論文　コンクリートの吸水性状に基づく中性化深さの予測に関する研究

清水　五郎[*1]・中田　善久[*2]・久保田　英樹[*3]

要旨：気乾状態で17年を経過した10φ×20cmコンクリートで，試験体11本を対象として中性化深さ試験を実施した。また，当該コンクリートに対して吸水試験ならびに調合分析試験を行った。調合分析の方法としては，破砕した試料を希釈した塩酸で溶解し，骨材を抽出した。その後，セメントの密度および空気量については既往のデータを用いて、材料構成比を算定した。また，コンクリートの中性化深さは水セメント比や吸水速度･含水率などと密接な関係にあることを示し，吸水性状から水セメント比を推定することで中性化深さの定量化も可能であることを示唆した。

キーワード：調合，吸水率，含水率，中性化深さ

1. まえがき

乾いたコンクリートが水中で水分を取り込む時，母材の乾燥程度，材料構成比，内部空隙の多少などによって吸水性状に差違を生ずることになる。したがって，吸水速度や吸水率の経時変化が個別に異なるのは主としてコンクリートの組織の相違を顕著に反映していることにほかならない。既往の研究においては水中に浸漬したコンクリートの吸水性状を手掛りとして当該コンクリートに対する調合分析，強度，乾燥収縮ひずみなどの物性を総合的かつ簡便に推定することが可能であることを報告してきた[1)～5)]。

この種の方法を可能とする全体に共通した要点としてはまず内部組織(調合)の異なる10φ×20cm試験体群の吸水試験値(各々の実験定数)に基づき目的の物性を評価する基準尺度を確立することが必要となる。したがって，基準尺に相当する関係式が得られた後の物性の予知，予測は吸水試験に基づく結果を基準尺によって採寸するだけで当該コンクリートの目的の評価が実現することになる。後述の未知のコンクリートから水セメント比を推定する方法などは本手法の例となる。また，コンクリートの乾燥収縮などに本手法を適用する場合などはコンクリートの長期性状を早期に予測する方法として極めて有効であり，本手法の特徴を十分発揮する適用例となる。また，本手法の特徴としては一つの吸水試験によって多くの物性を同時に予知することができることにあり，加えて高度な技術や設備などを必要としない長所を有している。

本報告はコンクリートの中性化深さを検討する際に同手法の適用が可能か否かについて基本的な実験を通じてその適用性を検証しようとするものである。偶然にも，17年を経過したコンクリート10φ×20cm円柱試験体11本が存在していたため，それらを対象とした室内実験を実施し，その概要を取りまとめ報告するものである。

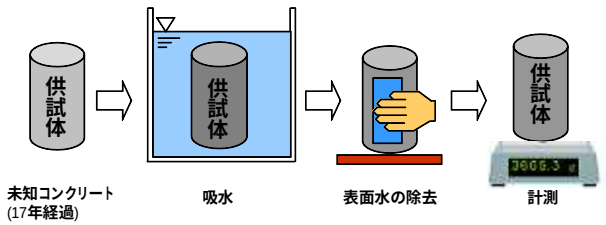


図 -1 吸水試験概要

2 実験概要

2.1 対象としたコンクリート試験体

気乾状態のまま17年を経過した10φ×20cm円柱試験体11本が実験室付属の倉庫内に存在していることが偶然発見された。経過年数は包装に用いられた新聞の日付から17年前のものと特定できたが調合は不明であった。なお，上記の物品倉庫はドライエリアに面する地下1階にあり，出入は比較的少なく，室温20±10℃，相対湿度60±20%程度と推定される。本実験ではそれらの試験体を対象として吸水試験，中性化深さ試験，調合分析試験を実施するものとした。

