論文　ドリル掘削による含水率分布測定のための基礎的検討

田中　俊成[*1]・酒井　雄也[*2]

要旨：ドリルによる掘削粉からセメント系材料の含水率分布や水の浸透深さを評価するための検討を実施した。ドリル掘削粉で測定する含水率は，摩擦熱の影響により円盤状試料で測定する含水率より低くなる傾向が見られたが，線形近似式により，掘削粉の含水率から円盤状試料の含水率を標準誤差 1.4%の精度で推定可能であった。また，水漏れ発色現像剤で可視化された水分浸透深さ付近で，掘削粉の含水率の減少が収束する傾向が見られた。掘削粉の含水率分布をシグモイド関数により近似し，曲率半径が最小となる深さを水分浸透深さの推定値として定義すると，水漏れ発色現像剤で観察される水分浸透深さと良好に一致した。

キーワード：ドリル，掘削粉，含水率，水分浸透深さ，微破壊検査

1. はじめに

コンクリート構造物への水分浸透は，中性化や塩分浸透による鉄筋腐食リスクを高め[1),2)]，凍結融解[3)]やアルカリシリカ反応[4)]によるコンクリート劣化を引き起こす要因となる。既設構造物の安全性や耐久性を評価する上で，水分浸透性状を把握することは重要である。2017 年制定の土木学会コンクリート標準示方書で，鋼材腐食に対する照査項目として規定されている「水の浸透に伴う鋼材腐食評価[5)]」では水分浸透速度係数を用いるが，この算定には水分浸透深さが必要となる。設計の照査のために水分浸透深さを室内試験レベルで把握する方法として，水分浸せきした円柱供試体を割裂し，発色現像材を噴霧する方法が提案されている[5)]が，実構造物レベルで水分浸透深さを測定する方法は，後述するように限定的であり，また，適用の難しい場面がある。一方，鋼材腐食や凍結融解現象をより詳細に把握しようとする場合，現象発生のための水分量の閾値[2),3)]があることから，水分浸透深さだけではなく，絶対値としての含水率評価も必要となる。

既設コンクリート構造物の水分浸透深さや含水率分布を現地で測定する方法としては，電気抵抗式水分計を使用する方法が実用化されている[6)]。この方法では，表層コンクリートに直径 6 mm 程度の削孔をして電極を差し込み，深さごとに測定した電気抵抗値を含水率に変換し，水分分布を算出するが，電気抵抗値は含水率だけではなく，対象コンクリートの構成材料[6)]や塩化物イオンの存在[7),8)]などにも影響を受けて変化する。そのため，この手法で測定される水分浸透深さを信頼してよいか，また，含水率を絶対値として扱うことができるかについては慎重な判断を要する[6)]。その他に含水率の絶対値を評価する方法としては，乾式でコアサンプルを採取して絶乾させる方法[9)]があるが，乾式でのコア採取は過剰な熱の発生による採取時の含水率の変化が懸念されるうえ，重さ十数キロのコアドリルの運搬や足場の設置などの労力がかかることや，多量の粉じんが発生する有害作業であることから，簡易的な方法とは言い難い。

そこで本研究では，既設コンクリート構造物を対象に簡便に実施可能で，かつ水分浸透深さと含水率の絶対値を評価可能な水分分布評価のための検討を実施した。筆者らは既報[10)]において，塩化物イオン浸透深さや中性化深さを直径 2 mm 以下のドリル削孔で測定可能なことを確認しているが，本論文では新たに，その際に生じるドリル掘削粉を利用することを想定した，水分浸透深さ・含水率分布の評価を試みた。

本手法は，コンクリートの構成材料や導電性イオンの有無によらず含水率の絶対値を測定可能であり，さらに中性化深さや塩分浸透深さを微破壊で測定する際の削孔を活用できるため，構造物に新たな損傷を加えないこともメリットである。また，掘削粉による水分分布評価は，ドリル削孔位置における局所的評価となるが，十分な精度で測定できるならば，例えば維持管理に重要な鉄筋直上のかぶりコンクリートの水分分布を効率的に収集することなどが可能となる。

