

論文 吸水および乾燥過程におけるモルタル内部の飽和度分布が反発度に及ぼす影響

相澤 新之介*1・大野 健太郎*2・岩野 聡史*3・鎌田 知久*4

要旨：コンクリートの反発度試験において、反発度はコンクリートの含水状態に影響を受け値が変動することが知られているが、その影響範囲は明確にされていない。本研究では、コンクリート内部の含水状態が反発度に及ぼす影響を検討するため、粗骨材による反発度の変動要因を排除したモルタル供試体を対象に吸水および乾燥を行い、モルタル表面の乾湿状態の違い、および内部の飽和度分布の変化が反発度に及ぼす影響について検討した。その結果、同一供試体にて表面の乾湿状態が異なる2面の反発度は異なり、打撃した一表面から20mm程度までの深さの含水状態が反発度に影響を及ぼす可能性が示唆された。

キーワード：反発度、モルタル、力学的特性、飽和度分布、圧痕体積

1. はじめに

コンクリートの表面を重錘やハンマ等で打撃し、その打撃過程から得られる指標を用いてコンクリートの強度や品質を評価する非破壊試験方法が多数提案されている。そのうち、JIS A 1155 に規定されているリバウンドハンマを用いた反発度法は最も普及している打撃試験であり、施工管理から維持管理の広い段階でコンクリートの強度推定を目的に使用される機会が多い。この試験方法から得られる反発度は、リバウンドハンマに内蔵される重錘の跳ね返りの程度を表したものである¹⁾。

ここで、コンクリートの力学的特性および反発度に対するコンクリートの含水状態の影響に関する既往の研究では、コンクリートが乾燥すると圧縮強度が高く測定されること²⁾、コンクリートの圧縮強度と反発度には相関があること¹⁾、コンクリートの含水率およびコンクリート表面の含水状態が変化することで反発度が変化すること^{3) 4)}、火害を受けたコンクリートを対象とした場合、コンクリートの圧縮強度と反発度の相関が低い場合もあること⁵⁾、などが報告されている。

このように、コンクリートの力学的特性の測定値と反発度はコンクリートの含水状態の影響を受け、両者は一定の条件下では相関を示すものの、一定の条件から外れる場合などは必ずしも相関を伴うものではなく、それぞれ独立した測定値であり、コンクリート中の水分の影響は異なると考えられる。また、吸水や乾燥を受けることでモルタル内部の飽和度分布の勾配が変化すること⁶⁾が報告されており、環境条件によってコンクリート内部と表層部の含水状態が異なる場合があり、反発度がコンクリート表面からどの程度の深さまでの含水状態の影響を

受けているのか定かではない。

そのため、本研究では、リバウンドハンマによる反発度試験を対象とし、コンクリートの飽和度分布が反発度に及ぼす影響を検討することとした。実験では、粗骨材の影響を排除する目的でモルタル供試体を対象とし、吸水過程と乾燥過程それぞれにおける表面の乾湿状態の違い、およびモルタル内部の飽和度分布の変化が反発度に及ぼす影響および力学的特性との関係について検討した。さらに、リバウンドハンマの打撃によるモルタル供試体表面の塑性変形痕を圧痕と定義し、圧痕体積と反発度の関係についても併せて検討した。

2. 実験概要

2.1 モルタル供試体の配合

モルタルの配合を表-1 に示す。得られた結果の妥当性判断および傾向確認を目的に水セメント比を55%、60%の2水準とし、セメント砂比を1:3とした配合にて検討した。

2.2 供試体の作製方法

実験フローを図-1 に示す。本実験では、反発度測定を実施する角柱供試体とモルタルの圧縮強度確認用に円柱供試体をそれぞれ作製し、供試体作製、水中養生、供試体成形、初期乾燥、吸水過程、乾燥過程の手順で実験を進めた。まず、フレッシュモルタルを内寸

表-1 モルタルの配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)		
	W	C	S
55	270	492	1475
60	288	480	1440

*1 東京都立大学 都市環境学部都市基盤環境学科 (学生会員)

*2 東京都立大学 都市環境学部都市基盤環境学科 准教授 (正会員)

*3 リック (株) 技術研究所 (正会員)

*4 東京都立大学 都市環境学部都市基盤環境学科 助教 (正会員)

