

ニューマチックケーソン工法を用いた橋梁下部工事のJR近接施工について

上田 健人¹

¹近畿地方整備局 福知山河川国道事務所 工務第二課

(〒620-0875 京都府福知山市字堀小字今岡2459-14)

国道27号西舞鶴道路は、舞鶴市上安と舞鶴市京田を結ぶ約4.9kmの幹線道路で、舞鶴市西地区の交通渋滞の緩和や京都舞鶴港と舞鶴若狭自動車道とのアクセス改善を図ること等を目的とした道路である。当工事はこの国道27号西舞鶴道路事業のうち、JR舞鶴線に近接橋梁下部工築造工事であり、ニューマチックケーソン工法により施工している。本論文では、軌道近接施工時の検討から施工中の計測方法や、新技術として試行導入したデジタルデータを用いた鉄筋出来形計測について報告する。

キーワード 営業線近接、ニューマチックケーソン工法無人掘削、デジタル配筋出来形検査

1. はじめに

舞鶴市西地区を走る国道27号は、幹線道路と生活道路としての機能を併せ持つため、朝夕の通勤時において、西地域市街地の主要交差点を中心として交通渋滞が発生している。国道27号西舞鶴道路は、舞鶴市上安と舞鶴市京田を結ぶ約4.9kmの幹線道路で、舞鶴市西地区の交通渋滞の緩和や京都舞鶴港と舞鶴若狭自動車道とのアクセス改善を図ること等を目的とした道路である。

当工事はこの国道27号西舞鶴道路事業のうち、JR舞鶴線および二級河川「伊佐津川」の一次支川「天清川」を超える高架橋「(仮称)上安久高架橋」の橋梁下部工築造工事であり、場所打ち杭工法で1基、ニューマチックケーソン工法で5基の合計6基の橋脚を施工する。

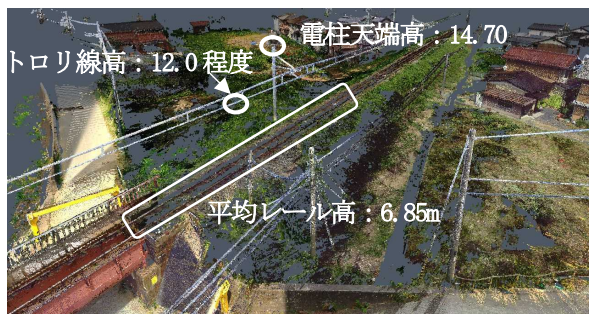


図-1 3次元測量結果

2. 営業線近接による影響検討および工法検討

(1) 営業線近接に伴う影響検討

設計段階において、営業線近接で設計および施工を実施するにあたり、以下の2点の課題がわかった。

- ・完成時に鉄道の建築限界を確保すること
 - ・橋梁下部工基礎施工時の安全を確保すること
- この2点の課題に対し、行った対策を以下に記す。

(2) 完成時に鉄道の建築限界を確保すること

鉄道の必要な建築限界は諸基準書より確認できたが、当該箇所のバラスト軌道高さおよび既設架線高さが不明であった。現況を把握するため、対象箇所の3次元測量を実施し、軌道の高さ・架線の高さの測定を行った。3次元測量の結果、図-1に示すように鉄道の盛土形状や軌道高さを把握することができた。この結果をもとに、最低桁高さを設定した。

(3) 橋梁下部工基礎施工時の安全性を確保すること

西舞鶴道路上安久高架橋の基礎形式選定において、表-1に示す通り、場所打ち杭(オールケーシング)、ケーソン基礎、地中連続壁基礎において比較検討を行った。一般部に関しては、実績・費用の面から場所打ち杭(オールケーシング)が採用された。営業線に近接する橋脚においては、場所打ち杭施工時の周辺地盤へ与える影響が、軌道の許容変位を満足できないと想定された。このため、経済的には場所打ち杭より劣るが近接施工の実績の多い、ニューマチックケーソン基礎を選定した。

橋脚施工位置を設定したのち、営業線の近接影響を都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル¹⁾(以降近接施工マニュアルと略す)に従い近接度合いを判定した。判定結果を図-2に示す。

