

論文 簡易な超音波速度計測によるコンクリート表層品質推定法の検討

中島 隆*¹・伊代田 岳史*²

要旨：コンクリート構造物の耐久性を確保するために、コンクリートの表層品質を向上させることが求められている。コンクリートの表層品質を評価するために表層透気試験や表面吸水試験などの非破壊試験が提案されているが、これらの試験には電源の確保や機材重量の問題がある。そこで本研究ではバッテリー内蔵型でハンディタイプの簡易超音波試験装置を使用し表層品質の推定を検討した。その結果、簡易な超音波速度計測は表面吸水試験から得られる吸水速度と相関がみられ、測定するタイミングを考慮することで、表層の品質を推定できると示唆された。

キーワード：簡易超音波速度試験, 超音波速度, 表層品質, 表面吸水試験

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を確保するために、コンクリートの表層品質を向上させることが求められている。コンクリートの表層品質が低下すると、コンクリート表面から劣化因子の CO_2 や Cl^- がコンクリート内部に侵入し、鉄筋腐食などを引き起こす。近年、施工されたコンクリートの表層品質を施工後早い段階で調査することがあるが、現場での簡易透気試験、簡易吸水試験が主に用いられている。しかし、これらの試験では計測時間が長時間であること、計測時にコンクリートの含水率の影響を受けるという問題点がある¹⁾²⁾。そのため、精度よく容易に表層品質を捉えることが求められている。

非破壊試験には上記で挙げた二つの試験方法以外にも複数存在するが、その中に超音波試験がある。超音波試験はコンクリート内部を伝播する超音波の速度を計測する試験である。超音波試験装置は受信子と送信子を併せ持つ試験機であり、それらをコンクリート表面へ接触させ速度を計測する。超音波試験装置の中には装置が大型のものが多く、図-1 のような小型でハンディタイプのものも開発されている。このハンディタイプの超音波試験装置は利点として容易にコンクリートを計測することにある。計測方法は試験機を表面に押し付け、計測される超音波速度を計測者が記録する。内部電源であるため持ち運びも容易であり、計測時間も約 15 秒でより多くの計測点で試験を実施できる。

コンクリートの表層とは養生や環境条件等の影響を受けて変化する可能性がある領域と考えられており、配合や施工方法によって表層領域は変化すると考えられている。また、コンクリートの品質を示す指標は複数あるが表層品質は表層領域におけるコンクリートの物質移動抵抗性と考えられる。



図-1 簡易超音波試験装置

そこで、本研究ではコンクリートの物質移動抵抗性を簡易超音波試験装置による超音波速度計測で把握するために実験を行った。コンクリート構造物の実施工では、実験室等で行われる水中養生ではなく、型枠存置の封緘養生が主である。よって実験では、養生シートを用いた封緘養生を行った。表層品質を変化させるために複数の養生日数で試験体を作製した。また、環境条件の影響を確認するために屋外環境でも試験体を暴露し同様に計測を行った。本論文ではこれらの検討結果について報告する。

なお、評価指標の1つとして、コンクリート表面から水を浸透させ物質移動抵抗性を評価する非破壊試験法である表面吸水試験も行った。

2. 実験概要

(1) 簡易超音波試験

使用した簡易超音波試験装置を図-1 に示す。本装置はコンクリート面に受信子および送信子を押し付け計測する。受信子と送信子間の 150mm を伝播する超音波速度が計測される。

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 芝浦工業大学 工学部先進国際課程 (兼務 土木工学科)教授 博士(工学)(正会員)

(2) 表面吸水試験

使用した表面吸水試験装置を図-2 に示す。表面吸水試験法はコンクリート内への水の浸透のしやすさを非破壊で測定するもので、コンクリート構造物の劣化抵抗性の評価手法として開発されている³⁾。本装置は開発された手法と同様のシステムを小型化したもので、コンクリート表面部分にシリンダーを装着し試験を行い、シリンダー内に注水後、10 分間の吸水量の経時変化から吸水速度を算出する。計測された吸水速度が小さいほどコンクリートは緻密であると評価できる。

(3) 試験体概要および養生方法

作製した試験体の形状は図-3 に示すとおりで、150mm×150mm×260mm の柱状とし、型枠には鋼製型枠を用いた。材齢 1 日で脱型を行い、脱型後試験体側面に図-4 に示す市販の養生シートを貼り封緘養生を行った。また、養生期間は 1, 7, 28 日とし、養生日数ごとに試験体を一体作製、養生期間終了後養生シートを剥がし、静置した。