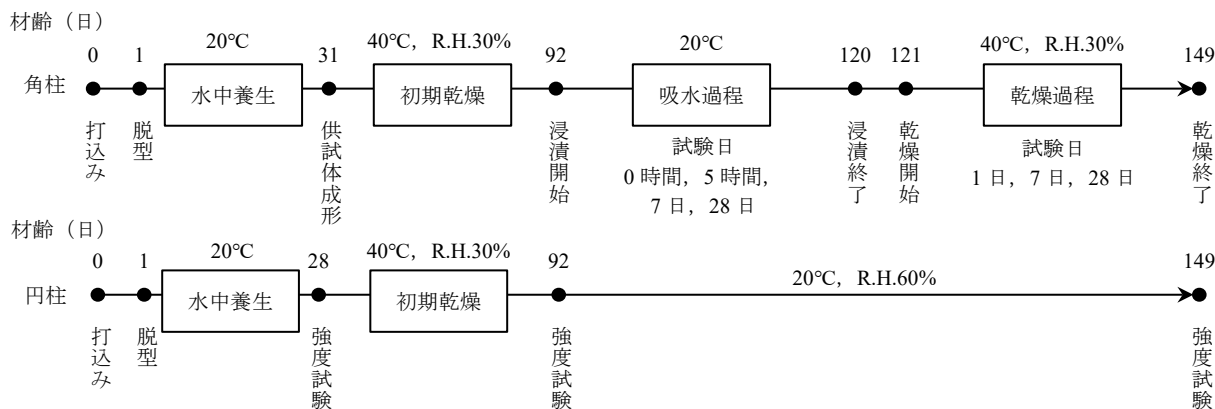


図-1 実験フロー図

100×100×400mmの鋼製型枠およびφ100×200mmの円柱樹脂製型枠に打ち込み、材齢1日で脱型後、円柱供試体は材齢28日、角柱供試体は材齢31日まで20℃の水中養生を行った。その後、角柱供試体は同材齢にてコンクリートカッターを用いて100×100×198mmの寸法に成形した。

2.3 吸水および乾燥方法

成形した角柱供試体を初期乾燥として40℃、R.H.30%の環境下で材齢92日まで乾燥させた。その後、角柱供試体の型枠側面の1面を吸水面、その向かい合う面を開放面と定義し、吸水面のみから吸水させるため、吸水面と開放面以外の面をアルミテープで覆った。また、吸水面はアルミテープと供試体の隙間からの水の浸入を防ぐために、図-2のように縁10mmまでアルミテープを折込み、その上からホットメルトを薄く塗布した。このような準備工程を終えたのち、図-3に示す吸水および乾燥工程に移行した。吸水過程では、材齢92日から20℃の環境下で吸水面から鉛直方向に10mmまで供試体を浸水させ、28日間の吸水を実施した。その後、材齢121日からの乾燥過程では吸水面をアルミテープで覆い、水の逸散を開放面のみからと制限し、40℃、R.H.30%の環境下で28日間乾燥させた。

また、円柱供試体は材齢28日まで20℃の水中養生を行い、初期乾燥として40℃、R.H.30%の環境下で材齢92日まで乾燥させた後（角柱供試体の初期乾燥と同様）、材齢149日まで20℃、R.H.60%の環境下で保管した。

2.4 試験項目

試験項目は、反発度試験、圧縮強度試験、供試体深度方向の飽和度分布測定および圧痕体積測定である。なお、各試験時には、アルミテープを取り除いた後試験を行った。各試験は吸水および乾燥過程における吸水0時間（材齢92日）、吸水5時間（材齢93日）、7日間（材齢99日）、28日間（材齢120日）、および乾燥1日間（材齢122日）、7日間（材齢128日）、28日間（材齢149日）において実施した。なお、各試験に用いた供試体は一水準につき一

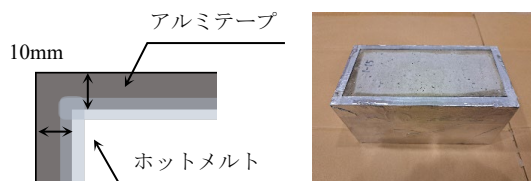


図-2 吸水面のアルミテープ

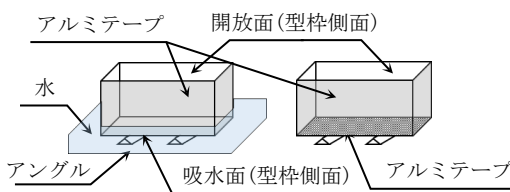


図-3 吸水および乾燥方法
(左：吸水過程、右：乾燥過程)

