

論文 ロボットによるタンピングおよび余剰水の除去が土間コンクリートの硬化体物性に与える影響

内山 重一*1・吉田 亮*2・荻野 祐一*3・大島 美穂*4

要旨: 土間コンクリートの施工時にロボットを用いて、タンピングおよび余剰水を除去することで、反発度や透気係数など、コンクリートの表層品質が向上することを現場非破壊試験により確認することができた。また、この表層品質の向上効果について、土間コンクリートからコアを採取し、室内試験により検証した。タンピングそして余剰水を除去することで、表面硬度や圧縮強度・割裂引張強度、吸水率などの硬化体物性値において、鉛直方向の差が減じることを確認できた。この結果は、コンクリートコアの配合推定からも裏付けをとることができた。

キーワード: ブリーディング, タンピング, 表層品質, 省力化, ロボット, 施工

1. はじめに

日本にコンクリートの技術が導入された頃の施工では、固練りのコンクリートを流し込んだ後に、竹竿で入念につつき、木槌で何度も押し固めることで、密実性を確保してきたことが知られている。廣井勇博士が陣頭指揮をとられた小樽築港のコンクリートブロックでは、上記のような施工をした後に、コンクリートの表面に薄らとみえる水を晒し布でふき取ってから打継ぎを行ったことが記載されている¹⁾。できるだけ少ない水量でコンクリートを作製し、硬化後には多くの水で養生を行うことが、コンクリートの耐久性の肝要である。しかし、職人の高齢化と不足が加速する現代では、上記のように時間をかけた施工を行うことは難しく、建設業界にも自動化・省力化に対する解が求められている。

コンクリートに含まれる水には、セメントの反応に使用される水と、施工時のコンクリートの流動性に寄与する水に分類される。後者は、打設後に余剰水としてコンクリートの表面に浮上（ブリーディング）するものと、硬化後に空隙となるものがある。いずれも耐久性を低下させるものであるが、ブリーディングが形成する水みちは、物質移動抵抗性を大きく下げる。地域によっては左官の均し作業の前段階で顕著な余剰水の発生がみられる。この余剰水の除去を左官が、手作業で行っており、この非効率作業をできる限り機械などの自動化へ移行することで生産性向上を図り、かつ更なるコンクリートの品質向上が求められている。既往研究では、余剰水を真空脱水により除去することで、コンクリートの硬化体物性が向上するという先進的な報告がある^{2) 4)}。

本研究では、土間コンクリートの施工においてロボッ

トを用い、タンピングならびに余剰水の除去することで得られる、硬化後のコンクリートの品質に与える効果を現場非破壊試験ならびに採取コアの室内試験により検証する。

2. 開発ロボットによるタンピングおよび余剰水の除去

ロボットによる余剰水の除去には、ふたつの課題がある。ひとつは、固まらないコンクリートの上を重量物が沈まずに走行させることである。もうひとつは、コンクリートから、セメントと骨材を残して余剰水だけを吸水することである。以下にその対策を示す。

2.1 固まらないコンクリートにおけるロボットの走行

固まらないコンクリートの上を沈まずに、滑らずに走行させるために、本研究ではキャタピラーの開発を行った。

開発の当初、キャタピラーは本体と一体型のゴムベルト方式を検討した。走行を安定させること、またコンクリート表面を傷つけないことを課題とし、材料の重量、強度、そして形状を検討した。その結果、ポリアセタール樹脂製で、薄肉で幅広の形状、そして着脱と洗浄が可能な製品組み立て式のキャタピラー(図-1)を考案した。これによりわだちを極力抑えた。ロボットの総重量は、タンクが空の状態では45 kg、タンク満たされた状態で57 kgである。

2.2 タンピングおよび余剰水の除去

ロボットの基本性能として、走行しながらコンクリート表面をタンピングさせ、余剰水をバキュームにより吸水し、平滑な板により走行時のわだちを均すことを考えた。

*1 須山建設株式会社 すやま創意くふう研究所理事所長 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 須山建設株式会社 すやま創意くふう研究所理事専務

