

論文 ハンディタイプ3Dスキャナを用いたコンクリート表面の粗さ評価に関する検討

城出 真弥*1・早野 博幸*2・関根 麻里子*1・七尾 舞*1

要旨: コンクリートのはつり面の表面粗さは、補修材の付着性能や耐久性に大きな影響を及ぼすが、施工現場においてははつり面の表面粗さを簡易に定量評価する手法は確立されていない。そこでハンディタイプ3Dスキャナを用いて、様々な工法で表面処理したコンクリートのはつり面の計測および表面粗さを算出し、各種パラメータによって表面粗さの評価を行った。その結果、計測精度が0.7mmの比較的廉価なハンディタイプ3Dスキャナを用いた場合でも、施工現場を想定した環境において、コンクリートのはつり面の3次元的な表面粗さを精度よく評価可能であることを示した。

キーワード: コンクリート, はつり面, 表面粗さ, 評価方法, ハンディタイプ3Dスキャナ

1. はじめに

コンクリート構造物の補修工法においては、コンクリートの劣化部分をはつり除去し、補修用の材料を新たに施工することで、コンクリート断面を修復するのが一般的である。そのため、コンクリート界面の付着は、補修材料の化学的な付着作用と既設コンクリートのはつり面の形状による物理的な付着作用によって確保される。特に、コンクリートのはつり面の表面形状は付着強度に大きな影響を及ぼし、表面処理の粗さが粗くなるほど、せん断強度や付着強度が増加することが報告されている¹⁾。古内らは、触針式三次元計測器を用いてはつり面を計測し、表面粗さとせん断強度および付着強度との関係を定量的に評価している²⁾。また、松田らは、CCDカメラとスポットレーザ投光器を利用した可搬・非接触式三次元計測装置を独自に開発することで、表面粒度の定量化と付着強度との関係について検討している³⁾。

以上のように、はつり面の表面粗さと付着強度等の関係について検討がなされているが、標準化には至っていない。その理由の1つとして、施工現場において、はつり面等の表面粗さを定量的かつ簡易に評価する方法が確立されていないことが挙げられる。

一方で、ハンディタイプ3Dスキャナは、近年の3Dプリンタの普及に伴って、廉価で携帯性に優れたものが市販されている。そのため、ハンディタイプ3Dスキャナが、施工現場におけるはつり面等の表面粗さの評価に適用できる可能性が考えられる。

そこで本研究では、ハンディタイプ3Dスキャナを用いたはつり面の表面粗さの評価方法を確立することを目的に、計測に必要なハンディタイプ3Dスキャナの計測精度、はつり面の粗さ評価に適した評価方法および施工現場への適用性について検討を行った。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本研究では、Step1としてコンクリートのはつり面を計測するために、ハンディタイプ3Dスキャナの計測精度およびはつり面の粗さ評価に適した評価方法について基礎的検討を行った。Step2では、Step1の結果からコンクリートのはつり面を計測するのに適していると考えられるハンディタイプ3Dスキャナを用いて、実際の施工現場を想定した環境での適用性について検討を行った。

2.2 供試体概要

コンクリート供試体は500×500×40mmの平板とし、配合は単位水量165kg/m³、水セメント比55%、スランプは9.0cm、空気量は5.5%であった。

材齢28日まで20℃で水中養生を行った後、平板底面の500×500mmの範囲に表面処理を行い、表面粗さ計測用供試体を作成した。表面処理の方法はウォータージェット工法(以下WJ)、ショットブラスト工法(以下SB)、チップング(以下CH)の3種類とした。はつり深さの程度はWJは粗骨材が露出する5mm程度、SBおよびCHは表面のモルタルが除去される2~3mm程度とした。

2.3 Step1各種測定器の比較検討

Step1では計測精度の異なるハンディタイプ3Dスキャナ2機種と三次元座標測定器を用いて、表面処理を施したコンクリートの計測を行なった。既往の検討²⁾からもコンクリート表面を正確に計測できるといえる三次元座標測定器とハンディタイプ3Dスキャナの計測結果を比較することで、コンクリートのはつり面を簡易かつ適切に評価できるような計測精度および評価方法を検討した。