これより、橋脚の近接影響は制限範囲(区分Ⅲ：新設

構造物の施工により既設構造物に対し、変位や変形等の有害な影響が及ぶと考えられる。新設構造物に対して対策を実施するとともに、影響検討を実施し、安全性を確認したのち、施工時に対象となる既設構造物および周辺地盤の挙動を計測する) であることが分かった。

表-1 基礎形式選定表 (一般部)

工法	場所打ち杭 (オールケーシング)	ケーソン基礎	地中連続壁基礎
特徴	・実績も多く、近接影響及び礫地盤への対応から、オールケーシング工法が採用される。	・近接施工や海上施工となる場合に用いられ、オールケーシングに比べ不経済である (工事費は基礎1基当たり2倍程度)。	・荷重規模が大きい橋梁や大深度に用いられ、オールケーシングに比べ不経済である (工事費は基礎1基当たり3倍程度)
評価	◎	○	△

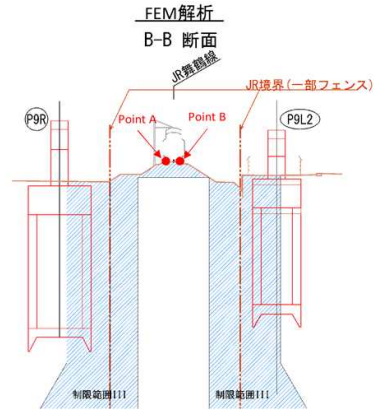


図-3 対象断面

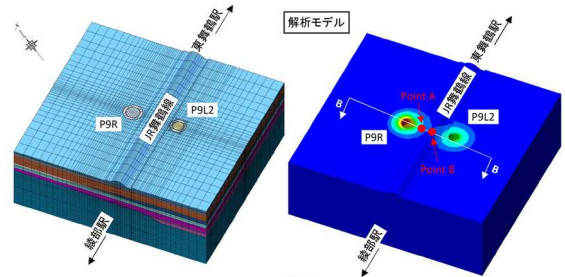


図-4 3次元FEMモデル

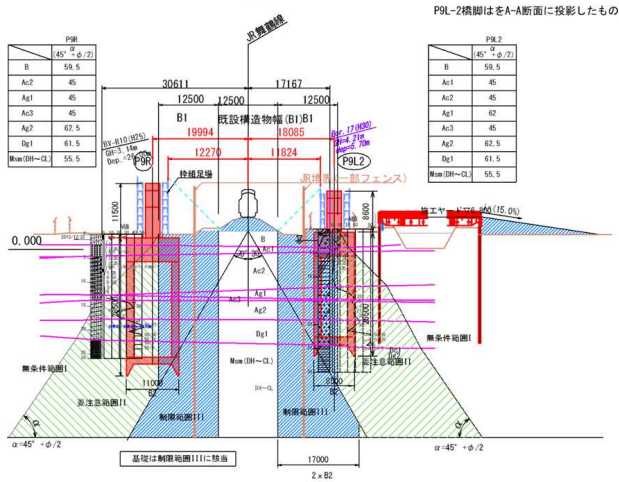


図-2 近接影響

このため、近接施工マニュアルに従い、新設構造物の対策として、以下の3点を実施することとした。

- ・ケーソン基礎のフリクションカットを最小に設定し、地山とケーソン躯体の空洞を低減する
- ・ケーソン沈設時の滑剤注入を行い、地山とケーソン躯体の空洞の充填を行いながら施工する
- ・ケーソン沈下掘削の影響を少なくするため、営業線とケーソン躯体の間に鋼矢板を設置する

次に、近接施工マニュアルに従い、3次元FEM解析を掘削ステップを考慮して実施した。その結果、最大変位は水平方向0.61mm、鉛直方向0.75mmと1mm以下となり、4級線の軌道整備基準である22mmを満足することができた。

表-2 3次元FEM解析結果

Phase	段階	Point A		Point B		管理基準値 (mm)	
		水平変位X (mm)	鉛直変位Y (mm)	水平変位X (mm)	鉛直変位Y (mm)		
0	初期状態	0.0	0.0	0.0	0.0	±3.0	
1	第1ロット沈下	3次元一片側沈下	0.12	0.13	0.11		0.10
		3次元二面側沈下	0.07	0.27	0.09		0.28
2	第6ロット沈下 (完成)	3次元一片側沈下	0.77	0.40	0.73		0.30
		3次元二面側沈下	0.16	0.93	0.25		0.96

