

コンクリート細孔構造中における液状水移動と水蒸気移動の分離評価

コンクリート研究室 香川雄治
指導教官 下村 匠

1. はじめに

コンクリート構造物の品質制御の上で、内部の水分状態を予測することは極めて重要な課題である。細孔構造中の液状水は凍結融解、自己収縮の原因となり、また、中性化、塩害など構造物の耐久性を劣化させる数々の現象の進行に直接的な関与をしている。

硬化後のコンクリートが経験する外部との水分移動形態には吸水、乾燥、吸湿がある。吸水とは、液状水としての外部との水分移動過程であり、吸水現象中のコンクリートは部分飽和状態である。乾燥、吸湿ではコンクリート内部は不飽和となり、外部とは水蒸気の形態で水分をやり取りするが、コンクリート中では液状水移動と水蒸気移動が共に生じていると考えられている。しかし、液状水の移動を実験により検証した例はない。そこで本研究では液状水中で電解し、蒸発時にはその位置に留まる塩化物イオンの特性に着目し、トレーサーとして用いることで不飽和コンクリート中の液状水移動を実験的に確認する。

2. 実験概要

水和反応の影響がない試料で液状水の移動を確認するため、セメントと粒子径の近い炭酸カルシウムを用いてモルタル供試体を作製し、塩化物イオンをトレーサーとした水分移動実験を行った。また、コンクリート細孔構造中において、液状水移動が実際に生じるか実験的検証を行うため、セメントモルタル供試体を用いて水分移動実験を行った。

表 - 1 炭酸カルシウムモルタル供試体の実験条件

実験タイプ	乾燥温度	乾燥条件	乾燥時間	含水比	配合量 (kg)			
	()			(%)	W	タンカル	S	NaCl
A-1	20	全面シール	14日	15	295	1000	967	6.06
A-2		一面乾燥						
B-1		全面シール		12.5	246			
B-2		一面乾燥						
C-1		全面シール		10	197			
C-2		一面乾燥						

表 - 2 セメントモルタル供試体の実験条件

実験タイプ	養生方法	養生時間	乾燥温度	乾燥条件	乾燥時間	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
							W	C	S	NaCl
D-1	水中養生	7日	20	全面シール	14日	32	320	1000	967	6.06
D-2				一面乾燥						
D-3				全面乾燥						
E-1	塩水中養生	7日	60	全面シール	14日	32	320	1000	967	6.06
E-2				一面乾燥						
E-3				全面乾燥						
F-1	塩水中養生	7日	60	全面シール	14日	60	417	694	967	6.06
F-2				一面乾燥						
F-3				全面乾燥						

表 - 1 に炭酸カルシウムモルタル供試体の実験条件を示す。初期水分量が液状水の移動に与える影響を調べるため、含水比換算で 15% の A タイプ、12.5% の B タイプ、10% の C タイプと 3 種類の供試体を作製した。表 - 2 にセメントモルタル供試体の実験条件を示す。

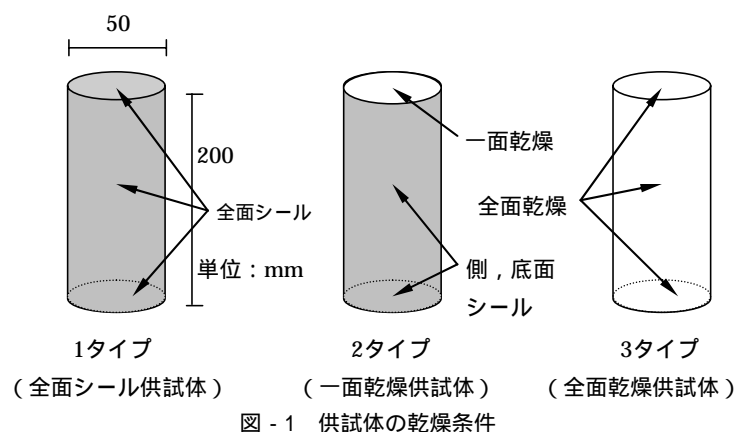


図 - 1 供試体の乾燥条件

毛細管空隙の連結の有無による液状水の挙動差異を検討するため、 $W/C=32\%$ の D, E タイプ、 $W/C=32\%$ の F タイプと 2 種類の含水比で実験を行った。図 - 1 に使用した供試体の寸法および乾燥条件を示す。直径 50mm、高さ 200mm の円柱供試体を作製し、それぞれ、全面シール、一面乾燥、全面乾燥、と 3 種の乾燥条件で、各条件につき 3 体ずつ、計 27 体の供試体を作製した。モルタル打設時には 2 層 3 回で突き固めた。シール面には食品包装用ラップフィルムでシールを施した。乾燥後の供試体より、上面から 0mm、10mm、20mm、40mm、80mm、200mm の位置で、供試体を 4mm 径のドリル等により削り出し、粉上になったものを塩化物イオン濃度測定用試料として用いた。