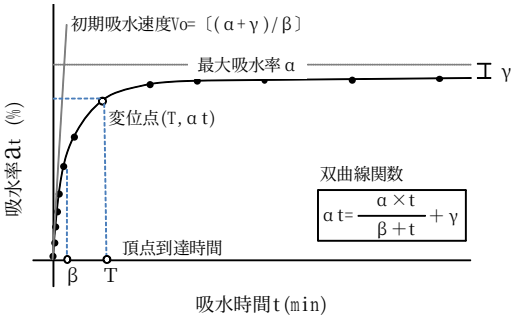
2.2 吸水試験

10φ×20cmの各試験体は70℃炉中で三日間乾燥させ，**図 -1** に示すように，(1)所定時間内の水中浸漬，(2)取り出して，表面水除去，(3)質量計測後水中浸漬を繰り返し実施し，測定前後の質量の差を測定前の質量で除した百分率を吸水率として得るものとした。また，一週間水中に浸漬して各試験体の最大含水量を求めるものとした。

*1 日本大学　理工学研究所　上席研究員　博士(工学)　(正会員)
*2 日本大学　理工学部建築学科　教授　博士(工学)　(正会員)
*3 三友エンジニヤリング株式会社　修士(工学)　(正会員)

表 -1　実験定数

No.	α (%)	β (min)	γ (%)	Vo (%/min)	T (h)	t=∞ (a_{max})	K (kg/m³・%)	k (m³・%/kg)
1	5.1	20.3	0.06	0.25	0.97	5.16	97.2	10.1×10^{-3}
2	4.6	35.0	0.08	0.13	1.06	4.69	100.4	10.0×10^{-3}
3	4.7	58.1	0.10	0.08	1.16	4.77	104.5	9.6×10^{-3}
4	4.4	48.1	0.08	0.09	1.07	4.47	111.9	8.9×10^{-3}
5	4.2	62.8	0.09	0.07	1.06	4.32	125.9	7.9×10^{-3}
6	4.3	136.3	0.11	0.03	0.84	4.36	121.3	8.3×10^{-3}
7	4.1	115.7	0.07	0.04	0.88	4.17	103.9	9.6×10^{-3}
8	4.3	123.9	0.10	0.04	0.90	4.37	111.3	9.0×10^{-3}
9	4.1	92.0	0.09	0.05	0.97	4.17	132.1	7.6×10^{-3}
10	4.0	139.5	0.09	0.03	0.71	4.05	124.3	8.1×10^{-3}
11	3.8	102.7	0.09	0.04	0.85	3.92	122.1	8.2×10^{-3}



α：最大吸水率(%)

β:最大吸水率の1/2にいたる時間t(min)

γ:補正係数(γ　0)