(1) コンクリート表面の計測方法

使用した各種測定器の性能を表-1に示す。本検討で用いたハンディタイプ3Dスキャナは、大きさが

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 修士(工学) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 博士(工学) (正会員)

150×200×50mm 程度、本体重量は 800g 程度と軽量で携帯性に優れるものであり、計測精度が 0.1mm と 0.7mm の異なる 2 機種を用いて計測を行った。計測精度 0.7mm の機種は 0.1mm に比べて廉価であることや、計測したデータの保存に掛かる時間が短い等の特徴がある。また、比較対象として三次元座標測定器による計測も行った。三次元座標測定器はプローブと呼ばれる球状の物体を対象に押し当てて計測する接触式と、ラインレーザーによる非接触式の 2 種類で計測を行った。接触式および非接触式ともに、計測精度は 0.5mm と設定した。

なお、はつり面の計測は温度の影響による体積変化の誤差を抑制するため、20±2℃環境下に 24 時間以上静置し、表面乾燥状態になった後に計測を行った。

(2) 計測データの解析方法

写真-1 に非接触式の三次元座標測定器とハンディタイプ 3D スキャナの計測状況を示す。三次元座標測定器は、座標が固定されているため、対象のコンクリート表面と平行となる一定の基準面に対する距離が計測されている。一方でハンディタイプ 3D スキャナは、常時平板表面と平行に移動して計測するものではなく、スキャナからの距離に応じた平板の点群データが計測される。したがって、コンクリートの表面粗さを算出するためには、コンクリート表面と平行となる基準面に対して三次元座標データに変換する必要がある。そこで、図-1 に示すように、測定対象周囲に L 字型のパネルをコンクリート表面に置き、これを基準面として三次元座標データに変換した。

その後、図-2 に示す範囲を対象として粗さ評価を行った。平板端部は中央部に比べて表面処理の程度が不均一となっていることが懸念されるため、端部 20mm は評価対象外とした。また、接触式の三次元座標測定器は計測に多大な時間を要するため、中央部の 40×40mm の範囲を対象とし、精度検証のため同じ範囲の非接触式の計測結果と比較を行った。

(3) 二次元的コンクリート表面粗さの評価方法

本検討では、JIS B 0601 に示される最大高さ Rz および算術平均粗さ Ra に準じて簡易的に二次元的な評価を行った。各評価値を算出した対象断面を図-3 に示す。X 方向の 3 箇所、Y 方向の 3 箇所ですべて 6 箇所の評価値の平均を算出する。また、各粗さパラメータの算出方法を以下に示す。

最大高さ Rz は、基準線(高さの平均値)から最も高い部分と最も低い部分の和で表される。

$$R_z = Z_p + Z_v \quad (1)$$

ここに、 Rz : 最大高さ(mm)

Zp : 平均高さからの最大山高さ(mm)

Zv : 平均高さからの最大谷深さ(mm)

算術平均粗さは図-4 に示すように、平均高さに対して各点の高さの差の絶対値の平均を表す、従来は断面曲線の基準長さで除すが、本検討では各断面の測定点のみを対象とするため、測定点の総数で除すこととする。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (2)$$

ここに、 Ra : 算術平均粗さ

l : 測定点数

z(x) : 位置 (x) における高さ (mm)

表-1 各測定器の性能

測定器		計測精度	計測範囲
三次元座標測定器	接触式	0.5mm	40×40mm
	非接触式		
ハンディタイプ3Dスキャナ		0.1mm	440×440mm
		0.7mm	



写真-1 計測状況(左:ハンディ,右:三次元座標測定器)

