

# 論文 排水・水中養生したコンクリートの耐久性評価

宮原 茂禎<sup>\*1</sup>・丸屋 剛<sup>\*2</sup>・岸 利治<sup>\*3</sup>

**要旨:** 養生によりコンクリート表層の耐久性を向上させる手法を構築することを目的として、型枠内部に透水板を配置してコンクリートを打設することにより打設直後の余剰水を排出するとともに、硬化後に透水板に湛水することで水中養生を行うことができる養生システムを考案し、その効果を各種の耐久性試験により評価した。その結果、本養生には、通常的水中養生を上回る空隙構造の緻密化、中性化の抑制、塩分浸透抑制効果があることが確認された。

**キーワード:** コンクリート, 耐久性, 養生, 表層品質, 透水型枠養生, 水中養生

## 1. はじめに

これまでに構築されてきた社会資本の維持管理費用が今後急激に増大していくことが予想されているなかで、新設の構造物に対しては品質の良いコンクリートを施工し、必要に応じた予防保全を施すことで、将来の維持管理費用や労力を低減させるライフサイクルコストの考え方が浸透してきている。近年の技術提案型の入札制度の拡大とも合わせてコンクリートの耐久性向上技術に関する関心が高まり、盛んに研究開発が行われている。コンクリートの耐久性向上技術は、主に初期ひび割れの防止とコンクリート自体の品質向上の観点から検討が行われており、設計、材料・配合、運搬、打設、養生、表面保護工の各工程において様々な技術が開発されている。このうち養生に関しては、型枠内部に織布や専用のシートを設置して打設直後の余剰水や気泡を排出する透水型枠<sup>1),2)</sup>や、脱型後のコンクリート面に設置して表面の湿潤状態を保つ湿潤養生マット<sup>3)</sup>などについて研究が行われ、実用化されている。これらはそれぞれに良好な効果が確認されており、透水型枠はコンクリート表面部の水セメント比の低減による高耐久化や気泡の減少による美観の改善が期待でき、湿潤養生はセメントの水和反応を十分に進行させ、緻密な空隙構造を形成することで耐久性の向上を図ることができる。現状では、養生はこのような打設初期の排水または硬化後の給水や乾燥防止のどちらか一方を行う場合がほとんどであり、大きな労力や費用を伴わずに両者を複合して実施できる養生方法があればさらなる品質向上が期待できる。本研究では、施工現場において水中養生に匹敵する効果を得ることができる養生方法を見出すことを目的として、初期の余剰水の排出と硬化後の給水を同一の型枠を用いて連続して行うことができる手法を考案し、その効果を空隙構造や耐久性試験を通して評価した。

## 2. 実験方法

### 2.1 排水・水中養生方法

本検討では硬化前の余剰水の排出と硬化後の湿潤養生を行うことができる養生方法を考案し、その効果を検証した。型枠の構造と養生の手順を図-1とあわせて以下に示す。

- ① 通常の木製型枠の内部に厚さ2cm程度の透水板を配置し、コンクリートとの接触面には透水性のシートを設置する。
- ② コンクリートを打設する。打設中および打設直後は下部に設置した水抜き栓を開いて、コンクリート表面の余剰水や空気泡を排出する。
- ③ 終結後に水抜き栓を閉じて透水板に湛水することにより水中養生を行う。