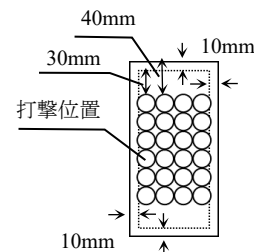


図-4 打撃位置



写真-1 反発度試験

体とした。

(1) 反発度試験

反発度試験に際し、材齢92日における円柱供試体の圧縮強度の1/10応力に相当する荷重(W/C=55%:50kN, W/C=60%:45kN)を角柱供試体に載荷して固定した。打撃面は吸水面と開放面の2面とし、各面の打撃回数は24回とした。打撃位置は図-4のようにマーカの中央を打撃した(写真-1)。なお、本研究では打点数を多くするため打撃位置を供試体縁部から10mm以上の内部としたが、供試体縁端部と供試体中央部での測定値に大きな違いは認められず、縁端部の影響は無いと判断した。

(2) 圧縮強度試験

反発度試験を行った角柱供試体を対象に圧縮強度試

験を実施した。反発度試験時に载荷した荷重を完全に除荷した後、続けて強度試験を行った。また、吸水および乾燥期間中の強度発現の有無を確認する目的で、材齢 92 日および材齢 149 日で円柱供試体の圧縮強度試験を実施した。このときに得られた応力-ひずみ関係より静弾性係数を算出した。

(3) 飽和度分布の測定

反発度測定後の供試体を乾式コンクリートカッターで切断し、97×100×20mm の試料片を切り出した。図-5 のように供試体を長手方向に二分した後、一方を表面から 20, 40, 60, 80mm, もう一方を表面から 10, 30, 50, 70, 90mm の位置で切断し、吸水面から 20mm 毎に 9 つの試料片を作製した。切り出した直後の質量 $W(g)$, 絶乾状態の質量 $W_{dry}(g)$, 表乾状態の質量 $W_{wet}(g)$ を測定し、式 (1) より試料片の飽和度 $R(\%)$ を算出した。なお、試料片を 105°C で乾燥させて質量が恒量になった時点を超乾状態とみなし、その後、20°C 水中で保管し表面水を除いたときの質量が恒量になった時点を表乾状態であるとみなした。

$$R(\%) = \frac{W - W_{dry}}{W_{wet} - W_{dry}} \times 100 \quad (1)$$

(4) 圧痕体積の測定

反発度試験時のリバウンドハンマの打撃によるモルタル供試体表面の塑性変形痕を圧痕と定義し、非接触 3 次元測定器 (高さ分解能 0.1 μ m) で圧痕中の最大深さ、圧痕の表面積および体積を測定した。測定は前述の飽和度分布測定時に供試体を切り出した直後に実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタルの力学的特性と質量変化率の関係

吸水および乾燥過程における角柱供試体の圧縮強度を図-6 に示す。なお、角柱供試体の吸水 0 日 (材齢 92 日) および乾燥 28 日 (材齢 149 日) と同日に測定した円柱供試体 (20°C, R.H.60% で保管) の圧縮強度も併せて示す。また、吸水前の角柱供試体の圧縮強度と比較した際の圧縮強度比と角柱供試体の質量変化率の関係を図-7 に示す。質量変化率は式(2)によって算出した。ただし、 $M(\%)$ を質量変化率、 $M_0(g)$ を吸水 0 時間の角柱供試体の質量、 $M_i(g)$ を反発度試験時の角柱供試体の質量とする。

$$M(\%) = \frac{M_i - M_0}{M_0} \times 100 \quad (2)$$

吸水過程において、圧縮強度は吸水 5 時間で低下し、吸水 7 日の圧縮強度は吸水前の 80% 程度まで低下して最小値を示した。その後、吸水 28 日に向かい微増傾向を示した。吸水過程では、吸水時間の増加に伴いモルタルの細孔が液状水で満たされていく。ここで、外力が作用するとき、空隙内に存在する水には間隙水圧が発生し、局