2. 実験概要

本論文では，本試験としてドリル掘削粉による含水率・水分浸透深さ評価の妥当性を確認するための検討を実施し，その検討のための予備試験として含水率測定方法に関する検討を実施した。各実験の概要について以下に示す。

2.1 供試体作製

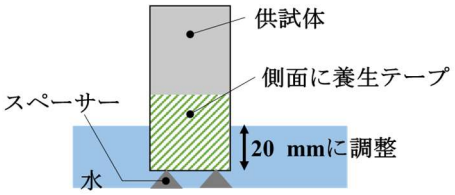
表－1 に示す配合でセメントペーストやモルタルの供試体を作製した。供試体名は最初のアルファベットが供試体種類（セメントペースト：CP，モルタル：M）を，

*1 東京大学大学院　工学系研究科社会基盤学専攻　(学生会員)
*2 東京大学　生産技術研究所　(正会員)

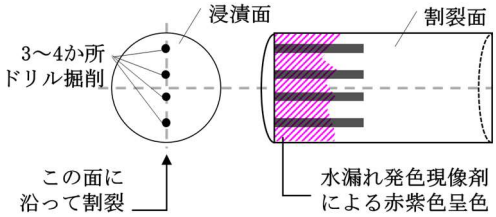
表－1　供試体の配合・養生条件と試験条件

用途	供試体名	供試体種類	W/C	S/C	単位体積質量 (kg/m³) W*1	C*2	S*3	AEA*4	ThA*5	AFA*6	養生方法	試験時材齢	浸漬時間
本試験	CP50A-1	セメントペースト	0.5	0	613	1225	0	0	18	0.089	気中養生	209 d	1 h
	CP50A-2											211 d	2 h
	CP50A-3											219 d	6 h
	CP70A		0.7	0	689	984	0	0	20	0.095	気中養生	211 d	1 h
	M40A	モルタル	0.4	1	365	913	1005	8	0	0	気中養生	211 d	3 h
	M50A		0.5	1	419	837	913	0	7	0.03	気中養生	211 d	1 h
	M100A		1	1	590	590	717	0	20	0.1	気中養生	218 d	0.5 h
	M100W		1	1	590	590	590	0	20	0.1	水中養生	218 d	0.5 h
予備試験	M30A-Y	モルタル	0.3	1	302	1005	1005	11	0	0	気中養生	345 d	1 h
	M40A-Y		0.4	2	272	679	1359	7	0	0	気中養生	345 d	1 h
	M50A-Y		0.5	2	318	636	1272	7	0	0	気中養生	345 d	1 h

*1: 水，*2: セメント，*3: 細骨材，*4: AE 減水剤，*5: 増粘剤，*6: 消泡剤



図－1　液状水浸漬試験のセットアップ



図－2　ドリル掘削と水漏れ発色現像剤の散布の概要

続く数字とアルファベットは水セメント比(%)と養生方法（気中養生 : A，水中養生 : W）を表す。3 体ある CP50A については，”-1”，”-2”，”-3”と番号を添えて区別している。また，”-Y”という文字列が続くものは予備試験用の供試体であることを示す。セメントとして普通ポルトランドセメントを，細骨材として東京都八王子産の砂岩砕砂を使用した。セメントの物性値は，密度 3.15 (g/cm³)，ブレーン値 3620 (cm²/g)である。細骨材の物性値は，表乾密度 2.65 g/cm³，絶乾密度 2.62 g/cm³，吸水率 1.32 %，粗粒率 3.04 である．供試体寸法は直径 5 cm，高さ 10 cm の円柱形である。打込翌日に脱型し（脱型日を材齢 1 日とする），打設面を研磨し，**表－1** 中に示した養生を施した。気中養生の供試体は，**表－1** 中の試験時材齢まで，温度 20 ℃，相対湿度 60±10%の室内に静置した。水中養生の供試体は材齢 122 日まで温度 20 ℃の水槽内に浸漬し，その後，**表－1** 中の試験時材齢まで，温度 20 ℃，相対湿度 60±10%の室内に静置した。

