

論文 真空脱水処理工法におけるコンクリート中の水分移動に関する実験的研究

平川 博也^{*1}・鈴木 康介^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：真空脱水処理工法に伴うコンクリート内部の水分移動性状は，コンクリート表面の真空状態に依存する。著者らは既往の研究¹⁾において，本工法を施した際のコンクリート表面からの脱水量が局所的に異なることを明らかにし，その要因がコンクリート表面における真空状態の不均一性にあることを指摘した。そこで本研究では，それら局所的に異なる真空の状態が水分移動性状に及ぼす影響の評価を目的として，間隙水圧を測定することにより真空脱水処理の影響領域および影響度について実験的に検討を行った。

キーワード：真空脱水処理工法，間隙水圧，動水勾配

1. はじめに

真空脱水処理工法は，打設後に生じるブリーディング現象によって引き起こされるコンクリート表層部の力学的特性および耐久性の低下を改善するために開発された施工方法である。本工法は，コンクリート打設後にコンクリート表面を真空状態にし，内部に存在する余剰水を強制的に排出させるとともにコンクリートの密実さを増大させる締固め工法である。真空脱水処理を施したコンクリートの品質改善効果として，表層強度の向上，早期強度の発現，凍結融解作用に対する抵抗性の増大，美装性の向上など数多くの効果が報告されている²⁾。

一般に，実施工で用いる真空マットには，脱水口はその領域のほぼ中央に一ヶ所のみ設置されている。したがって，既往の研究における脱水量および強度分布は，マット下面で一様なものとして評価されてきた。勿論，深さ方向には強度は異なるものと評価されている。このような考えは，マット下面に存在する物質が液体のような非圧縮等方材料に対しては成立する。しかしながら，コンクリートは，液体と固体の複合材料であり，セメントと水の水和反応によりある程度の強度を有した難透水性材料であるた

め，上述の考えは適用が困難である。すなわち，真空マットに設置された脱水口からの距離に応じて，表面の真空度，脱水量，コンクリート中の透水性状や強度特性を議論しなければならないわけである。

このような観点から，著者ら¹⁾は真空脱水処理工法適用時におけるコンクリート表面の局所的に異なる領域からの脱水量を測定し，脱水時の真空状態および脱水量はコンクリート表面において均一ではなく脱水口からの距離に応じて低下することを指摘した。すなわち，このような現象は，実施工で使用されるような大規模コンクリートではより顕著に差異が生じるものと想定され，それに伴う力学的特性や変形性状は無視し得ないものと考えられる。しかしながら，局所的脱水量分布実験ではコンクリート表面における脱水量分布の評価に留まり，深さ方向への真空の影響領域ならびに脱水量とコンクリート内部の水分移動性状を関連付けた脱水メカニズムの明確化には至っていない。

そこで本研究では，コンクリート表面において局所的に異なる真空状態がコンクリート内部の水分移動性状へ与える影響評価を目的とし，真空マット下面のコンクリート内部における間

*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科

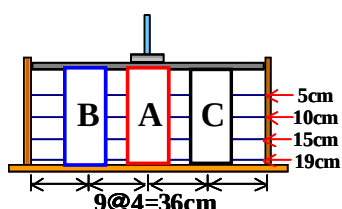
*3 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

表 - 1 コンクリート配合表

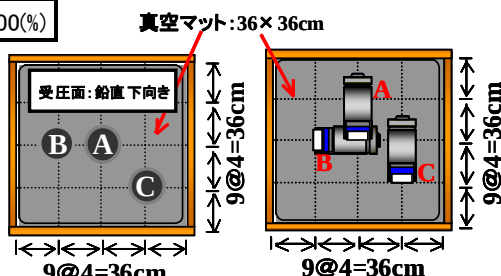
W/C (%)	最大骨材寸法 (mm)	細骨材率 (%)	設計スラブ (cm)
55	20	50	15
単位重量 (kg/m ³)			AE剤
水	セメント	細骨材	粗骨材 (C×%)
180	333	852	874 0.1