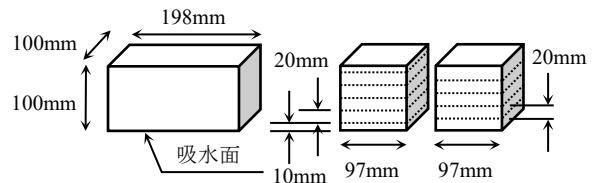


図-5 試料片の作製

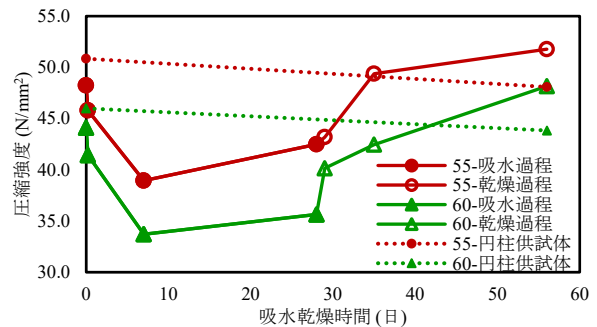


図-6 吸水・乾燥に伴う圧縮強度の変化

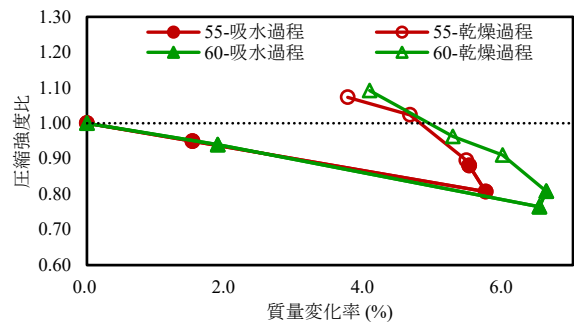


図-7 質量変化率と圧縮強度比

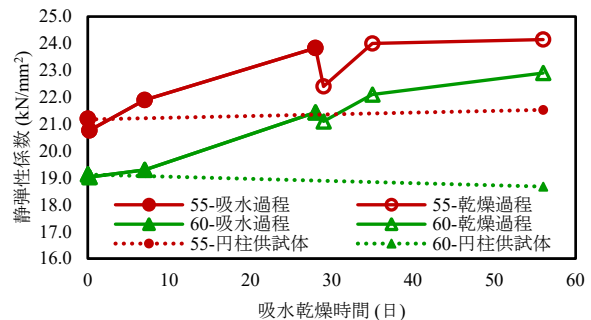


図-8 吸水・乾燥に伴う静弾性係数の変化

所的な間隙水圧によって微細組織の破壊やマイクロクラックの進展が生じる⁷⁾と報告がある。吸水 5 時間および吸水 7 日では、細孔中の液状水の間隙水圧の作用によって圧縮強度が低下したと考えられる。吸水 28 日では吸水 5 時間や吸水 7 日と同様に圧縮強度が低下すると想定されたが、僅かに圧縮強度が増加傾向を示した。福島ら⁸⁾によれば、20°C, 4 週水中養生後のセメントペーストに対し、40°C, R.H.40% の条件下で 3 日間乾燥させ、その後 3 日間水に浸漬させる乾湿サイクルを 3 サイクル与えたところ、軽微な水和反応が進行していることが報告されており、本実験においても吸水過程における再水和によって強度が発現した可能性が示唆される。一方、吸水過程から乾燥過程に移行すると、圧縮強度は増加傾向を