*4 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻修士課程 学士 (工学) (学生会員)

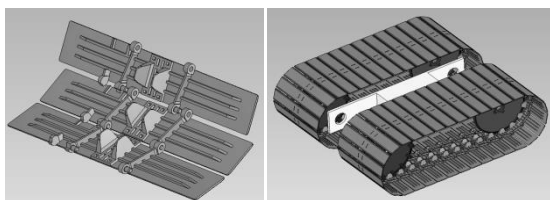


図-1 キャタピラー

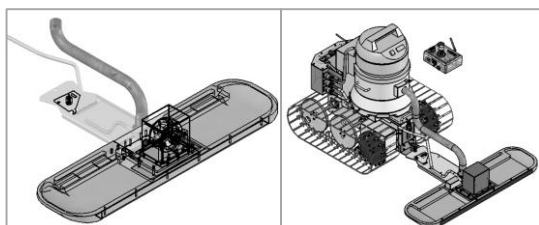


図-2 タンパー

表-2 吸水ロボットの仕様概要

本体重量	タンク空時 45kg タンク満タン時 57kg
タンパー寸法	奥行き 270 mm 幅 1000 mm 高さ 176 mm 腕長さ 370 mm
タンパー重量	8 kg
最大速度	45 cm/s
移動モーター	250W24V DC モーター
移動牽引力	モーター性能 70 kg
キャタピラー	摩擦力 10~40kg
本体バッテリー	Li イオンバッテリー 24V13.2A 使用時間 80分 充電時間 180分
バキューム バッテリー	Li イオンバッテリー 24V9A
バキューム	湿乾両用バキューム 静圧 0.012MPa 風量 2m ³ /min 12 L
タンパーモーター	250W24V DC モーター 荷重 320 N 振動数 45 Hz
無線距離	50 m

タンピング時の振動機の振動数は 45 Hz である。また、タンパー (図-2) の吸水ヘッドの重さ・角度、接地面における溝を調整し、また吸水口と水面との距離を一定 (15

mm) に保持することで、セメントや骨材を残して、極力、余剰水のみを吸水する設計とした。

また、余剰水を強制的に滲出させるためにタンパーを設計した。タンパーの寸法は 1000 mm × 270 mm × 32 mm であり、硬質ウレタンで製作した。タンパーの上部には振動モーターを設置することで、タンパーに振動をかけ、キャタピラーと吸水バケットを装備したアクチュエーターで牽引されながらコンクリート表面をタンピングする。これにより滲み出てきた余剰水を吸水し、さらに平滑な底面で走行時のわだちを均す設計となっている。

以下の表-2 に、開発したコンクリート余剰水除去ロボットの仕様を示す。

3. 実験概要

3.1 供試体 (土間コンクリート) の概要

(1) コンクリートの配合

表-1 にレディーミクストコンクリートの配合を、表-2 に材料の諸元を示す。空気量とスランプの目標値は 4.5%、15 cm である。また粗骨材には石灰石が用いられており、最大寸法は 20 mm である。また、打設日は 2017 年 3 月 7 日である。

(2) 供試体 (土間コンクリート) の施工

図-3 に施工の様子 (工程) を示す。土間コンクリートの施工は、8000 mm × 20000 mm × 厚さ 150 mm の実験フィールド (イ) に打設した。基礎地盤には碎石を転圧により設置した。また、土間シートを敷き、配筋は D13 をシングルで 200 mm 間隔で設置した。

午前 8:30 よりポンプ圧送によりコンクリート打設 (ロ) し、10:30 より吸水ロボットを走行させ、タンピングしながら余剰水の吸水 (ハ、ニ) を行った。余剰水は打設完了の 30 分後 (10:30) から吸水を開始し、およそ 0.67 L/m²を吸水 (ホ) することができた。また、未除去部分については、後述する仕上げの過程において、浮上していた余剰水を排除している。排除した量は余剰水の水深より 0.38L/m² 程度と推測され、除去部よりもやや少ない。

