

# 論文 精緻な維持管理手法の提案に向けた養生不足による水和停滞領域とその大きさの検討

宮脇 正嗣\*1・杉山 明希\*2・伊代田 岳史\*3

**要旨：**養生の不足によって内部と表層ではコンクリートの物質移動抵抗性は異なると考えられることから、本研究ではこれまでより精緻な維持管理に向け、養生の不足による水の逸散を原因とした表層コンクリートの物質移動抵抗性の低下が引き起こされる範囲を特定するため、養生期間・水セメント比・セメント種類を変化させ、材料・施工による物質移動抵抗性への影響を検討した。その結果、養生不足による影響を受ける領域の特定が可能となり、それより深い範囲では養生期間に依らず物質移動抵抗性が変わらないこと、養生が不足するほどその影響が極端に大きくなる可能性があることが示唆された。

**キーワード：**養生期間, セメント種類, 水セメント比, 表層

## 1. はじめに

近年、日本では高度経済成長期に一気に整備されたコンクリート構造物が供用後 50 年を超え、それらの耐久性を十分に確保し、これからも健全で安全な状態で供用し続けるための維持管理の重要性が高まっている。コンクリート構造物の維持管理を行うにはまず点検が行われ、その結果に基づいて劣化予測を行うこととなる。現在、コンクリート構造物の劣化現象の 1 つである中性化に関して材料や周辺環境等の影響を考慮した様々な劣化予測式が提案されている<sup>1)</sup>。その中でも現在最も一般的に用いられる手法はコンクリート構造物からコアを採取し、フェノールフタレイン法によって中性化深さを測定した後、土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】<sup>2)</sup>に示されている $\sqrt{t}$ 則で表される式を用いて今後の劣化の速度を予測するものである。この式では、コンクリートの表層と内部を一律のものにとらえ、供用期間と中性化深さからそのコンクリートの中性化速度係数を算出できるとしている。しかしながら、既往の研究<sup>3)</sup>において養生が不十分であった場合、水の逸散に伴い水和が滞り、表層の物質移動抵抗性が小さくなることが指摘されており、中性化深さと供用期間の関係は必ずしも $\sqrt{t}$ 側の関係にならないことが考えられる。そこで本研究では、コンクリート構造物の劣化に影響を与えたと考えられる、材料(水セメント比, セメント種類等), 施工(養生方法, 養生期間等), 周辺環境(気温, 湿度等)のうち、材料, 施工の影響を考えるため、水セメント比, セメント種類, 養生期間を変化させ、促進中性化試験に加え新たに考案しているコンクリートの深さ方向の物質移動抵抗性を連続的に把握することのできる真空吸水試験<sup>4)</sup>を行い、材料の違いによる養生不足の影響範囲について検討した。

表-1 コンクリート計画配合

No.	セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	S	G
N35	OPC	35	44	170	486	788	886
N45		45	46		378	830	934
N55		55	48		309	858	965
N65		65	50		262	876	986
BB35	BB	35	44		486	780	877
BB45		45	46		378	824	927
BB55		55	48		310	852	959
BB65		65	50		262	872	981
L55	LPC	55	48	309	861	969	

## 2. 試験概要

### 2.1 使用材料および試験体諸元

本研究では、普通ポルトランドセメント (以後 OPC と示す), 高炉セメント B 種 (高炉スラグ微粉末 50%置換, 以後 BB と示す), 低熱ポルトランドセメント (以後 LPC と示す) を使用した。細骨材には密度 2.60g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.35%の砕砂を, 粗骨材には密度 2.70g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.26%の砕石を用いた。本研究におけるコンクリート計画配合を表-1 に示す。物質移動抵抗性を評価するため、目標空気量は 4.5%±1.5%とし、減水剤, AE 減水剤を用いて調整した。水セメント比は OPC, BB を用いた配合において 35, 45, 55, 65%と変化させ、打込み翌日まで型枠存置, 翌日脱型し養生方法は全ての配合で 20℃の環境で封緘養生とした。また養生期間は 1, 3, 5, 7, 10, 28 日とし、水和の遅さを考慮して LPC を用いた配合のみそれらに加えて 12, 14 日養生の供試体も作製した。

\*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 工学部土木工学科

\*3 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)