(4) 使用材料およびコンクリートの配合

本研究では表層の品質を変化させるために異なる水セメント比で養生日数を変えて検討を行った。表-1 にコンクリートの配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメント(OPC)を使用した。

(5) 試験方法

図-5 に簡易超音波試験、表面吸水試験の測定位置を示す。測定は試験体側面かつ端部の影響を受けない中央部で行い、側面 2 面で実施。図-6 に計測サイクルを示す。養生終了後はコンクリート内部が高い保水状態であることが考えられる。そのため、試験面開放後 1 日、7 日、14 日、28 日で計測を行った。計測では水分状態の参考のため、kett 社製コンクリート水分計 HI-520 による表面含水率の測定も行った。また、環境の変化を検討するため屋内と屋外の試験を実施した。まず、屋内では気温 20℃のコントロールされた環境でコンクリートの練混ぜ、打設を行い、気温 20℃相対湿度 60%の環境で養生、静置する。一方屋外では、構造物の環境条件に近づけるために練混ぜ、打設、養生、静置を全て屋外で行う暴露実験を行った。使用した配合は表-1 の水セメント比 55%の配合で、打込み時期は 9 月中旬の晴れの日に行い、気温は 30℃であった。暴露地は東京都江東区豊洲にある芝浦工業大学豊洲キャンパスで実施し、打込み、養生、静置はすべて同じ場所である。暴露地の特徴として風通しもよく、直射日光が当たる環境である。なお、計測は同一試験体の表裏で直射日光の当たる日当の面と、当たらない日陰の面で行った。

3. 試験結果と考察

3.1 測定材齢による影響

図-7 に各種配合養生条件のコンクリートによる測定

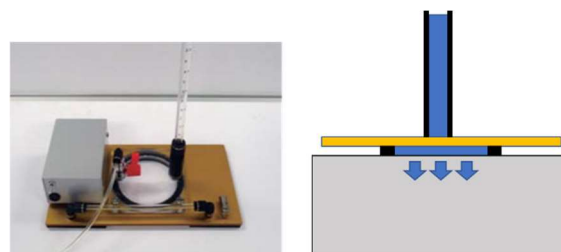


図-2 表面吸水試験装置

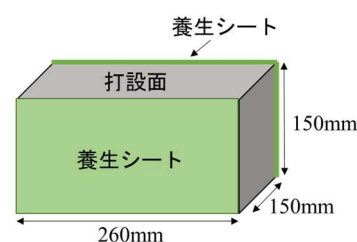


図-3 試験体寸法および養生方法



図-4 養生シート

表-1 コンクリート計画配合

環境	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
					W	C	S	G
屋内	35	12cm	4.5%	44	170	486	723	953
	45			46		378	796	969
	55			48		309	858	964
	65			50		262	928	956
屋外	55			48		309	858	964

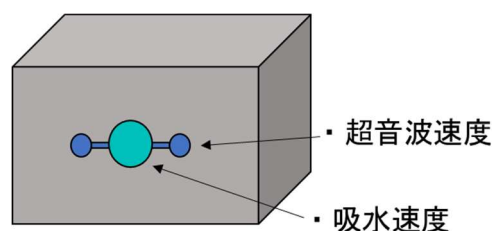


図-5 測定位置

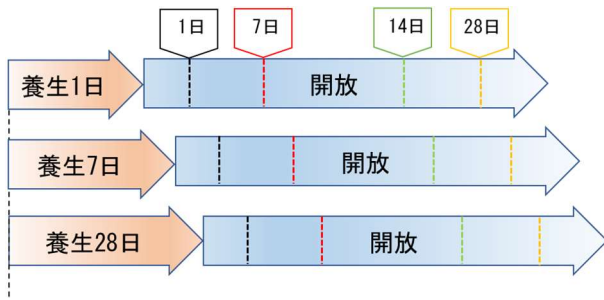


図-6 計測サイクル

材齢と超音波速度の関係を、図-8 にその材齢と吸水速度の結果を示す。図-7 から超音波速度は材齢の経過とともに低下する傾向を示している。また、図-8 より吸水速度は材齢の経過とともに増加する傾向を示した。計測された数値は水セメント比、養生の影響を受け数値は大きく変動している。また、材齢の経過とともに超音波速度は低下し、吸水速度は増加したことから、養生終了後のコンクリート表面から水の蒸発の影響を受けていると考えられる。養生を行っている時は蒸発が起きないため、水分が十分に保たれ水和が進行するが、養生が終わるとコンクリート表面からの蒸発が始まる。蒸発によって水隙を埋めていた水が表面へ移動し、空隙に置き換わることによって生成された表層の空隙部分の増加が、超音波速度の低下および、吸水速度の増加に関係するものと考えられる。

