

論文

[1044] フレッシュコンクリートの脱水機構に関する解析的研究

正会員 ○伊藤康司 (JR貨物)  
 正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学)  
 清水敬二 (長岡技術科学大学)  
 正会員 橋本親典 (長岡技術科学大学)

1. はじめに

通常、コンクリート中のセメントが完全に水和するためにはセメント重量の23%、ゲル水として19%程度の水が必要とされているが、実際には、施工性や充填性を考慮してW/C=50%程度、特に建築用ではW/C=60%程度のコンクリートを使用している。そのため、コンクリートが硬化するまでにはかなりの量の水がブリージングにより外部に排水される。こうしたコンクリート中の余剰水を減少させる方法として減水剤、流動化剤等の混和剤を使用する方法とコンクリート打設後に余剰水を強制的に排水させる方法がある。

コンクリート中の余剰水を強制的に排水させる工法には真空脱水工法、テキスタイルフォーム工法等、現在までいくつかの工法が実用化しており、これらの工法の有効性が実験的に明かにされている<sup>1,2)</sup>。しかし、これまでの研究は、脱水処理されたコンクリートの品質(強度、中性化深さ、凍結融解抵抗性、等)に関するものがほとんどで、打設されたコンクリート中で余剰水がどの様に移動し、その結果、内部の物性が、どの様に変化しているかと言った問題に関する研究は少ない。

本研究は、テキスタイルフォーム等の透水型枠を用いた場合、コンクリート打設後にコンクリート内部の水がどの様に移動し排水されるかを解析的に明らかにするものである。

2. 解析理論の概要

コンクリート中の水の脱水機構のうちブリージングについては既往の研究により1次元圧密理論で表現できることが報告されている<sup>3)</sup>。そこで、シートの脱水機構については排水がブリージング方向とシート方向の2方向に現れるため1次元圧密理論を2次元に拡張した2次元圧密理論を適用して検討することにした。解析理論は圧密理論のなかで最も基本的な線形圧密理論<sup>4)</sup>を用いた。線形圧密理論は、①間隙流体の質量保存、②流体の運動に対するダルシー則、③間隙を有する物体の釣り合い、④間隙を有する物体の変形に対するフックの法則、⑤Terzaghiの有効応力原理の5つの基本仮定に立脚している。これらの仮定のもとに線形圧密理論の基本的な支配方程式を示すと次のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (u_{i,i}) - n m_r \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{k}{\gamma_w} (\sigma_{,i})_{,i} = 0 \quad (1)$$

$$[G (u_{i,i} + u_{i,i})]_{,i} + [(K - \frac{2}{3}G) u_{k,k}]_{,i} + f_i = 0 \quad (2)$$

ここで、 $\sigma$ ; 間隙水圧、 $u_i$ ; 粒子の変位ベクトル、 $n$ ; 間隙率  
 $m_r$ ; 間隙水の体積圧縮係数、 $k$ ; 透水係数、 $\gamma_w$ ; 水の単位体積重量  
 $G$ ; せん断弾性係数、 $K$ ; 体積弾性係数、 $f_i$ ; 物体力

なお、 $_{,i}$  は  $i$  に関する偏微分を表している

式(1)、(2)の連立偏微分方程式はそれぞれ間隙流体の連続の式、力の釣合方程式を表しており、

空間的には有限要素により解析を行い、時間的には差分近似による数値解析を行った。

有限要素解析を行う場合の境界条件として、本研究では型枠面を不透水面、シート面および自由面を透水面とした。

### 3. 解析モデルの要素特性の検討

解析に必要なコンクリートの要素特性は透水特性と変形特性であり、透水特性については変水位透水試験、加圧ブリージング試験を行い、変形特性については直接一軸圧縮試験を行ってそれぞれの特性を決定した。

#### 3.1 変形特性（直接一軸圧縮試験）

極く初期のコンクリートの力学的な性状を知るために、変位制御（毎分1mm）で直接一軸圧縮試験を行った<sup>5)</sup>。試験用供試体は次のように作成した。すなわち、表1に示す配合のコンクリートをφ10×20cmの円柱供試体に詰め、十分に締め固めた後、所定の時間放置し、試験前に脱型した。コンクリート打設後の時間経過にともなう荷重-変位曲線を図1に示す。図1の荷重-変位曲線から各時間の弾性係数を求め、弾性係数の時間経過による変化を求めると図2のようになる。