表 - 2 実験条件

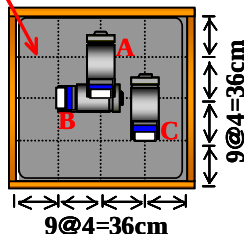
継続時間	脱水開始時期	真空度
10(min)	打設後:120(min)	100(%)



(a) 断面図



(b) 平面図(鉛直方向)



(c) 平面図(水平方向)

図 - 2 間隙水圧測定の実験概要図

表 - 3 実験パラメータ

測定深度(cm)	設置位置	設置方向
5	A, B, C	鉛直方向 水平方向
10		
15		
19		

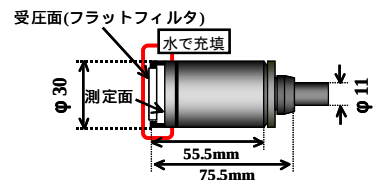


図 - 1 間隙水圧計の概要図

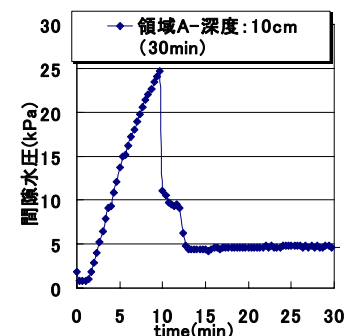


図 - 3 脱水保持時間 30 分

における間隙水圧履歴

隙水圧を測定することにより、深度および真空マット方向への真空の影響領域、影響度について実験的検討を行った。

2. 真空脱水処理を施すコンクリートの概要

2.1 供試体概要

本実験で使用した供試体形状寸法は、36×36×20(cm)のスラブである。本研究においては、真空脱水処理工法適用時の間隙水圧測定を目的としていることから、供試体は実験毎に同一配合で打設を行った。コンクリートの配合は、表 - 1 に示す通りである。なお、使用材料は、普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm³）、骨材は市原市万田野産細骨材(密度：2.59g/cm³) および荒川水系粗骨材(密度：2.63g/cm³，最大寸法：20mm)である。

2.2 実験概要

(1) 間隙水圧計の概要

本実験で使用した間隙水圧計は図 - 1 に示すような 2 重構造であり、間隙水圧のみを測定可能な構造となっている。また、測定面は水圧以外の影響を防ぐために 2 μm の細孔径を有するフラットフィルタが先端に取り付けられている。測定時には、フラットフィルタ内を完全に水で満たし、受圧面および測定面間の空間も水で充填させた。