よって、養生終了後のコンクリート表面からの蒸発の影響を確かめる必要がある。

3.2 水分の蒸発の影響

図-9, 10, 11 に各養生日数での養生を終了してからの開放日数と超音波速度の関係を示す。開放1日から7日にかけて超音波速度の増加がみられたものは養生1日だけであり、養生7日および養生28日では超音波速度は低下した。図-9の養生1日の結果をみると、開放1日から7日で超音波速度は増加し、その後一定の挙動を示す。これは、養生1日および開放日数1日時点では材齢が短く、コンクリートの水和が不十分のため完全な硬化に至らず超音波速度が低く計測されたと考えられ、開放日数7日までに水和が進み超音波速度が増加したと考えられる。また、開放7日以降の超音波速度が一定になったのは、水和による超音波速度の増加とコンクリート表面から水の蒸発による超音波速度の低下が相殺したためと考えられる。

図-10の養生7日の結果をみると、開放日数の増加とともに超音波速度は低下する傾向がみられた。これは養生7日間のうちにコンクリートの水和が進行し、コンクリートが硬化したため超音波速度は増加せず、試験面を開放した後はコンクリート表面から水の蒸発が超音波速

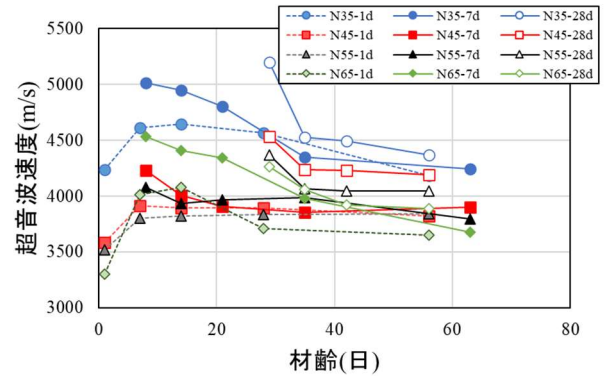


図-7 材齢と超音波速度の関係

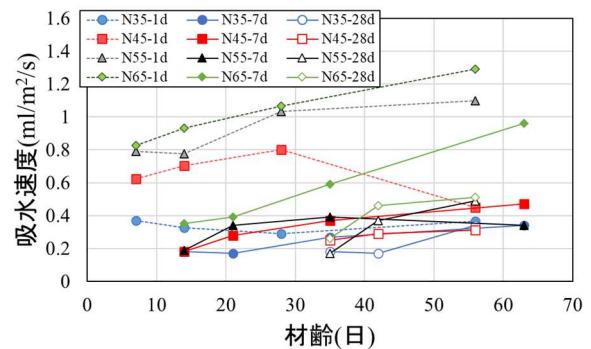


図-8 材齢と吸水速度の関係

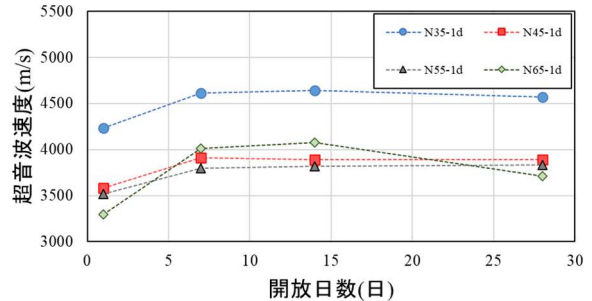


図-9 開放日数と超音波速度の関係－養生1日

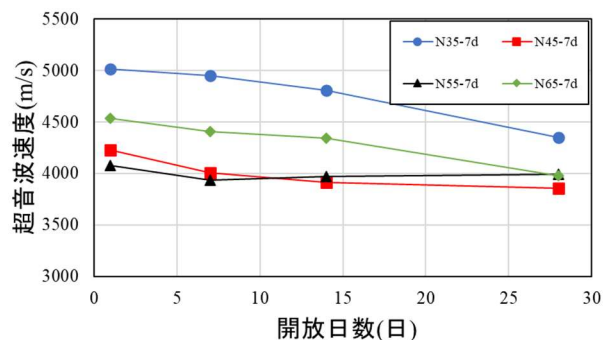


図-10 開放日数と超音波速度の関係－養生7日

度を低下させていると考えられる。

図-11の養生28日の結果を見ると、開放1日から7日では超音波速度が低下し、7日からほぼ一定の挙動を

示す。これは養生 7 日と同じく、養生 28 日間行ったことで超音波速度の増加は一定値まで達したと考えられ、養生 7 日に比べ養生 28 日は長期間の養生により、水和によって水が十分に使用されたため、超音波速度の低下は開放日数 7 日以降緩やかになったと考えられる。

