

注入モルタルの加圧脱水特性

河 井 徹
(技術研究所)岡 田 武 二
(技術研究所)

§ 1. はじめに

PIP くい工法は、品質管理の行き届いた場所打ちモルタルくいとして建造物の基礎くい、山留壁などに使用されている。また、最近では打設した PIP くいから鉄筋や形鋼などの耐力材を切り出し、後付け部材を接合することにより、PIP くいを本体構造物の一部に使用することも行なわれている。この場合、耐力材の後付け部材との接合部はあらかじめ加工しておくことが多いため、耐力材は所定の位置に挿入されている必要がある。

しかし、砂層、砂礫層などの透水係数の大きい地盤での施工や長尺くいの施工では、注入モルタルの脱水固化のために、耐力材が所定の深度まで挿入不可能な場合がある。この脱水固化とは、注入モルタルが加圧脱水されることに起因している。つまり、注入モルタル中の水分が周辺地盤に浸透していく結果、脱水固化した層がくい周辺部から進んでくる現象である。しかし、このような注入モルタルの加圧脱水特性に関する研究は皆無であり、その特性も対策も明らかにされていない。

そこで、注入モルタルの加圧脱水特性の解明と、脱水固化速度を定量的に把握することを目的として加圧脱水実験を行なった。本論文は、その実験結果および検討結

果について報告するものである。

§ 2. 注入モルタルの加圧脱水実験

2.1 実験方法

2.1.1 脱水装置と加圧方法

脱水装置は、図—1に示すように内径10cm、高さ32cmの円筒形容器に加圧ピストンを取り付けたものとした。加圧方法は、容器内に20cmの高さまで投入した注入モルタルの上面に設置したピストンを圧縮空気で加圧した。圧縮空気が常に一定の圧力でピストンに作用するように、空気圧調整装置を使用した。排水面は容器底部のみの片面脱水とした。

2.1.2 脱水量、沈下量、間げき水圧の測定

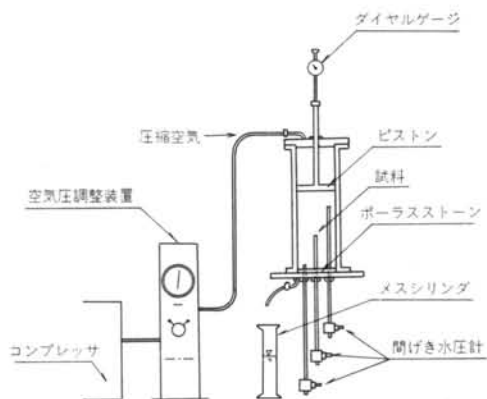
注入モルタルからの脱水量は、容器下部のメスシリンダで、また沈下量はピストン上部に取り付けたダイヤルゲージで測定した。注入モルタル中に生じる間げき水圧は、パイロットの上端を排水面から1, 4, 7, 10, 13, 16cmの高さに設置した間げき水圧計で測定した。測定はいずれも30秒間隔とした。

2.1.3 水結合材比 $W/(C+F)$ の測定

脱水固化したモルタルの水結合材比は、固化したモルタルの底面付近および底面から2cm間隔でスライス状に切断した試料の重量とその乾燥後の重量から算出した。

2.1.4 配合と使用材料

注入モルタルの配合を表—1に示す。セメントは日本セメント株式製の普通ポルトランドセメント（比重3.15, 比表面積3,100cm²/g）、混和材は電発フライアッシュ株式製のフライアッシュ（比重2.1, 比表面積2,990cm²/g）、細骨材は柏崎産川砂（粗粒率1.84, 比重2.64, 吸水率2.08%）を用いた。混和剤は、株式会社コンケム製のイントルージョンエイド IA、および日曹マスタービルダーズ株式製の GF 800 の2種類を用いた。混和剤 IA は、リグニンスルホン酸塩を主成分にした注入モルタル用混和剤であ



図—1 脱水試験装置

記号	混和剤 Ad の 種 類	単 位 量 (kg/m ³)					W/(C+F) (%)	S/(C+F)	Ad/(C+F) (%)	P ロートの 流下時間 (sec)	間げき比 e_0 (V_v/V_{C+F+S})
		C	F	S	W	Ad					
P50	IA	636	121	954	378	6.63	50	1.25	0.875	16~18	0.609
F50		580	110	1104	345	5.52	50	1.60	0.800	"	0.527
F45	GF	656	125	1015	351	6.25	45	1.30	"	"	0.538
F40		749	143	892	357	7.14	40	1.00	"	"	0.555