(2) 実験条件

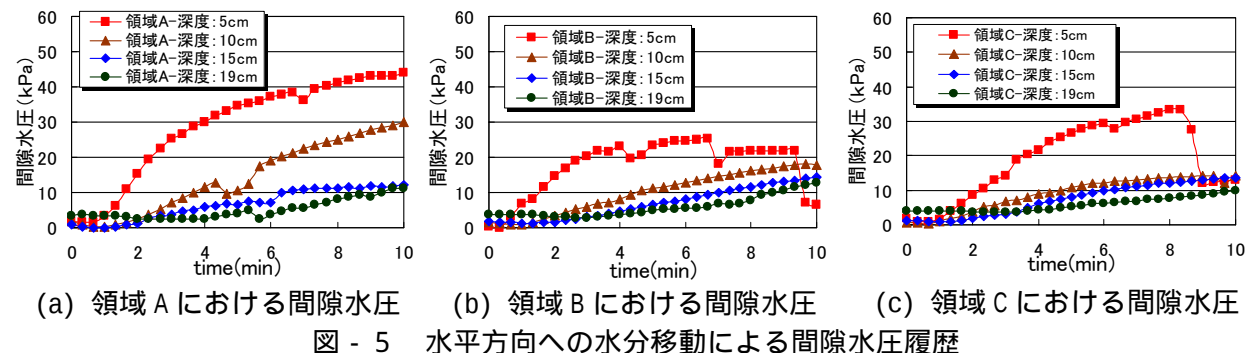
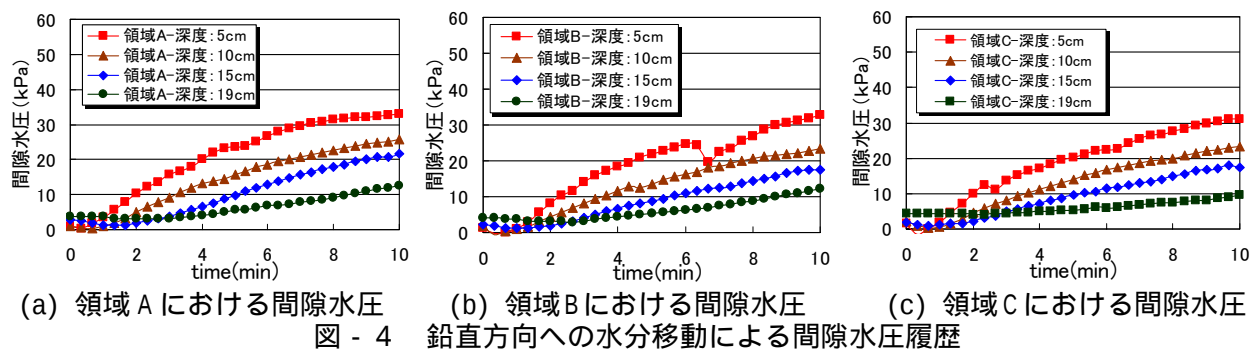
表 - 2 に実験条件を示す。真空脱水処理開始時期は、既往の研究において提案されているブリーディング終了後であり、本研究では事前に JIS A 1123 「ブリーディング試験方法」に準じたブリーディング試験により、2 時間と設定した。また、脱水保持時間は 10 分間とし、真空度[=吸引圧(MPa)/大気圧(MPa)×100(%)]は、100(%)で行った。

(3) 間隙水圧の測定位置

表 - 3 に実験パラメータを示す。実験パラメータは、間隙水圧計の設置位置および設置方向である。間隙水圧の測定は、図 - 2 (a) に示すように真空脱水処理表面から深さ方向に 5, 10, 15, 19cm の 4 断面で実施した。また、平面内における測定位置は、同図(b), (c) に示すように、コンクリート中心部、型枠近傍部および型枠隅角部とし、それぞれ領域 A, B および C と定義する。なお、間隙水圧計の受圧面の設置方向は、同図に示すような鉛直方向および水平方向とした。これは、鉛直方向ではコンクリート表面への水分移動、水平方向では脱水口への水分移動を評価することにより、コンクリート中の水分移動性状を 3 次的に評価するためである。

3. 真空脱水処理工法に伴うコンクリート内部の間隙水圧性状

本章では、コンクリート内部の水分移動に及



ばすコンクリート表面における局所的に異なる真空状態の影響について、間隙水圧変化に着目して議論することとする。なお、本稿における実験結果については、負圧を正としている。

3.1 間隙水圧の履歴性状

図 - 3 に、真空脱水処理を 30 分間施した際の領域 A における深度 10cm での間隙水圧履歴を示す。なお、同図は間隙水圧計の受圧面を鉛直方向に設置した際の結果である。

同図から、真空脱水処理開始後 10 分経過時点において急激に間隙水圧が低下していることがわかる。これは、コンクリート内部での脱水可能な余剰水量が少なくなり、過剰脱水によって空気みちが形成されたためと考えられる。すなわち、深度 10cm に関しては、ブリーディング終了後に真空脱水処理を施す場合には、脱水保持時間は 10 分程度が適切であり、それ以上の脱水は過剰脱水を引き起こす恐れがあるものと判断される。したがって、以下では脱水保持時間 10 分までの範囲に対して議論を行うこととする。

3.2 各領域における鉛直方向および水平方向への水分移動による間隙水圧履歴

図 - 4 および図 - 5 に、真空脱水処理時における領域毎の鉛直方向および水平方向の間隙水圧の履歴を示す。なお、図中の ■, ▲, および ● はそれぞれ各領域における測定深度 5, 10,

