

空隙構造を簡易に計測する真空吸水試験の開発および真空吸水試験を用いた 中性化進行予測手法の提案

Development for Testing Method of water absorption on vacuum condition and Proposal for Method of Prediction on Carbonation Depth by this Testing Method

伊代田岳史* 井ノ口公寛** 豊村恵理**

Takeshi Iyoda, Kimihiro Inokuchi and Eri Toyomura

Nowadays, in case of prediction for deterioration of concrete structures, it is not dealt with effect of constructions directly. However, it is known that the quality of permeability is different on surface and inside of concrete, due to curing and construction conditions. In this research, it was developed the testing method of water absorption on vacuum condition for measuring the internal structure of porosity. And then it is cleared that the different of quality on water permeability surface and inside of concrete. Furthermore, it was proposal for method of prediction on carbonation depth by this testing method. As a result, it is able to predict of carbonation depth with curing conditions.

Key words : surface and inside of concrete, curing, testing method of water absorption on vacuum condition, carbonation

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物を長寿命化させるためには、十分な耐久性を確保し、適切に維持管理を行う必要がある。耐久性に及ぼす要因として考えられる項目は配合などの材料要因と養生などの施工要因であり、精緻な劣化予測にはこれらの要因を加味した劣化予測式を確立することが必要である。現在、コンクリート標準示方書で提案されている中性化ならびに塩害による鋼材腐食の劣化予測式では、コンクリートは深さ方向に一様であると考慮し、材料特性値としてセメント種類と水セメント比を変数として中性化速度係数や拡散係数を与えている。しかしながら中性化や塩害の劣化因子となりうる炭酸ガスや塩化物イオンはコンクリートの表層から浸透・拡散して鉄筋に到達するため、コンクリートの表層部の品質は前述した材料要因のみならず施工要因である養生方法や養生期間などの影響を大きく受ける。また養生終了後に曝される周囲環境の影響も著しく大きい。一方、材料特性値は設計段階において照査可能であることに對し、施工要因は現場による自主管理と環境の影響を受けるため制御することは非常に困難である。このような施工や環境条件によりコンクリート表層部の品質は大きく変動するものと考えられ、それに付随して劣化因子の浸透状況もコンクリート中で一様になるとは限らない。さらに混

和材が混入されたセメントを用いたコンクリートでは養生の影響を大きく受けることが知られており、その影響は著しく大きいと考えられる。このようにコンクリート表層の品質確保や耐久性向上は長寿命化においては、著しく重要であるといえる。今後、既設構造物を劣化予測し維持管理するには、コンクリートの深さ方向を考慮することが重要であると考えられる。

そこで、まずコンクリートの表層と内部で異なる空隙構造を定量的に表現できる手法の開発を行った。乾燥させた試験体において、真空条件下にて側面から水分を吸水させることで吸水深さを求め、空隙特性の相違を明確とする真空吸水試験を開発した。次に、材料要因（水セメント比、セメント種類）や施工要因（養生期間、養生方法）を変動させ、養生の影響を一様に受ける試験体を用いて真空吸水試験と促進中性化試験を実施し、吸水性と耐久性の関係を明確にした。その上で壁構造物を模擬して表層と内部の相違を真空吸水試験により表現し、深さ位置における物質移動抵抗性を検討した。その結果より養生の相違による中性化進行予測式の高度化を試みた。簡易に深さ方向の品質を評価できる真空吸水試験を用いて、深さ位置ごとに細かに中性化速度係数を与えることで中性化進行予測手法を確立することを目的とした。また、その予測手法の実構造物への適用性を検証した。

* 土木工学科 Department of Civil Engineering

**建設工学専攻 Architecture and Civil Engineering

2. 真空吸水試験法の確立

2.1 原理

コンクリート内部に存在する連続空隙は各種物質移動経路となりうる。中でも様々な劣化に起因すると考えられる水に着目して、コンクリート内部の空隙を計測することが望まれる。そこで、本研究においては短い試験期間において空隙あるいは水の移動を計測する手法として真空吸水試験法を検証した。コンクリートの内部まで乾燥させた試験体をある一定量の水位をもつ容器に入れ、雰囲気全体を真空中に吸引することにより、コンクリートの空隙部分の空気は上面から排気され、一方で水分が吸い上げられることを原理として、吸い上げられた水の高さまたはその面積が空隙を表していると仮定したものである。これまで透水試験は試験に長期間を要していたが、この方法であれば数時間で試験が可能となる。さらに、コンクリートの表層から内部に至る連続した空隙の測定ができれば、物質移動抵抗性ならびに劣化の進行を表現できるものと考えた。