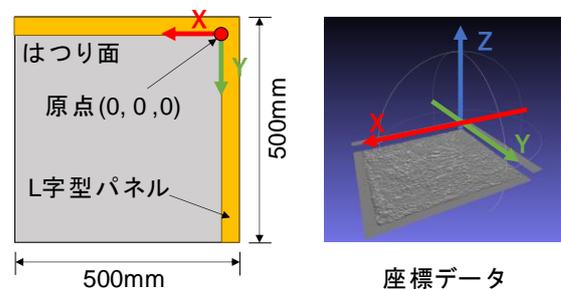


図-1 解析方法

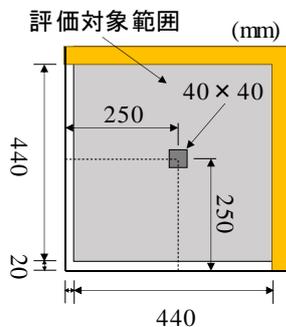


図-2 評価範囲

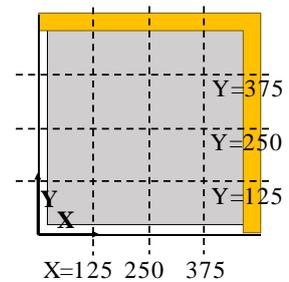


図-3 評価対象断面

(4) 三次元的コンクリート表面粗さの評価方法

JIS B 0601 に示される粗さパラメータはあくまで二次元的な評価である。本検討では三次元データを計測しているため、一例として ISO-25178 に示される、算術平均高さ Sa に準じて三次元的な粗さ評価の検討を行った。

算術平均高さ Sa は平均面に対する高さの差の絶対値の平均を表し、算術平均粗さ Ra を面の評価に拡張したパラメータである。従来は曲面全体の高さの差の絶対値を対象面積で除すが、本検討では測定点のみを対象とするため、その総数で除すこととする。

$$Sa = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (3)$$

ここに、 Sa : 算術平均高さ

A : 測定点数

z(x, y) : 位置 (x, y) における高さ (mm)

2.4 Step2 施工環境を考慮した検討

Step2 では、施工現場で計測に影響が生じると考えられる屋外環境の明るさおよび対象表面の湿潤状態の影響について検討した。これは、ハンディタイプ 3D スキャナは光の反射により計測を行うため、直射日光や表面の水膜などが計測に影響すると考えられるためである。

また、施工現場では日本道路協会が定める舗装路面の粗さ測定方法⁹⁾の、「砂を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」(以下サンドパッチ)および「回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」(以下 CT メーター)が簡易的な評価として用いられている。そこで、これらの方法とハンディタイプ 3D スキャナを用いた評価を比較し評価方法としての有用性を検討する。

3. 実験結果および考察(Step1)

3.1 はつり面の表面状況

表面処理を施したコンクリート表面の状況を写真-2 に示す。WJ で処理した表面は、粗骨材の周囲を取り巻くモルタルの大部分が取り除かれて粗骨材の大部分が露出し、粗骨材の下部のモルタルで付着している状態であった。一方で SB で処理した表面は、WJ よりもモルタルが残っており、粗骨材の上部だけが露出している状態であった。CH で処理した表面も SB と同様に粗骨材の露出が少なく、粗骨材の角が削れているものが認められた。

3.2 はつり面の測定状況

写真-1 に示すように、非接触式の三次元座標測定器はテーブル状で、供試体を設置し、ラインレーザーを照射する。1つの供試体あたり 15~20 分程度で計測が終了した。一方で、ハンディタイプ 3D スキャナはレーザーを照射しながら対象面全体を手動で動かし、計測を行う。1つの供試体あたり、3 分程度で計測が終了した。計測状況から、ハンディタイプ 3D スキャナを用いることで、

計測を短時間で行うことができ、測定者の技量に関わらず計測できることが確認された。

3.3 二次元的はつり面の粗さ評価

(1) 接触式と非接触式の比較

図-5 および図-6 に三次元座標測定器の接触式と非接触式の計測結果から算出した最大高さ Rz および算術平均粗さ Ra を示す。最大高さ Rz に関しては表面粗さが大きくなる WJ および CH では若干異なる傾向を示したが、概ね非接触式と接触式が同程度の値となることが確認された。この結果から、非接触式の三次元座標測定器はコンクリートはつり面の形状を精度よく計測および評価できていると判断し、これを基準としてハンディタイプ 3D スキャナと比較検討を行う。

(2) 計測精度の検討

図-7 および図-8 に非接触式の三次元座標測定器とハンディタイプ 3D スキャナの計測から算出した最大高さ Rz および算術平均粗さ Ra を示す。また、図-7 に示す最大高さ Rz の算出結果に対象断面 6 箇所の中の最大値および最小値を併記した。