表1 示方配合

	セメント	水	細骨材	粗骨材
単位置	316	190	744	1096

W/C=60% スランフ°15cm

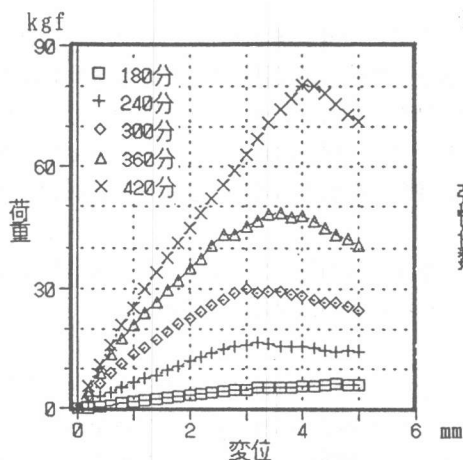


図1 荷重-変位曲線

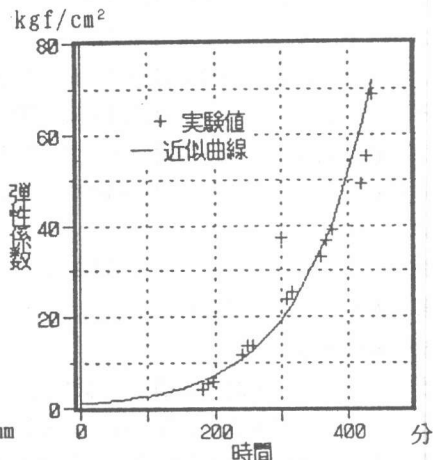


図2 弾性係数の時間変化

従って、極く初期のコンクリートの弾性係数の経過時間による変化は次式のように表される。

$$E = 1.065 \times \exp(9.66 \times 10^{-3} \times t) \quad (3)$$

本研究で採用した解析プログラムでは変形特性を定数として取り扱う必要があることから、解析上弾性係数は  $E = 2.35 \text{ kgf/cm}^2$  を用いるとし、ポアソン比は0.35を用いた。

#### 3.2 透水特性（透水試験、加圧ブリージング試験）

コンクリートの透水係数は水和反応の進行およびコンクリートの間隙比の変化により異なってくる。そこで、打設後の経過時間を変えて変水位透水試験を行い水和反応の影響を調べ、また、加圧ブリージング試験を行って間隙比の影響を実験的に求めた。

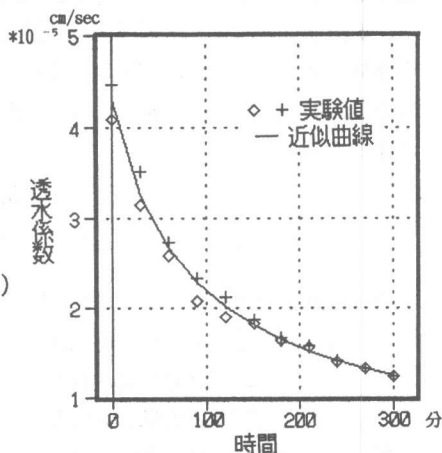


図3 透水係数の時間変化

表1の配合のコンクリートについて、JIS A 1218に規定されている土の透水試験に準じて透水試験を行った結果を図3に示す。図3は、初期段階の水和反応をよく表しているが、凝結が始まると考えられる150分以降の透水特性がうまく表現できていない。そこで150分以降については、打設後300分の時の透水係数を0として直線的に低下させることにした。300分で透水係数を0としたのは、ブリージング、シート排水ともに300分程度で排水が終了していることを考慮したためである。加圧ブリージング試験では、透水試験に使用したコンクリートと同一の配合のコンクリートに加圧力 ( $p = 20\text{kgf/cm}^2$ ) を加え排水量の時間変化の様子から間隙比と透水係数の関係を求めた。実験によってえられた排水量-時間曲線、および、間隙比-間隙比係数の関係をそれぞれ図4、図5に示す。