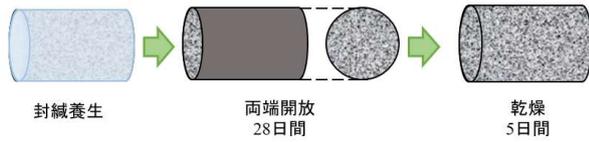


図-1 真空吸水試験前処理概略図

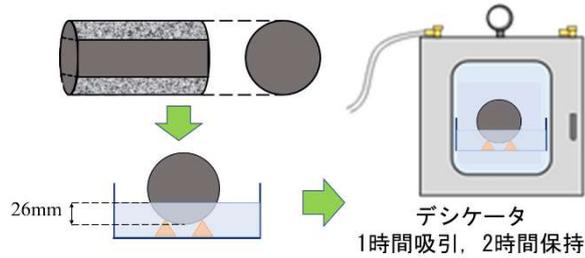


図-2 真空吸水試験概略図

## 2.2 促進中性化試験

試験は角柱供試体（100×100×400mm）を用い、所定の養生期間が終了したものから打設面と底面以外の4面をアルミテープでシールして中性化促進環境に静置した。中性化の促進条件はJISA 1153:2012に基づき、温度20℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5.0%とした。供試体は所定の促進期間（2日、1、4、8、13週）において50mm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後、変色境界までの距離を1面当たり6点、計12点測定し、その平均を中性化深さとした。

## 2.3 真空吸水試験

現在筆者らのグループで提案している真空吸水試験はコンクリート物質移動抵抗性を簡易的に評価すること、またコンクリートの深さ方向の物質移動抵抗性を連続的に把握することを目的とした試験方法である。本研究では円柱供試体（Φ100×200mm）を使用した。既往の研究<sup>4)</sup>に従った本試験の前処理方法を以下に示す。所定の養生終了後、図-1に示すように側面をアルミテープでシールし、両端を解放した状態で温度20℃、相対湿度60%の環境下に28日間静置することで、実構造物の施工における養生終了後の脱枠に伴う乾燥を模擬した。その後アルミテープをすべて取り除いてから5日間40℃の乾燥炉にて乾燥させた。

前処理を行った後、試験体側面からの水の侵入を防ぐため、図-2のように円柱底面と打設面、側面の一部に幅5cmのアルミテープでシールした。次にバットに円柱供試体が26mm浸漬するように水を張り、デシケータに設置後、デシケータ内を真空ポンプで1時間吸引（-0.1MPa）した後、2時間真空を保持し試験を行った。その後、供試体を割裂し、水の吸い上げられた高さを浸漬面の長手方向に10mm間隔で計21点測定した。

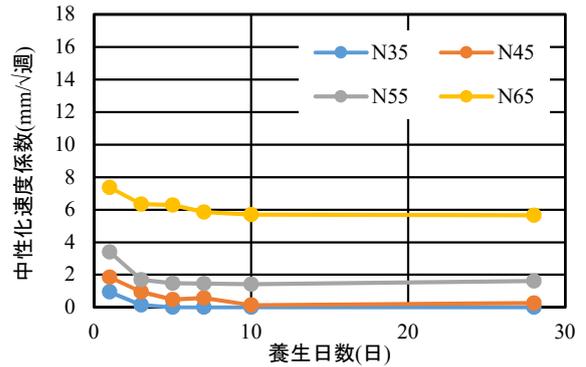


図-3 養生日数と中性化速度係数の関係(OPC)

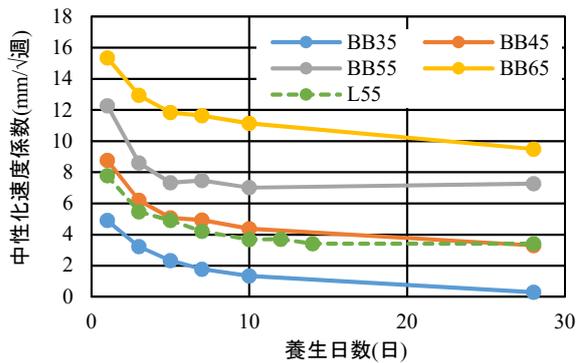


図-4 養生日数と中性化速度係数の関係(BB, LPC)