いずれの粗さパラメータにおいても、WJ が最も粗い結果となり、SB および CH が同程度となることが確認された。これはハンディタイプ 3D スキャナの精度によらず、同様の傾向が確認された。また、SB で処理した供試体に比べて WJ および CH で処理した供試体の方が、粗さパラメータの最大値と最小値の差が大きくなった。これは、写真-1 に示すように WJ は骨材の露出、CH は手作業によるばらつきが影響していると推察される。以上の結果から、各処理工法の表面粗さの特徴を捉えていると考えられ、ハンディタイプ 3D スキャナを用いてコンクリートの表面粗さの計測および評価が可能であると確認した。

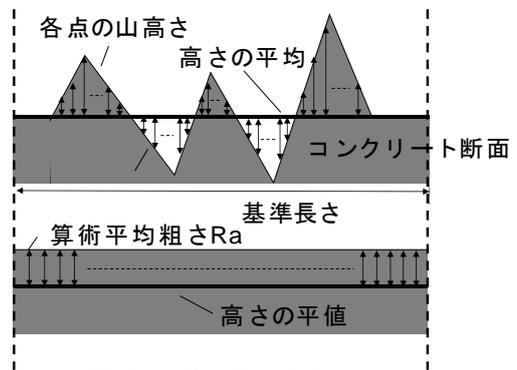


図-4 算術平均粗さ Ra



写真-2 はつり面(左 : WJ, 中 : SB, 右 : CH)

(3) 表面粗さパラメータの検討

図-7 に示す最大高さ Rz は、非接触式の三次元座標測定器に比べてハンディタイプ 3D スキャナはいずれも小さい値となった。最大高さ Rz は数多く取得したデータ中の極値、わずかな値による評価であるため計測精度や計測データ数の影響を受けやすいことが考えられる。また、計測データ数は三次元座標測定器が 1000 程度に対して、ハンディタイプ 3D スキャナは 200 程度と少ないことも影響しているといえる。そのため、最大高さ Rz は、ハンディタイプ 3D スキャナを用いることで過小評価される可能性がある。

図-8 に示す算術平均粗さ Ra は、ハンディタイプ 3D スキャナと三次元座標測定器が同程度の値となった。また、ハンディタイプ 3D スキャナ 2 機種でも計測精度によらず、同程度の値であることを確認した。

(4) 二次元的粗さパラメータのまとめ

図-9 に非接触の三次元座標測定器とハンディタイプ 3D スキャナの粗さパラメータの関係を示す。ハンディタイプ 3D スキャナは非接触の三次元座標測定器に比べて、算術平均粗さ Ra であれば同程度、最大高さ Rz では 8 割程度の値となることが確認された。また機種の違い、すなわち計測精度の違いが粗さパラメータへ及ぼす影響は明確に確認されなかったこと、さらに計測時間、解析時間やコスト面から、コンクリートのはつり面の粗さ評価を行うには、ハンディタイプ 3D スキャナの計測精度は 0.7mm でも十分であると考えられる。

3.4 三次元的はつり面の粗さ評価

これまでは、既往の研究などで多く適用されてきた二次元のパラメータではつり面の粗さ評価を行った。本研究では、三次元での面的データが取得できており、表面粗さの評価についても三次元パラメータを用いて評価するのが望ましいと考えられることから検討を行った。

図-10 に算術平均高さ Sa の算出結果を示す。WJ では若干かい離がみられるが、計測精度が 0.7mm のハンディタイプ 3D スキャナでも非接触の三次元座標測定器と同程度の値であることが確認できる。そのため、ハンディタイプ 3D スキャナで計測を行うことでコンクリートはつり面の三次元的な評価が適切に行えると考えられる。

ただし、粗さの評価方法については様々なパラメータが考案されており、どれを適用すればよいかは判断が難しいところである。少なくとも、二次元より三次元で評価した方がデータ数が多く、実際のはつり面の粗さ評価を忠実に定量化できると考えられるが、今後、粗さと様々な物性(付着力、耐久性など)との関連性についての検討が必要である。