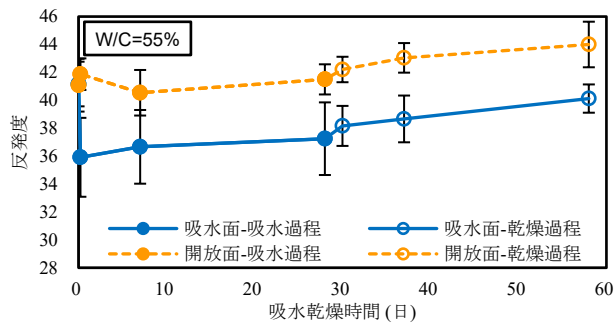


図-9 吸水・乾燥に伴う反発度の変化

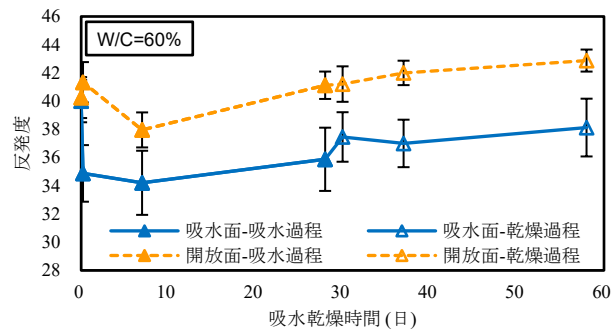


図-10 吸水・乾燥に伴う反発度の変化

示した。質量変化率の低下に伴い圧縮強度比は増加し、乾燥 28 日の 圧縮強度は吸水前のそれと比較し 10%程度増加した。乾燥過程では細孔中の水分が逸散して空隙ができることで、細孔中の液状水の移動が容易になる。そのため、吸水 7 日や吸水 28 日に比べ、細孔中の液状水の間隙水圧の作用が軽減され、圧縮強度が上昇したと考えられる。また、乾燥 28 日の圧縮強度は、前述した吸水過程における再水和の影響により、吸水前より高くなった可能性が示唆される。なお、材齢 92 日および材齢 149 日の円柱供試体の圧縮強度は角柱供試体とは異なり減少傾向を示した。水が供給されない条件のもと、この期間の材齢増加による強度発現が確認されなかったため、材齢 92 日から 149 日にかけて円柱供試体内部に残存する水による水和反応は生じていないと考えられる。吸水および乾燥過程におけるモルタルの静弾性係数の変化を図-8 に示す。なお、円柱供試体の圧縮強度試験結果から算出した静弾性係数も併せて示す。静弾性係数は吸水 28 日まで増加傾向を示し、乾燥過程では緩慢な増加傾向または横ばいとなった。吸水過程では増加傾向にあり、既往の研究と同様の結果となった²⁾。

3.2 モルタル供試体全体の含水状態およびモルタル内部の飽和度分布が反発度に及ぼす影響

(1) モルタル供試体全体の含水状態が反発度に及ぼす影響

吸水および乾燥過程における反発度の変化を図-9、図-10 に示す。図中には各面の反発度の平均値 (n=24) と標準偏差の範囲を表示している。また、吸水前の反発度と比較した際の反発度比と供試体の質量変化率の関係を図-11 に示す。吸水面の反発度は吸水 5 時間で低下し、その後、吸水 28 日までの変化は小さい傾向を示した。乾燥過程では、乾燥 28 日まで微増傾向を示した。一方、開放面の反発度は吸水および乾燥過程を通して変化は小さいものの、吸水 7 日では反発度が低下し、これを起点に緩慢な増加傾向となった。吸水 7 日における反発度の低下は、3.2(2)および図-12 で後述するように、開放面側まで水分が浸透したことによる影響と考えられる。吸水面では短時間の吸水によって反発度が低下し、その