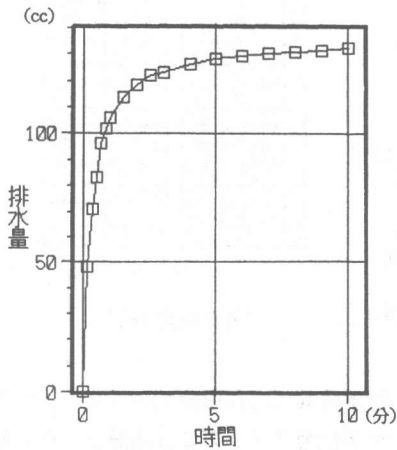


図4 排水量-時間曲線

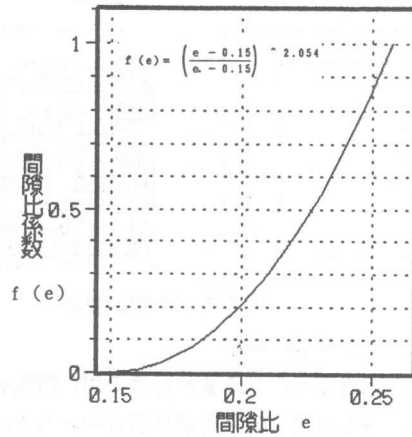


図5 間隙比-間隙比係数

間隙比と透水係数を関係づける間隙比係数  $f(e)$  は初期間隙比の透水係数の値を1としてそれぞれの間隙比の透水係数が初期間隙比  $e_0 (=0.2576)$  の何倍になるかを表す係数であり、排水量と時間の関係から求めた。以上の実験結果より解析に用いる透水係数の値を次の様に定めた。

$$k = f(e) \times 71.5 \times 10^{-5} \times (t + 60)^{-0.69} \quad t < 150 \text{分} \quad (4 \text{ a})$$

$$k = k_{150} \times (300 - t) / 150 \quad 150 \text{分} < t < 300 \text{分} \quad (4 \text{ b})$$

### 3. 3 硬化供試体の圧縮試験

表2 示方配合

W/C	単位量 $\text{kg/m}^3$				間隙比
	セメント	水	細骨材	粗骨材	
45	332	149	782	1151	0.1981
50	327	163	769	1132	0.2180
55	321	177	756	1114	0.2379
60	316	190	744	1096	0.2576

排水によりコンクリートはより密な構造となり、強度が増加することが予想される。そこで、固体部分(セメント、骨材)の容積を表1の配合と同一とし、水の量だけを変えて間隙比を変化させた表2の配合について、28日強度を測定し、間隙比と強度の関係を検討した。実験

$\text{kgf/cm}^2$

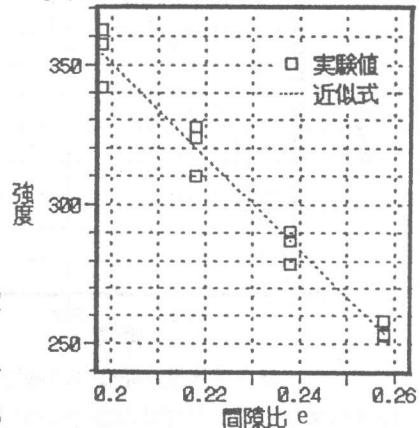


図6 間隙比-強度特性

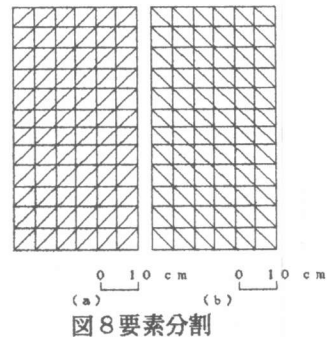
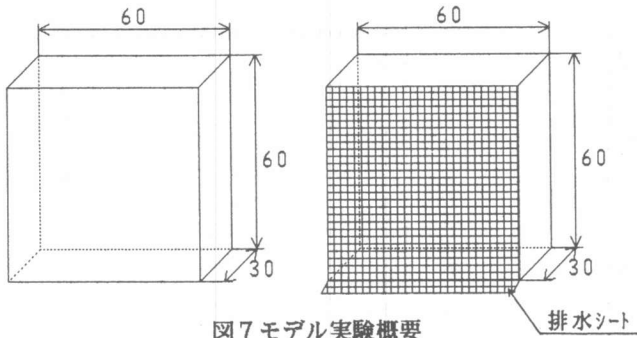
結果を図6に示す。強度と間隙比 $e$ の関係を最小二乗法で求めると式(5)のようになる。

$$\sigma_{28} = 685 - 1.67 \times 10^3 \times e \quad (5)$$

#### 4. 解析結果の検討

##### 4.1 モデル実験

解析の妥当性を検討するために表1の配合でモデル実験を行った。実験概要を図7に示す。実験は、シートを取り付けた場合と取り付けない場合の2種類について行い、排水量の経過時間変化を求めた。なお、シートによる排水量を測定するために、シート下端部を外部に出した。すなわち、シート側の型枠側板は下端でシートをはさむ格好になっている。シートから排出された水を樋で集め、メスシリンダーで排水量を測定した。