(4) 施工時の計測

施工時は、近接マニュアルに従い、表-3に示す値で管理し、図-5に示す管理フローに従って管理した。

表-3 管理値

管理値		水平変位	鉛直変位
一次管理値 (警戒値)	整備基準値×0.4	±8mm	±8mm
二次管理値 (工事中止値)	整備基準値×0.7	±15mm	±15mm
三次管理値 (限界値)	整備基準値×1.0	±22mm	±22mm

ここで、二次管理値 (工事中止値) は、工事を中止し、軌道状況を西日本旅客鉄道が確認し、対策を検討することとなる。三次管理値 (限界値) は、列車の抑止を工事管理者が実施することになる。

三次管理値に達した場合、列車の抑止を実施するため、西日本旅客鉄道の工事管理者と列車見張り員の有資格者を各1名配置した。

計測器は、測定箇所プリズムを設置し、トータルステーションにより位置を測定した。配置図を図-6に示す。

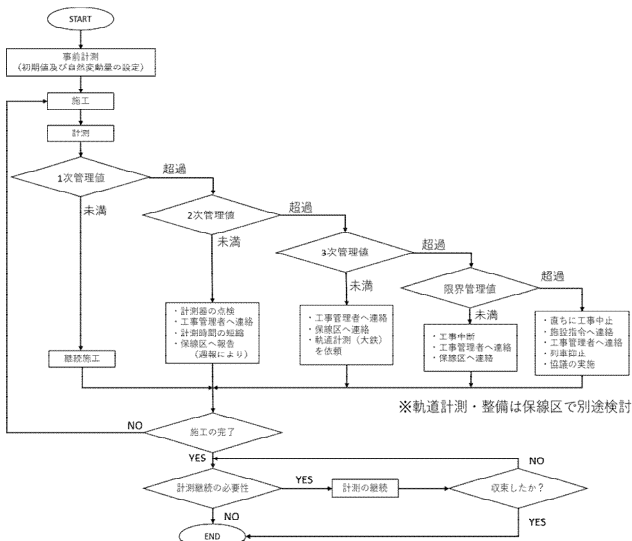


図-5 管理フロー

プリズムは、保線の関係上、直接レールには取り付けられなかったため、軌道から同じ離れの法面に設置し、プリズムの挙動を軌道の挙動とみなして軌道の変位を測定した。

測定した結果、鉛直変位は最大3.9mm、水平変位は最大4.3mmとなり、1次管理値以下で施工完了することができた。

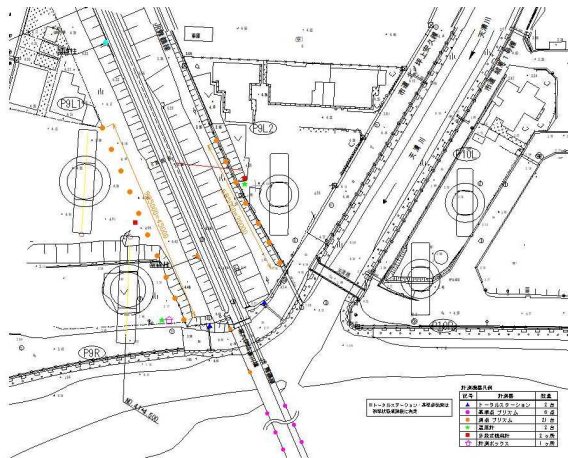


図-6 設置位置図

適正な検討と対策を行った結果、令和4年7月に営業線近接部のケーソン基礎沈下掘削作業は問題なく終了した。

3. ニューマチックケーソンの無人化施工

当工事では、図-7に示す通り、掘削深さが35.5mで最大作業気圧が0.35MPaとなるため、ケーソン内の最短作業時間は90分（減圧時間148分）になる。作業員の安全性の向上と生産性の向上を目的として、作業気圧が0.18MPaを超える作業は、無人化施工を採用した。



写真-1 トータルステーション



写真-2 プリズム設置状況



写真-3 工事管理者配置状況



写真-4 列車見張り員配置状況

(1) 安全性の向上について

潜函病とは高気圧作業者が減圧中または減圧後において運動器障害・中枢神経系の障害・呼吸循環系の障害を発症する病気である。発生原因は、高気圧下で作業することのため、高気圧下での作業を低減することにより、潜函病にかかるリスクを低減できる。