2.2 試験方法の概要

図1に真空吸水試験法の概要を示す。構造物から取得したコア試験体または作製した供試体を、試験の前処理として40℃の乾燥炉で試験体の質量がほぼ恒量になるまで、内部水分を逸散させる。吸水面と水分蒸発面を開放し、それ以外の部分をアルミテープで封緘する。試験体が下から20mm浸かるようにバットに水を張り、真空デシケータにセットして真空状態を保持する。真空状態の保持は、真空ポンプで1時間吸引後、真空保持を2時間実施することで設置した試験体底面から水を吸い上げる。所定の時間が経過したのち、試験体をデシケータから取り出し、試験体を割裂する。水分が蒸発しないよう割裂した直後に水の吸い上げられた領域をマーキングする。カメラで撮影して画像解析を行う。ここでは全断面積に対する水の吸い上げられた面積の割合を算出し、真空吸水面積率とした。ただし、深さ方向の影響を評価する場合には1cmごとの断面積に対する水分が上昇した面積割合を算出することとした。

2.3 影響要因の抽出

(1) 前処理の影響

試験前の供試体の乾燥期間が真空吸水面積率に与える影響を調べるために、40℃の乾燥期間を1, 3, 5, 7日と変動させ、最適な日数を検討した。その結果BBを用いたコンクリートにおいて乾燥期間が7日の吸水面積率が5日より小さくなった。これは乾燥期間内に乾燥炉内で炭酸化することで表層部分が密になったためではないか

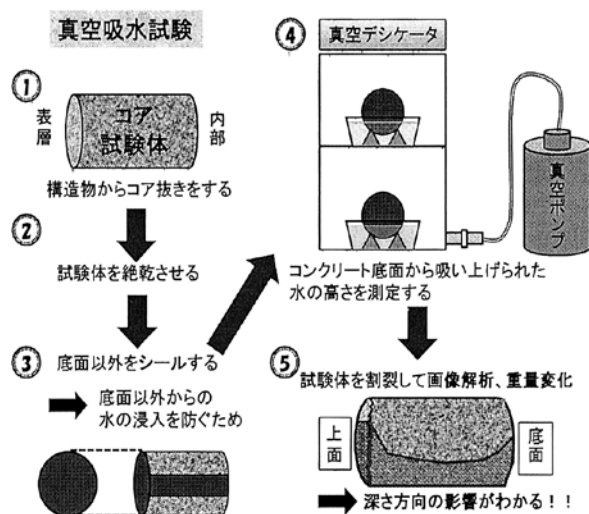


図1 真空吸水試験法の概要

Fig.1 Outline of testing method of water absorption on vacuum conditions

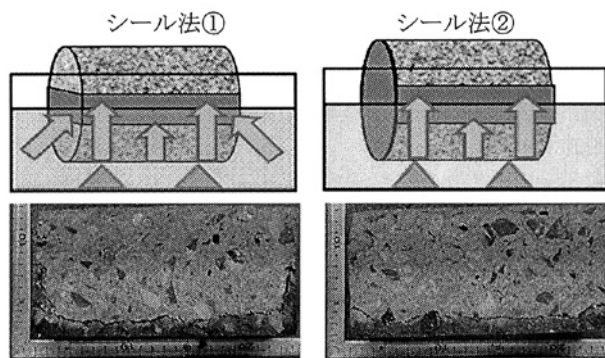


図2 封緘面の相違が試験結果に与える影響

Fig. 2 Effect for different of sealed area

表1 真空吸水試験の試験条件

Table 1. Test conditions for method of water absorption on vacuum conditions

乾燥期間（前処理）	40℃ 5日間
封緘面	両端面全面シール
水分高さ	20mm
吸水時間	3時間（1時間真空吸引， 2時間真空保持）

と考えられる。そのため、本研究の真空吸水試験においては乾燥期間を5日として統一した。

(2) 封緘面の検討

図2のように、封緘面としてシール法①では幅5cmのアルミテープを端部と側面ともに1周巻いた方法、シール法②では両端面は全面シールする方法により試験結果を

表2 コンクリートの配合表

セメント種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	OPC	BFS	S	G
N	45	48	174	387		841	928
	55	50	174	316		906	923
	65	52	174	268		963	906
B B	45	49	174	193	193	854	905
	55	51	174	158	158	920	900
	65	53	174	134	134	978	884

表3 試験体の養生条件

養生方法	1	5	7	28	試験 実施
D-1			乾燥(D:20℃, 60%)		
S-5					
S-7					
S-28			封蔵(S:型枠存置)		
C-5					
C-7		C:湿布			
W-28				W:水中	

同一養生期間と前処理を行った試験体の試験結果を図に示す。前者の方法では両端部は下からの吸水に加えて左右からの水の浸入も考えられる。従って、深さ方向の影響を正確に測定できない可能性があることから、底面部分に全断面アルミテープを貼り付ける方法を採用した。