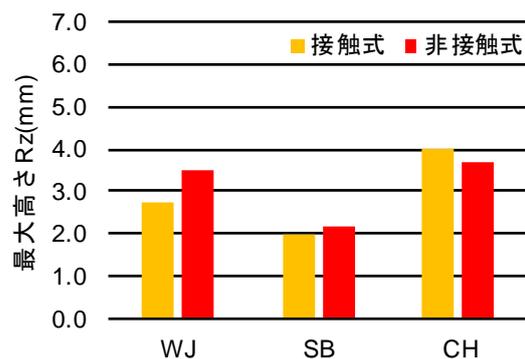


図-5 最大高さ Rz (接触式-非接触式)

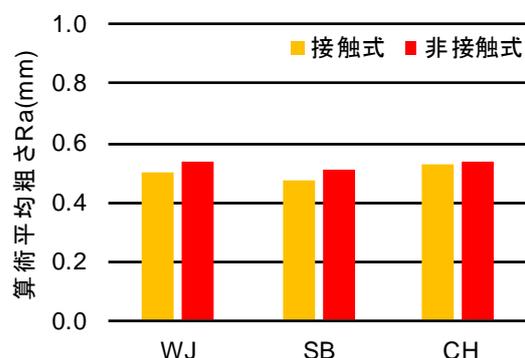


図-6 算術平均粗さ Ra (接触式-非接触式)

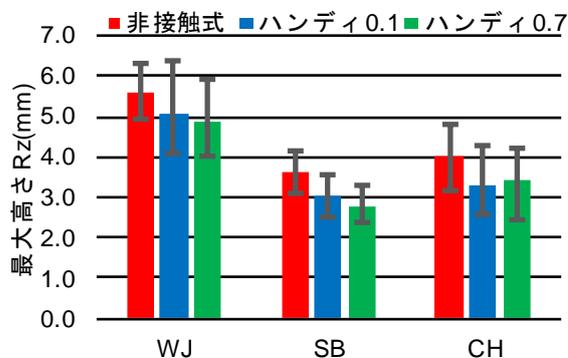


図-7 最大高さ Rz (非接触式-ハンディ)

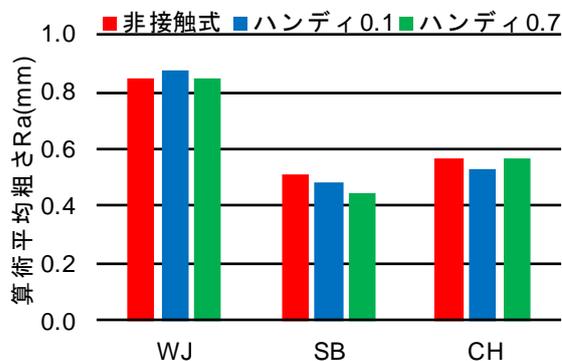


図-8 算術平均粗さ Ra (非接触式-ハンディ)

4. 試験結果および考察(Step2)

4.1 表面の乾湿状態が計測結果へ及ぼす影響

乾燥状態の測定後にコンクリート表面を濡らして計測を行った。水膜がコンクリート表面に残った状態で計測を行ったところ、正常に計測できなかった。そのため、写真-3 に示すようにコンクリート表面を水膜ができない程度に水分を拭き取り、湿潤状態の計測を行った。

図-11 に乾燥および湿潤状態の計測結果を示す。図に示すように、湿潤状態であっても乾燥状態と同様の計測結果となった。そのため、施工現場で使用する際も表面に水膜が残らない程度にコンクリート表面の水分を拭き取ることで、十分に計測が可能であると考えられる。

4.2 屋外環境が計測結果に及ぼす影響

スキャナ計測時の明るさに関しては、目安として照度が屋外は 30,000lx 程度、屋内の試験室は 350lx 程度であった。屋外で計測するにあたって、対象面に直射日光が当たる場合は、ハンディタイプ 3D スキャナの計測を行うことができなかった。これは、前述の水膜と同様に、光の反射が影響しているためと考えられる。そのため、一時的に遮光カーテンで測定器および測定対象部分を日陰にすることで直射日光を遮り、計測を行った。遮光カーテンで直射日光を遮った際の照度は 3,000lx 程度であった。図-11 に屋内および屋外の計測結果を示す。図より、屋外における計測結果と屋内における計測結果に差が認められず、屋外環境となる施工現場においても計測が可能であることを確認した。