15, 19cm での間隙水圧であり、ここで示す間隙水圧は水分の流れによって発生する圧力である。

まず、図 - 4 に示す鉛直方向に間隙水圧計を設置した際の間隙水圧性状は、いずれの実験結果においても、真空処理開始直後に位置ヘッドからの僅かな低下を生じた後に時間の経過とともに増加している。また、その増加傾向は深度 5cm および 10cm においては、間隙水圧が真空処理開始直後に低下した後、急激な増加を示しており、真空処理開始 5 分間で最終到達圧の 70% に達する結果となっている。これに対して、深度 15cm および 19cm の間隙水圧履歴は、位置ヘッドからの低下現象が真空処理開始後約 5 分間という比較的長時間に渡って生じ、その後に緩やかな増加を示している。このことは、上層部ほど真空の影響を大きく受けるため短時間の内に上昇傾向へ移行することに対して、下層部では真空の影響が小さく、真空による水分拡散による時間的な遅れが生じることによるものと考えられる。また、真空処理終了時における間隙水圧の値は、深度が深くなるにつれて小さく、深度毎の差はほぼ一定である。このような現象の詳細については次節で記述する。

次に、図 - 5 に示す水平方向に間隙水圧計を設置した際の間隙水圧履歴についてであるが、深度 5cm において、領域毎で間隙水圧には差異

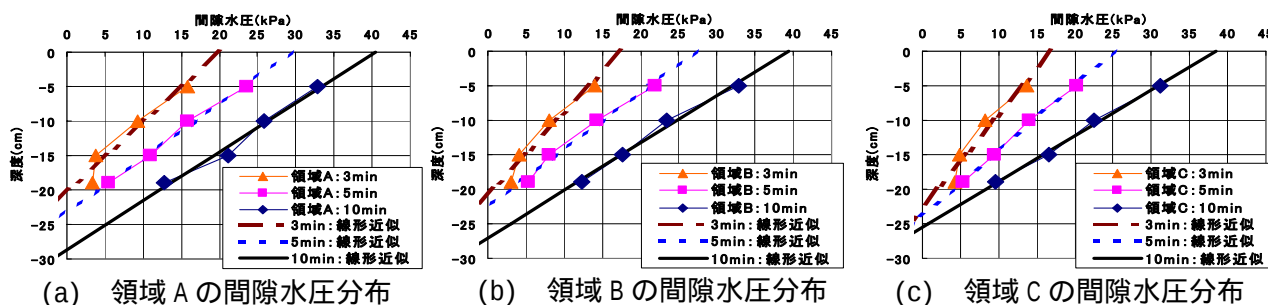


図 - 6 各領域における間隙水圧分布の経時変化

を生じていることがわかる。すなわち、脱水口付近である領域 A では間隙水圧が真空脱水処理直後では急激に上昇した後に緩やかに上昇する傾向を示していることに対して、型枠近傍部である領域 B および領域 C では真空脱水処理開始約 8～9 分の時点で急激な低下を生じている。このような領域 B および C における間隙水圧性状は、前節で述べたように、型枠近傍部において空気みちが発生したためと考えられる。

鉛直方向と水平方向の間隙水圧性状の比較であるが、コンクリート表層部、特に脱水口近傍である領域 A ほど、間隙水圧は水平方向成分が鉛直方向成分を上回る結果となっている。このような現象の詳細は、3.4 節の動水勾配変化で論ずることとする。

3.3 真空の影響領域に関する検討

本節では、真空脱水処理時における真空影響の到達深度について論ずる。なお、真空脱水処理時の脱水性状は、上表面への水分移動が支配的であると考えられるため鉛直方向への水分移動による間隙水圧の変化に着目する。図 - 6 (a)～(c)は、測定時間 3, 5, 10 分における領域毎の間隙水圧分布およびそれらに対応する線形近似曲線である。なお、縦軸は深度を表している。