以上より表1に真空吸水試験の試験条件をまとめる。

3. 真空吸水試験と中性化速度の関係調査

3.1 試験概要

(1) 試験体概要

試験体のセメント種類は、普通ポルトランドセメント[N]と高炉スラグ微粉末を50%置換させた試製高炉セメントB種[BB]を用いたコンクリートとし、W/B=45, 55, 65%, W=174kg/m³で試験を実施した。配合、養生条件を表2, 3に示す。なおW/B=45, 65%についてはD-1の養生方法のみで試験を実施した。試験に使用した試験体は、真空吸水試験では全断面から均一に乾燥の影響を受ける100×100×50mm、促進中性化試験では100×100×400mmの角柱試験体とした。それぞれの試験は材齢28日経過後に実施した。

(2) 真空吸水試験概要

2で開発した真空吸水試験を角柱の試験体を用いて実施した。なお、割裂後の試験体断面の一例を図3に示す。

(3) 促進中性化試験概要

試験は、JIS A 1153:2003に基づき、試験条件は温度

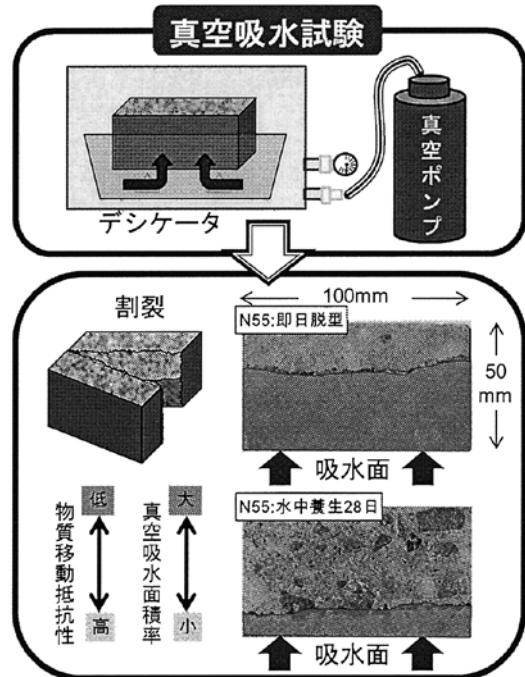


図3 真空吸水試験概要（角柱試験体）

Fig.3 Outline of testing method for water absorption on vacuum condition (for prism specimen)

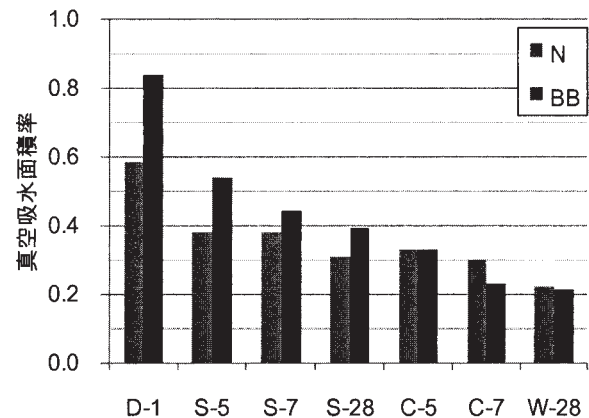


図4 真空吸水試験結果

Fig. 4 Result for water absorption test

20℃、湿度60%、CO₂濃度5.0%とした。試験体は所定の促進中性化期間（1, 2, 3, 4, 6, 8週）において40mm間隔で割裂し、断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。中性化深さの測定は6点の平均値で算出した。

3.2 試験結果

(1) 真空吸水試験結果

真空吸水試験を行った後の角柱試験体（100×100×50mm）の一例を図3に示す。即日脱型のように養生が不十分であるものほど吸水面積が大きくなっており、水中養生28日のように養生を十分行ったものは吸水面積が小