3. 実験結果および考察

図 - 2 に A タイプ (含水比 15%) 供試体の塩化物イオン濃度分布を示す。全面シールを施したものでは上面からの距離に関係なく、ほぼ塩化物イオンが一樣に分布していることに対し、一面乾燥では表面から 20mm 程度の上面近傍で塩化物イオン濃度が高くなっている。これは相当量の液状水の蒸発が上面またはその近傍で生じたことを示している。また、上面近傍以外では乾燥条件に関わらず、共に塩化物イオン濃度分布は一樣であるが、全面シールに比べ一面乾燥ではその濃度が低くなっている。このことから、供試体中に液状水は等分布に拡散しているという条件の下で、一面乾燥条件で大気中に蒸発した上面近傍の相当量の液状水が大気中に蒸発し、これが駆動力となって、それより下部の液状水が上面近傍へ移動したことが示されている。

図 - 3 に B タイプ (含水比 12.5%) 供試体の塩化物イオン濃度分布を示す。A タイプと同様、全面シールでは塩化物イオン濃度が一樣であるのに対し、一面乾燥では上面近傍の塩化

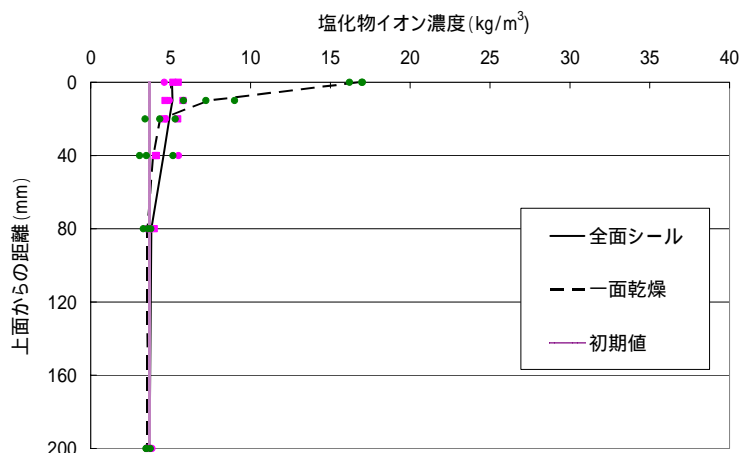


図 - 2 A タイプ供試体の塩化物イオン濃度分布

物イオン濃度が高く、これらの位置までの液状水移動が生じたことを確認できる。Aタイプに比べて上面近傍への塩化物イオン濃度が高いことから液状水の移動が顕著であるように思われるが、これは初期含水比がAタイプと比べて低く、液状水単位容積あたりに含まれる塩化物イオンが多いため、水分の移動量が同じであっても、塩化物イオン濃度は大きくなること、また、乾燥期間が14日間と短かったために、水分の移動量自体が少なかったことに起因している。

図-4にCタイプ(含水比10%)供試体の塩化物イオン濃度分布を示す。当初、含水比が低いと液状水移動は起こりにくくなることを想定していたが、A、Bタイプと同様、塩化物イオンの移動があり、低含水比での液状水移動の発生を確認できた。

図-5にDタイプ(W/C=32% 乾燥温度60)供試体の塩化物イオン濃度分布を示す。一面乾燥供試体の塩化物イオン濃度分布で他のタイプと比べて上面近傍でわずかに塩化物イオン濃度が高く、液状水の移動を推察できる。

図-6にEタイプ(W/C=32%、乾燥気温60)供試体の経過時間と水分量の関係を示す。E-1タイプ(全面シール)では水分が移動できないので、時間経過による含水比の