これにより、透水型枠による排水効果と水中養生の効果

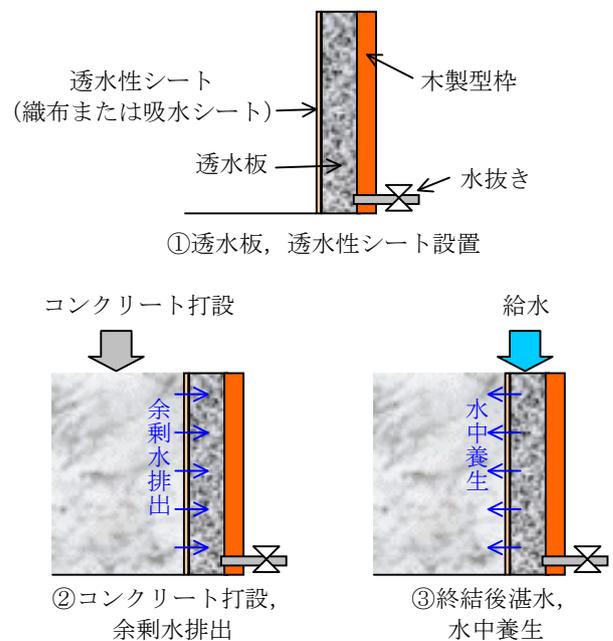


図-1 排水・水中養生の概要

\*1 大成建設(株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 修(工) (正会員)

\*2 大成建設(株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 博(工) (正会員)

\*3 東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 博(工) (正会員)

表-1 コンクリートの配合

骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	高炉セメント B 種	細骨材	粗骨材	混和剤*
20	8	56.5	5.0	47.6	150	265	903	1015	夏用 : 3.18 冬用 : 2.12

※混和剤 夏用：AE 減水剤遅延形，ケース 1-1～1-4 で使用。冬用：AE 減水剤標準形，ケース 2-1～2-3 で使用。

をあわせて得ることができると考えた。本報ではこの養生方法を排水・水中養生と呼ぶこととする。

## 2.2 実験ケース

養生効果の検証のために製作した試験体は一辺 30cm の立方体とした。コンクリートは呼び強度 24，スランブ 8cm，Gmax20mm の高炉 B 種コンクリート (24-8-20BB) をレディーミクストコンクリートとして購入して，打設した。配合を表-1 に示す。

表-2 に実験ケースを示す。試験体製作は 2 回に分けて行い，1 回目に製作した試験体をシリーズ 1，2 回目の試験体をシリーズ 2 とし，養生方法ごとにそれぞれケース 1-1～1-4 およびケース 2-1～2-3 とした。末尾が 1 のケースは標準養生した試験体であり，養生効果を評価するための基準とした。標準養生試験体はコンクリート打設後 1 日で脱型し，材齢 28 日まで 20℃ の水中で養生した。排水・水中養生は 3 種類の透水性シートを用いて試験した (ケース 1-2, 1-3, および 2-2)。透水性シートはコンクリート硬化後に透水板がコンクリートと接着するのを防ぐこと，および初期の余剰水や気泡を吸収するために設置したもので，材質による養生効果の差異を確認することを目的として厚みの異なる 2 種類の織布 (厚さ約 0.2mm と 0.5mm) および表面吸水シートを用いた。表面吸水シート (ケース 1-3) は，特殊孔あきフィルムと高吸水ポリマーを染み込ませた不織布をラミネートした吸水シート<sup>4),5)</sup> で，型枠面に貼付して耐久性の向上

や美観の改善を図る目的で実用化されたものを使用した。織布 (ケース 1-2 および 2-2) は市販の木綿であり，透水板の凹凸がコンクリート表面に転写されないように二重にして使用した。

排水・水中養生とあわせて，木製型枠の存置による養生 (ケース 1-4，以降，型枠存置とする)，養生マットへの散水による湿潤養生 (ケース 2-3，以降，マット散水養生とする) を施した試験体を製作して養生効果を比較した。ケース 1-4 の型枠存置期間は 3 および 7 日とした。コンクリート標準示方書【施工編】<sup>9)</sup> に示される養生期間の標準は高炉セメント B 種では気温 15℃ 以上で 7 日である。型枠存置 7 日は一般的な土木工事における養生を想定したもので，3 日はやや養生不足の状況を想定したものである。マット散水養生は早期に脱型したあとの湿潤養生を想定したもので，材齢 3 日で脱型したのちに試験体に養生マットをかけて散水し，7 日まで湿潤状態を保持した。

養生を終了した試験体は特に温度管理をしていない室内で保管した。試験体は養生方法ごとに 2 体ずつ製作して 1 体は非破壊用の試験体として保管し，もう 1 体はコアを採取して次節に示す方法で養生の効果を検証した。