## 3. 試験結果

### 3.1 促進中性化試験の結果

#### (1)養生日数と中性化速度係数の関係

図-3にOPCを用いた配合、図-4にBBとLPCを用いた配合の結果から求めた養生日数と中性化速度係数の関係を示す。ここでは単に養生期間の相違による物質移動抵抗性を従来通り評価するため、全ての促進材齢を直線近似し、中性化速度係数を算出した。水セメント比、セメント種類に依らず、養生日数が長くなるほど中性化速度係数は小さくなる傾向にあるが、BB、LPCを用いた配合の方が養生を延ばすことによる中性化速度係数の低下が大きいことがわかる。従って水和の遅いセメントを用いた場合、コンクリート本来の物質移動抵抗性を得るにはより長い養生期間が必要であると言え、土木学会標準示方書【施工編】8章<sup>5)</sup>に記載されている湿潤養生期間の標準においてBBがOPCに比べ養生期間が長く設定されている点にも通じている。また、ある一定期間以上の養生を施した場合において中性化速度係数の減少が頭打ちになる傾向が確認された。圧縮強度の場合、材齢28日付近まで湿潤養生を施すことによって強度が増進し続けることが知られているが、中性化速度係数はOPCを用いた配合においては材齢7日程度、BBを用いた配合においては材齢10日程度までの養生で中性化速度係数の低下が停滞することから、初期材齢においては物質移動抵抗性に影響を与える空隙が水和反応の進行により充填さ

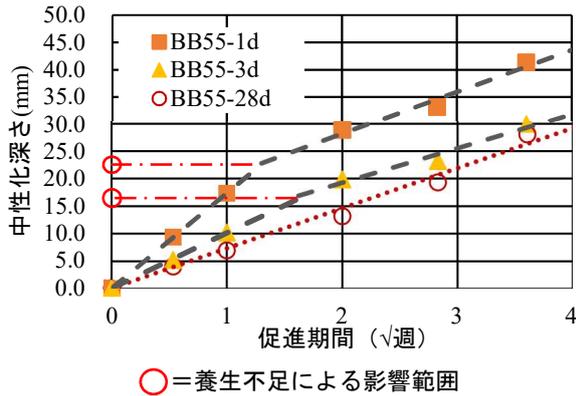


図-5 BB55 促進中性化試験結果

れていると考えられる。従って初期の養生をしっかりと行うことで、その配合のコンクリートの持つ物質の移動を妨げるポテンシャルの大部分を發揮させることができると考えられる。

### (2)養生不足による影響

図-5にBB55の養生1, 3, 28日の促進中性化試験の結果を示す。この図より、養生28日については中性化深さが期間の平方根に比例していることがわかるが、1, 3日養生の場合その関係にないことがわかる。これは養生不足による水の逸散に伴う表層コンクリートの水和の停滞が原因として考えられ、養生不足の影響を受けているということとなる。また促進期間の後半で比べると、養生日数に依らず促進期間に対する中性化深さの増加スピードがほぼ同等であることより、養生の影響を受けていない内部のコンクリートは養生期間に依らずほぼ同等の物質移動抵抗性を有していると考えられる。

### 3.2 真空吸水試験の結果

代表的な配合として、N55とBB55, L55の試験結果を図-6, 図-7, 図-8に示す。底面を左側に示しており、右側が打設面となっている。どちらのグラフを見ても打設面側が大きく吸い上がる結果となっており、これは脱型までの24時間で水分が逸散してしまったことや、ブリーディングの影響が原因として考えられる。反対に底面側はそれらの影響を受けていないと考えられるため、養生の影響のみを反映していると考えられる。そこで本研究では底面側に着目することとした。真空吸水試験の結果も促進中性化試験と同様に、一定の養生期間を超えるとその効果は頭打ちになる傾向や、BBやLPCを用いた配合は、水和のスピードが遅いことから養生不足の影響を受けやすく、より長い養生期間が必要であることが確認された。また、L55は養生期間が短いと、養生の影響を受けないと考えられる内部コンクリートも吸水深さが大きくなっていることから、養生に対してより一層の注意が必要であるといえる。