その後、打設後およそ 3 時間で不陸調整・ノロ取り (ヘ)、3 時間 15 分後にトロウエル (ト) によって均しを行った。そして、3 時間 30 分後に金鋸仕上げ (チ) を行い、午後 2:00 に仕上げ作業を終了した。

なお、仕上げのタイミングは左官の経験で決めており、ガングを履いて土間に入っても、跡があまり残らない時期や、土間の外周の淵廻りを金鋸で均しても、ノロが金鋸面に残らないなど、職人の経験知を考慮して仕上げのタイミングを判断した。トロウエルをかける時期は、土間表面の水が引き、トロウエルを回して、鋸むらが少し残ることにより判断をした。

表-1 レディーミクストコンクリートの示方配合

単位量(kg/m ³)			
W	C	S	G
171	320	838	980

表-2 材料諸元

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)
20	15	53.4	4.5

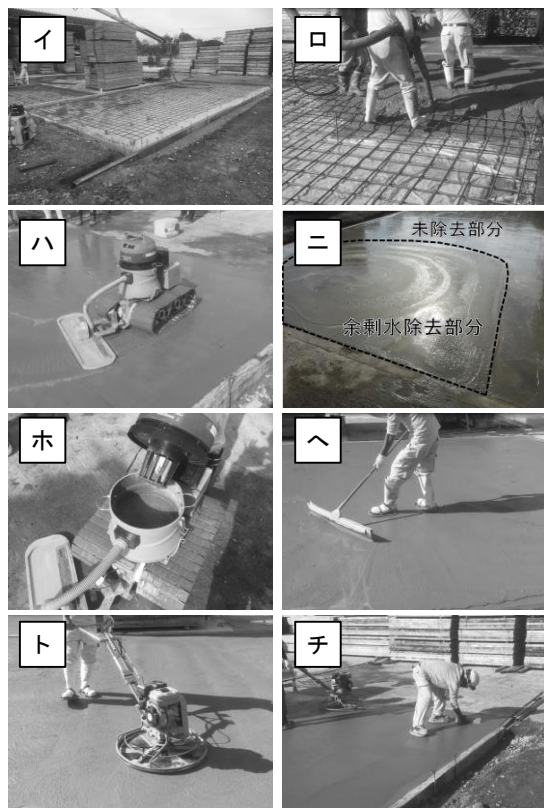


図-1 土間コンクリートの施工のフロー

(3) 供試体（土間コンクリート）の養生

仕上げを行った後は、1 週間の散水とシート養生を施した。シート養生は厚さ 0.15mm のポリエチレンフィルム材を、土間の全面に敷き詰めた。

3.2 表層品質試験

材齢 3 か月に、以下の現場非破壊試験ならびに採取コアによる硬化体物性の試験を行った。

(1) 表面硬度試験

テストハンマーによる強度試験は一般にばねによるシュミットハンマーN(NR)型(以下テストハンマーと呼ぶ)を用いて、コンクリート部材の圧縮強度相当を測定し、これから圧縮強度を判定する調査方法である。今回の調査では原則として JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定方法」、土木学会規準(JSCE-G504-2007)「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法」に従うことと

した。測定箇所は、できるだけ濡れ、豆板、空泡、露出している砂利等の部分は避け表面組織が均一かつ平滑な平面部を、余剰水の除去・未除去でそれぞれ 5 か所、選定した。打点については 1 箇所毎の測定打撃点数を、縁部から 30 mm 以上離れたコンクリート面で、互いに 30 mm 以上の間隔を持った 20 点とし、得られた値が反響やくぼみ具合等から判断して明らかに異常と認められる場合は破棄、平均値の±20%以内の場合は採用し、破棄された値を除いて 1 つの測定点で新たに平均値を計算するものとする。