## 2.3 養生効果の評価試験

養生の効果を，圧縮強度，透気係数，空隙構造，促進中性化深さ，塩化物イオンの見掛け拡散係数を測定する

表-2 実験ケース一覧

ケース No.	養生方法	養生期間 (日)	養生方法	特記事項	
シリーズ 1	1-1	標準養生	28	材齢 1 日で脱型，28 日まで水中養生	比較用
	1-2	排水・水中養生①	3, 7	材齢 1 日まで排水後，3 または 7 日まで湛水養生。その後常温室にて保存	透水性シート： 織布厚さ約 0.2mm
	1-3	排水・水中養生②	3, 7	材齢 1 日まで排水後，3 または 7 日まで湛水養生。その後常温室にて保存	透水性シート： 表面吸水シート
	1-4	型枠存置	3, 7	木製型枠を存置。脱型後は常温室にて保存	施工現場における養生を想定
シリーズ 2	2-1	標準養生	28	材齢 1 日で脱型，28 日まで水中養生	比較用
	2-2	排水・水中養生③	3, 7	材齢 1 日まで排水後，3 または 7 日まで湛水養生。その後常温室にて保存	透水性シート： 織布厚さ約 0.5mm
	2-3	マット散水養生	7	材齢 3 日で脱型，7 日まで養生マットを巻いて散水。その後常温室にて保存	早期脱型後の湿潤養生を想定

ことにより検証した。

透気係数は Torrent 式透気試験により、材齢 1 ヶ月および 1 年で測定した。圧縮強度は材齢 3 ヶ月で型枠に接していた側面から  $\phi 50 \times 100\text{mm}$  のコアを採取して JIS A 1108 に従い試験した。空隙構造、中性化深さ、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定は、コアを材齢 28 日において採取して、以下の手順で測定した。空隙構造測定の試料は表面からの深さ 0~10mm, 10~20mm の範囲から一辺約 5mm の立方体試料を切り出し、D-dry 乾燥を 7 日間施した。測定は水銀圧入式ポロシメータにより行い、3.2nm から  $340\mu\text{m}$  の空隙量を求めた。促進中性化試験は、型枠面を除いたコアの側面と底面をエポキシ樹脂でコーティングし、 $20^\circ\text{C}$ , RH60%,  $\text{CO}_2$  濃度 5% の条件で

3 ヶ月および 6 ヶ月間行った。中性化深さは割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、表面からの非呈色深さを測定することにより求めた。塩化物イオンの見掛けの拡散係数は浸せき試験により求めた。促進中性化の試験体と同様にコーティングしたコアを 3% の塩化ナトリウム溶液へ 6 ヶ月間浸せきした。浸せき後ドライカッターで表面から 1cm ずつ平板を切り出し、JIS A 1154 の電位差測定法により塩化物イオン濃度を測定した。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 圧縮強度試験結果