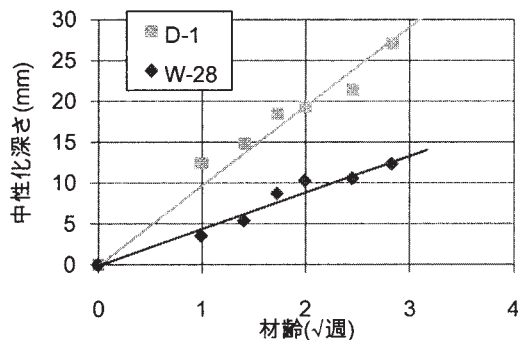


図5 促進中性化試験による経時変化の結果

Fig.5 Results of accelerating carbonation test

さくなっていることが分かる。これは真空状態に保持されることで試験体下面から水が吸い上げられ、空隙構造が粗であるほど吸水面積が大きくなる傾向をとらえたものであり、空隙構造を表しているものと考えられる。そこで、ここで指標として用いる真空吸水面積率は、その数値が大きいほど残存している空隙量が多く、物質移動抵抗性が低下すると考えられる。本試験において得られた材料要因、施工要因が真空吸水面積率に与える影響を図4に示す。セメント種類によらず、養生期間が長くなるほど、真空吸水面積率は低下する傾向を示した。これは養生期間の相違が、水和反応の過程で空隙組織に影響を与えたことによるものだと考えられる。セメント種類に着目すると、BBの場合D-1のように脱型直後から乾燥を伴う養生方法では、顕著に真空吸水面積率が大きくなった。次に型枠を存置したS養生においては、BBにおいて養生日数（型枠存置期間）を長くしてもNと同等の数値にはなっておらず、檀らの報告²⁾と同様、BBのような混和材が混入している系では型枠存置における養生のような水分を供給しないような養生では、N同等までの空隙分布を取らないと考えられる。一方、湿布により水分を外部から供給するC養生では、C-7以降でBBの真空吸水面積率がNよりも小さい結果を示した。このことは、水分供給を行うことで混和材の混入された系のセメントでは緻密化すると考えられる。

(2) 促進中性化試験結果

図5にNにおける促進中性化による経時変化の結果の一例を示す。養生が不足していると考えられるD-1においては、筆者らの報告³⁾のように、初期材齢での中性化の進行が著しく大きいことが確認できる。CO₂ガスの進行は空隙構造に大きく依存することから、表層部分の

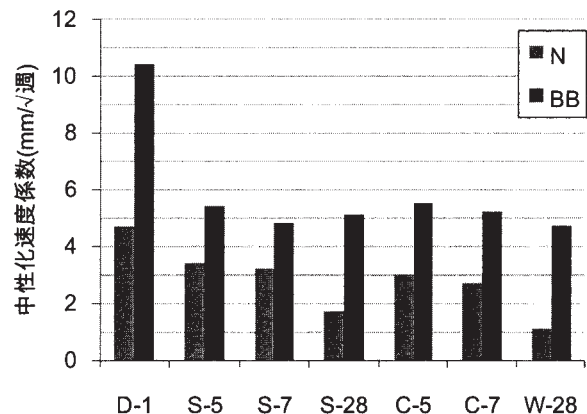


図6 促進中性化試験結果

Fig.6 Results for accelerating carbonation ratio coefficient

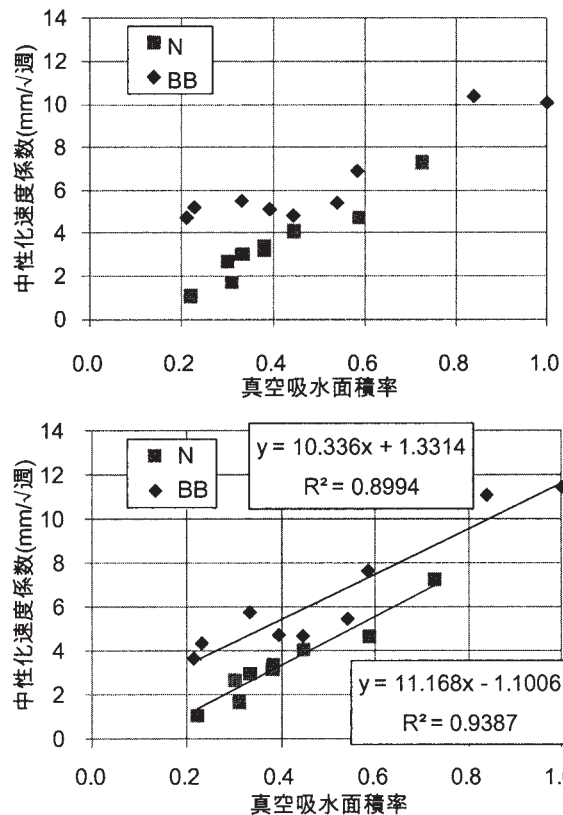


図7 吸水面積率と中性化速度係数の関係

(上：全促進材齢時、下：若材齢時のみ)

Fig.7 Relationship between area ratio of water absorption and carbonation ratio coefficient

(Upper : using all data, Down : using early age data)

養生が不足している領域のコンクリートでは粗な空隙構造を有しており、中性化促進期間の初期材齢において急激に中性化深さが大きくなるといえる。これらのグラフをもとに算出したと材料、施工要因との関係を図6に示

表4 コンクリートの配合表

Table 4 Mix proportions for core test

セメント 種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	OPC	BFS	S	G
N	45	48	168	373		822	946
B B	45	47	168	187	187	799	957

す。まず、セメント種類に着目するとNの場合、養生方法によらず、養生期間が長くなるほど、中性化速度係数は低下する傾向を示した。一方、BBの場合、D-1では顕著に中性化速度係数が大きくなっていたが、その他の養生方法、養生期間ではほとんど差はみられなかった。