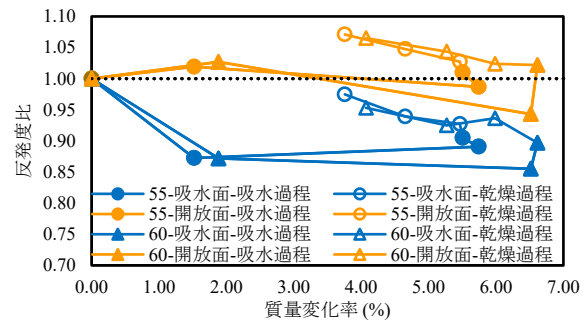


図-11 反発度比と供試体の質量変化率

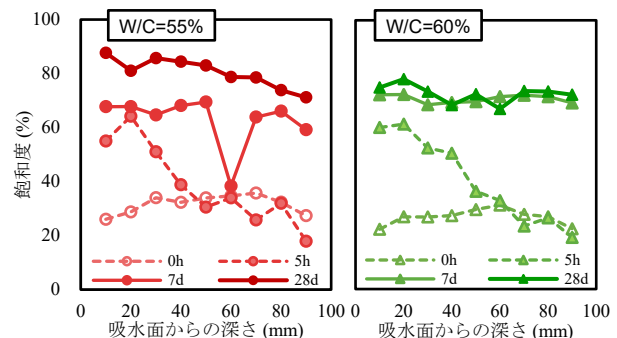


図-12 飽和度分布の変化

後の吸水に伴う反発度の変化が小さいこと、同一の供試体の吸水面と開放面で測定した反発度が大きく異なることから、同一のコンクリートであっても吸水履歴の異なる面では表面の乾湿状態が異なり、反発度が異なる可能性が示唆される。また、乾燥過程では吸水面がアルミテープで覆われ、開放面は空気に直接接触しており、吸水面と開放面の含水状態が異なると考えられる。そのため、吸水面と開放面では乾燥が反発度に及ぼす影響が異なると想定されたが、図-11 に示すように乾燥過程における反発度の履歴曲線の概形が吸水面と開放面で類似している。したがって、乾燥過程の吸水面および開放面における反発度の微増傾向は、モルタル表面の含水状態の変化に起因するものではなく、再水和の影響によって供試体全体の組織変化が生じ、両面で得られる反発度が変化した可能性が考えられる。

(2) 吸水過程における供試体内部の飽和度分布

以降では、吸水 0 日から吸水 28 日までの供試体内部の飽和度分布を対象に考察する。吸水過程における供試

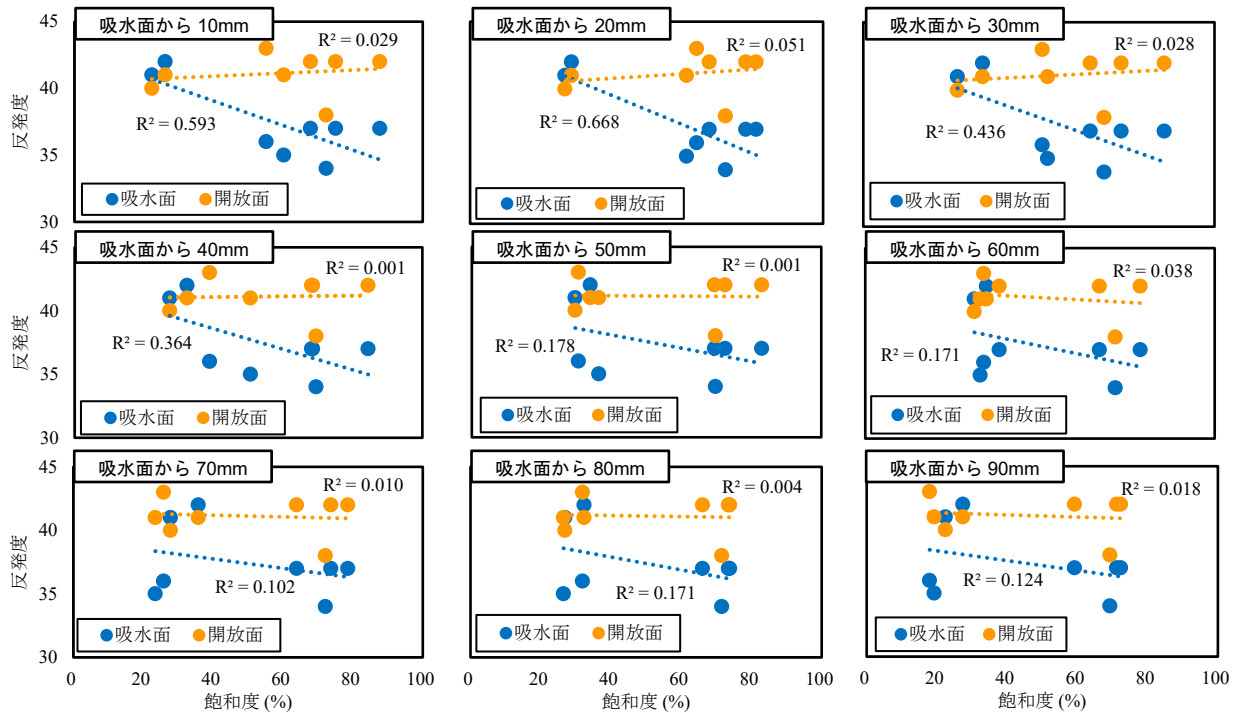


図-13 吸水面からの各深さの飽和度と各面で測定した反発度

体内部の飽和度分布を図-12に示す。吸水前と吸水5時間を比較すると、飽和度はW/C=55%では吸水面から40mm、W/C=60%では50mmの深さまでの範囲で増加した。W/Cに関わらず吸水面から10mm、20mmで最も高い飽和度となり、深さ方向に増加の程度は徐々に小さくなった。吸水面から50~90mmの範囲では飽和度は増加せず、5時間の吸水で表面から40~50mm付近まで水が浸透したといえる。一方、吸水7日および吸水28日時点で全体の飽和度が増加し、深さ方向で飽和度の大きな差異は見られなかった。吸水時間の増加に伴い、水セメント比によりその程度は異なるものの、供試体全体に水分が浸透したと考えられる。