図-2 に各種の養生を施した試験体から採取したコア

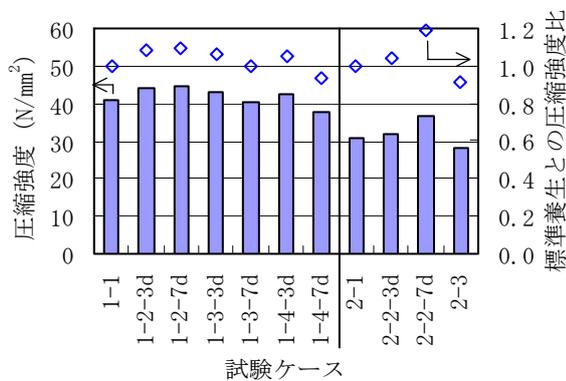


図-2 材齢 3 ヶ月における圧縮強度測定結果

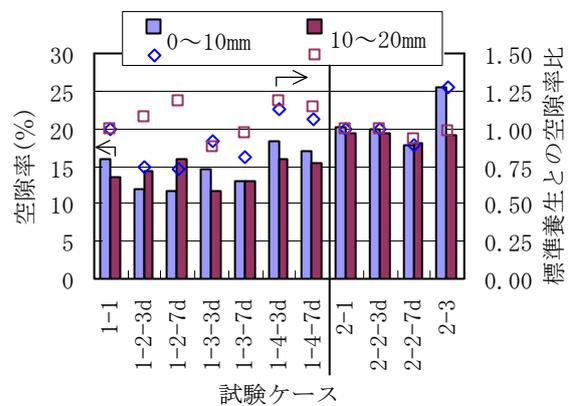
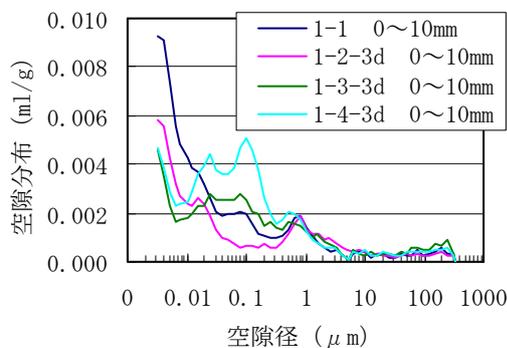
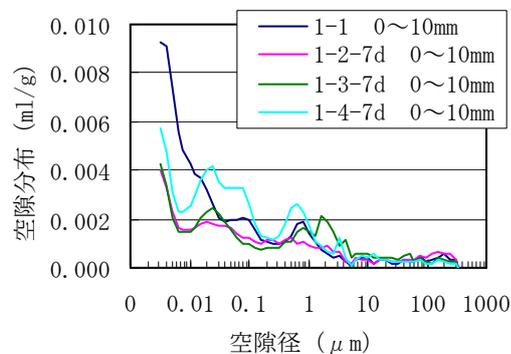


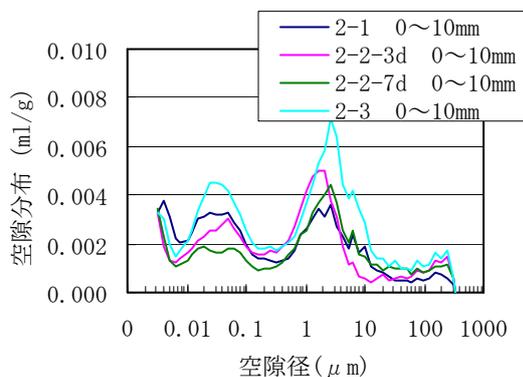
図-3 空隙率および標準養生との比



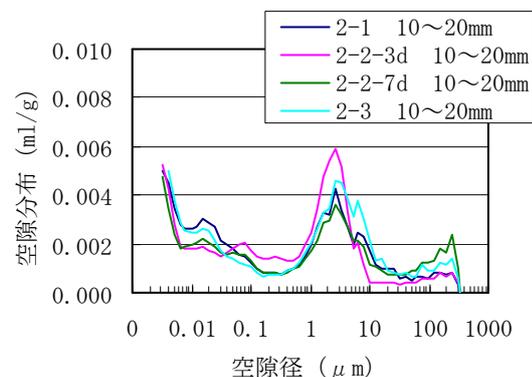
a. シリーズ 1 (養生期間 3 日)



b. シリーズ 1 (養生期間 7 日)



c. シリーズ 2 (深さ 0~10mm)



d. シリーズ 2 (深さ 10~20mm)

図-4 養生方法の違いによる空隙構造の変化

の材齢3ヶ月における圧縮強度を示す。棒グラフは測定値、菱形の点は同時に製作した標準養生試験体 1-1 または 2-1 に対する比である。排水・水中養生したケース 1-2, 1-3 および 2-2 において若干の強度増加が確認できるが、最大でも 1.2 倍程度と割合は小さい。いずれの養生方法も表層部の品質を向上させるものであり、コンクリート内部の品質も反映される圧縮強度までが大きく変化することはなかった。なお、夏に打設した 1-1~1-4 と冬に打設した 2-1~2-3 は同じ配合のコンクリートであるが、強度に約  $10\text{N/mm}^2$  の差があった。この原因は明らかではないが、本研究では標準養生試験体との比較で検討を進めるため特に問題は生じない。

