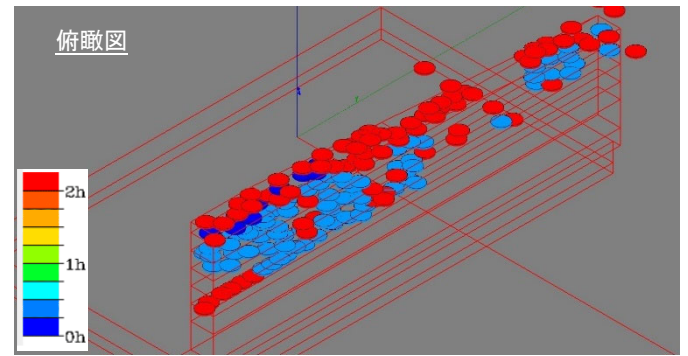


図-14 打重ね管理結果

図-14の打重ね管理結果より、一部で上下の打重ねのデータが取れていない箇所では赤色で表示されているものの、全体的には水色もしくは青色で表示されている。実際の1層当りの打設時間も20~30分程度だったことからデータの時間経過との整合性が取れていることがわかる。

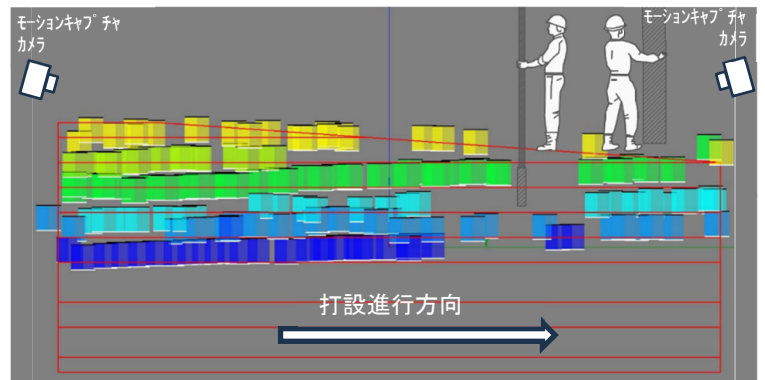


図-15 打設状況

6. まとめ

本稿では、バイブレータ位置特定技術の開発の概要と2箇所の実現場での実証実験で得られた計測結果の課題や対策を報告した。大口径深礎の実証実験結果で生じた不具合の課題に対して技術の改良を重ね、U型擁壁ではより不具合の少ないデータを取得でき、バイブレータ締固め管理に対する本技術の有効性を示すことができた。それでも100%のデータ取得は難しく、前章で述べたカメラ配置の問題や、日光による反射物もカメラに影響を与えることから、今後はこれらの問題点に対する改良を進めていきたい。

謝辞

本技術の開発にあたり計測リサーチコンサルタント(株)様には多大なるご協力を賜りましたこと、この場を借りて深く御礼申し上げます。