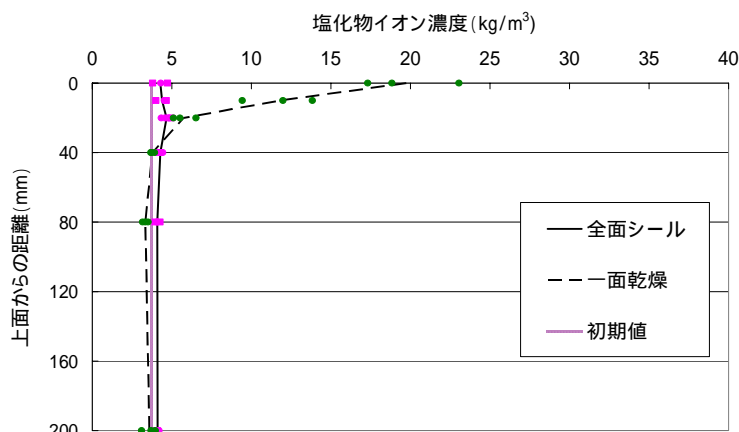


図-3 Bタイプ供試体の塩化物イオン濃度分布

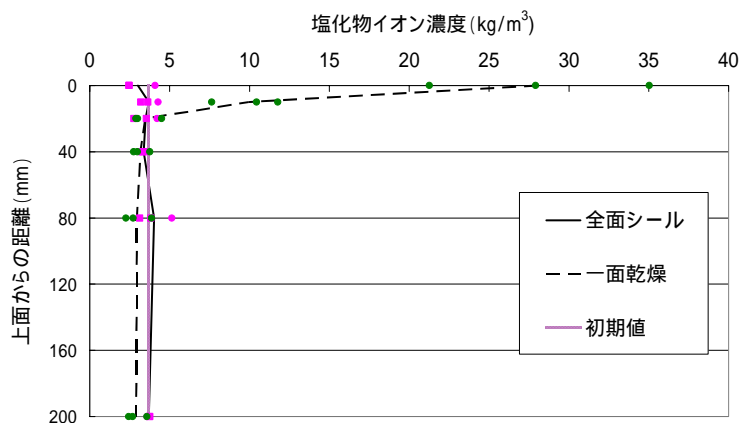


図-4 Cタイプ供試体の塩化物イオン濃度分布

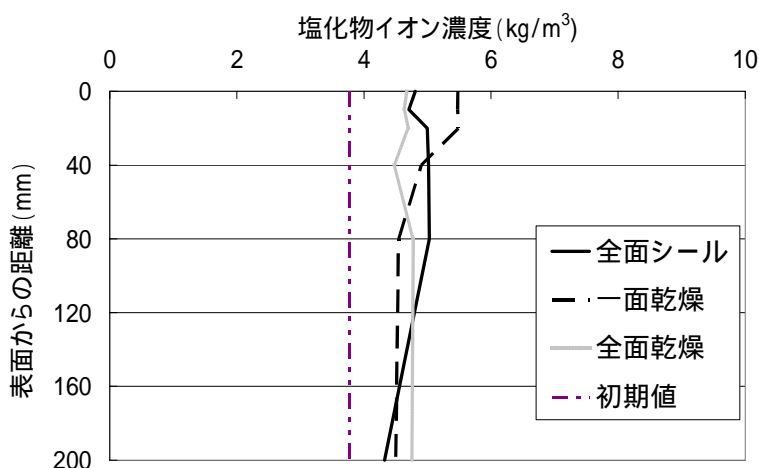


図-5 Dタイプ供試体の塩化物イオン濃度分布

変化は見られず，供試体内の水分状態は乾燥初期の状態を維持していると考えられる．E - 2（一面乾燥），E - 3 タイプ（全面乾燥）では大気中への水分の拡散が見られる．

図 - 7 に E - 1 タイプ（全面シール）供試体の水分量，および塩化物イオン濃度分布を示す．水分の移動がほとんど生じないため，塩化物イオン濃度および水分量は供試体中で等分布になっており，水分量は初期理論値に近い値となっている．理論値より水分量が減少しているが，これはセメントの水和反応が進んだためであると思われる．

図 - 8 に E - 2 タイプ（一面乾燥）供試体の水分量，および塩化物イオン濃度分布を示す．0mm から 20mm の上面近傍で塩化物イオン濃度が上昇し，水分は減少している．上面近傍以外では，塩化物イオン濃度，水分量，ともに一様分布である．塩化物イオン濃度上昇位置まで移動した水分の中には，乾燥初期，上面近傍以外の位置の水分が含まれており，これが液状水の形態で上面に拡散する場合のみ，このような上面近傍での塩化物イオン濃度の上昇が起こりうる．ゆえに不飽和コンクリート