##### 4.2 解析結果の検討

3章の実験でえられた要素特性を用い解析を行った。要素分割は三角形分割を図8(a)(b)の様にし、両計算結果の平均値を解析値とした。計算ステップは全ステップ2分間隔とした。解析結果と実験値の比較を図9、図10に示す。シートを取り付けた場合の排水量は、シート排水量とブリージング量を加えた総排水量を示している。また、解析値の排水量は、変形が各要素の奥行き方向、つまり、モデル供試体の幅方向に一定とし、各要素の変形量に幅を掛けて計算した。ただし型枠界面の排水量に与える影響は無視している。

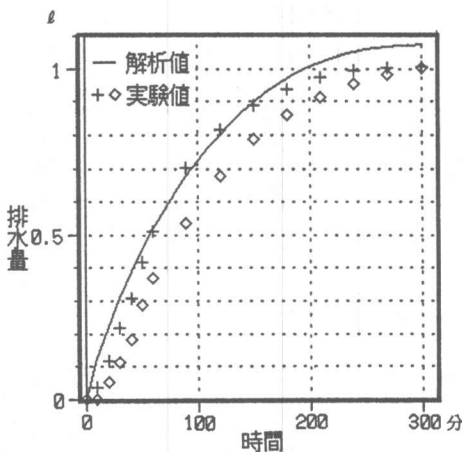


図9 排水量-時間(ブリージング)

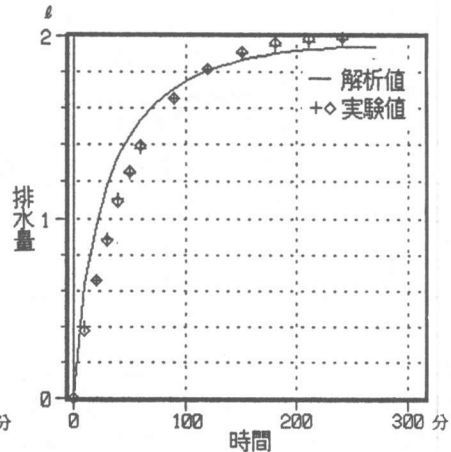


図10 排水量-時間(シート排水)

図9のブリージングだけの場合については、解析値と実験値の排水性状は比較的よく一致している。初期段階で解析値の排水量が多いのは、練り混ぜ直後の急激な水和反応の影響を考慮し

ていないためと思われる。また、凝結が始まる150分程度以降では、実際には凝結が始まるため排水が抑制されると考えられるが、解析では凝結の影響を完全に表現できていないため、実験値よりも大きくなっている。

次に型枠の片面にシートを取り付けた場合(図10)では、解析値と実験値は比較的良好に一致している。しかし、シートを取り付けない場合と同様に初期段階では解析の排水量が大きくなっている。120分からは解析値が実験値よりも小さくなる。解析では、要素から水が抜けると圧密が進み、間隙比が小さくなると考え、排水が進むに従って透水係数を小さくしている。120分以降、解析値が実験値よりも小さくなるのは、透水係数の減少の割合を大きく仮定したためであると考えられる。

#### 4.3 脱水機構の検討

コンクリート中の水の流れる方向は、解析でえられた各時間の間隙水圧分布から推定できる。ダルシーの法則より、水の流れる方向は間隙水圧の等しい曲線(等間隙水圧曲線)に直角な方向になる。解析によってえられた間隙水圧の値を用いて等間隙水圧曲線を書くと図11の様になる。解析結果によれば、流れの方向は時間に関係なくほぼ一定の方向となったので、代表的な例として120分時の分布状態を示した。流れは、ブリージングにより上に向かう流れとシートに向かう流れがある。シート近傍はシートに向かう流れの成分が大きく、シートから離れるほど上向きの流れの成分が大きくなっている。また、深さ方向での流れの方向は、深い要素ほどシート方向の流れの成分が大きく、シートの影響を強く受けている。シート排水は、コンクリートの自重による圧力で間隙中の水を排水させるので、自重による圧力の大きい要素、言い換えれば下部の要素ほどシートの効果が大きく現れる。

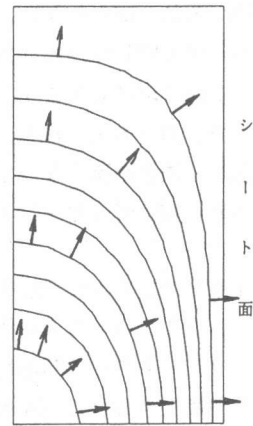


図11 流れの方向

#### 4.4 間隙比の分布

解析でえられた要素の変形から、深さが同じ位置での横方向の間隙比の分布を推定すると図12の様になる。上部の要素はシートの影響が小さいため、型枠側もシート側も同じ程度の間隙比であるが、下部の要素では初期段階でシート側の要素がしめ固まっている。しかし、時間が経過すると間隙比は一定の値になる。