2.2 液状水浸漬試験

表－1 に示した本試験用の供試体に対し，試験時材齢において円柱供試体を，打設面側を浸漬面として液状水中のスペーサー上に静置して吸水させた。試験のセットアップを**図－1** に示す。供試体の側面には，浸漬部分に養生テープを貼付した。浸漬用の水には室温で 24 時間以上汲み置いた水道水を使用し，試験中は供試体下面から水面までの高さが 20 mm になるように適宜水の量を調整した。各供試体に対する浸漬時間は**表－1** に示した通りである。

2.3 ドリル掘削と含水率測定

液状水浸漬試験の後，**図－2** 左に示すように直径 4 mm のドリルを使用して浸漬面側から中心線上で 3, 4 か所のドリル掘削を行い，深さ 40 mm まで 5 mm ごとに掘削粉を採取した。このとき，5 mm ごとに得られた掘削粉の量は，0.5±0.1 g であった。採取した掘削粉は，質量測定までの水分逸散が最小限になるように密閉容器に入れて保管した。深さ 40 mm までの掘削粉を採取した後，最小表示 0.1 mg のはかりで試料の質量を測定した。その後ただちに 500 W の電子レンジで 10 分間試料を加熱して再度質量を測定した。そして，深さごとに採取した掘削粉のそれぞれに対し，以下の式で定義する含水率を計算した。

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \tag{1}$$

ここで，w は含水率 (-)，m_1 は加熱前に測定した質量，m_2 は加熱後に測定した質量である。含水率の測定方法としては，105 ℃で絶乾させる方法[9]が一般的だと思われ

るが，本論文では，現場での簡便性・即時性を考慮して電子レンジで加熱する方法を採用している。なお，電子レンジ加熱で測定される含水率と 105 ℃加熱で測定される含水率の対応については，2.6 に後述する予備試験で確認した。

2.4 水漏れ発色現像剤による水分浸透深さ観察

ドリル掘削粉で評価する水分浸透深さの検証のため，水漏れ発色現像剤による水分浸透深さの可視化観察を実施した。ドリル掘削の後に，**図－2** 左に示すように，ドリル掘削を行った中心線に沿って万能試験機で円柱供試体を割裂し，割裂面に水漏れ発色現像剤をスプレーで噴霧した。使用した水漏れ発色現像剤では，水分の存在個所が赤紫色に呈色する。**図－2** 右に示すように，各ドリル孔位置における水分浸透深さをノギスで測定し，水分浸透深さを平均値として算出した。

2.5 円盤状切断による含水率測定

ドリル掘削粉で評価する含水率の検証のため，2.4 の水分浸透深さ観察の後，半円柱状になった円柱供試体から半円盤状の試料を採取し含水率を測定した。厚さ 1 mm のダイヤモンドカッターを使用して供試体を浸漬面側から，深さ 40 mm まで 5 mm ごとに半円盤状に切断した（以下では単に円盤状試料と称する）。円盤状試料は切り出し直後にラップで包み，密閉容器に入れた。深さ 40 mm まで円盤状試料を切り出した後ただちに，2. 3 と同様に 500 W の電子レンジで 10 分間加熱する前後の試料質量を測定し，深さごとに切り出した円盤状試料を対象に含水率を算出した。