同図から、いずれの領域における深度においても、測定時間の経過に伴い間隙水圧の上昇が生じており、その上昇量は測定深度が浅いほど、また、脱水口からの距離が近い領域 A ほど、大きい結果となっていることがわかる。これは、真空影響が各測定深度へ到達するまでには時間的な遅れが発生していること、その影響度合いは深度が深くなるにつれて低下することによるものである。また、間隙水圧分布はほぼ線形であることから、測定点以外の間隙水圧は外挿近

似で評価可能であると仮定する。すなわち、近似直線と深度の軸の交点が真空の及ぼす最大深度であり、その値は測定時間の経過に伴い深くなることわかる。領域毎の最大深度であるが、真空脱水処理終了時において、領域 A でもっとも深くなり、領域 B および領域 C へいくに従い浅くなっていくことがわかる。すなわち、真空度が最も大きい脱水口近傍においては、その影響領域は約 30cm 程度である。また、コンクリート表面における到達圧においても局所的に異なり、その低下量は脱水口からの距離が大きくなるにつれて顕著となっている。

3.4 コンクリート内部の水分移動

本節では、鉛直方向および水平方向の間隙水圧履歴を用いて、深度方向および真空マット方向への動水勾配を算出することにより議論する。なお、算出方法は以下に示す通りである。

$$h = \frac{P}{\rho g} \cdots \cdots (1)$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} \cdots \cdots (2)$$

ここで、 h : 水頭 P : 間隙水圧[MPa]

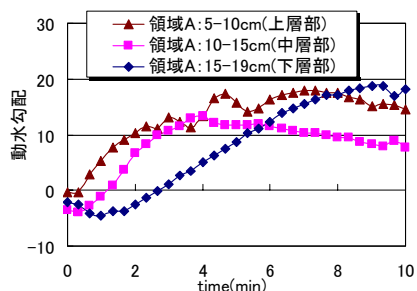
ρ : 水の密度[kg/m³]

L : 測定間距離 i : 動水勾配

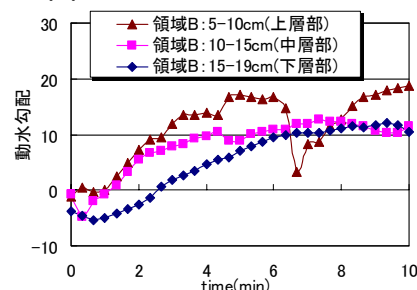
(1) 鉛直方向の動水勾配履歴

図 - 7 に鉛直方向の動水勾配履歴を示す。なお、各領域における動水勾配は、5-10cm、10-15cm、15-19cm での深度をそれぞれ上層部、中層部、下層部と定義することにする。また、図 - 8 に各層における動水勾配を模式的に表した図を示す。

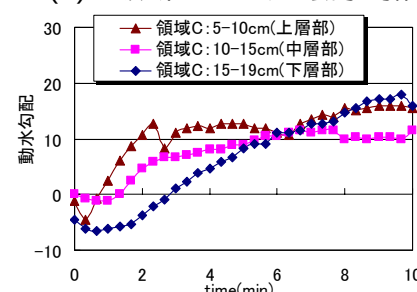
いずれの領域においても、真空処理開始直後から約 5 分経過した時点では、図 - 8 (a)に示すように、上層部および中層部における動水勾配が下層部よりも大きくなっている。これは先に



(a) 領域 A における動水勾配



(b) 領域 B における動水勾配



(c) 領域 C における動水勾配

図 - 7 鉛直方向の動水勾配履歴

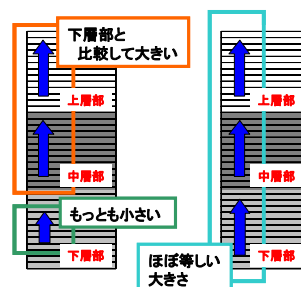
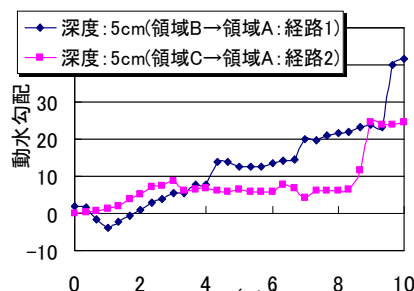
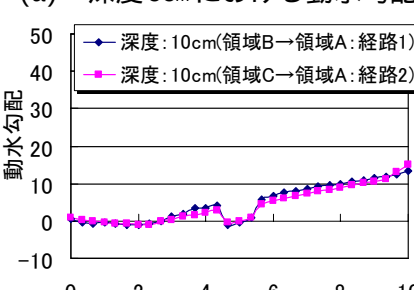