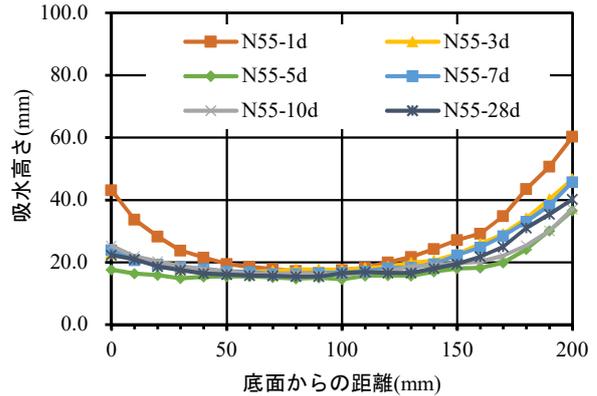


図-6 真空吸水試験結果 (N55)

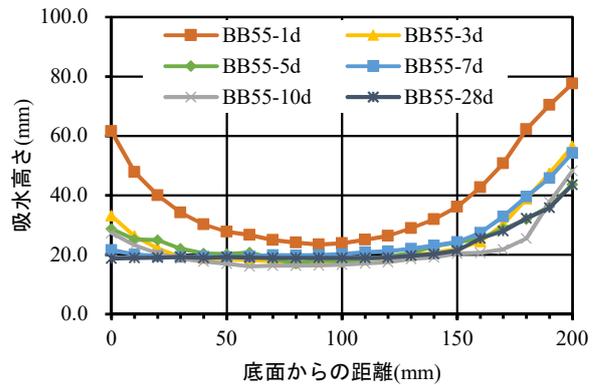


図-7 真空吸水試験結果 (BB55)

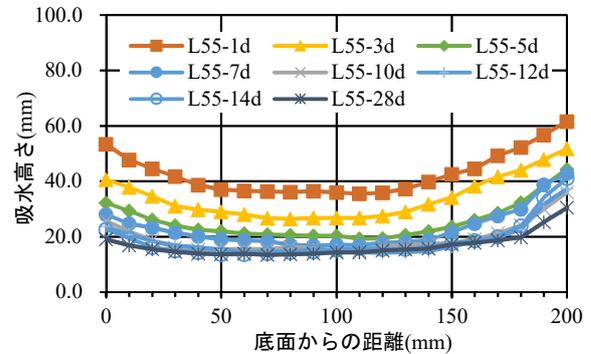


図-8 真空吸水試験結果 (L55)

### (1) 端部吸い上がりについての検討

養生が十分に施された場合、底面側の吸水高さは供試体中心部とほぼ同等であることが予想されるが、28日間養生を施した供試体においても端部が吸い上がる傾向がみられた。その原因がコンクリートでなく試験方法にあると考えたため、真空吸水試験で用いたものと同様の供試体を作製し、コンクリートカッターにて半分にカットした後同様の手法で真空吸水試験を行い端部が吸い上がるかどうかの確認を行った。試験後の供試体の写真を図-9に示す。切断し、端部とした中心部(底面からの距離100mm)の吸い上がりが大きくなることはなかった。このことより端部であることにより吸い上がりが大きくなる

なることは無いと言え、真空吸水試験の結果は正しくコンクリートの空隙の状態を反映できているものと考えられる。

## (2) 内部コンクリートの物質移動抵抗性

供試体中心部に着目すると OPC, BB を用いた配合においては養生期間の長さに関わらず、吸い上げ高さがほぼ同等であることがわかる。これより促進中性化試験の結果と同様に、養生の影響を受けない内部のコンクリートの物質移動抵抗性はほぼ同等といえる。これを確認するために、透気試験を行った。図-10 に示すように真空吸水試験と同様の前処理を行った供試体を養生期間 1, 5, 10 日養生で作製し、円柱供試体 (Φ100×200mm) の中心 50mm をコンクリートカッターで切り出した後 0.1MPa の圧力で空気を通過させ、その透気量を水上置換法によりメスシリンダーを用いて計測し、以下の式(1)より透気係数を算出した。

$$K = \frac{2LP_1}{(P_1^2 - P_2^2)} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここで、

K: 透気係数 (cm<sup>4</sup>/N・s), L: 供試体厚さ (cm)