Vo:初期吸水速度時間t(min)が0の吸水曲線の傾き

T ：頂点到達時間(h)、吸水曲線傾きが1になる時間

図 -2 吸水率－時間曲線の概念

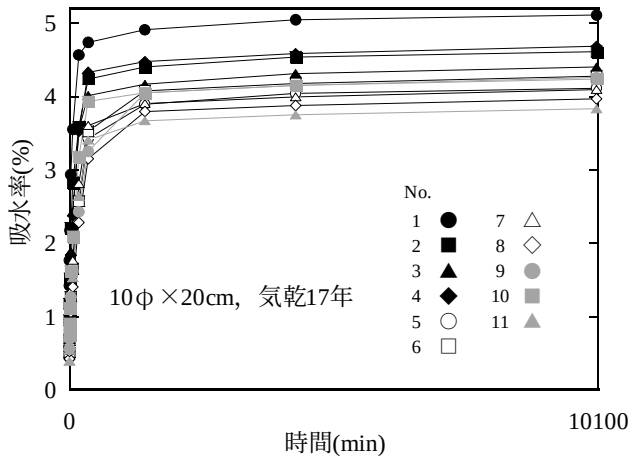


図 -3 吸水率－時間曲線，試験結果

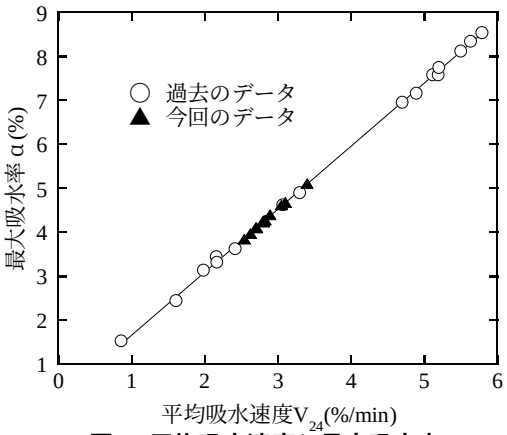


図 -4 平均吸水速度と最大吸水率

2.3 中性化深さ試験

吸水試験終了後の湿潤状態の各試験体に対して,圧壊しないように圧縮試験を行い併せて割裂引張試験を実施した。割裂面の入念な観察とフェノールフェタレイン溶液を噴霧し,赤色部までの平均距離を中性化深さとして推定するものとした。

2.4 調合分析試験

未知のコンクリート硬化体の材料構成比を定量化するために約1/2に相当する割裂試験片を対象として調合分析を行った。その方法は骨材を破損しないように十分注意しながらコンクリート硬化体をハンマーによって粒状に破砕し,5倍に稀釈した工業用塩酸を十分量加えてセメント分を溶解する方法とした。この方法によれば骨材を微粉砕していないので細粗骨材の形状や使用量を目視により確認することが可能であり,精度良く定量化が実現する唯一の方法と判断される。なお,骨材については各々ふるい分け試験を実施するものとした。

3 実験結果と検討

3.1 10φ×20cmの吸水性状

吸水試験結果から 吸水率(a)－時間(t)曲線を求めることができるが, この曲線の傾向は, 初期に吸水率の増分が大きく,次第に緩慢となる滑らかな曲線として推移する。特に, 初期における吸水はセメントペースト中の間隙に対する透水であり,骨材が吸水性状に及ぼす影響は無視できるほど小さい。数学的モデルとしては双曲線関数が良好に適合する(相関係数R^2=0.97)ため, **図 -2**に示すα，β，γを固有値として算出できる[6]。

今回実施した全試験体のa－t曲線を示せば **図 -3** となる。また, **図 -3** の結果から実験定数αおよびβは, 一週間経過後も吸水率は, 微量増加するため, その補正値であるγなどを示せば**表 -1**となる。表中のKは, 実験係数で単位ペースト量を最大吸水率で除した値である。また，kはKの逆数である。一方，最も相関性の高いパラメータ組み合わせとしては,**図 -4** に示す平均吸水速度と最大吸水率との関係となる[7]。これは，コンクリートの内部空隙が大きくかつ乾燥しているコンクリートほど吸水速度は大きくなり,同時に最大吸水率は直線的に増大することを意味し,一般的な概念と一致している。なお, 吸水試験に関連する上述の試験値はコンクリートの中性化深さを推定する際に有用な指標として活用することになる。

表 -2 調合分析試験結果

記号	W/C (%)	空気量 (%)	水 w*2	単位容積質量(kg/m³)			容積(m³)			
				セメントC	細骨材S	粗骨材 G	水w*2	セメントC	細骨材S	粗骨材G
1	63.1	4.5	194.0	307.4	726.1	1064.5	194.0	97.3	270.9	392.8
2	54.9	4.5	166.9	304.2	746.0	1120.6	166.9	96.3	278.3	413.5
3	54.6	4.5	176.1	322.3	736.9	1089.3	176.1	102.0	275.0	402.0
4	52.1	4.5	171.5	328.9	735.3	1097.7	171.5	104.1	274.4	405.1
5	49.8	4.5	180.8	363.2	712.0	1066.6	180.8	115.0	265.7	393.6
6	49.6	4.5	175.3	353.5	718.9	1083.0	175.3	111.9	268.2	399.6
7	48.7	4.5	141.9	291.3	778.1	1166.7	141.9	92.2	290.3	430.5
8	51.7	4.5	157.0	329.2	742.6	1129.4	157.0	104.2	277.1	416.8
9	47.0	4.5	176.2	374.7	728.8	1052.3	176.2	118.6	272.0	388.3
10	46.1	4.5	158.7	344.5	733.6	1120.6	158.7	109.0	273.7	413.5
11	46.3	4.5	151.5	327.2	745.6	1142.9	151.5	103.5	278.2	421.7