2.6 500W10 分加熱と 105℃24 時間乾燥の対応確認のための予備試験

表－1 に示した予備試験用の供試体に対して，試験時材齢において 2.2 と同様の方法で液状水浸漬試験を実施し，2.3，2.5 中に示した方法でドリル掘削粉と円盤状試料を採取した。ただし，試料の採取深さは，浸漬面から 0 ~ 5 mm, 10 ~ 15 mm, 20 ~ 25 mm の 3 水準とした。採取した試料をそれぞれ二分し,一方を対象に 2.3 や 2.5 と同様に 500 W の電子レンジで 10 分間試料を加熱し，その前後の試料質量から含水率を求めた。また，他方を対象に，105 ℃の乾燥炉で 24 時間試料を乾燥させ，その前後の試料質量から含水率を求めた。以上により，掘削粉試料と円盤状試料のそれぞれに対し，二種類の方法で求めた含水率の対応を確認した。**図－3** にその結果を示す。

掘削粉試料(a)，円盤状試料(b)の双方において，二種類の方法で測定した含水率は良好に一致した。この予備試験の結果を踏まえ，500W の電子レンジで 10 分間加熱することによる含水率測定から妥当な結果が得られると判断し，本試験ではこの方法を採用している。

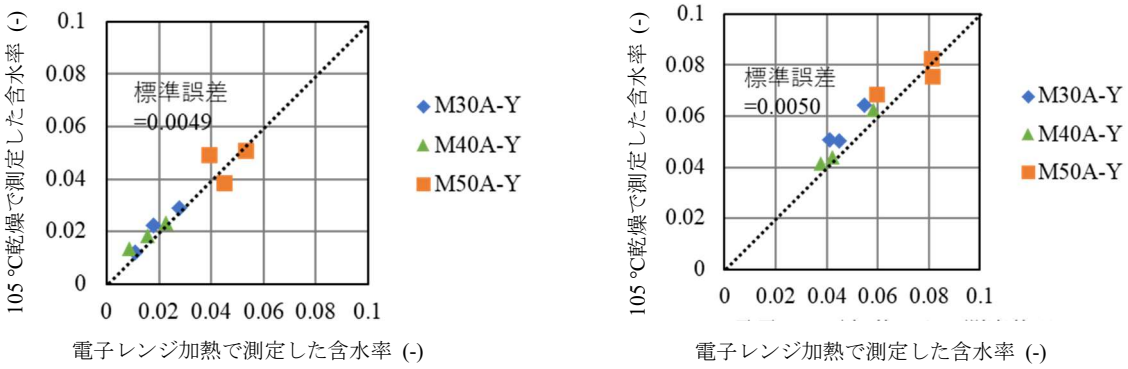
3. 実験結果

3.1 含水率測定結果と水漏れ発色現像剤による水分浸透深さ観察結果

図－4 (a1)~(h1)に 2.3 および 2.5 で測定した掘削粉と円盤状試料の含水率測定結果を示す。ここで，0~5 mm，5~10 mm，…，35~40 mm の深さから採取した試料の含水率をそれぞれ 2.5 mm，7.5 mm，…，37.5 mm の位置にプロットしている。CP50A-1 (**図－4** (a1))については，30~35 mm を掘削した際に供試体が破損し，これ以降の深さの掘削粉を採取困難であったため，30~35 mm，35~40 mm の掘削粉の含水率のプロットが欠落している また，**図－4** (a2)~(h2)には，2.4 で実施した水漏れ発色現像剤による水分浸透深さの観察結果を示している。観察した水分浸透深さを**図－4** (a1)~(h1)中に赤点線で示し，その値を近傍に赤文字で付している。

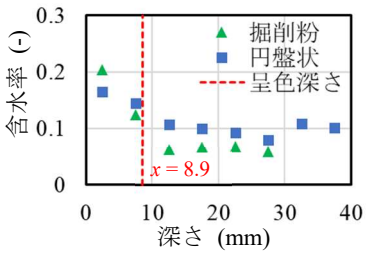
3.2 掘削粉による含水率の真値推定

まず，掘削粉による微破壊での含水率推定に関する検討について述べる。**図－4** (a1)~(h1)において，掘削粉と円盤状試料の含水率に着目すると，双方において，含水率は表面付近において高く，深くなるにつれて減少し，その後一定値に近づく傾向が見られる。しかし，二つの含水率の絶対値については，掘削粉の含水率が円盤状試