P<sub>1</sub>: 載荷圧力 (N/cm<sup>2</sup>), P<sub>2</sub>: 流出側圧力 (0.1N/cm<sup>2</sup>)

Q: 透気量 (cm<sup>3</sup>/s), A: 透気面積 (cm<sup>2</sup>)

結果を図-11 に示す。N55, BB55 のどちらの配合においても養生期間に依らず透気係数がほぼ同等であった。これより透過する物質が気体、液体どちらであっても、養生の影響を受けない内部コンクリートの物質移動抵抗性は同等であることが確認された。

## 4 養生不足による影響範囲の検討

これまでに述べてきたように、内部のコンクリートは養生不足による影響を受けないのに対し表層のコンクリートはその影響を大きく受けるため、より精緻な維持管理を行うには養生の不足による乾燥の影響を受けた範囲を特定することが不可欠である。そこで、今回行った二つの試験から養生不足による影響範囲を定量化することを試みた。

### 4.1 促進中性化試験から算出した影響範囲

促進中性化試験結果の項において、養生が不足した場合、中性化深さが促進期間の平方根に比例しないこと、また内部のコンクリートは養生の影響を受けず、中性化速度係数は養生期間に依らず一定であることを述べた。そこで、図-5 の○印のように、内部コンクリートの中性化速度係数と表層コンクリートの中性化速度係数が同等となったと考えられる中性化深さを影響範囲とした。N35, N45, BB35 の配合では中性化進行が遅く十分なデータが得られなかったため影響範囲を算出できなかった。養生期間と促進中性化試験から算出した影響範囲の関係

切断して端部とした部分

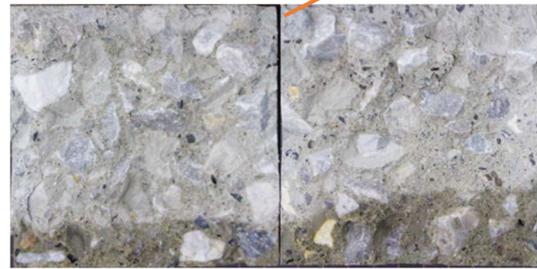


図-9 端部吸い上がりの確認

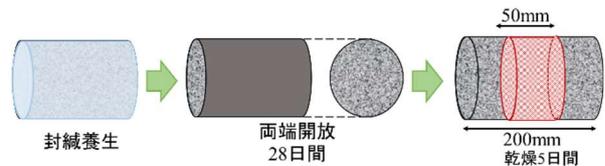


図-10 内部コンクリート供試体概要

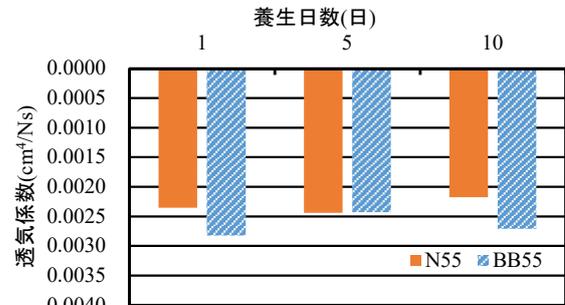


図-11 内部コンクリート透気試験結果

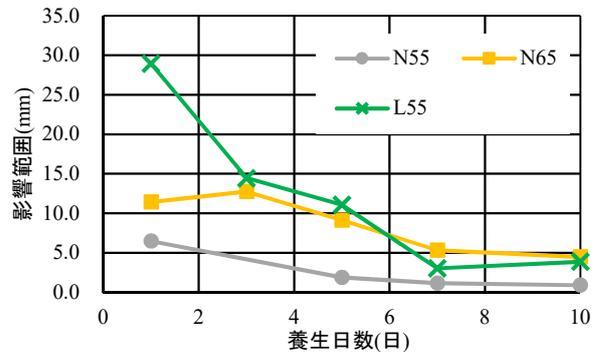


図-12 養生不足の影響範囲 N, L (促進中性化試験)