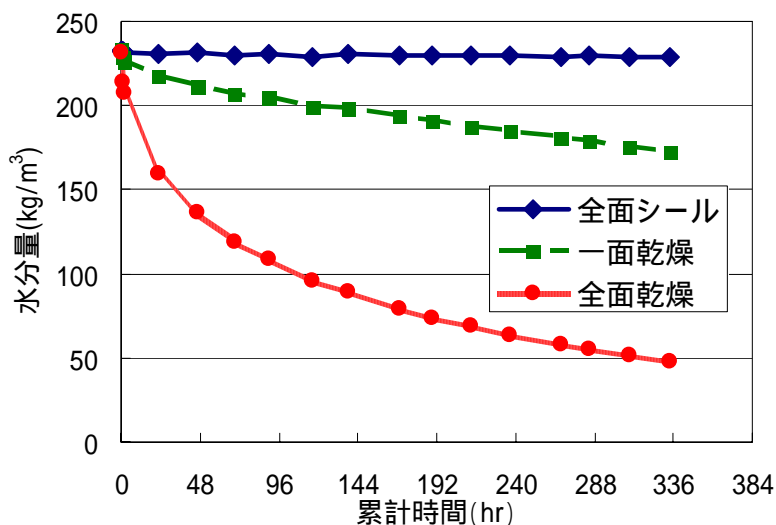


図 - 6 E タイプ供試体の水分経時変化

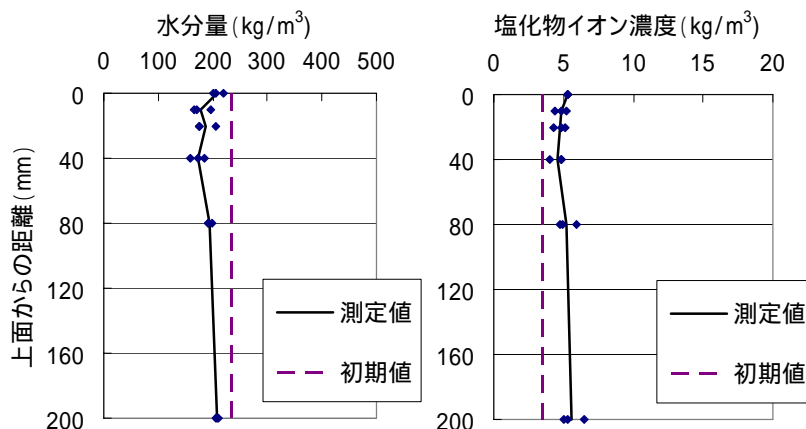


図 - 7 E - 1 タイプ供試体の水分量および塩化物イオン濃度分布

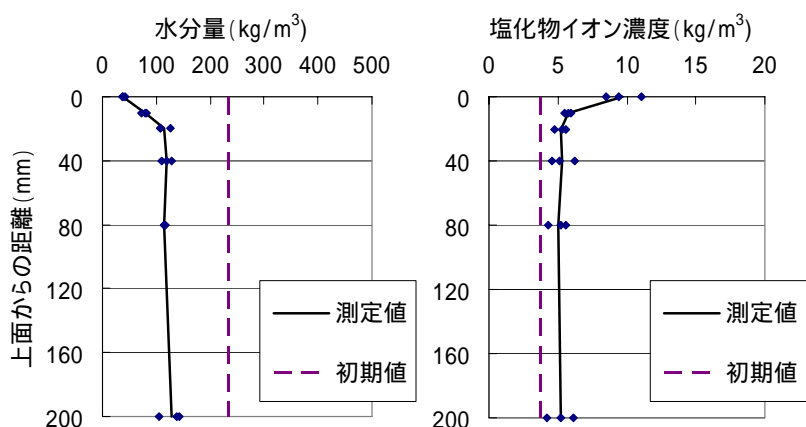


図 - 8 E - 2 タイプ供試体の水分量および塩化物イオン濃度分布

細孔構造中で、液状水の移動は生じていると結論できる。また、水分量が少ない上面近傍で塩化物イオン濃度が増加していることから、液状水移動は高い水分量るとき卓越し、水蒸気移動は低い水分量るとき卓越することが示唆される。