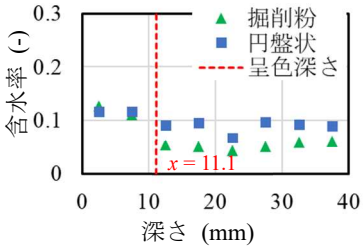


(a) 掘削粉試料　　(b) 円盤状試料

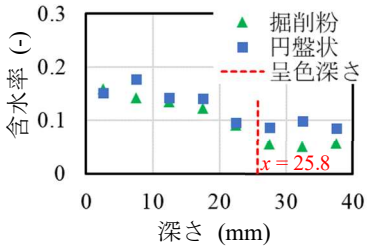
図－3　電子レンジによる 500W10 分加熱と 105℃24 時間乾燥で求めた含水率の比較



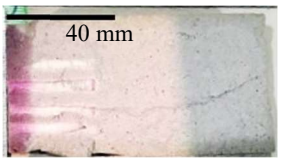
(a1) CP50A-1 の含水率測定結果



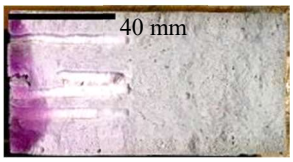
(b1) CP50A-2 の含水率測定結果



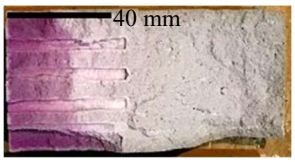
(c1) CP50A-3 の含水率測定結果



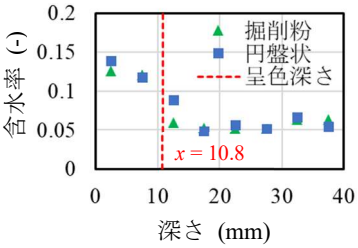
(a2) CP50A-1 の呈色状況



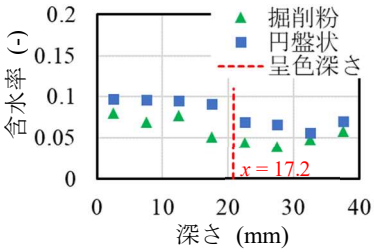
(b2) CP50A-2 の呈色状況



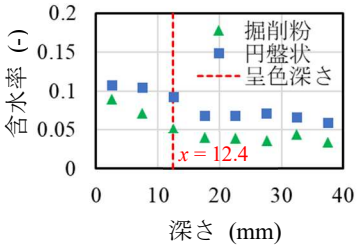
(c2) CP50A-3 の呈色状況



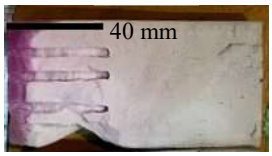
(d1) CP70A の含水率測定結果



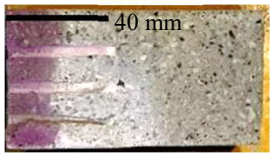
(e1) M40A の含水率測定結果



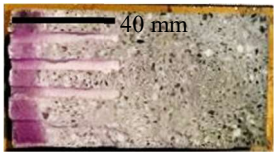
(e1) M50A の含水率測定結果



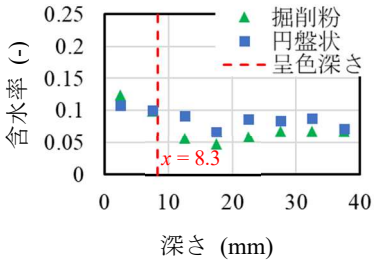
(d2) CP70A の呈色状況



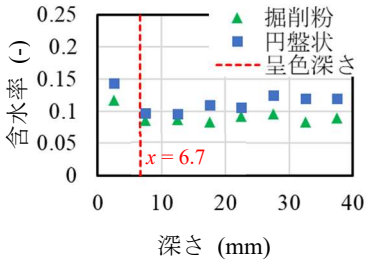
(e2) M40A の呈色状況



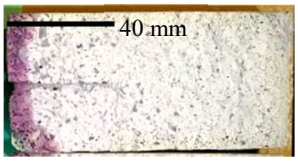
(e2) M50A の呈色状況



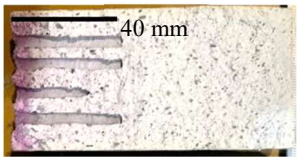
(g1) M100A の含水率測定結果



(h1) M100W の含水率測定結果



(g2) M100A の呈色状況



(h2) M100W の呈色状況

図－4　深さごとの含水率測定結果と水漏れ発色現像剤による呈色状況

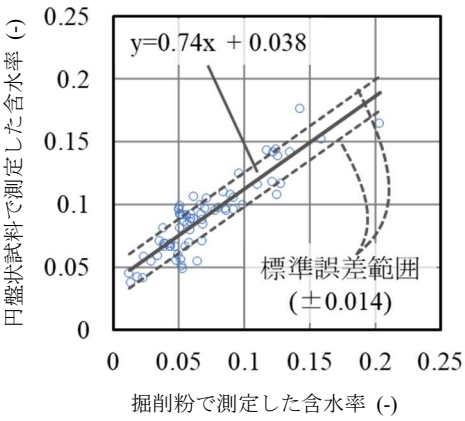