3.3 真空吸水面積率と中性化速度係数の関係

3.2(1), (2) で得られた同一養生条件における真空吸水面積率と中性化速度係数の関係を図7に示す。図よりセメント種類によらず、真空吸水面積率が増加するとともに中性化速度係数も大きくなっており、その間には高い相関性があることがわかる。セメント種類に着目すると、BBにおいては真空吸水面積率が0.55よりも小さい領域では中性化速度係数が一定の値に収束する傾向となっているが、0.55以上になるとその関係はNと同様の傾きとなる傾向を示していた。これは、中性化速度係数は促進中性化試験による結果から算出している事に起因していると考えられる。BBにおいては十分に養生した場合、空隙構造は緻密化するのに対し、促進中性化による中性化速度は元来のpHの影響を受けることがあると考えられ、実環境での進行とは若干の乖離があるものとする。また、養生不足の場合には図5からも分かるように材齢初期段階にて中性化深さが急激に進行するが、材齢の経過とともにその進行速度は低下することが分かる。そこで、本研究においては養生不足の場合には急激に中性化が進行することを加味するため、中性化速度係数を若材齢までで算出することとし、筆者らの報告⁴⁾よりNでは4週、BBでは2週までの中性化速度係数を算出した。改良した中性化速度係数と真空吸水面積率の結果を図7下に示す。これより、NとBBにて関係式を構築し、この関係式を用いることとした。

4. 表層と内部のコンクリート品質評価

4.1 試験概要

(1) 試験体

試験体は表4に示す配合によりW=168kg/m³のコンクリートを作製し、φ100×200mmの円柱型枠に打設し上面をラップで封緘した。セメント種類は、3.1同様、普通

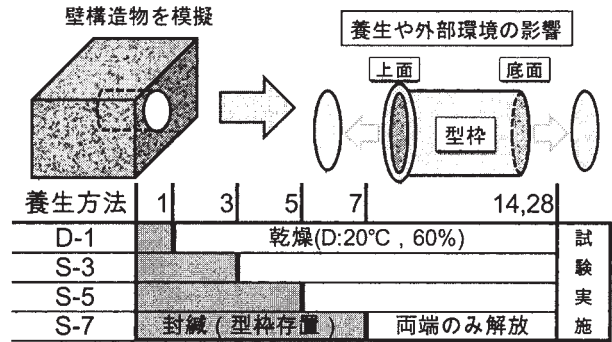


図8 コンクリートの養生条件

Fig. 8 Curing conditions for core test

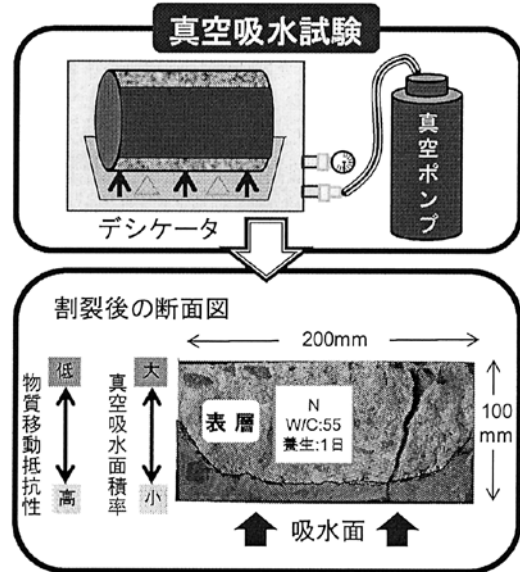


図9 真空吸水試験概要（円柱試験体）

Fig.9 Outline of testing method for water absorption on vacuum condition (for core specimen)

ポルトランドセメント [N] と高炉スラグ微粉末を50%置換させた試験高炉セメントB種 [BB] を用いたコンクリートとした。作製した試験体は所定の封緘養生期間（1, 3, 5, 7日）経過後に打設面と底面を脱型した。養生条件を図8に示す。これは200mm厚の壁構造部材を模擬し、脱型後に大気に暴露されることを模擬したものである。両端面を脱型した試験体を温度20℃、湿度60%に管理された恒温恒湿室にて暴露した。なお、試験体は材齢14, 28日経過後に試験を実施した。

(2) 試験概要

真空吸水試験は2.1(2)に基づいて実施した。試験の概要を図9に示す。ただし、試験体の形状の相違から、シールは試験体の両端面と側面とし、円柱試験体（φ100×200mm）が20mm浸漬するように水を張り試験を実施

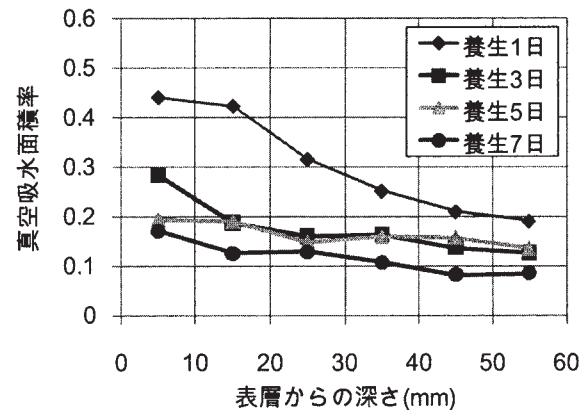
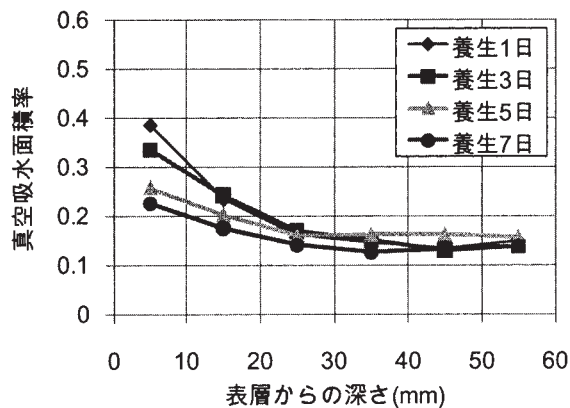