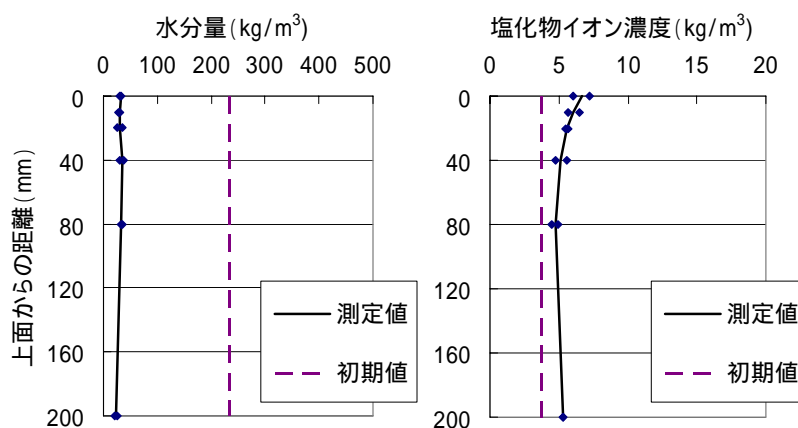


図 - 9 E - 3 タイプ供試体の水分量および塩化物イオン濃度分布

図 - 9 に E - 3 タイプ (全面乾燥) 供試体の水分量、および塩化物イオン濃度分布を示す。全面乾燥条件のため、水分の移動が顕著である。塩化物イオン濃度は上面から 0mm から 20mm の位置で高くなっているが、同じ乾燥条件である上面から 200mm の位置では塩化物イオン濃度の上昇は見られなかった。この原因として、ブリーディングによる材料分離の影響が考えられる。

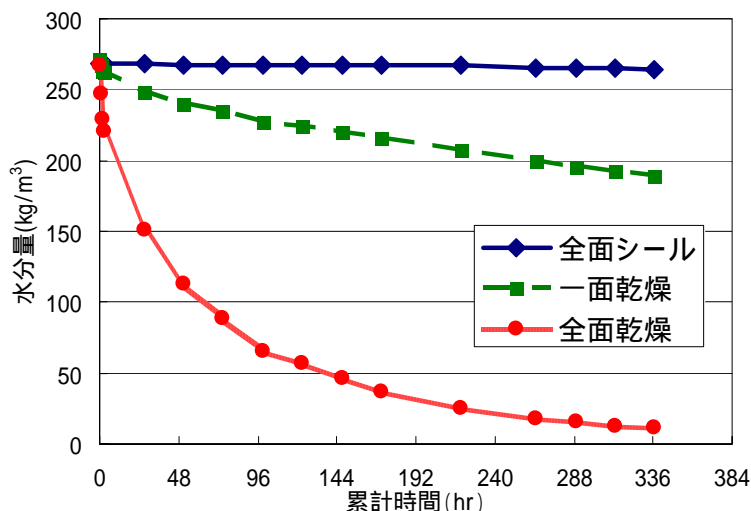


図 - 10 F タイプ供試体の水分経時変化

図 - 10 に F タイプ (W/C=60%、乾燥温度 60) 供試体の水分経時変化を示す。F - 1 タイプ(全面シール)では水分の移動がないので、供試体内の水分状態は乾燥初期の状態を維持していると考えられ、F - 2 (一面乾燥)、F - 3 タイプ (全面乾燥) では大気中への水分の拡散が見られる。

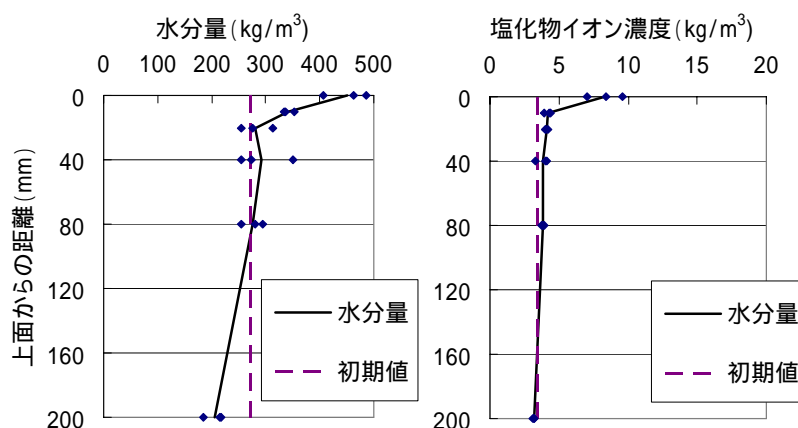


図 - 11 F - 1 タイプ供試体の水分量および塩化物イオン濃度分布

図 - 11 に F - 1 タイプ (全面シール) 供試体の水分量、および塩化物イオン濃度分布を示す。全面シール条件で水分の移動は生じていないが、塩化物イオン濃度、水分量、共に