表 -3 中性化深さ試験結果

記号	W/C (%)	中性化深さ(mm)		
		側面	上側	下側
1	63	30.4	50.6	20.1
2	55	24.3	29.2	15.5
3	55	20.9	20.3	14.3
4	52	14.1	12.1	7.60
5	50	10.8	13.3	8.40
6	50	8.60	7.20	4.30
7	49	8.40	12.6	6.90
8	52	7.40	5.00	4.60
9	47	5.70	6.40	5.20
10	46	4.70	2.40	5.60
11	46	4.40	2.40	2.80

写真 -1 調合分析後のふるい分け結果

写真 -2 中性化試験結果

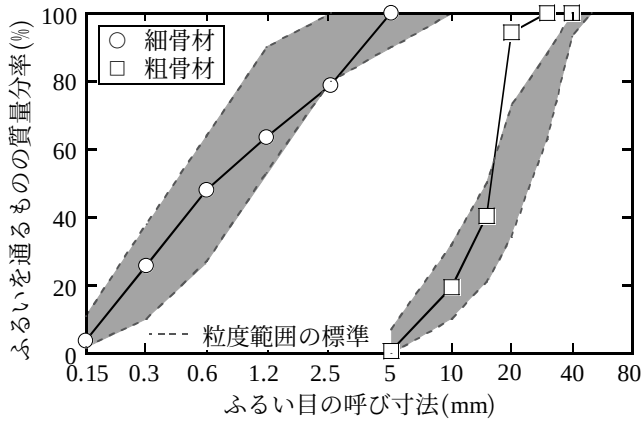


図 -5 ふるい分け試験結果

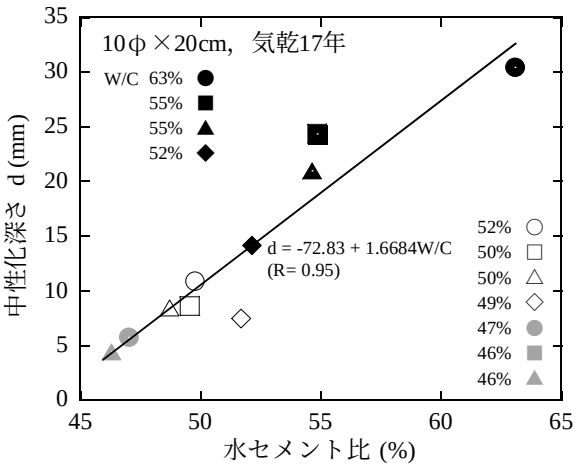


図 -6 水セメント比と中性化深さ

3.2 調(配)合

今回採用した調合の分析方法は母材コンクリートからセメント成分を塩酸によって溶解し,細粗骨材を原形の状態で抽出する方法である。なお, 材料構成比の算定に際しては(1)普通ポルトランドセメント使用, (2)連行空気量4.5%, (3)最大含水量＝単位水量, を前提として, 算出するものとした。抽出した粗骨材の形状は丸身を帯び, 良質な川砂利と判断されるほか,細骨材に関してもセメント固形物を含まず容易に川砂とみなせる状態であった。調合の算定結果を**表 -2**に示す。また, 骨材のふるい分け試験の結果を**図 -5**に示す。

3.3 17年経過時の中性化深さ

(1) 中性化深さの実測値

10φ×20cm試験体の割裂断面において実施した中性化深さ (d) 試験の結果を**表 -3**及び**写真 -2**に示す。**表 -3**の試験結果によれば中性化深さは,試験体の下面が最も小さく, 側面及び上側では 2.5＜d＜50mm の範囲にあり, 試験体によってかなりの変動が認められる。したがって試験体制作時のばらつきも含めて試験体毎に材料構成比が各々異なっていると判断される。