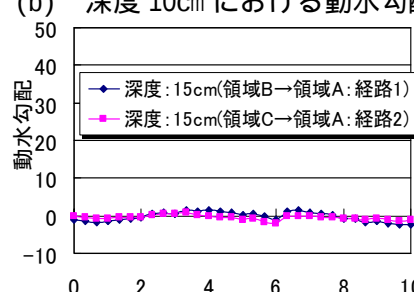
図 - 8 動水勾配模式図(鉛直方向)



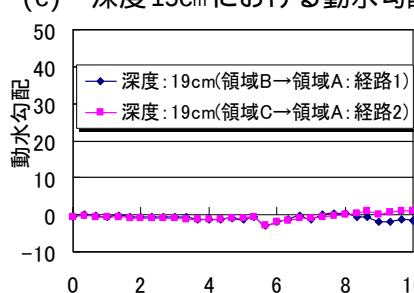
(a) 深度 5cm における動水勾配



(b) 深度 10cm における動水勾配

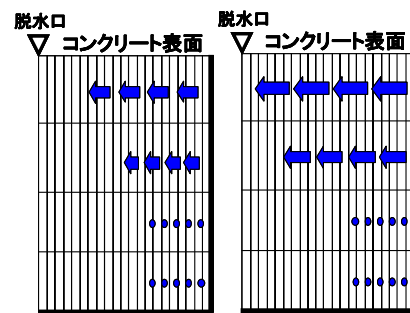


(c) 深度 15cm における動水勾配



(d) 深度 19cm における動水勾配

図 - 9 水平方向の動水勾配履歴



(a) 開始直後 (b) 5分経過時

図 - 10 動水勾配模式図(水平方向)

方、下層部では、締め固めが十分ではなく間隙水圧が非定常状態であるものと想定される。

領域毎の差異であるが、真空処理開始後 5 分経過した時点では、特に領域 A および B において大きな動水勾配となっており、間隙水圧が最大となる 10 分経過した時点では領域 A でもっとも大きな値となっている。仮に、真空処理中におけるコンクリートの透水係数が時々刻々と変化し、その値は領域毎で差異が無いものとする、領域 A および B において流速ベクトルは領域 C に比べて大きくなり各領域からの脱水量も異なることとなる。

(2) 水平方向の動水勾配履歴

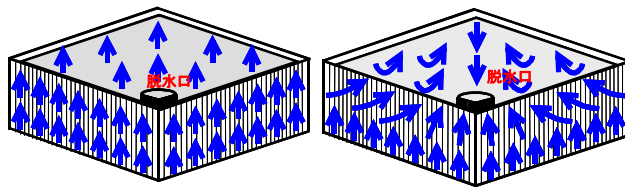
図 - 9 に水平方向の動水勾配履歴を示す。なお、同一平面内の動水勾配は、領域 A と領域 B

および領域 A と領域 C の動水勾配を示しており、それぞれ経路 1 および経路 2 と定義することにする。また、図 - 10 に各深度における動水勾配を模式的に表した図を示す。

図 - 9 から、深度 5cm および 10cm と深度 15cm および 19cm における動水勾配履歴には差異が生じていることが分かる。すなわち、深度 5cm および 10cm の動水勾配履歴では、真空処理適用時全体を通じて上昇傾向を示しており、この傾向は深度 5cm における経路 1 の動水勾配履歴においてもっとも顕著である。深度 10cm の動水勾