(2) 表面透気試験

表層透気試験では、Roberto J.Torrent によって開発された、外部チャンバーを有したダブルチャンバー法を行った。本手法は、コンクリートのごく表層の skin からの空気の流入の影響を排除できる試験である。チャンバーをコンクリートに密着させて所定レベルまで減圧し、バルブ閉止後の内部チャンバーの気圧上昇を計測する。この時、外部チャンバーと接触するコンクリート付近では、深さ方向に一次元の透気流が形成されるため、コンクリート表層の影響を排除して透気性を評価できる。

(3) 表面水分率試験

KETT 社製 コンクリート・モルタル水分計 HI-520 を用いて、コンクリート表層の水分率を測定した。本機体は高周波容量式水分計であり、モルタル、コンクリートの水分による誘電率（高周波容量）の変化を検出して、みかけの水分量を測定している。

測定箇所は、前述の表面透気試験と同じであり、測定点は各箇所 10 点である。

3.3 採取コアを用いた室内試験

現場において非破壊試験を行った後に、土間の鉛直方向に対し、φ75 mm のコンクリートコアを水冷式により採取した。

採取したコアは、実験室内において、以下の手順を踏み各種硬化物性を調べることで密実性の向上効果を検証した。

(1) ビッカース硬度試験

採取コアを仕上げ面から鉛直方向に、20 mm ごとに切断し、おおよそ 400×400×15mm の試料とした。試料は 9 μm のダイヤモンドスラリーを用いて研磨し、アセトンによる洗浄後、20℃、R.H.11%の環境で保管した。試験は、「ビッカース硬さ試験(JIS Z 2244)」に準拠して行った。載荷時間は 15 秒、5N の力で載荷した。その後、光学顕微鏡を用いて圧痕の対角線の長さを測定し、以下の式 (1) でビッカース硬さ HV を算出した。

$$HV = 0.102 \times \frac{F}{d^2 / 2 \sin(\frac{\theta}{2})} = 0.1819 \times \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

ここに、

d : 圧こんの対角線長さの平均(mm) $[(d_x+d_y)/2]$
 θ : ビッカースダイヤモンド圧子の対面角(136°)

(2) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に従って実施した。採取したコアを仕上げ面から 60 mm までと、60 mm 以深に、水冷式ダイヤモンドカッターにより分断した。全ての供試体の高さの差が ± 10 mm の範囲に収まるように整形した。整形後、供試体を水道水で洗浄し、水分状態による試験への影響を排除するために、絶対乾燥を行った。その後、供試体の直径と高さをノギスにより測定し、断面積ならびに直径と高さの比を算出し、JIS に示された方法により直径と高さの比による補正を行った。

(3) 割裂引張強度試験

絶対乾燥後の供試体を用いて、JIS A 1113 に従って割裂引張強度の試験を実施した。

(4) 配合推定・吸水率試験

ICP 法により配合推定を行った。粗骨材に石灰石が用いられるため、コンクリートの溶解にはギ酸を用いた。また、単位水量を推定するため、アルキメデス法による吸水試験についても、本研究では密実性の評価に用いる。

4. 余剰水の除去が土間コンクリートの硬化体物性に与える影響

余剰水の除去の有無による表層コンクリートの品質の際を、現場における非破壊試験で評価する。また、上記コンクリートについてコンクリートコアを採取し、実験室において、表面から深さ方向のコンクリートの品質の変化について、コンクリートの硬化体物性の試験ならびに配合推定を行うことで検証を行う。

4.1 表層品質試験

(1) 表面硬度試験

図-4 の表面反発度の試験結果では、余剰水を除去しない個所の反発度が 33 であるのに対し、除去した個所では 36 と 1 割程度まで向上していることがわかる。

(2) 表面透気試験

つぎに、透気試験結果(図-5)を見てみる。余剰水を除去しなかった個所の透気係数は 2.0×10^{-16} (m^2) 程度であるのに対し、除去した個所では 0.9×10^{-16} (m^2) と透気係数が 1/2 程度まで減少している。コンクリートの耐久性の指標となる物質移動抵抗性が向上した結果が得られた。