図-12 に表面含水率と開放日数の関係を示す。開放後 7 日に比べて 1 日では表面含水率はいずれも高く計測され、開放 7 日以降含水率は安定する。これは、試験面開放後 7 日間はコンクリート表面では水の蒸発が著しく水分の移動が活発であることを示し、7 日間以降水分の移動は安定すると考えられる。表面吸水試験では計測するコンクリート表面の水分が計測結果に影響すると考えられており、計測時の表面含水率も計測するのが望ましいと考えられている。今回の結果から超音波速度の計測も同じくコンクリート表面から水の蒸発の影響を受けることが確認された。

以上の結果から超音波速度の計測を試験面開放後の経時変化で見た場合、開放後初期の段階ではコンクリート表面から水が蒸発するため、適切な超音波速度の計測がされているとは考えられない。各養生日数の結果から超音波速度の計測は最低でも試験面開放後 7 日まで待たなければコンクリート表面の蒸発の影響を受けると考えられる。また、表面含水率を参考に超音波速度計測の条件を設定すると、養生終了後試験面開放 7 日以降で表面含水率が平衡状態となることから、コンクリート表層の品質を計測する場合、試験面開放後 7 日以降十分に水分の影響が収まれば、コンクリート表層の品質を計測することができると考えられる。

3.3 W/C と養生日数の影響

養生日数による品質の変化を比較する。図-13 に養生日数と超音波速度の関係を、図-14 に養生日数と吸水速度の結果を示す。養生日数との比較では、開放日数 28 日での計測結果を用いた。

まず、超音波速度は水セメント比 35% 以外の 3 配合では養生 1 日から 28 日では増加したが、35% では超音波速度の低下がみられた。

次に吸水速度では水セメント比 35% 以外の 3 配合では養生日数の増加とともに吸水速度も低下する傾向がみられた。しかし養生 7 日と 28 日では吸水速度に変化がみられない。

養生日数を延長することで、表面からの水の蒸発が防がれ、水和が進行しコンクリート表層の組織は緻密になるため超音波速度は増加し、吸水速度は低下すると予想される。今回水セメント比 35% は他の配合と異なる傾向を示した理由としては、セメントに対する水の量が少ないため、水が十分にセメントとの水和に使用され、養生の効果が結果に反映されなかったと考えられる。ただし、