(2) 調合との関係

表 -2に示す調合分析結果のうち,水セメント比と試験

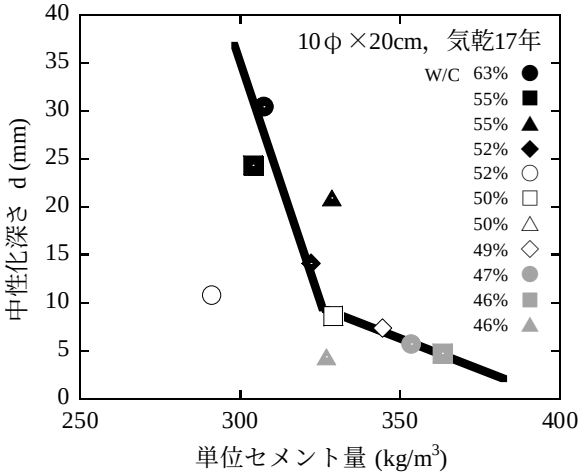


図 -7 単位セメント量と中性化深さ

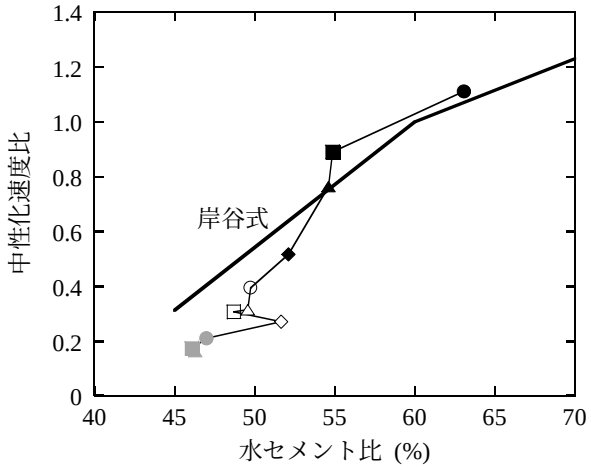


図 -8 水セメント比と中性化速度比

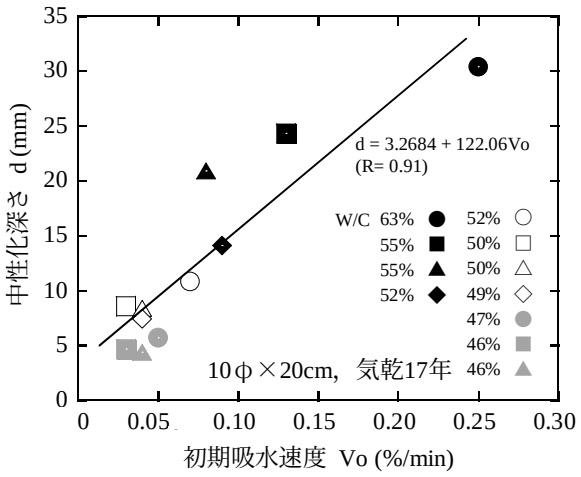


図 -9 初期吸水速度と中性化深さ

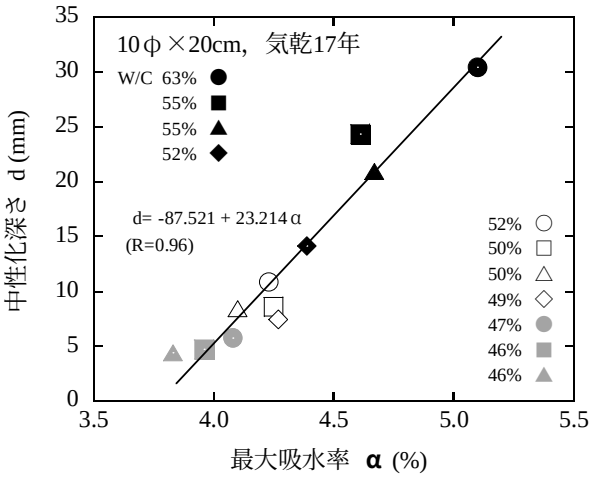


図 -10 最大吸水率と中性化深さ

体側面における中性化深さ(d)との関係を示せば，**図 -6** を得ることができる。なお，単位容積質量の算出は骨材においてはJIS A 1109，JIS A 1110に準じて密度を算出した。また，セメントにおいては普通ポルトランドセメントとし，密度においては既往の文献のデータを用いて行った[8]。**図 -6** によれば両者に比較的良好な比例関係が認められ，水セメント比が大きくなるほど中性化深さは増大する傾向にある。このことは一般的な傾向に合致するものであり，併せて調合分析結果の妥当性をも裏付けるものである。一方，単位セメント量がコンクリートの中性化深さに及ぼす影響に関して **図 -7** にその結果を示した。両者の関係は単位セメント量(C)　330kg/m^{3}を分岐点としてその値を下回る場合では中性化深さが急激に増大することを示している。調査または，試験に基づく中性化速度に関して，水セメント比60%の時の中性化速度を1.0として他の中性化速度との比率(中性化速度比)を求め，水セメント比との関係で示せば，**図 -8** となる。また，**図 -8** には岸谷式に基づく17年経過時の算定値を示したが，両結果は相対的には類似の傾向にある結果を示した。

(3) 吸水性状との関係

吸水率－時間曲線の原点のおける接線の傾きを初期吸水速度(Vo)として**表 -1** に示したが，Voと中性化深さ(d)との関係を**図 -9** に，最大吸水率と中性化深さとの関係を**図 -10** に示した。これらの指標はいずれもの中性化深さとの相関性は高く，式で表すと(1)式，(2)式となる。また，(1)，(2)式は中性化深さを相対的に特定する際には有用な指標となる。また，この式により中性化深さを予測することが可能である。