(3) 表面水分率試験

余剰水除去による効果は、表面水分率試験(図-6)においても確認できる。余剰水を除去しない個所の表面水分率は 5.0%、除去した個所では 5.5% と差異が確認できた。コンクリートが緻密である場合、内部組織(細孔構造)が緻密であり、内部の水分を保持できる。このよう

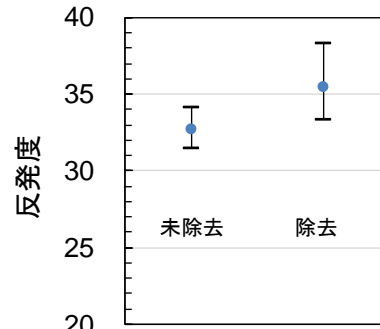


図-4 反発度試験の結果

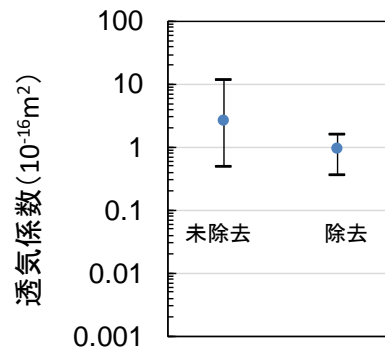


図-5 表面透気試験の結果

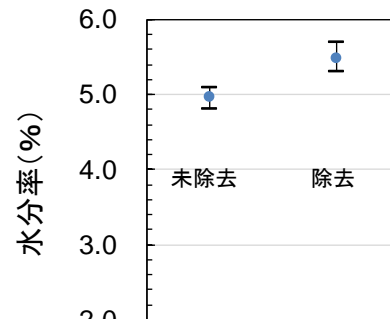


図-6 表面水分率試験の結果

な理由により、表面水分率からも余剰水を除去したコンクリートの方が緻密であることが示された。

4.2 採取コアを用いた室内試験

(1) ビッカース硬度試験

ビッカース硬度試験結果(図-7)を見る。余剰水を除去していないコアでは、仕上げ面から深さ 60 mm の位置までビッカース硬度が、80 mm 以深の硬度よりも低い。一方で、余剰水を除去したコアでは 80 mm 以深の硬度と表層の硬度がほぼ同程度になっていることがわかる。余剰水を除去することで、表層 60 mm 程度の密実性を向上させる効果があると考えられる。

(2) 圧縮強度試験

圧縮強度(図-8)の結果を見る。余剰水を除去しな

ったコアの表層部の圧縮強度は 23 N/mm² であり、深部コアの圧縮強度は 22 N/mm² であった。わずかではあるが表層部の圧縮強度のほうが高い。これは、表層部にセメントペーストが多く、粗骨材が少ないことに由来する。一方、余剰水を除去した表層コアの圧縮強度は、26 N/mm² 程度であり、深部コアの圧縮強度は 24 N/mm² 程度であった。圧縮強度の差としてはわずかではあるが、余剰水を除去するところで表層部の密実性が向上していることがわかる。

(3) 割裂引張強度試験

引張強度 (図-9) の結果を見る。余剰水を除去しなかったコアの表層部の引張強度は 2.5 N/mm² であり、深部コアの引張強度は 3.2 N/mm² であった。一方、余剰水を除去した表層コアの引張強度は、3.3 N/mm² 程度であり、深部コアの引張強度も 3.3 N/mm² 程度であった。余剰水により低下していた表層の引張強度が、余剰水を除去することで深部と同程度まで回復している。この結果より、余剰水を除去するところで表層部の密実性が向上していることがわかる。

(4) 吸水率試験

表-5 に吸水試験の結果を示す。吸水率は、供試体の体積において、静水圧下で水が浸透できる空隙の体積の割合を示している。供試体の上部と下部の吸水率を比較することで、余剰水ならびに空気泡の浮上による空隙の増減を考察する。