4.3 既往の計測方法との比較検討

本検討では、既往の計測方法の「砂を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」(以下サンドパッチ)および「回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法」(以下CTメーター)と3Dスキャナによる方法との比較検討を行った。CTメーターは写真-4 に示すように、対象面に専用の機器を設置し計測を行う。半径 142mm の円周上を 0.87mm 間隔でレーザーセンサを用いて計測し、平均プロファイル深さを算出する。1回の計測は1分程度で終了した。サンドパッチは写真-4 に示すように一定の粒度に調整したガラスビーズを所定量置き、ゴムパッド等で円形に広がらなくなるまで、押し広げた。その円の直径から求めた面積と容積から、きめ深さを算出する。1回の計測は数分程度で終了した。ハンディタイプ 3D スキャナは軽量であり、3分程度で計測が行えることから、既往の計測方法と比べても、同様に簡易な計測方法であると考えられる。

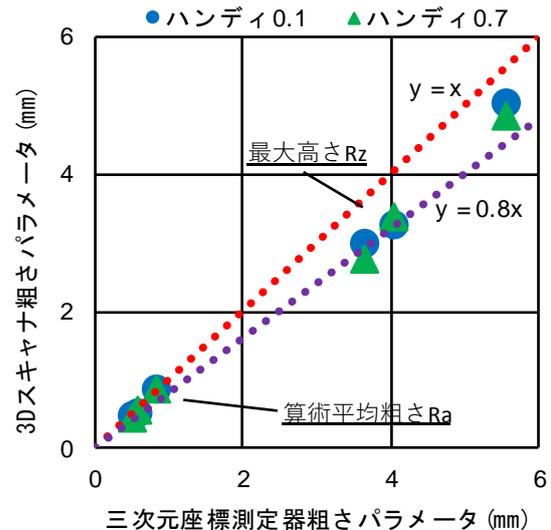


図-9 粗さパラメータの関係

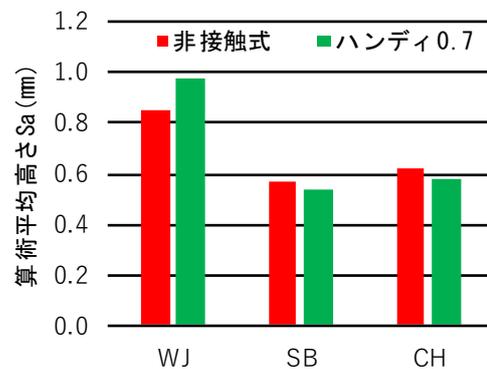


図-10 算術平均高さ Sa

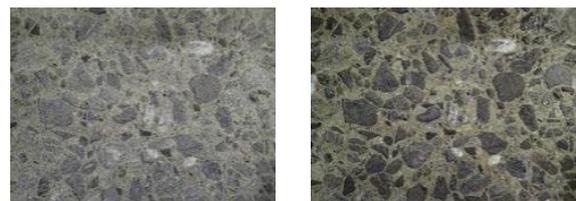


写真-3 表面乾湿状態(SB, 左:乾燥, 右:湿潤)

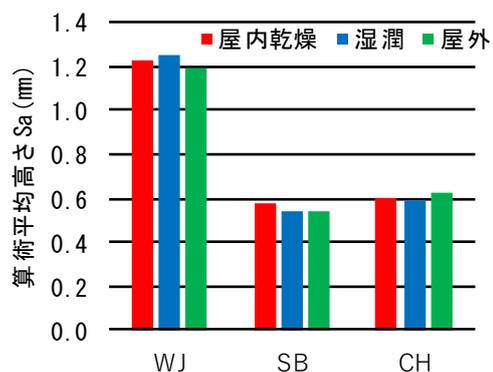


図-11 算術平均高さ Sa(屋内乾燥-湿潤-屋外)