料の含水率に比べて低い場合が散見される。この理由については，ドリル掘削粉採取時の摩擦熱による水分蒸発が考えられる。円盤状試料採取時にも，ダイヤモンドカッター切断の摩擦熱により幾分か水分が蒸発するものと考えられるが，円盤状試料の場合には，掘削粉試料に比べて体積が大きいため，摩擦熱による水分蒸発の影響が少ないと考えられる。**図－5** は，掘削粉で測定した含水率と円盤状試料で測定した含水率を比較したものである。**図－5** 中には，2.6 で予備試験として含水率を測定した M30A-Y，M40A-Y，M50A-Y のデータも含めている。図

中には線形近似による近似式も示しており，その式は以下で表される。

$$w_{est} = 0.74w_p + 0.038 \qquad (2)$$

ここで，w_{est} は含水率の推定値(-)，w_p は掘削粉で測定した含水率の実験値(-)である。**図－5** 中に破線で示したように，式(2)による推定値と円盤状試料で測定した含水率の標準誤差は 0.014(=1.4%)であった。また，今回測定した掘削粉の含水率の範囲は 0.012 から 0.203 であり，この範囲が式(2)により含水率の真値を推定する場合の適用範囲である。また，本研究では粗骨材を含まないモルタルやセメントペーストを対象として含水率の測定を行っている。骨材の体積割合が高くなるコンクリートでは，掘削粉中に骨材由来の粉末が混入する可能性も高くなり，質量減少率から含水率を測定する際の誤差要因となる。しかし，筆者らは既報 [11]においてモルタル掘削粉に対し酸処理と加熱処理を行うことにより掘削粉中の骨材分の構成割合を推定可能なことを確認している。コンクリートを対象にして掘削粉から含水率を求める場合にも同様の方法で掘削粉中の粗骨材割合を把握することで，掘削箇所が骨材にあたった場合でもその影響を補正できると考えている。

なお，本研究の主目的とは異なるが，水漏れ発色現像剤による着色と円盤状試料の含水率の関係に着目すると，例えば M40A(**図－4** (e1), (e2))では，含水率が 0.09 程度の 0~20 mm の領域で着色が起きている一方で，M100W(**図－4** (h1), (h2))の 25~40 mm の領域では含水率が 0.12 程度であるにもかかわらず着色が起きていない。既往研究 [12]では有意な吸水量が確認された供試体でも水漏れ発色現像剤による着色が起きない場合があることも報告されており，水漏れ発色現像剤による着色には，含水率以外にも影響要因があるものと考えられる。