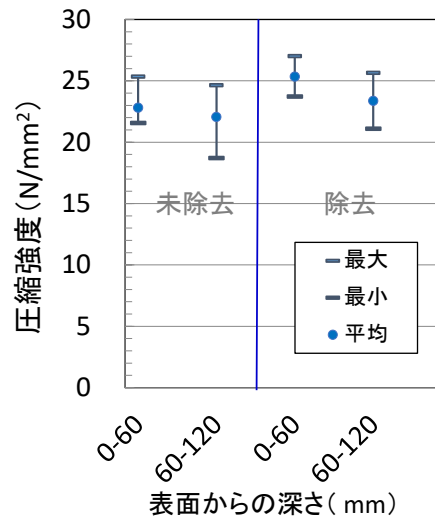


図-8 圧縮強度試験の結果

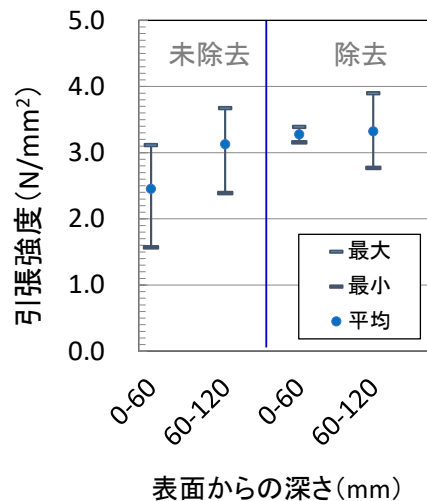


図-9 割裂引張強度試験の結果

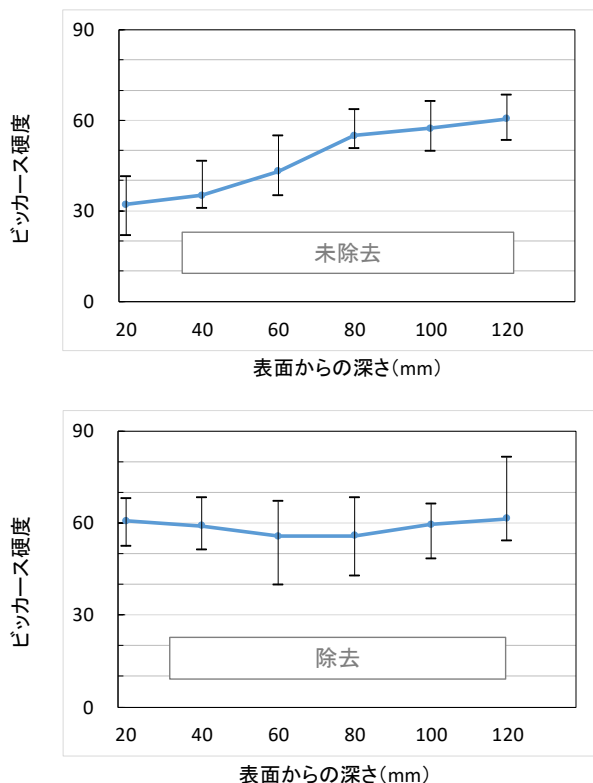


図-7 ビッカース硬さ試験の結果

余剰水を除去していない供試体では、0-60 mm (上部) と 60-120 mm (下部) の吸水率はそれぞれ、6.6%、5.8% であった。また、余剰水を除去した供試体では、0-60 mm (上部) と 60-120 mm (下部) の吸水率はそれぞれ、6.1%、5.7% であった。余剰水の除去の有無にかかわらず、余剰水が浮上した後の供試体の下部 (60-120 mm) では、吸水率が 5.7% 程度となる。一方で、供試体の上部 (0-60 mm) では、余剰水の除去の有無で吸水率に差が生じている。余剰水を除去することで、供試体の上部の吸水率は下部の吸水率に近づくことがわかる。

(5) 配合推定

表-4 に配合推定の結果を示す。いずれの供試体においても示方配合に比較して、セメント量が少なく、骨材量が大きく算出される結果となった。本試験では、粗骨材に石灰石が使用されているため、ギ酸を用いた。酸の種類を変えて行った場合には、示方配合により近づくことを