(3) モルタル内部の飽和度分布と反発度の関係

モルタル内部の飽和度分布と反発度の関係を検討した。吸水面からの各深さの飽和度と吸水面および開放面の反発度の関係を図-13に示す。図中には飽和度と反発度の関係について直線近似を行ったときの決定係数を表示している。吸水面からの深さと決定係数の関係を図-14に示す。吸水面の決定係数は吸水面から10mm、20mmの位置で高い値を示し、30mm以降緩やかに低下した。一方、開放面の決定係数は吸水面からの深さに関わらず低い値となった。反発度は深さ10~20mmのコンクリートの品質を反映したものである⁹⁾との指摘もあり、吸水したモルタル表面の場合、表面から20mm程度の深さまでの含水状態が反発度に影響を及ぼす可能性がある。

4. 反発度と圧痕の関係に関する検討

本実験では、圧痕の測定項目として、圧痕中の最大深

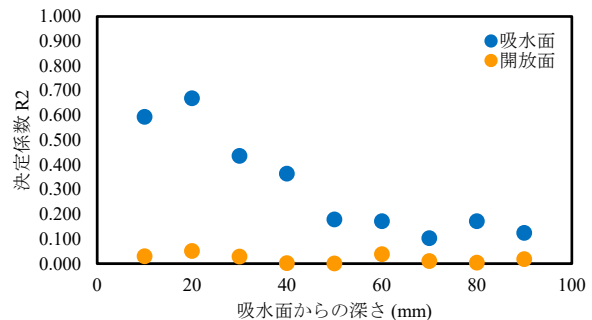


図-14 決定係数と吸水面からの深さ

さ、圧痕の表面積および体積を測定した。圧痕の各測定値と反発度の関係を図-15、図-16、図-17に示す。なお、吸水前の供試体の打撃面は両面ともに乾燥状態にあるため、各測定結果を乾燥状態のものに含めた。圧痕の最大深さ、表面積および体積と反発度の関係において、圧痕の最大深さや表面積に比べ、圧痕体積は反発度と強い負の相関を示した。リバウンドハンマで打撃した際のモルタル表面に生じる塑性変形体積が大きいほど反発度は小さくなり、反発度がモルタル表面の塑性変形のしにくさを表している可能性が示唆される。また、湿潤状態の表面は乾燥状態のものに比べ圧痕体積が大きい傾向にある。湿潤状態にあるモルタル表面付近の細孔内は液状水で満たされており、リバウンドハンマが貫入した際に間隙水圧が発生し、表面付近の微細組織が破壊され⁷⁾圧痕体積が大きくなったと考えられる。以上から、湿潤状態にあるモルタル表面をリバウンドハンマで打撃したとき、表面付近の液状水に生じる間隙水圧によって塑性変形体積が大きくなり、反発度が小さくなったと推定される。