$$d = 3.2684 + 122.06Vo \quad (R=0.91) \qquad (1)$$

$$d = -87.521+23.214\ \alpha \quad (R=0.91) \qquad (2)$$

(4)試験体の形状

10φ×20cm円柱試験体は全方向からCO_2が侵入するため中性化深さの測定値は明らかに過大となる。現時点では物理的な解析には至っていないが，ここで岸谷式

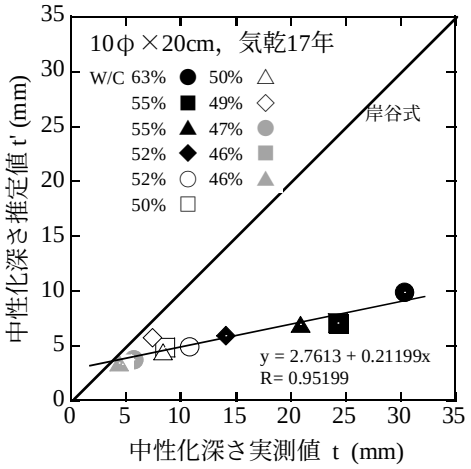


図 -11(a) 中性化深さの実測値と推定値

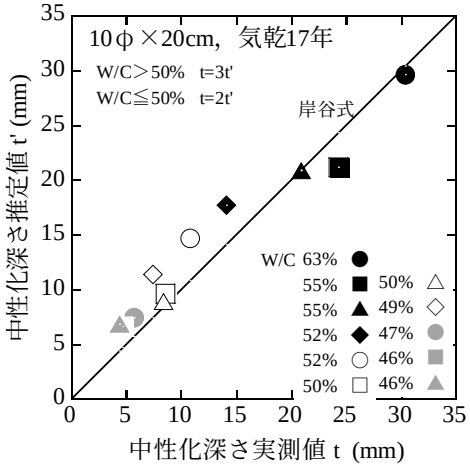


図 -11(b) 中性化深さの実測値と補正後の推定値

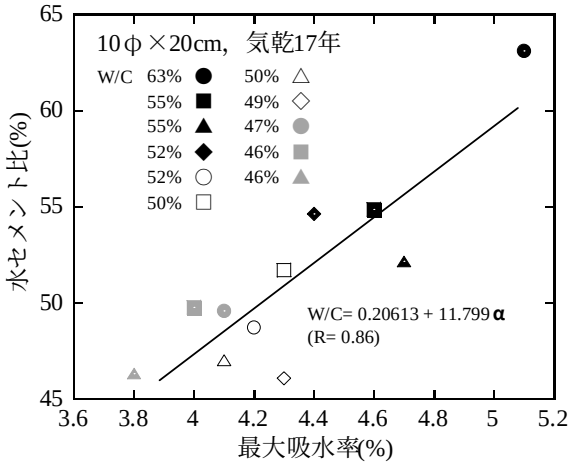


図 -12 最大吸水率と水セメント比