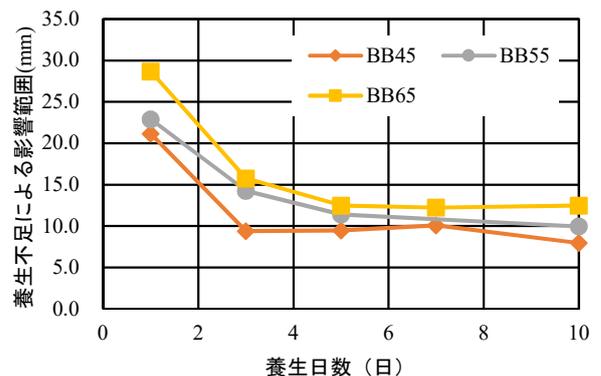


図-13 養生不足の影響範囲 BB (促進中性化試験)

を図-12, 図-13 に示す。養生期間が長くなるほど影響範囲が小さくなる傾向が得られた。影響範囲は大きいものでおよそ 30mm 程度となった。

#### 4.2 真空吸水試験から算出した影響範囲

真空吸水試験における養生不足による影響範囲は、底面からの距離に対する吸水高さの傾きが初めて 0 に近づいた時の底面からの距離とした。本研究では傾きが 0.011 に達した時の底面からの距離とした。具体的な閾値は今後も検討が必要であると考えられる。養生日数と真空吸水試験から算出した養生不足による影響範囲の関係を図-14, 図-15 に示す。こちらの試験においても養生期間が長くなるほど影響範囲は小さくなる傾向が得られた。また、養生期間 5 日において影響範囲が小さくなる結果が得られたが、試験実施の過程に何らかの要因があると考えられるが現段階では不明である。影響範囲は大きいもので 60mm となった。

#### 4.3 二試験間の養生不足による影響範囲の関係

前項までで、2 つの試験からそれぞれ養生不足の影響範囲を算出した。両者の関係を図-16 に示す。真空吸水試験から得られた影響範囲が大きくなると、促進中性化試験から得られた影響範囲も大きくなる関係にあることが分かった。また真空吸水試験から得られた影響範囲に対して、促進中性化試験から得られた影響範囲は小さいものとなったが、これは透過する物質や透過方向が違うこと、中性化は化学反応を伴っていることなどが原因として考えられるため、今後更なる検討が必要であると考ええる。

#### 4.4 養生不足の影響範囲とダメージ度の関係

真空吸水試験において図-17 の斜線分の面積のように、養生不足の影響範囲における 28 日養生での吸い上げ最低値との差の総面積を養生不足によるダメージ度と定義し、各養生条件にてダメージ度を算出した。

養生不足の影響範囲とダメージ度の関係を図-18 に示す。両者には曲線を描く関係が認められた。また、影響範囲が 20mm を超えたところから影響範囲が大きくなるほどダメージ度のバラつきが大きくことが読み取れる。これより、養生を怠り養生不足による影響範囲が大きくなってしまった場合コンクリートの品質は安定せず、大きな初期不良となってしまう可能性が示唆された、反対に十分な養生を施した場合においては、コンクリートの品質が安定することが確認された。そのためには初期の養生が重要であると言える。

### 5 精緻な維持管理手法への適応の可能性

ここまでで養生の不足による影響範囲について検討した。実構造物の劣化予測を行う場合、初めに述べたように $\sqrt{t}$ 則が用いられるが、表層と内部のコンクリートを

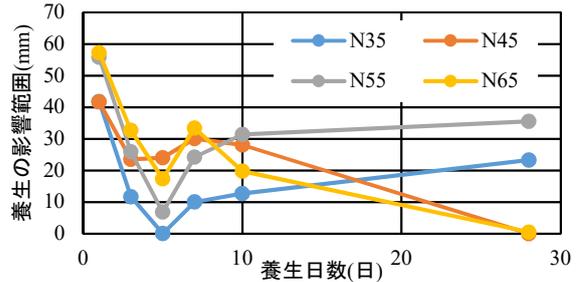


図-14 養生不足の影響範囲 N (真空吸水試験)

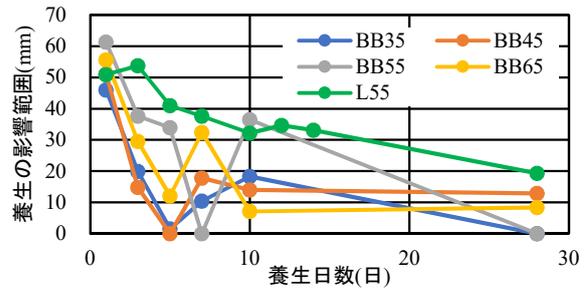


図-15 養生不足の影響範囲 BB, L (真空吸水試験)