### 3.2 空隙構造測定結果

図-3 に水銀圧入法で測定した空隙率および標準養生に対する空隙率の比を示す。図-4 に各ケースの空隙分布を示す。空隙率をみると一見養生による差が小さいようであったが、分布は大きく異なっていた。図-4a. はシリーズ1で養生期間を3日とした場合の、表面からの深さ 0~10mm の測定結果を示したものである。排水・水中養生したケース 1-2, 1-3 において、標準養生したものの（ケース 1-1）よりも空隙が小径側にシフトして、緻密な空隙構造となっていることが確認された。型枠を存置したケース 1-4 では  $0.1\mu\text{m}$  付近に多くの空隙が残存した。材齢7日まで養生を行った図-4b. も3日の場合と同様の傾向を示した。型枠存置したケース 1-4 は3日から7日にかけて  $0.1\mu\text{m}$  付近にあった空隙が小径側にシフトしていた。図-4c. にシリーズ2の測定結果を示す。いずれのケースも  $0.05\mu\text{m}$  と  $3\mu\text{m}$  の付近に多くの空隙が確認された。標準養生したケース 2-1 と比較して、排水・水中養生したケース 2-2 は  $0.05\mu\text{m}$  付近の空隙量が減少し、マット散水養生したケース 2-3 では  $0.05\mu\text{m}$  と  $3\mu\text{m}$  付近の空隙ともに増加した。図-4d. にはシリーズ2における表面からの深さ 10~20mm の測定結果を示す。ケース 2-2 はこの深さでも標準養生と比較して空隙量が若干減少しているが、表面 10mm までの測定結果と比較して養生方法による差が小さくなった。寸法や水セメン

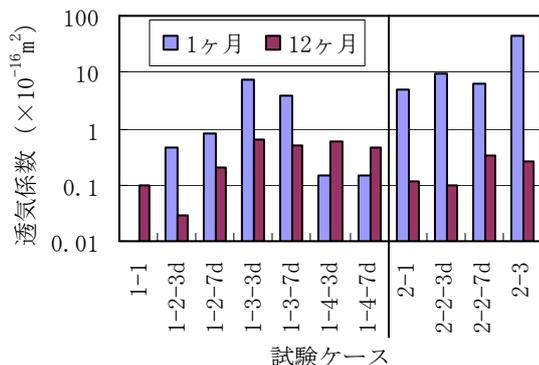


図-5 透気係数測定結果

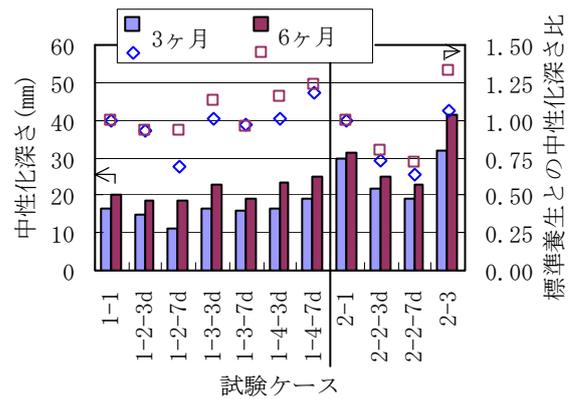


図-6 中性化深さおよび標準養生に対する比

ト比などによっても異なると考えられるが、本実験の場合、養生の効果は特に表面から 1~2cm 程度の比較的狭い範囲に現れていることがわかる。空隙分布の測定からは、排水・水中養生により空隙構造が緻密化することおよび、型枠存置やマット散水養生では標準養生相当の効果を得るのが難しいことが改めて確認された。