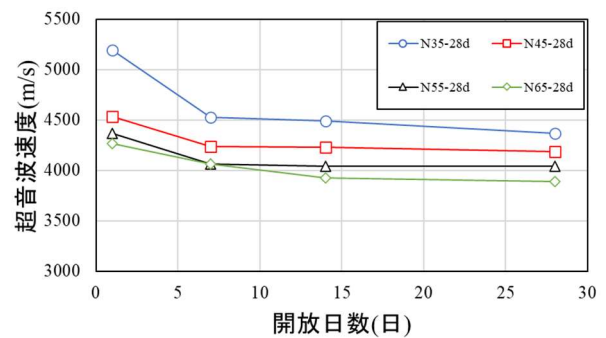


図-11 開放日数と超音波速度の関係－養生 28 日

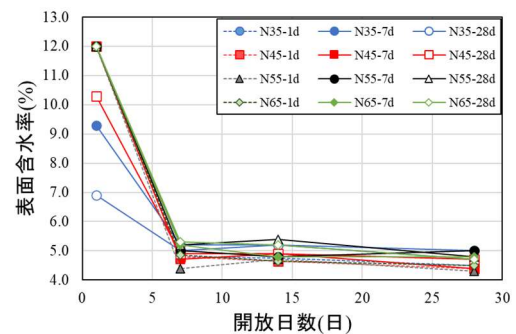


図-12 表面含水率と開放日数の関係

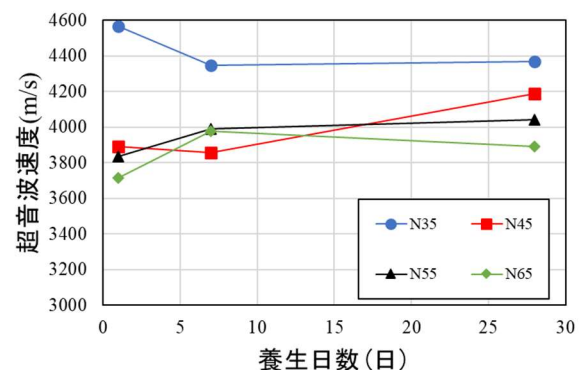


図-13 養生日数と超音波速度の関係

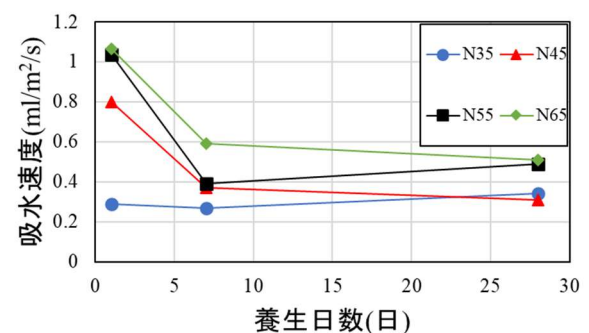
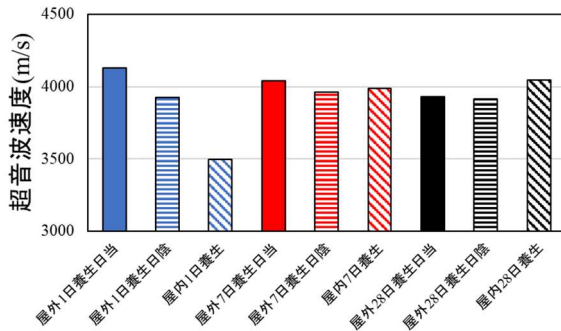
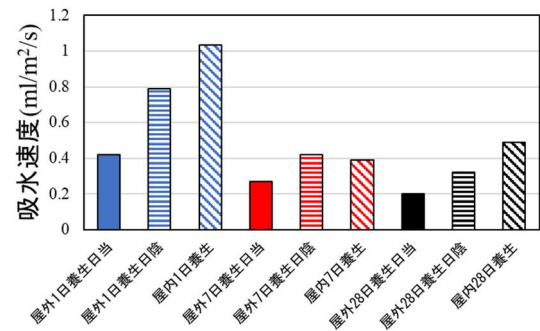


図-14 養生日数と吸水速度の関係

他の 3 配合の結果から養生によって変化する表層品質を超音波速度、吸水速度ともに計測できると考えられる。



図－15 日射と超音波速度の関係



図－16 日射と吸水速度の関係

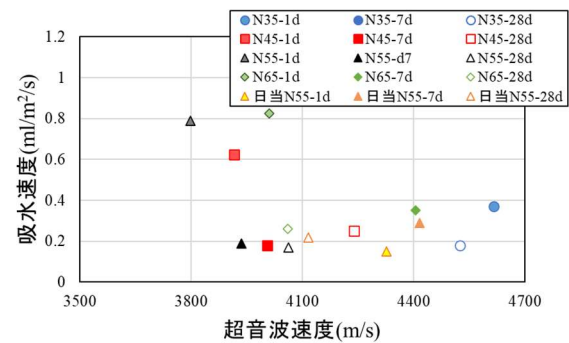
3.4 暴露環境の影響

図－15 に日射と超音波速度の関係を、図－16 に開放28日での日射と吸水速度の関係を示す。超音波速度は養生1日の結果では、7日と28日に比べて屋内よりも屋外に暴露した試験体の超音波速度が高い。また、吸水速度でも養生1日の試験体で屋内と屋外で吸水速度に大きな差がみられた。また、日陰に比べて日当側の超音波速度は増加し吸水速度は低下する傾向がみられた。これら2つの結果から、日射がある方が緻密な構造になっていることが考えられる。理由として、打設時期が9月中旬であったために、コンクリート表面の温度は高くなり、高温養生され水和促進したと考えられる。