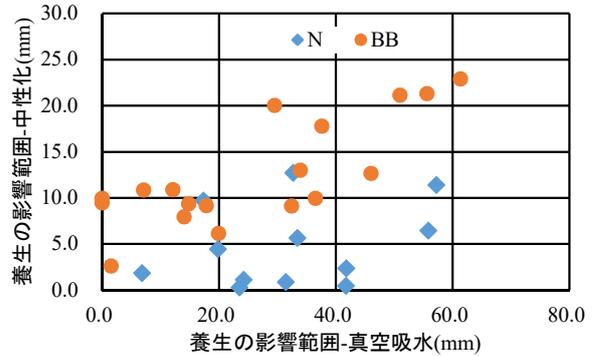


図-16 各試験から算出した影響範囲の関係

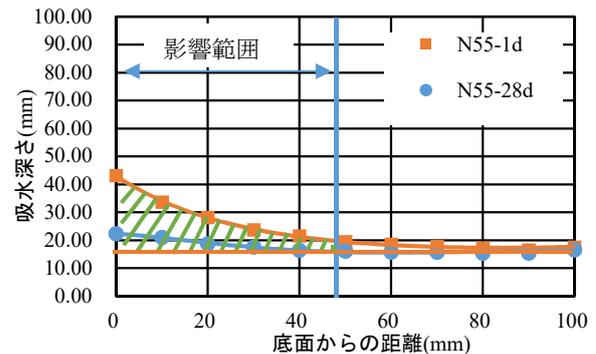


図-17 ダメージ度算出概略図

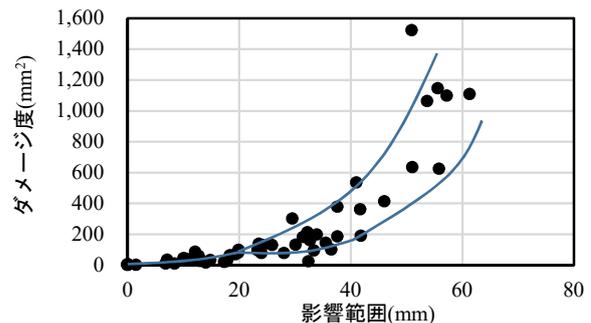


図-18 影響範囲とダメージ度の関係

均質なものと捉えている。そこで実構造物から採取したコアを用いて真空吸水試験を行い、短時間でコンクリートの奥行方向の物質移動抵抗性を把握することでより精緻な劣化予測が可能であると考えられる。例えば真空吸水試験と中性化深さの測定結果から中性化深さが養生不足による影響範囲より大きかった場合、採取コアの内部コンクリートのみを用いて促進中性化試験を行い内部コンクリートの物質移動抵抗性を把握することで、今後の精緻な劣化予測が行うことができると考えられる。

## 6 まとめ

水セメント比、セメント種類、養生期間を変化させ 2 種類の物質透過試験に実施によって養生不足による影響について検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 養生不足の影響を受けない内部のコンクリートの物質移動抵抗性は養生期間に関わらず同等であった。
- (2) 養生不足による影響範囲は最大で、促進中性化試験結果からは 30mm 程度、真空吸水試験からは 60mm と算出された。
- (3) 養生不足の影響範囲が大きいほど、コンクリートの

品質がばらつくため、その影響範囲を小さくすることが重要であり、十分に養生を施すことでコンクリートの品質を安定させることができる。

- (4) 真空吸水試験を実構造物コアで実施することで、より精緻な劣化予測が行える可能性がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会, 構造物表面のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会 (335 委員会) 成果報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ No.80, 2008
- 2) 土木学会, コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2018
- 3) 豊村恵理, 伊代田岳史: 養生条件が中性化速度式に及ぼす影響と評価方法の検討, 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
- 4) 伊代田岳史, 井ノ口公寛: 簡易な真空吸水試験を用いた中性化進行予測手法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.748-753, 2012
- 5) 土木学会, コンクリート標準示方書【施工編】, 2017