### 3.3 透気試験結果

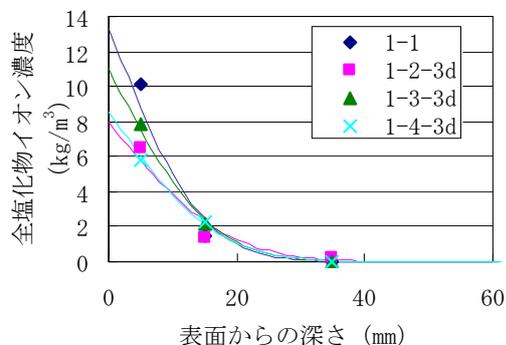
図-5 に材齢1ヶ月および12ヶ月における透気試験結果を示す。ケース 1-1 は1ヶ月では透気しなかった。水中養生が終了して間もないため含水率が高かったと考えられる。材齢1年のデータと比較すると、ほとんどの養生方法において透気係数は標準養生のものよりも大きくなった。空隙構造の結果とあわせて推察すると、ケース 1-4 (型枠存置) や 2-3 (マット散水養生) は表面が緻密化しておらず透気係数が大きくなったものと考えられる。排水・水中養生したケースについては、空隙構造は緻密であるものの、織布や表面吸水シートの表面の細かい凹凸がコンクリートに転写されている。また、透水板も完全には平滑でないため、それらで生じるコンクリート表面のわずかな凹凸が原因で空気が漏洩し、養生の効果透気係数に反映されなかったと推察される。

### 3.4 促進中性化試験結果

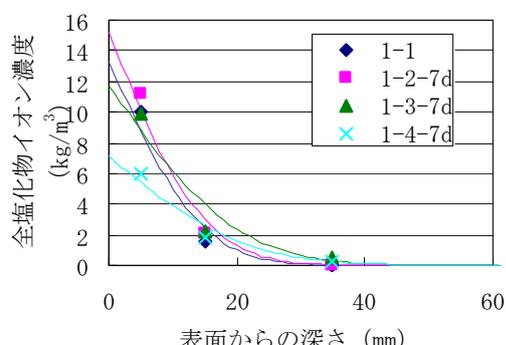
図-6 に促進中性化試験結果を示す。排水・水中養生したケース 2-2 は中性化深さが標準養生の 75%程度に抑えられており効果が認められた。養生期間7日のほうが3日より中性化深さは小さくなる傾向であったが、3日においても標準養生より中性化が抑制されていた。硬化前の排水により表層のコンクリートの水セメント比が低減されたため、水中養生期間が多少短くても標準養生以上の品質が得られたものと考えられる。7日間養生した場合は表層の低水セメント比部分の水和反応がより進行し、3日以上効果が得られた。同じく排水・水中養生したケース 1-2, 1-3 の中性化深さは標準養生のものと同程度とどまっており、透水性シートの種類により効果に差が現れた。ただし、排水・水中養生したい

表-3 表面塩化物イオン濃度および見掛けの拡散係数の計算結果

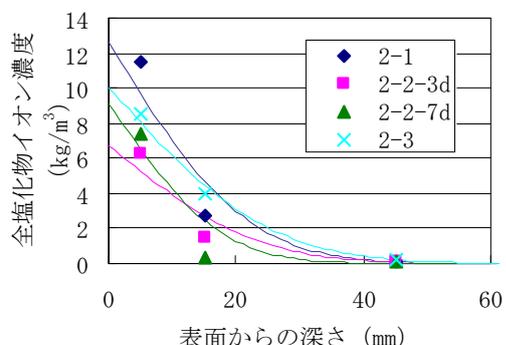
項目	ケース 1							ケース 2			
	1-1	1-2-3d	1-2-7d	1-3-3d	1-3-7d	1-4-3d	1-4-7d	2-1	2-2-3d	2-2-7d	2-3
表面塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	13.3	8.0	15.2	11.0	11.7	8.6	7.1	12.7	6.7	9.1	10.1
見掛けの拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)	1.27	2.04	1.34	1.50	2.47	1.70	2.76	2.84	3.24	1.84	3.87



a. 養生期間 3 日 (ケース 1)



b. 養生期間 7 日 (ケース 1)



c. ケース 2

図-7 塩化物イオン濃度分布測定結果

ずれのケースも養生期間 3 日で標準養生と同等以上の効果が得られたのは特筆すべきである。ケース 1-2 および 1-3 では標準養生よりも空隙構造は緻密化していたが中性化深さは同等であり、両者が異なる傾向を示したが、今回の試験ではその原因を明らかにすることができなかった。型枠存置およびマット散水養生したケース (1-4 および 2-3) の中性化深さは標準養生と比べて最大で 34%大きくなった。