図10 真空吸水試験結果 (左: N, 右: BB)

Fig.10 Result of water absorption test on core specimens (Left: N concrete, Right: BB concrete)

した。吸水面積割合を画像解析で10mmおきに算出し、水の吸い上げられた面積を当該領域の断面積で除することで真空吸水面積率を算出した。

4.2 試験結果

真空吸水試験を行った後の試験体の一例を図9に示す。これより表層のコンクリートは内部のコンクリートよりも粗であることが考えられ、吸い上げられた水の領域は大きいことが分かる。そこで、図10に各種コンクリートにおける養生期間を変化させた試験体の結果を示す。内部のコンクリートにおいては、若干のばらつきはあるものの、セメント種類ごとにある程度同等の吸水面積率を示しており、材料特性値であるW/Bならびにセメント種類により物質移動抵抗性が決定されることが想定される。一方、いずれのセメントにおいても表層では吸水面積率が大きくなっており、その影響範囲はセメント種類により異なり、Nでは3cm程度、BBでは養生1日で5cm程度だが、養生3日以降はNと同等であった。以上より、養生期間を長く設定することで表層の吸水面積率は小さくなっており、表層コンクリートにおける養生の重要性が明らかとなった。

5. 中性化進行予測手法の高度化

5.1 高度化した中性化予測手法の提案

現在、コンクリート標準示方書により扱われている中性化速度式には、現地での測定結果を考慮する形で材料・施工要因が加味されている。しかしながら、簡易的に取り扱うためにコンクリート内部は均一であるとの設定から表層品質を考慮することなく、同一の中性化速度係数(拡散係数)を与えて計算することとしている。し

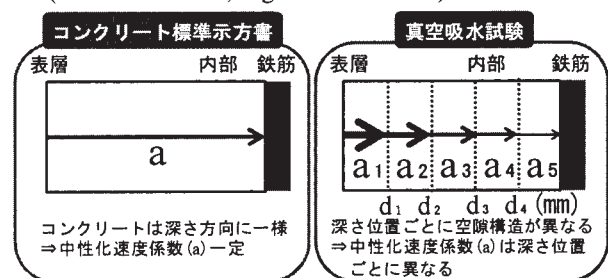


図11 中性化進行予測手法の概念図

Fig. 11 Outline of method for prediction of carbonation progress

かしながら、現実的には表層のコンクリートは施工欠陥や養生の影響を多分に受けており、その領域は表層から深さ25~50mm程度までが影響を受けている範囲だと考えられる⁵⁾。中性化を評価する場合、その進行速度を考慮すると、この領域での劣化速度を取り扱うためには一様の中性化速度係数を与えることは危険側の評価となりうる。特にかぶり小さい構造物においては、鉄筋腐食に及ぼす影響は大きいと考える。

そこで本研究での中性化進行予測手法の概念図を図11に示す。コンクリート標準示方書のように中性化速度係数を表層から内部への深さ方向に一定とするのではなく、深さ位置ごとに中性化速度係数を与えることでコンクリート表面から近い領域における養生不足による粗な空隙構造を取り扱うように検討することとした。中性化深さが d_1 まで進行すると、中性化速度係数が a_1 から a_2 に切り替わるようにし、深さごとに繰り返し計算し、劣化予測を行えるようにした。与える深さ位置における中性化速度係数は空隙に依存するものとし、図7で得られた関係式をもとに与えていくものとする。