図－5　掘削粉で測定した含水率と円盤状試料で測定した含水率の比較

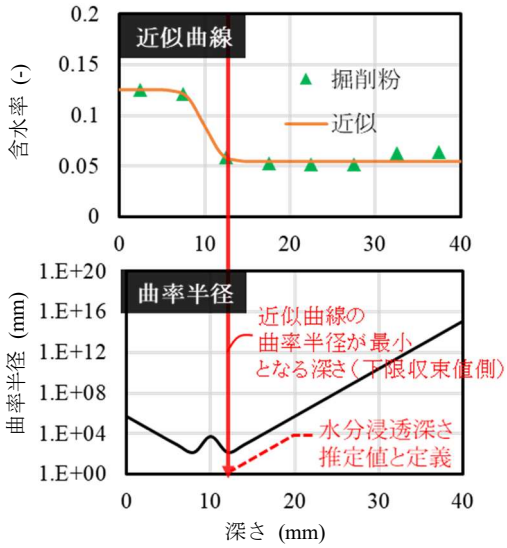
3.3 掘削粉の含水率分布に基づく水分浸透深さ評価

続いて，掘削粉による微破壊での水分浸透深さ評価に関する検討について述べる。**図－4** (a1)~(h1)において，呈色深さと掘削粉の含水率変化の対応に着目すると，いずれの供試体でも，掘削粉の含水率の減少が収束傾向になる深さ付近が呈色深さに対応している。そこで，「含水率の減少が収束傾向になる深さ」を定量的に表現することで，呈色深さ，すなわち水分浸透深さの評価を試みた。

まず，以下のシグモイド関数により，掘削粉の含水率を曲線近似した。

$$w_{approx} = a - \frac{b}{1 + \exp\left(-c(x - x_0)\right)} \qquad (3)$$

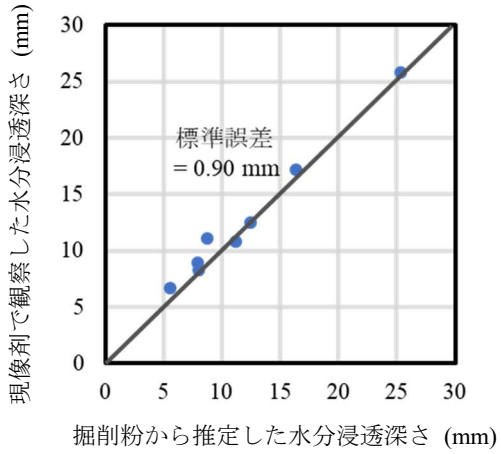
ここで，w_{approx}は含水率の近似値(-), x は深さ(mm)である。a, b, c, x_0 は実験定数であり，含水率の測定値との誤差二乗和を最小化する条件で，Excel のソルバー機能によりパラメータフィッティングを行って求めた。**図－6** 上図には，CP70A に対する曲線近似を例として示している。この曲線は，含水率が減少し収束に向かう変化を表現可能である。減少から下限収束値に向かう間には曲線の曲率半径が最小になる点が必ず存在する。**図－6** 下図は，**図－6** 上図の曲線から，各点における曲率半径を計算したものであり，**図－6** の上図から下図に貫通して引いた赤実線が下限収束値側で曲率半径最小となる深さである。この深さは前述した，「含水率の減少が収束傾向になる深さ」の指標の一つと言ってよい。そこで，上記のようにして求めた曲率半径最小となる深さを水分浸透深さの推定値として定義し，水漏れ発色現像剤による観察結果と比較した。**表－2** には，各供試体に対する式(3)による曲線近似のパラメータと，算出した曲率半径最小



図－6　CP70A に対する近似曲線(上図)とその曲率半径の変化(下図)