### 3.5 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定結果

図-7 に 3%の塩化ナトリウム溶液に 6 ヶ月間浸せき

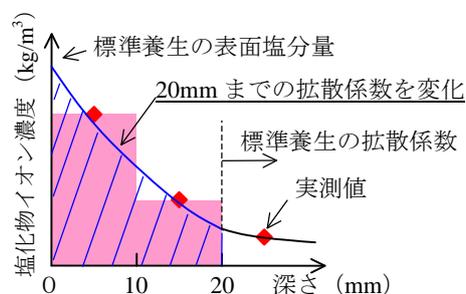


図-8 表面部の拡散係数計算方法

したときの塩化物イオン濃度の分布を示す。図中の曲線は、JSCE-G 572 2007「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験法 (案)」に従って求めたもので、表-3 に示す表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数による濃度分布曲線である。実測値をみると排水・水中養生の効果の傾向は中性化試験の結果とほぼ一致しており、中性化抑制効果の小さかったケース 1-2, 1-3 は塩化物イオンの浸透抑制効果も十分ではない (図-7a. および図-7b.). 中性化抑制効果の大きかったケース 2-2 では塩化物イオンの浸透も顕著に抑制された (図 7c.). また、型枠存置したケース 1-4 は養生期間 3, 7 日ともに深さ 10mm までの塩化物イオン濃度は低くなったが、それより内部では標準養生との差はなかった。

表-3 に示した表面塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、相互に関連をもっており表面塩化物イオン濃度が大きいものは見掛けの拡散係数が小さく、小さいものは大きくなるように連動して変化する。しかし、本研究のように全ケースを同一の環境で浸せきした場合には、境界条件である表面塩化物イオン濃度は養生方法が異なっても表-3 に示されるほどの違いはなく、表面塩化物イオン濃度が小さく (大きく) 計算されたのは表面部分の空隙構造が緻密化 (粗大化) して見掛けの拡散係数が小さく (大きく) なったためと考えることもできる。そこで、表面塩化物イオン濃度は一定値として、養生によって表面部分の見掛けの拡散係数のみが増減とした場合の拡散係数を数値計算することで、養生効果の評価を試みた。計算方法の概要を図-8 に示す。数値計算においては以下の 3 つの仮定をもとに、深さ 20mm までに浸透した塩化物イオン量の計算値 (図中斜線部の面積) が実測値 (図中塗りつぶしの面積) と一致するように、この部分の見掛けの拡散係数を変化させた。

・同一の環境に浸せきしたため各ケースの表面塩化物イ

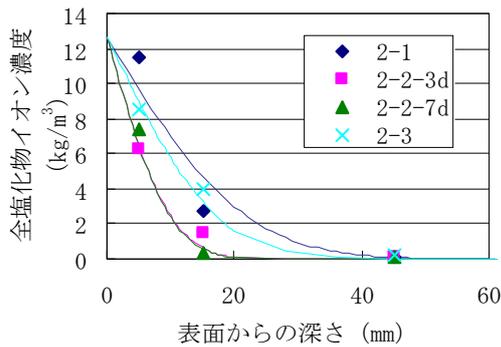


図-9 表面部の拡散係数を変化させた回帰曲線 (シリーズ2)