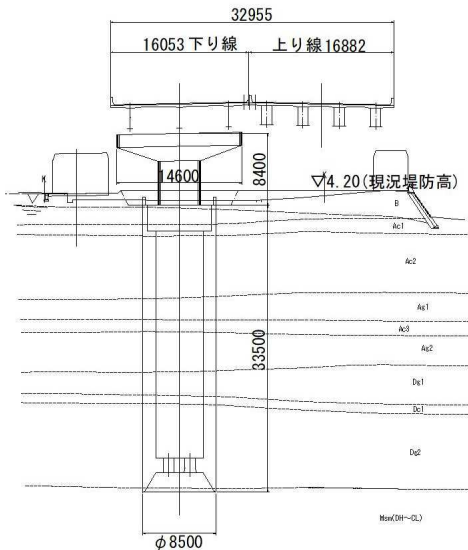


図-7 P10L橋脚断面図

(2) 生産性の向上について

表-4に示す通り、 函内作業気圧が0.18MPa以上になると、 有人機械掘削よりも無人掘削の方が効率的となる。

理由は、 図-8に当工事の最大気圧下での作業時間を示すが、 高気圧下での作業が90分、 減圧時間が148分になっている。 有人機械掘削のほうが効率的に掘削できるが、 高気圧になると、 減圧の関係上、 作業時間である8時間の中で掘削作業のできる時間が最低90分と短くなるため、 ある時点で有人機械掘削より無人掘削のほうが効率が良くなる。 よって、 当工事では、 表-4を参考に、 0.18MPaを超える高気圧下では無人掘削を採用した。

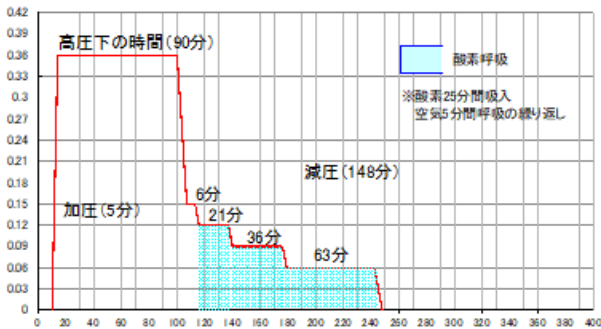


図-8 標準高気圧作業時間 (圧力0.34~0.36MPa)

表-4 1日の掘削量 (単位m3)

函内作業気圧(Mpa)	掘削面積40~60m2	
	有人機械	無人掘削
0.00 (素掘り)	53.4	32.0
0.00を超え~0.1以下	51.9	32.0
0.1を超え~0.14以下	42.0	32.0
0.14を超え~0.18以下	30.5	32.0
0.18を超え~0.22以下	19.8	32.0

ニューマチック工法積算資料²⁾より

4. デジタルデータを用いた鉄筋出来形計測

コンクリート構造物の鉄筋組立時の段階確認にデジタル画像を用いて鉄筋出来形計測を実施し、 受発注者の作業効率化等を目的として令和3年7月「デジタルデータを活用した鉄筋出来形計測の試行要領 (案)」³⁾ (以降、 試行要領と略す) が策定された。

試行現場を選定し、 試行要領に従ってデジタル画像を用いた鉄筋出来形計測を実施し、 従来方法の配筋検査との比較を実施した。

表-5 PRISM一覧表

番号	コンソーシアム代表	カメラの種類	計測項目				
			鉄筋本数	鉄筋径	鉄筋間隔	重ね継手	かぶり厚
1	清水建設	3眼カメラ	○	○	○	△	△
2	IHIインフラ建設	デジタルカメラ	○	○	○	△	△
3	鹿島建設	ステレオカメラ	○	○	○	△	△
4	三井住友建設	デブスカメラ	○	○	○	△	△
5	JFEエンジニアリング	デジタルカメラ	○	△	○	○	×

(1) PRISMで精度が確認された機械について

PRISMで精度が確認された機械は、 表-5に示す5機種である。 今回は、 一般リースが可能なAI配筋検査システム (三菱電機製) を用いた (写真-5)。



計測項目	計測精度	項目	仕様
鉄筋検出	検出率100% (ただし過検出を含む)	外形寸法	W320mm x H210mm x D95mm
対象鉄筋	D 10~D 51 (判定率 90%)	重量	約2.1kg
平均鉄筋間隔	±5mm (100mm計測時)	周囲温度	-10℃~+40℃
		構造体	JIS C 0920 保護等級IP65