表-4 吸水率

試験の結果	
試料名	吸水率
	[%]
未除去 0-60	6.6
未除去 60-120	5.8
除去 0-60	6.1
除去 60-120	5.7

表-5 配合推定の結果

試料名	単位容積質量 [kg/m ³]	材料単位量 [kg/m ³]			W/C [%]
		セメント量	水量	骨材量	
未除去 0-60	2347	277	177	1893	64
未除去 60-120	2379	274	160	1944	58
除去 0-60	2371	273	168	1930	62
除去 60-120	2384	275	161	1948	59
示方配合	2309	320	171	1818	53

確認しており、上記した差異は試験方法によるものと考えられる。

配合推定の結果を、供試体の上下方向に比較する。余剰水の除去の有無にかかわらず、供試体の下部においては W/C が 58%程度となっている。一方で、供試体の上部においては、余剰水を除去することで、除去しなかったものに比べて W/C がやや低くなり、下部の供試体の W/C に近づいていることが確認できる。

このように、ブリーディングとして浮上してきた余剰水を除去することで、コンクリートの表層と深部(下部)の硬化体物性値(品質)の差異が無くなることが確認でき、またその硬化体物性の向上効果は、材料(配合)が鉛直方向に均一であることに由来すると検証ができた。タンピングならびに余剰水を除去により、躯体におけるコンクリートが均一となることは、W/Cの低下による乾燥への抵抗性の付与だけでなく、躯体の表面と内部におけるコンクリートの体積変化がもたらす応力も生じにくく、ひいては土間コンクリートのひび割れの低減に寄与することが期待される。

5. まとめ

土間コンクリートの施工時に生じる余剰水を除去することによるコンクリートの品質向上について、現場非破壊試験ならびに、採取コアを用いた室内試験により検証を行った。

余剰水を除去することで、鉛直方向の品質の差を減じることができた。表層の組織を内部と同程度に緻密になっており、土間コンクリートに必要なすり減り抵抗性や乾燥収縮抵抗性が向上することが期待される。

現場非破壊試験では、推定圧縮強度、透気係数、表面水分率のいずれにおいても確認することができた。いずれの試験においても、余剰水を除去することで、コンクリートは緻密になる傾向が得られた。そして実験室内に

おけるコア供試体の試験結果からも、空隙率の低下、密度の増大、圧縮強度の増加として、余剰水を除去した効果が組織を緻密とするように現れていた。

土間コンクリートの設計段階において、余剰水のないコンクリートを選ぶことが、本質的な解である。しかし、労働の負担が大きくなる固練りのコンクリートを職人は受け入れず、よい施工が行われないこともあり得る。土間コンクリートの余剰水を除去することは、(水セメント比の低い生コンを使用して)土間職人の負担を大きくすることなく、コンクリートの品質(ひび割れ抵抗性)を向上させることに繋がる。この取り組みは、職人不足という問題を抱える現代の現場においても、コンクリートの品質向上に対するひとつの解となる。実際に、この取り組みを行ってからは、生コンプラント、現場監督、職人のコンクリートの余剰水に対する意識が改善され、土間コンクリートの品質が向上している。したがって、吸水ロボットは、現場における土間コンクリートの品質低下を抑えるための抑止力となっていると言える。

参考文献

- 1) 高崎哲郎：評伝 山に向かいて目を挙ぐ 工学博士・広井勇の生涯、鹿島出版社、2003.9
- 2) 畑中重光、和藤浩、三島直生、村松昭夫：真空脱水工法によるコンクリート床スラブの表層および内部強度性状改善に関する実験的研究、日本建築学会構造計論文集、No.558、pp.7-14、2002
- 3) 畑中重光、和藤浩、三島直生、村松昭夫：真空脱水コンクリートの品質に及ぼす処理マットおよび真空度の影響、日本建築学会構造計論文集、No.588、pp.13-19、2005
- 4) 畑中重光ほか：真空脱水コンクリート床スラブの表層に発生する微細ひび割れの低減に関する実験的検討、日本建築学会技術報告集、Vol.17、No.35、pp.31-35、2011