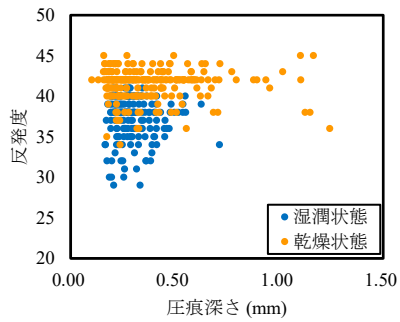


図-15 圧痕深さ

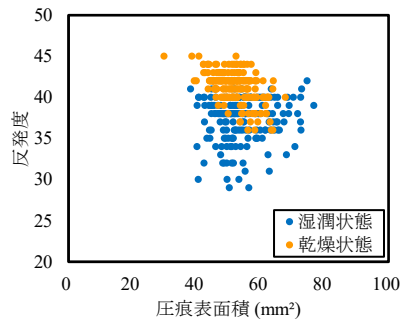


図-16 圧痕表面積

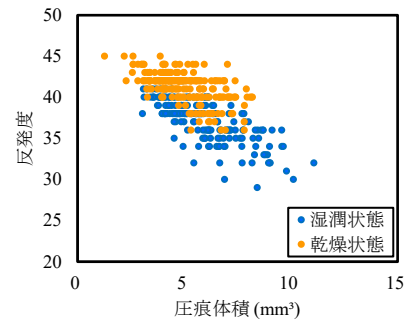


図-17 圧痕体積

5. まとめ

本研究では、吸水過程と乾燥過程それぞれにおけるモルタル表面の乾湿状態の違い、および飽和度分布の変化が反発度に及ぼす影響および力学的特性との関係について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 吸水過程において、モルタルの角柱供試体の圧縮強度は吸水7日で吸水前の圧縮強度の80%程度まで低下し、その後、吸水28日に向かい微増傾向を示した。乾燥過程に移行すると増加傾向を示し、乾燥28日の圧縮強度は吸水前のそれと比較し10%程度増加した。静弾性係数は吸水28日まで増加傾向を示し、乾燥過程では緩慢な増加傾向または横ばいとなった。
- (2) 短時間の吸水によって吸水面の反発度が低下し、その後の吸水に伴う反発度の変化が小さいこと、同一の供試体の吸水面と開放面で測定した反発度が大きく異なることから、同一のコンクリートであっても表面の乾湿状態の違いによって反発度が異なる可能性が示唆された。
- (3) 吸水面からの深度方向の飽和度と吸水面および開放面の反発度の関係に対して直線近似を行い、決定係数を算出したところ、吸水面の決定係数は吸水面から10mm、20mmの位置で高い値を示した。吸水したモルタル表面の場合、表面から20mm程度の深さまでの含水状態が反発度に影響を及ぼしていると考えられる。
- (4) 圧痕の最大深さや表面積に比べ、圧痕体積が反発度と強い負の相関を示した。リバウンドハンマーで打撃した際のモルタル表面に生じる塑性変形体積が大きいほど反発度は小さくなり、反発度はモルタル表面の塑性変形のしにくさを表している可能性が示唆された。
- (5) 湿潤状態のモルタル表面は乾燥状態のものに比べ、表面に生じる圧痕の体積が大きい傾向にあった。

謝辞

本研究に際し、東京都立大学の上野敦准教授に御助言いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 谷口秀明, 渡辺博志, 河野広隆, 藤田学: テストハンマーによるコンクリートの硬度測定および強度推定の誤差要因に関する検討, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.199-210, 2004.8
- 2) 岡島達雄: コンクリートの強度・ヤング係数と水分の関係, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.20-24, 1994.
- 3) 古賀裕久, 河野広隆, 伊藤祐二, 川崎克己: コンクリート強度推定のための反発度測定における乾燥・吸水状態の影響, 土木学会第57回年次学術講演会, V-157, pp.313-314, 2002.9
- 4) 三井健郎, 米澤敏男, 北川高史, 今城宏三: 反発度法により推定した構造体コンクリート強度に影響する要因の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1651-1656, 2005.6
- 5) 春畑仁一, 内田慎哉, 岩野聡史, 池田憲一: 火害を受けたコンクリートの反発度・反発速度比・機械インピーダンス・接触時間による劣化状態の評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1635-1640, 2018.6
- 6) 金氏裕也, 後藤智和, 黒田保: 乾湿繰り返しを受けるモルタルの水分移動特性, セメント・コンクリート論文集, Vol.76, No.1, pp.130-137, 2022
- 7) 大下英吉, 谷口幸弘: 部分的に水で飽和された多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーに関する研究, 土木学会論文集, No.620/V-43, pp.257-270, 1999.5
- 8) 福島浩樹, 石森正俊, 胡桃澤清文, 名和豊春: 乾湿繰り返しによるセメント硬化体の収縮・膨張挙動, セメント・コンクリート論文集, Vol.64, No.1, pp.74-81, 2010.
- 9) 湯浅昇: リバウンドハンマーによる強度推定に関する話題提供—各種リバウンドハンマーの相互比較, リバウンドハンマーの反発度と圧縮強度との関係を求める方法の提案—, コンクリート工学, Vol.48, No.12, pp.23-30, 2010.12