表－2　曲線近似のパラメータと曲率半径最小深さ

供試体名	パラメータ				最大誤差	曲率半径最小深さ (mm)
	a	b	c	x_0		
CP50A-1	0.20	0.14	7.40	2.56	0.005	7.9
CP50A-2	0.13	0.07	8.06	2.11	0.010	8.7
CP50A-3	0.15	0.10	20.58	0.28	0.009	12.5
CP70A	0.13	0.07	9.99	1.08	0.008	11.2
M40A	0.08	0.03	16.89	2.94	0.008	16.4
M50A	0.10	0.06	8.28	0.31	0.006	5.6
M100A	0.12	0.07	7.60	3.85	0.011	8.0
M100W	0.12	0.03	4.39	1.10	0.008	25.3



図－7　水分浸透深さの推定値と観察値の比較

深さを示した。**図－7** に，掘削粉による水分浸透深さの推定値と水漏れ発色現像剤による観察値の比較を示す。推定値と観察値は良好に一致しており，標準誤差 0.90 mm の推定精度であった。

4. 結論

ドリル掘削による含水率測定を目的としてドリル掘削粉の含水率と円盤状試料で測定した含水率を比較したところ，掘削粉試料の含水率の方が低くなる傾向が見られた。これは，ドリル掘削時の摩擦熱による水分の蒸発の影響と考えられる。しかし，線形近似式により掘削粉の含水率から円盤状試料で測定される含水率を，標準誤差 1.4%の精度で推定可能であった。

また，ドリル掘削粉の深さ方向の含水率分布に対し，シグモイド関数による曲線近似を行い，近似曲線の曲率半径が最小となる深さを水分浸透深さの推定値として定義し，水漏れ発色現像剤により可視化観察した水分浸透深さと比較したところ，両者は良好に一致し，その標準誤差は 0.90 mm であった。

参考文献

1) Hope B.B., Ip A.K., Manning D.G.: Corrosion and electrical impedance in concrete, Cement and Concrete Research, Vol.15, No.3, pp.525-534, May.1985.
2) Gonzalez J.A., Lopez W., Rodriguez P.: Effects of moisture availability on corrosion kinetics of steel embedded in concrete, Corrosion Engineering, Vol.49, No.12, pp.1004-1010, Dec.1993.
3) Beaudoin J.J., MacInnis C.: The mechanism of frost damage in hardened cement paste, Cement and Concrete Research, Vol.4, No.2, pp.139-147, Mar.1974.
4) Bazant Z.P., Steffens A.: Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete, Cement and Concrete Research, Vol.30, No.3, pp.419-428, Mar.2000.
5) コンクリート委員会・規準関連小委員会: 土木学会規準「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法（案）（JSCE-G 582-2018）」の制定, 土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造）, Vol.74, No.4, 256-259, 2018.
6) 湯浅昇, 笠井芳夫: 非破壊による構造体コンクリートの水分測定方法, コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.49-55, 1994.9
7) Balestra C.E.T., Reichert T.A., Pansera W.A., Savaris G.: Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment, Construction and Building Materials, Vol.230, 116979, Sep.2020
8) Azarsa P., Gupta R.: Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review, Advances in Materials Science and Engineering, Vol.2017, May.2017
9) 植松俊幸, 神代泰道, 一瀬賢一: 31 年間供用した躯体コンクリートの品質に関する調査, 日本建築学会技術報告集, Vol.21, No.48, pp.409-414, 2015.5
10) Tanaka S., Sakai Y.: Development and verification of neutralization depth and chloride ion penetration depth measurement method using fibrescope,. Proceedings of : The 5th International Conference in Sustainable Construction Materials and Technologies, London, UK., 2019.7 (CD-ROM)
11) Tanaka S., Sakai Y.: Fundamental study on the correlation between scaling resistance and pore structure evaluated using drilling powder, Proceeding of The 12th International Symposium of Society for Social Management Systems 2019 (SSMS2019), Tokyo, Japan, Sep.2019 (CD-ROM)
12) 鎌田知久, 岸利治: 乾燥に伴う水分の逸散と空隙構造の変化がセメント硬化体への液状 水浸透性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集. Vol.41, No.1, 641-646, 2019.7