述べたように、コンクリート表面の真空処理の影響がコンクリート表面に近づくにつれて大きくなるためである。また、5 分経過時点からの動水勾配履歴においては、上層部および中層部ではほぼ一定値であるのに対して、下層部においては上昇傾向を辿っており、各層における動水勾配の値は同図(b)に示すようにほぼ等しい大きさとなっている。

このような性状は、上層部および中層部においては真空処理開始後約 5 分で脱水が十分に行われたためにコンクリートが締め固められ、間隙水圧が定常状態に達したものと考えられる。一



(a) 真空処理初期 (b) 約5分経過時

図 - 11 3次元的な水分移動

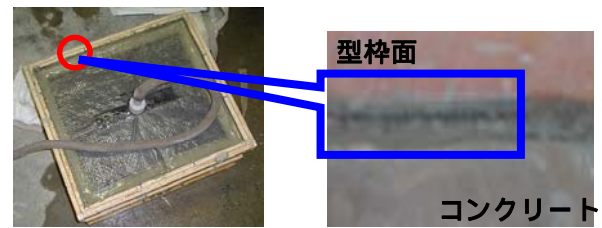
配履歴においても、深度 5cm と比較して 1/2 程度ではあるが、経路 1 および経路 2 とともにほぼ同じ傾向で動水勾配の上昇が生じている。また、その上昇量はいずれの深度における動水勾配においても、真空処理開始後約 5 分間よりも 5 分経過した時点からの上昇量が大きい結果となっている。一方、深度 15cm および 19cm の動水勾配履歴においては、いずれの深度における動水勾配においても変化は無く、ほぼ 0 となっている。このことから、水平方向への水分移動は真空処理開始後約 5 分間では、図 - 10(a)に示すような比較的小さい水分移動となることに対して、約 5 分経過した時点からは、同図(b)に示すような大きい水分移動になるものと想定される。

4. 3次元的な水分移動性状

前章までで議論したコンクリート中の水分移動性状は 2 次元的な評価であったが、本章ではそれらを組み合わせた 3 次元的な評価を行うこととする。なお、図 - 11 に前章から推測される 3 次元的な水分移動性状を、供試体形状寸法に対する 1/4 モデルを用いて示す。

前章で示した動水勾配履歴を比較すると、真空処理開始後約 5 分では、鉛直方向よりも水平方向の動水勾配の値が大きくなっている。このことは、同図(a)に示すように、各層における水分移動がコンクリート表面に向かって垂直に上昇するものと想定される。一方、約 5 分経過した時点からの動水勾配は、上層部、特に深度 5cm における水平方向の動水勾配が鉛直方向を上回る結果となっており、水分移動性状は時間の経過とともに同図(b)のような脱水口へ向かう集約的な性状を示すことになる。

このような脱水口に向かう水分移動現象は、コンクリート骨格との摩擦抵抗によりコンクリ



(a) 全体図

(b) 拡大図

図 - 12 剥離現象

ートの縮みを誘発することになる。この事實は、図 - 12 に示すような型枠面とコンクリートの剥離現象から確認され、水分移動とコンクリートの変形の関連性について議論しなければならない。すなわち、複数回にわけて真空処理を施さなければならないような実コンクリート構造物では、領域毎における変形状が異なることとなり、領域境界におけるひび割れの誘発を生じさせることが懸念される。このような観点からも今後は、変形状の明確化および水分移動性状との関連性について検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、真空脱水処理に伴うコンクリート内部の水分移動性状を間隙水圧の変化に着目することにより評価した。

以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 真空脱水処理中の水分移動性状は、時間的および領域毎に異なることがわかった。
- (2) 真空の影響範囲は時々刻々と変化し、脱水口近傍においてもっとも広範囲であり、型枠面へ近づくほど小さくなることがわかった。

参考文献

- 1) 平川博也, 小野貴史, 大下英吉: 真空脱水処理工法に伴うコンクリート内部の水分移動性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1359- 1364, 2004
- 2) 和藤浩, 村松昭夫, 山口武, 畑中重光: 真空脱水締固め工法による建築床スラブコンクリートの性能改善, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1393- 1398, 1999