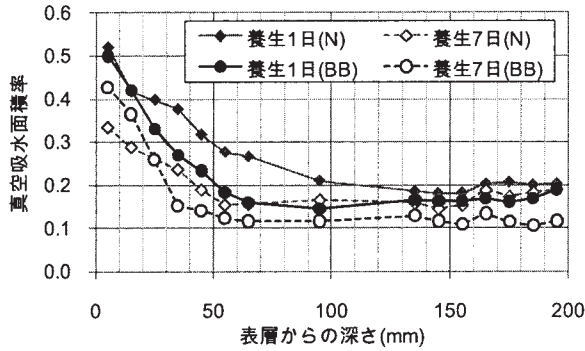


図12 真空吸水試験結果

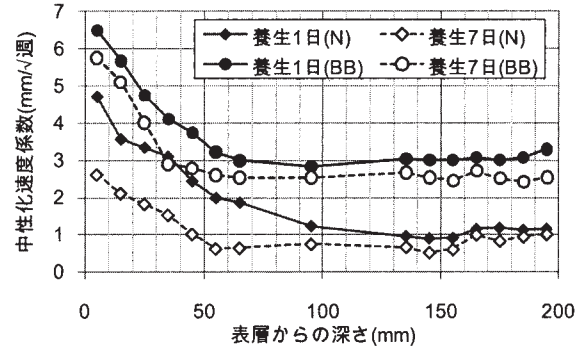


図13 深さ位置における中性化速度係数の推定値

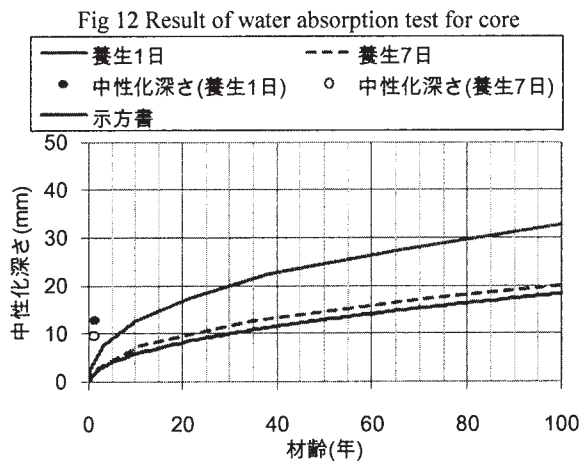


図14 養生を考慮した劣化予測 (Nコンクリート)

Fig. 14 Estimating carbonation depth (N concrete)

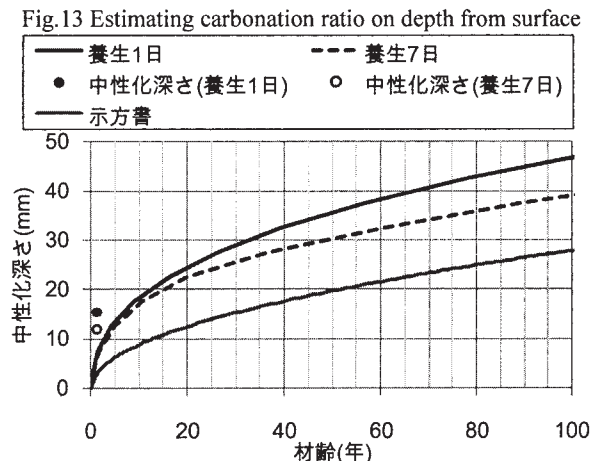


図15 養生を考慮した劣化予測 (BBコンクリート)

Fig. 15 Estimating carbonation depth (BB concrete)

5.2 養生期間の異なる試験体の中性化進行予測

養生日数が異なるコンクリート試験体で提案した予測手法を適用した。試験体は、屋内で暴露していたコンクリート試験体 (900×300×400mm) からφ100×200mmのコアを採取し、中性化進行予測手法の検証を行った。コンクリートのセメント種類は、普通ポルトランドセメント [N] と高炉スラグ微粉末を50%置換された試製セメント [BB]、W/B=60%で型枠存置1,7日後にそれぞれ暴露したものである。試験体からコアを採取し、コア試験体の真空吸水試験結果図12に示す。これより表層では施工の影響を受け粗な空隙構造を形成しているのに対し、内部では緻密な構造が形成されていることがわかる。この結果をもとに図7の関係式から算出した中性化速度係数の結果を図13に示す。これより表層からの深さが深くなる、つまり内部にいくに従って中性化速度係数が小さくなることが表現できている。次に、以上の結果を用いて5.1に示した方法で養生日数ごとの中性化進行予測を図14,15に示した。これより、材齢初期における養生が

不足しているコンクリートの中性化深さは、中性化速度が一定としている示方程式と比較して大きくなることが表現可能となった。一方で、養生を施した場合には、Nでは示方程式と同様の進行を表現することができているが、BBでは示方程式と同様の進行を示していない。これは本手法の中性化が促進試験の結果によるものであることが問題であると考えており、今後さらに検討する予定である。また図中の点は材齢390日のときの中性化深さだが、予測値よりも中性化が進行していることが確認できる。その理由については、中性化が進行し表層部が緻密化したことで吸水面積率が低下し、それにより予測が過小評価されたと考えられる。その点については今後さらに検討する必要があると考えられる。

5.3 実環境における中性化進行予測

次に、実環境で施工され実環境で暴露していたコンクリート試験体 (400×500×800mm) からφ100×200mmのコアを採取し、中性化進行予測手法の検証を行った。コンクリートのセメント種類は、普通ポルトランドセメ