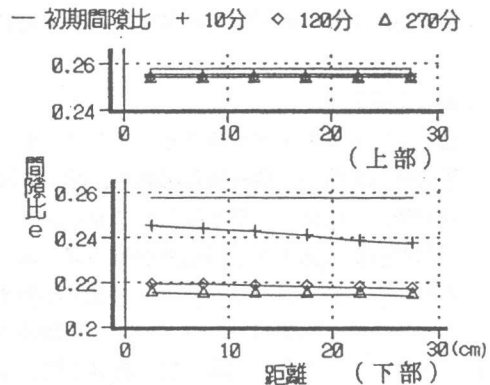
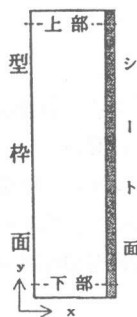


図12 間隙比の分布

#### 4.5 コンクリートの性状変化の推定

排水によりコンクリートは密な構造となり、強度が増加する。モデル実験のシート面と型枠面の材令28日におけるシュミットハンマーによる表面反発度の分布を図13に示す。解析によってえられた変形量をもとに間隙比の分布を計算し、式(5)によって強度分布を推定してみると

図14のようになる。図13と図14を比較してみると、実験ではシート面の方が型枠面より約3割程度強度が大きいのに対し、解析

ではシート面も型枠面もほとんど同じ強度となっている。また、深さ方向の強度の変化の様も異なっている。解析では固体部分の容積は一定とし、水の容積の減少分だけで間隙比の変化を計算したが実際には、間隙中の水と一緒にセメント粒子も移動しているため、間隙比の減少が即、強度の増加とはならない。シート面は型枠面と同じ間隙比であるが、セメント粒子が多く集まり、強度が増加したものと考えられる。一方、実

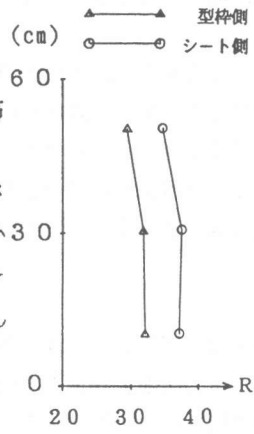


図13 表面反応度

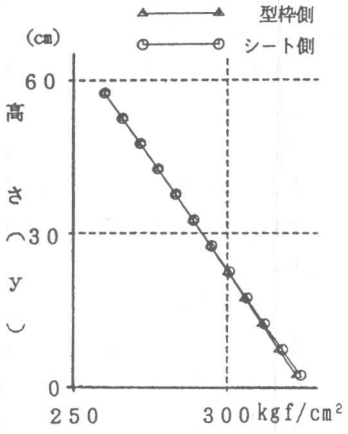


図14 強度分布 (解析結果)

験値で、深さが深くなっても強度が増加しなかったのは、シートによる排水が型枠底部の一ヶ所で行われ排水時にセメント粒子も一緒に流れ出てしまったためと考えられる。

### 5. 結論

本研究でえられた結論を要約すると次のようになる。

- 1) コンクリートの透水特性および変形特性を決めることにより総排水量の推定が可能となりコンクリート内部の間隙比の分布および経時変化を推定できる。
- 2) 解析でえられた間隙水圧の分布から水の移動方向が推定できる。シートを取り付けた場合の流れの方向はシート方向とブリージング方向であり、深い要素、シートに近い要素ほどシートの影響を強く受ける。
- 3) コンクリート要素の収縮は水の移動だけでなくセメント粒子、砂粒子の移動も伴うため、強度を推定するのに間隙比の分布だけでは充分でない。

### 【参考文献】

- 1) 透水型枠 (テキスタイルフォーム) によるコンクリート表層部品質の改善と鉄筋コンクリート建築物への適用: 熊谷技報第40号、pp.55-64、1987.2
- 2) 野中勲、丸山久一、清水敬二: フレッシュコンクリート中の水の移動に関する基礎的研究、土木学会第43回年次学術講演会第5部、pp.346-347、昭和63年10月
- 3) 吉田 七: 新しいコンクリートの沈下に関する数理論的考察、土木学会論文集第14号、pp.6-13、昭和27.9
- 4) G・グーデフス著: 川本 万、桜井春輔、足立紀尚共訳、地盤力学の有限要素解析1、森北出版
- 5) 岡本寛昭: 極く初期コンクリートのレオロジーモデルに関する研究、セメント技術年報 39、pp.178-181、昭和60