上面近傍で高くなっている．これはモルタルの打設時および養生初期にブリーディングが起き、水分が上面に向けて移動し空隙量が多くなったためである．

図 - 12 に F - 2 タイプ（一面乾燥）供試体の水分量、および塩化物イオン濃度分布を示す．初期状態（F - 1）と比較し、

塩化物イオン濃度は上面近傍で高くなり、水分量は40mmより上部での減少が著しい．塩化物イオン濃度の増加が上面近傍で生じていることから、同位置までの液状水の移動を確認できる．E - 2 タイプにおいて水分量の減少は20mm以上の上面近傍で著しく、その他の下部では一様分布であることに

対し、F - 2 タイプでは水分量が80mmでピークとなり、それより上部および下部では水分量は減少している．これはFタイプ（W/C=60%）の細孔構造中の毛細管空隙の連結および、空隙量の分布状況が原因であると考えられる．

図 - 13 に F - 3 タイプ（全面乾燥）供試体の水分量、および塩化物イオン濃度分布を示す．初期状態（F - 1）と比べ、上面近傍で塩化物イオン濃度の増加が見られる．上層では空隙が多く水分の拡散係数が大きいいため、供試体全面で蒸発は生じるが、上面近傍の拡散速度が相対的に速く、その水分量の差によって下部からの液状水移動が生じたものと考えられる．上面から40mmから200mmの位置では液状水の移動は上下方向に生じず、各高さ位置で蒸発している．

4. 結論

一面乾燥条件のセメントモルタル供試体において、不飽和状態でのコンクリート細孔構造中の液状水の移動を実験的に確認できた．また、コンクリート細孔構造中では、空隙中の水分量が多いときには液状水移動が卓越し、低いときには水蒸気移動が卓越するという結論に達した．

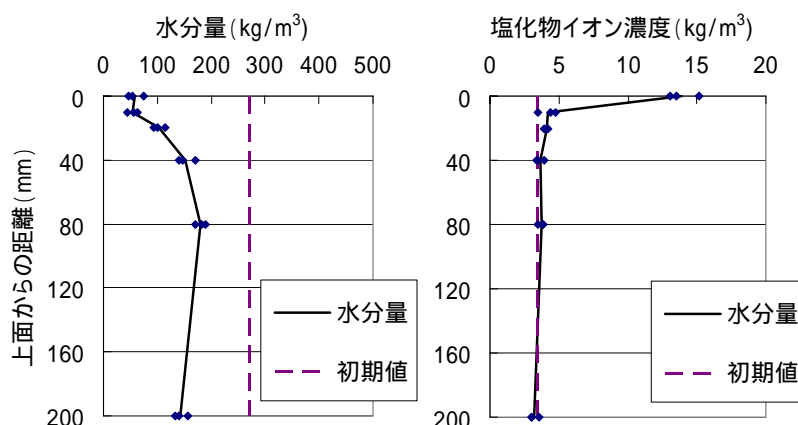


図 - 12 F - 2 タイプ供試体の水分量および塩化物イオン濃度分布

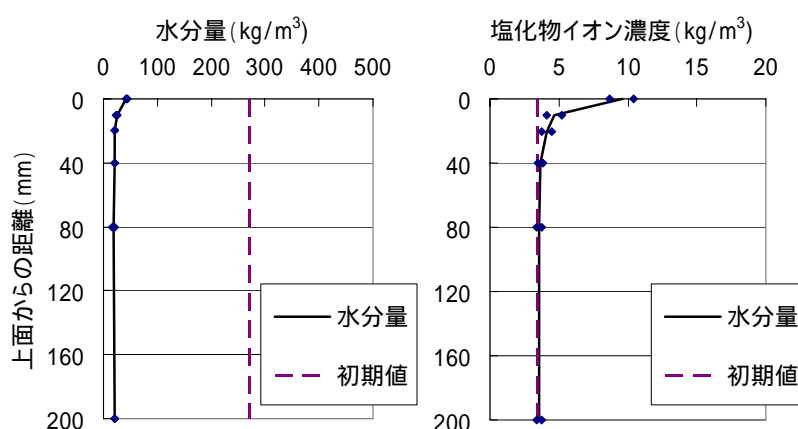


図 - 13 F - 3 タイプ供試体の水分量および塩化物イオン濃度分布