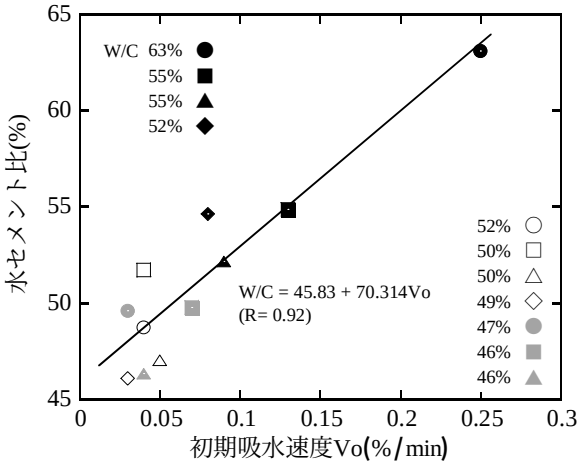


図 -13 初期吸水速度と水セメント比

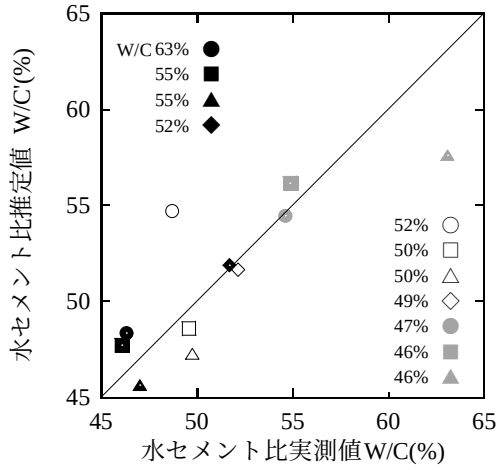


図 -14 水セメント比の実測値と推定値

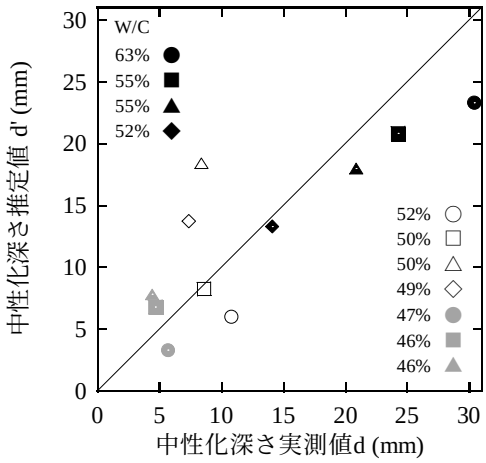


図 -15 中性化深さの実測値と推定値

(3), (4)式に基づく算定値と実測値との関係を示せば, **図 -11(a)**となる。実測値は著しく大きいことがわかる。次に, W/C≦50%の中性化深さを岸谷式の推定値を2倍, W/C＞50%の場合, 推定値を3倍と修正すると **図 -11(b)** となり岸谷式とほぼ重なる。したがって, 17年経過時点では円柱試験体の中性化深さは2～3倍促進されているように推察される。