ント [N] , $W/B=55\%$ で型枠存置7日後に実環境に暴露したものである。図16にコア試験体の真空吸水試験結果ならびに図7の関係式から中性化速度係数を算出した結果を示す。また図17に中性化進行予測を行った結果を示す。真空吸水試験から中性化進行予測を行ったものは、材齢初期に中性化が大きく進行しており、示方書よりも早く中性化が進行している。図中の点はコア試験体の中性化深さ4.13mm（材齢395日）となっているが、示方書よりも正確に予測ができており、真空吸水試験から中性化進行予測することができる可能性があると考えられる。

6. むすび

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 提案した簡易な真空吸水試験法を用いることでコンクリート内部の空隙構造が推定可能となった。
- (2) 養生不足の影響を伴うコンクリートにおいては、表層と内部のコンクリートの吸水性能が大きく異なる。そのため、物質移動抵抗性を考慮する際には養生の影響を考慮する必要があることが分かった。
- (3) 養生方法が異なる試験体の真空吸水面積率と促進中性化試験における中性化速度係数は、本研究の範囲においてはセメント種類ごとに一定の関係があることが分かった。この関係を用いることで、表層から任意の深さ位置における真空吸水面積率が算出できれば、中性化速度係数を与えることができる。
- (4) 提案した中性化進行予測手法を用いることで、従来取り扱えなかった養生の影響を加味した中性化の進行を予測することが可能となった。

なお、本稿においては中性化の進行について検討を加えたが、かぶりを考慮すれば危険側と評価するものではないといえる。一方、劣化進行の早い塩害については本手法の考え方を導入することが重要な意味をもつものと考えている。今後、塩化物イオンの劣化進行の実験的検証と今回の提案式の適用性についても検討を加えていく予定である。

参考文献

- 1) 伊代田岳史, 青木浩也, 井ノ口公寛, 村上祐: 材料・施工要因が表層コンクリートの物質移動抵抗性に与える影響, 第65回セメント技術大会, pp.258-259, 2011
- 2) 檀康弘, 伊代田岳史, 大塚勇介, 佐川康貴, 濱田秀則:

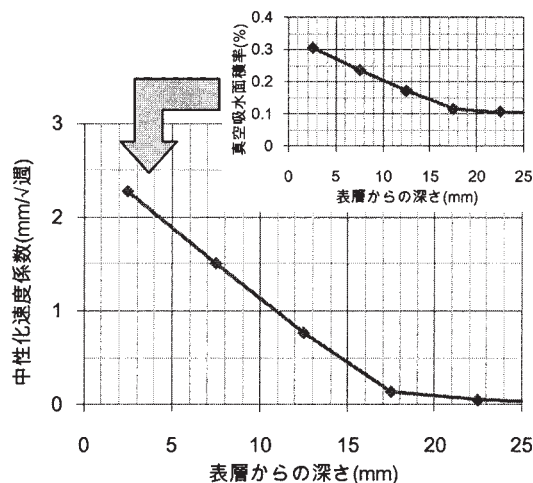


図16 深さ位置での吸水面積率と中性化速度係数の関係

Fig.16 Relationship between water absorption area and carbonation ratio on different depth from surface

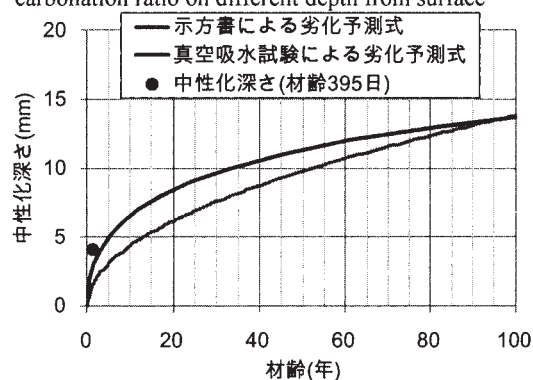


図17 実測の中性化深さと示方書ならびに真空吸水試験の中性化進行予測式との関係

Fig.17 Comparing estimation of carbonation depth and carbonation depth on experiment

高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの養生条件と耐久性の関係, 土木学会論文集E, Vol.65, No.4, pp. 431- 441, 2009

- 3) 井ノ口公寛, 豊村恵理, 伊代田岳史: 高炉コンクリートの養生相違が乾燥の影響範囲に与える影響, 混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム, 日本コンクリート工学会, pp.69-74, 2011
- 4) 豊村恵理, 伊代田岳史: 養生条件が中性化速度に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集第11巻, pp.401-406, 2011
- 5) 伊代田岳史, 兼安真司, 檀康弘, 前田悦孝: 高炉セメントコンクリートの塩分浸透と中性化の複合作用に対する耐久性評価, 自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム, pp.275-278, 2005.

本稿は日本コンクリート工学会主催のコンクリート工学年次大会 2012 に投稿した論文に、内容補足したものであることを付記する。

(2012年5月19日受付)