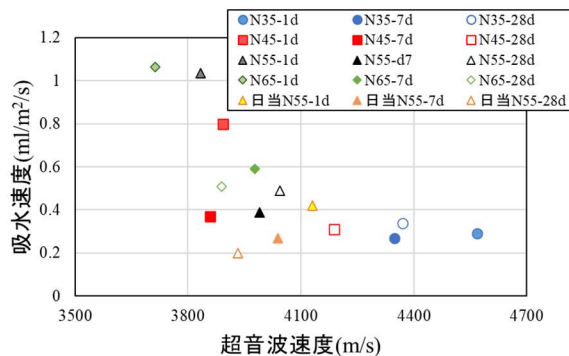
また、暴露環境に置いた場合、雨水による給水が水和を促進させたと考えられる。今回試験体を暴露した場所では日当側は雨が直接当たるが、日影側は校舎を背にしているために、雨がかかりにくい。これら雨水の有無、かかり方も計測結果に影響を与えていると考えられる。表－2 に養生の異なる試験体の合計降水量の推定値を示す。合計降水量は国土交通省気象庁が公開している気象データから暴露地に近い江戸川臨海をサンプルとして使用した。表から、どの養生期間でも雨水による給水があったことがわかる。また、表から養生1日、試験面開放後7日での合計降水量は75mmであり若材齢の期間に雨水による給水があったと考えられ、養生1日で屋内に比べて屋外の計測値に大きな差がみられた結果の原因と考えられる。

表－2 合計降水量の推定値

		養生		
		1日	7日	28日
合計降水量 mm	開放1日	6.0	0.0	6.0
	開放7日	75.0	0.5	26.5
	開放14日	75.5	106.5	38.5
	開放28日	189.5	135.0	108.5



図－17 開放後7日の超音波速度と吸水速度の関係



図－18 開放後28日の超音波速度と吸水速度の関係

4. 超音波速度と吸水速度の関係

超音波速度と吸水速度を比較した。図－17 に開放後7日での超音波速度と吸水速度の関係を、図－18 に開放後28日での超音波速度と吸水速度の関係を示す。これらの図から試験面開放後水の蒸発が進行することによって両計測結果は比例関係に近づくと考えられる。試験面開放後7日で計測値が不安定な理由として、超音波速度計測の対象となる表層範囲が表面吸水試験の計測できる表層範囲とは異なっているため、試験面開放期間が長期間必

要となり、放後28日では水の蒸発が進行したため計測値が安定したと考えられる。

5. まとめ

(1) 簡易超音波試験装置による超音波速度計測では、湿潤養生後にコンクリート表面から水の蒸発の影響

を受けると考えられ、試験面の乾燥が進み水分の移動が収まるまで計測値は影響を受ける。

- (2) 超音波速度は、材齢初期は水和の影響を受け計測値が増加するが、試験面開放後 7 日以降で水の移動が収まれば、表層品質の違いを計測できる。
- (3) 暴露実験において、環境条件の差による計測値の変動が確認された。特に材齢初期段階での日射および雨水の影響が表層品質に影響を及ぼすと考えられ、実構造物での計測では、材齢初期にコンクリート表面に雨水による給水もしくは、型枠上からの日射による加熱などを受ける場合、表層品質の計測結果は打設時期の周辺環境に大きく依存した結果が得られると考えられる。
- (4) 簡易超音波試験装置によって計測された超音波速度と、表面吸水試験によって計測される吸水速度から、試験面開放後 28 日で超音波速度計測によって表層の品質を捉えることができる可能性が示された。

参考文献

- 1) 温品達也，坂田昇，渡邊賢三，柳井修司：表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34 No.1，2021
- 2) 小松怜史，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート床版上面の品質評価手法の検討，土木学会第 71 回年次学術講演会，2016
- 3) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質評価法に関する基礎的研究，土木学会論文集，Vol.69，No.1，82-89，2013
- 4) 白根勇二，舟橋政司，松尾健司：施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，2010
- 5) Levitt, M.: Non-destructive testing of concrete by the initial surface absorption method, Proceedings of a Symposium on Non-Destructive Testing of Concrete and Timber, London, June 1969, Institution of Civil Engineers, pp. 23-26, 1970.
- 6) 三田勝也,加藤佳孝：ブリーディング水がコンクリート表層部の品質に与える影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，pp.1385-1390,2011
- 7) 荒木萌，伊代田岳史，北川真也：簡易な超音波速度計測によるコンクリートの強度推定に関する検討，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，2019
- 8) 家部麻里子，秋山仁志，岸利治：水の流下試験によるコンクリート表層の品質評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，2012
- 9) 国土交通省，気象庁，各種データ資料：<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (閲覧日：2022 年 1 月 7 日)