図-12 に計測結果を示す。それぞれ算出する粗さパラメータは異なる指標値のため絶対値で比較することはできないが、3D スキャナによる評価では粗さが同程度と評価された SB および CH において、CT メーターおよびサンドパッチでは SB に比べて CH が小さくなった。これは、CH のように表面処理にばらつきがある場合、図-13 に示す各計測方法の計測範囲やデータ数の違いが影響していると考えられる。特に施工現場において、表面処理が広範囲になることで、計測範囲およびデータ数の違いがより大きく粗さパラメータに影響することが考えられる。そのため、コンクリートのはつり面の粗さ評価を行うにあたり、局所的にはなく広範囲のデータを簡易に取得することが望ましく、その点ハンディタイプ 3D スキャナによる計測は有用であると考えられる。

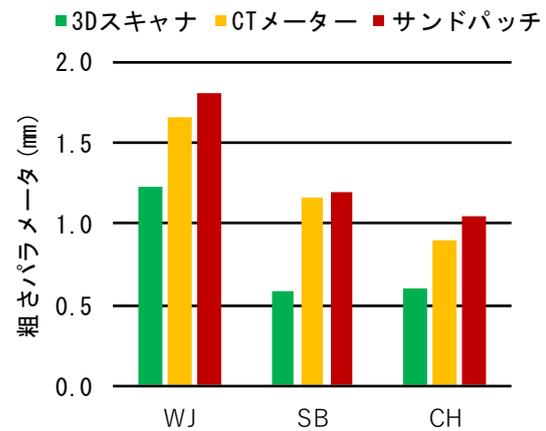


図-12 各測定方法の試験結果

5. まとめ

本研究では、ハンディタイプ 3D スキャナを用いたコンクリートのはつり面の表面粗さの評価方法を確立することを目的に、計測に必要な計測精度、はつり面の粗さ評価に適した評価方法および施工現場への適用性について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 三次元座標測定器および計測精度の異なるハンディタイプ 3D スキャナ 2 機種を用いて、各種表面処理を施したコンクリートのはつり面の計測を行った結果、ハンディタイプ 3D スキャナを用いることで、コンクリートのはつり面の計測、評価が短時間で簡易に行えることを確認した。
- 2) はつり面の粗さ評価には、一例として三次元で評価できる算術平均高さ S_a のように、計測した全データを使用したパラメータを用いることにより、計測精度 0.7mm のハンディタイプ 3D スキャナでも適切に評価が可能であった。
- 3) 既往の表面粗さの計測方法と比較検討を行った結果、屋外における施工現場を想定した環境でも計測可能であることから、広範囲のデータを簡易に取得できるハンディタイプ 3D スキャナを用いた評価は有用であると考えられる。

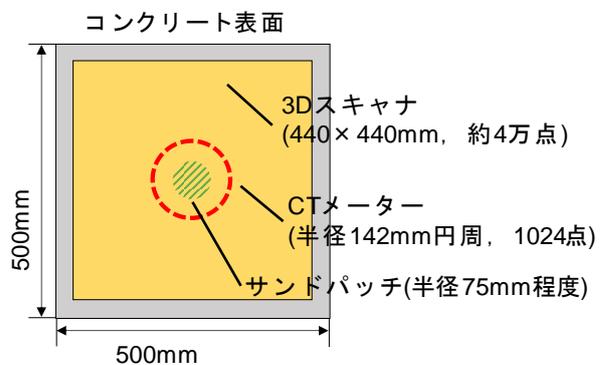


図-13 各計測方法の評価範囲



写真-4 計測状況 (左: CT, 右: サンドパッチ)

参考文献

- 1) 高瀬誠司, 小玉克己, 栗原哲彦, 佐藤貢一: 補修・補強材料としてのポリマーセメントモルタルの付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.319-324, 2000
- 2) 尾崎宏喜, 古内仁: ポリマーセメントモルタルと既存コンクリート界面の付着特性における界面粒度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1507-1512, 2005
- 3) 松田浩, 和田眞禎, 仲村政彦, 鶴田健: 3次元計測装置を用いたコンクリート表面粒度の定量化と付着性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.901-906, 2001
- 4) 日本道路協会: 砂を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法, 舗装調査・試験方法便覧[第1分冊], pp.104-116, 200