$$y=\frac{0.3(1.15+3X)}{R^2(X-0.25)^2}C2 \qquad (X \geqq 0.6) \qquad (3)$$

$$y=\frac{7.2}{R^2(4.6X-1.76)^2}C2 \qquad (X \geqq 0.6) \qquad (4)$$

y: 経過年数　　C: 中性化深さ (cm)
y: 中性化比率　X: 水セメント比

(5)水セメント比の推定値と中性化深さ

先に示したように,中性化深さは水セメント比とほぼ直線的な関係にある(**図 -6**)。一方, 硬化コンクリートの水セメント比は**図 -12**, **図 -13**からみても吸水試験から推定することができるといえる。**図 -13**の回帰曲線式から求めた値を水セメント比の推定値とし,水セメント比の調合分析による実測値と回帰式による推定値の関係を**図 -14**に示す。また, 中性化深さと水セメント比との関係も良好であり, **図 -6**に示す回帰曲線式を用い吸水性状により推定された水セメント比を代入し, 中性化深さの推定値を算出し, 実測値と比較すると**図 -15**のように相関性を示す結果となった。これより, 吸水試験から水セメント比を推定して中性化深さを特定する方法にも妥当性があり, より簡便な手法として適用が可能と考えられる。

4．まとめ

コンクリートの吸水試験結果と中性化深さとの関係を検討するなかで次のような知見が得られた。

(1) コンクリートの中性化深さは, 1)水セメント比のみならず, 2)初期吸水速度, 3)最大含水率などとほぼ直線的な比例関係にある。

(2) 吸水試験結果のうち初期吸水速度(Vo)に基づき, 当該コンクリートの水セメント比を下記の(5)式を用いることにより比較的精度良く推定することができる。

$$W/C = 45.83 + 70.314Vo \qquad (5)$$

(3) 中性化深さは(1)の吸水試験結果から1), 2), 3)のいずれかを経由して推定することが可能である。

5．あとがき

今回の実験においては経過年数 17 年のコンクリート(10 φ × 20cm)について中性化深さを中心として各々の指標に対する相関性の良否について検討を試みたものであるが試験体形状（間柱）の影響や経時変化に関する前後のデータが得られていないため将来を予測する展望には至らなかった。

今後は既存建物などの構造体コンクリートの調査結果などに基づき, データを蓄積し内容の充実をはかりたい。特に乾燥収縮ひずみや中性化深さなどの長期性状に関しては本手法の特徴を発揮できるように努める所存である。

本実験を推進する際には卒研生 秋山 良君の献身的な努力があることを記して謝意を表したい。

参考文献

1) 石井新ほか:コンクリートの吸水性状に基づく品質評価に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集 pp.93 -96,2009.4
2) 久保田英樹ほか:吸水性状に基づくコンクリートの品質評価に関する研究, 日本建築学会大会(東北), pp.619 -620,2009.8
3) 清水五郎ほか:吸水速度に基づく高強度コンクリートの調合・強度の推定に関する研究:日本建築学会大会(東北),pp.621 -622,2009.8
4) 清水五郎ほか:吸水性状に基づく高強度コンクリートの品質評価に関する研究,日本建築学会大会(北陸), pp.1219 -1220,2010
5) 清水五郎ほか:コンクリート吸水性状に基づく乾燥収縮ひずみの予測に関する研究JCI耐久性力学に基づく収縮影響評価に関するワークショップ, pp23 -28, 2011.8
6) 許永東ほか:吸水率 -時間曲線に基づくコンクリートの品質評価に関する実験的研究:日本建築学会構造系論文集 , 第 566 号 ,1 -6,2003.4
7) 加藤祐士ほか:吸水性状に基づくコンクリートの品質評価に関する研究:2010年度日本建築学会関東支部研究報告集,49 -52,2011.3
8) セメント協会:セメントの常識,1997.5