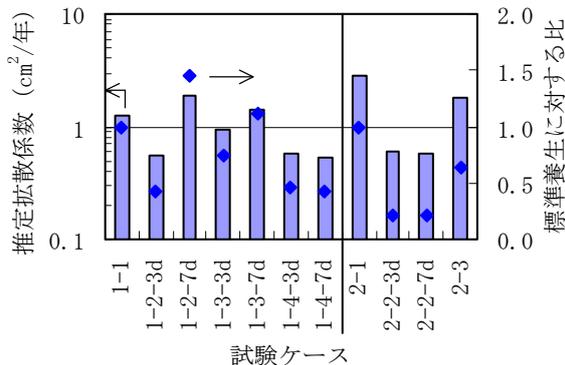


図-10 表面部の拡散係数推定値

オン濃度は標準養生の場合と同一とする。

- ・空隙構造の測定結果から示唆されたように、表面から深さ 20mm までのコンクリートの見掛けの拡散係数は養生方法により増減するが、これより内部のコンクリートは標準養生と同じ値であるとする。

- ・標準養生した試験体の見掛けの拡散係数は表面から内部まで一定であるとする。

計算結果の一例として、シリーズ2における濃度分布曲線を図-9に、各ケースの深さ 20mm までの見掛けの拡散係数の推定値を図-10に示す。図中の棒グラフが計算された見掛けの拡散係数、菱形の点が標準養生に対する比である。若干仮定が極端なところはあったがこの手法によって表面の拡散係数の差が顕著に現れた。排水・水中養生のケース 1-2, 1-3 における表面 20mm の見掛けの拡散係数は標準養生に対して 0.5 倍～1.5 倍程度となり特に塩化物イオンの浸透抑制効果は顕著でなかったが、ケース 2-2 では約 1/5 まで小さくなっている結果が導かれた。

### 3.6 排水・水中養生の養生効果

上述の通り、排水・水中養生は、空隙構造の緻密化、中性化の抑制、塩化物イオンの浸透抑制に関して標準養生と同等以上の効果があることが確認された。初期の余剰水を排出して表面部のコンクリートの水セメント比を低下させたうえで、湛水してその部位の水和反応を十

分進行させることにより、両者の複合効果が現れたと考えられる。また、28 日間の標準養生に対して 3 日もしくは 7 日間の養生期間で優れた効果を得ることができた。本研究は 30cm 立法の試験体での結果であるが、実構造物や大型の試験体においては自重などの影響により排水量が多くなり、養生効果がさらに増大する可能性がある。今回の空隙構造測定の結果では、養生により顕著に緻密化される範囲は表面の 10～20mm 程度の比較的小さい範囲であると考えられた。しかし、この表面の緻密化が耐久性向上に大きく寄与していることが示される結果となった。ただし、1-2, 1-3 のように空隙が小径化したものが必ずしも中性化や塩化物イオン浸透の抑制効果が大きいわけではない場合もあり、その原因解明は今後の課題としたい。

## 4. まとめ

本研究では養生によりコンクリート表層の耐久性を向上させる方法として、型枠内部に透水板を配置してコンクリートを打設することにより、同一の型枠で硬化前の排水と水中養生を連続して行う排水・水中養生を考案し、各種の耐久性試験によりその効果を確認した。得られた結果を以下に示す。

- ・排水養生と水中養生を複合させた本手法により、標準養生と同等以上の空隙構造の緻密化、中性化抑制、塩化物イオンの浸透抑制効果が確認された。また、排水・水中養生は透水性シートの材質や厚さにより効果に差が現れ、0.5mm 程度以上の適度な厚みのある織布が優れた効果を示した。

- ・養生により品質が改善される深さは 1～2cm 程度と比較的小さかったが、耐久性に大きな影響を及ぼしていることが示唆された。

## 参考文献

- 1) 田中健治郎：透水型枠，建築技術，pp.124-125，1990.7
- 2) 立松和彦ほか：透水型枠によるコンクリートの細孔構造の変化と耐久性の向上，コンクリート工学論文集，Vol.8，No.1，pp.171-178，1997
- 3) 野乃目洋ほか：吸水性ポリマ及び水膨潤ウレタンを用いたコンクリート養生マットの養生効果に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.56，pp.325-332，2002
- 4) 大友 健ほか：高吸水ポリマーシートを用いたコンクリート型枠面の物性改良工法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.311-314，1987
- 5) 大成建設 HP：http://www.taisei.co.jp/MungoBlobs/114/205/K00X45.pdf
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】，2007