【撮影条件】
・測定距離1m~2m ・撮影角度0°~±30°

写真-5 AI配筋検査システム (三菱電機HPより)

(2) 測定対象

以下に諸元を示す橋脚(図-9 参照)の底板・柱・梁の測定を実施した。

工事名：西舞鶴道路上安久高架橋 P9 橋脚他工事
橋脚名：P8 橋脚

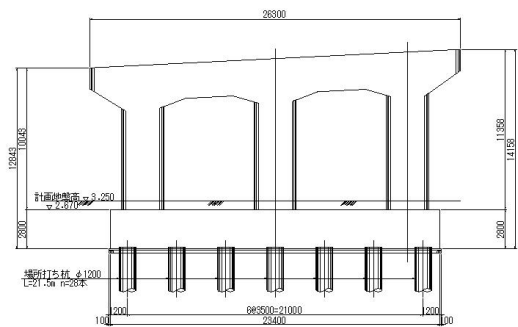


図-9 P8 橋脚

諸元:

場所打ち杭基礎 φ1200mm L=21.5m n=28本
 フーチング B×W 23.4m×11.4m H=2.8m
 橋脚躯体 B=26.3m H=7.7m

(3) 配筋測定について

a) 底版側部測定

測定した配筋を表-6に示す。

表-6 底版側部配筋

鉄筋番号	鉄筋径	配筋間隔	AI測定	従来法
F3	D35	250	259	258
F14	D19	200	208	200

AI測定による鉄筋径は、D35, D19とも問題なく判定した。平均間隔測定は、測定誤差10mm以下で判定した。

b) 底版頂部測定

頂部1段目測定した配筋を表-7に示す。

表-7 底版上部1段目配筋

鉄筋番号	鉄筋径	配筋間隔	AI測定	従来法
F8	D25	250	245	250
F9-1	D29	250	246	250
F9-2	D29	250	242	250

AI測定による鉄筋径は、D25, D29とも問題なく判定した。平均間隔測定は、測定誤差10mm以下で判定した。F9-1, F9-3(継手位置が異なるため番号が異なる)の判定はできなかった。

頂部2段目で測定した配筋を表-8に示す。

表-8 底版上部2段目配筋

鉄筋番号	鉄筋径	配筋間隔	AI測定	従来法
F11	D25	250	256	250
F12	D29	250	252	250
F13	D29	250	250	250

AI測定による鉄筋径は、D25, D29とも問題なく判定した。平均間隔測定は、測定誤差10mm以下で判定した。1枚の撮影画像からでは、1段目配筋に隠れてしまい2段目配筋は判別できなかった。

c) 柱測定

柱で測定した配筋を表-9に示す。

表-9 柱部(右)1段目配筋

鉄筋番号	鉄筋径	配筋間隔	AI測定	従来法
C2-1	D51	300	239	274
C2-3	D51	300	290	274
C3	D19	300	303	302
C4	D19	300	300	302

AI測定による鉄筋径は、D51は問題なく判定したが、

D19はD29と判定した。重ね継手が入ったためか、底版での鉄筋登録を用いて検査したためと考えられる。当該箇所での鉄筋登録を行ったところ、誤判定が低減した。

平均間隔測定は、1段目配筋で測定誤差最大35mmの判定であった。2段目配筋では最大137mmの誤差があった。誤差の原因は、中間帯鉄筋等の同種の鉄筋が背景に入り込み精度を下げたことと前面鉄筋による背面鉄筋の測定不能により精度が下がったと考えられる。

d) 梁測定

梁部で測定した配筋を表-10に示す。

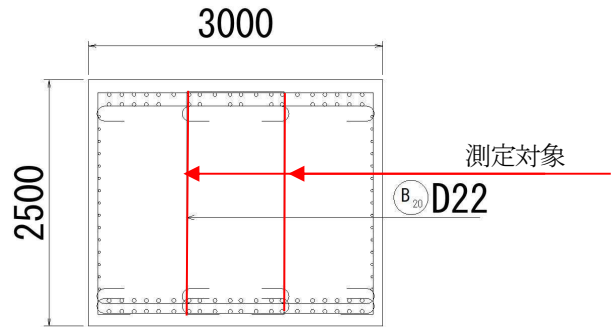


図-10 梁断面図

表-10 側面 1段目, 2段目配筋

鉄筋番号	鉄筋径	配筋間隔	AI測定	従来法
B8,9	D25	125	145	124
B11	D22	150	149	151
B20	D22	150	151	150

鉄筋番号B20は、2段目配筋だが、手が届かないところに配筋される鉄筋となる(図-10参照)。しかし、デジタル配筋機械を利用すると側部からでも平均間隔測定ができた。

e) かぶり測定

かぶりについては、底版側部において3種類の測定方法を実施した。

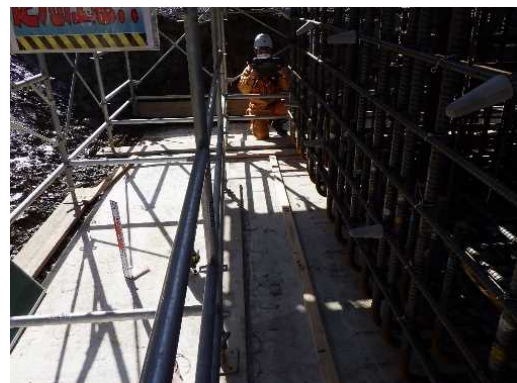


写真-6 測定状況

- 均しコンクリート上の墨と鉄筋を2点間計測モードで測定(写真-6, 7)
- 墨上にロッドを置き、ロッドと鉄筋を2点間計測

モードで測定 (写真-8, 9)

- ・レーザー墨出機でボードに位置を出し、レーザーと鉄筋を2点間計測モードで測定 (写真-10, 11)



写真-7 AI 機械画面

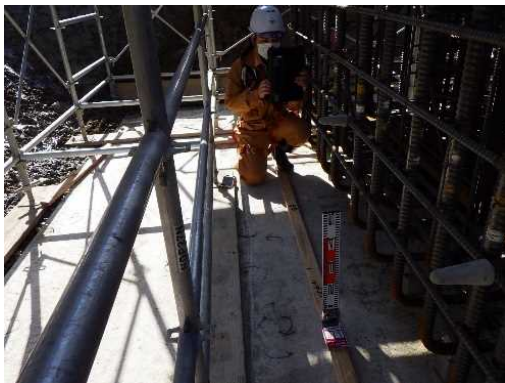


写真-8 測定状況



写真-9 AI 機械画面



写真-10 測定状況



写真-11 AI 機械画面

測定した結果、レーザー墨出機で位置を黒板に写した時が最も精度が良い結果となった。2点間計測モードは、人為で測定箇所を指定して計る機能であるため、鉄筋の配筋された同じ高さに墨が明示されている方が正確な位置を指定できるからと考えられる。

f) 現場試行を実施してみた

PRISM で精度が確認された機械を用い、鉄筋出来形計測の試行要領に沿って現場試行を行った。その結果、機械を用いることで鉄筋のマーキングやロッドの設置が省略でき、受注者の現場立会準備に関しては省力化ができることが分かった。

5. おわりに

- ・営業線近接作業において、計画時に3次元FEM解析を実施し、軌道への影響を把握した。さらに、近接施工マニュアルに従い、新設構造物への対策と軌道の測定を実施した。その結果、営業線近接部のケーソン基礎沈下掘削作業を問題なく完了した。
- ・ニューマチックケーソンの無人化施工を行うことで0.18MPaを超える高気圧下でのケーソン基礎掘削作業の生産性を向上させた。
- ・デジタルデータを用いた鉄筋出来形計測の現場試行を実施した。試行した結果、受注者の現場立会準備において、鉄筋のマーキングやロッドの設置が省略でき、省力化が可能であることが分かった。

謝辞：本報告にあたっては、当工事の受注者である株式会社大林組様から多大なるご協力を頂き、心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル 平成19年1月
- 2) 日本圧気技術協会：ニューマチックケーソン工法積算基準 令和2年7月
- 3) 国土交通省：「デジタルデータを活用した鉄筋出来形計測の試行要領(案)」 令和3年7月