表—1 注入モルタルの配合

配 合	混和剤の 種 類	W/ (C+F) (%)	加 圧 力 p (kg/cm ²)			
			1.5	2.5	3.5	4.5
P50	IA	50	○	○	○	○
F50		50	○	○	○	○
F45	GF	45				○
F40		40				○
P50 NA	IANA	50		○		

(注) IANA は混和剤 IA のアルミニウム粉末を除いたもの

表—2 実験の組み合わせ

り, IA を用いた注入モルタルをプレパクトモルタルと称する。混和剤 GF 800 は, ナフタリンスルホン酸塩を主成分にした注入モルタル用混和剤であり, GF 800 を用いた注入モルタルを流動化モルタルと称する。

プレパクトモルタルは通常の PIP くに使用しているモルタルであり, 流動化モルタルは高強度プレパックドコンクリート用に開発したモルタルである。

2.1.5 実験の仕様

実験の組み合わせを表—2 に示す。脱水固化層内の水結合材比の分布測定は, P50, F50 および P50 NA 配合の加圧力が $p=2.5\text{kg/cm}^2$ の場合は脱水終了までの数回とし, それ以外は脱水固化層が約 10cm の高さに到達したときと脱水終了時の 2 回とした。

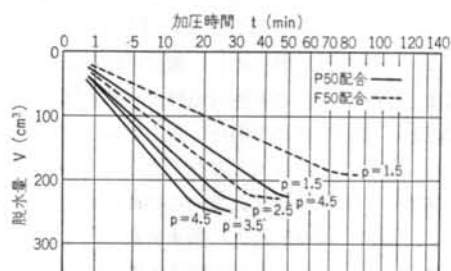
2.2 実験結果と考察

2.2.1 脱水量と沈下量

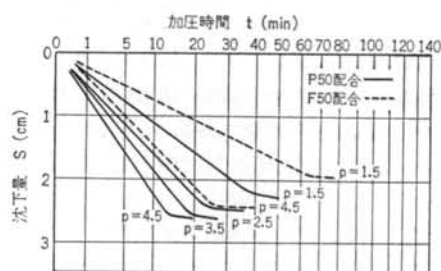
P50 および F50 配合の脱水量と沈下量の経時変化を図—2, 図—3 に示す。いずれの値も加圧力が大きいほど大きく, その値は加圧時間の平方根にほぼ比例して増加し, その後両者が比例しなくなる点(見掛けの脱水終了点)が現われる。その時点で, 脱水量, 沈下量とも加圧力が大きいほど大きく, プレパクトモルタルの方が流動化モルタルより大きな値を示している。

ここで, 脱水量および沈下量が加圧時間の平方根に比例して増加していることは, 注入モルタルの加圧脱水過程は Carman-Ruth の濾過理論¹⁾に準じているように考えられる。Carman-

Ruth の濾過理論とは, 濾別すべきスラリーに濾過圧力 を作用させると濾布上に固形物の薄層すなわちケーキが形成され, そのケーキは濾布と同じ作用をして厚みを増してゆき, 成長していくケーキによりスラリー自身が濾別されていくという理論であり, 水理公式集²⁾に詳細の解説が付けられている。



図—2 脱水量の経時変化



図—3 沈下量の経時変化



図—4 間げき水圧の経時変化



図—5 間げき水圧の経時変化

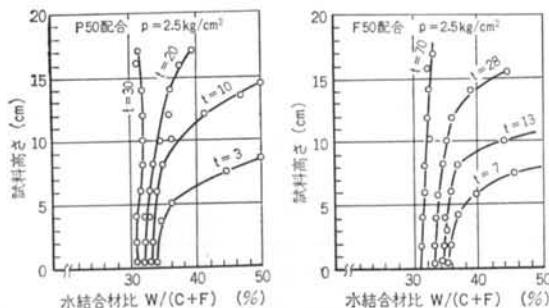


図-6 水結合材比の経時変化 図-7 水結合材比の経時変化

2.2.2 間げき水圧

注入モルタルに生じる間げき水圧の経時変化の例を図-4、図-5に示す。時間経過に伴い、間げき水圧が減少し始める面（以下、脱水境界面と呼ぶ）が上昇してゆき、その脱水境界面が試料の上部に到達した時点では試料内の間げき水圧は残留しているが、その後は徐々に減少している。このことは、脱水境界面以下では加圧脱水中に有効応力が増加することを示しており、一種の圧密過程が生じていることになる。つまり、加圧脱水の過程は単なる濾過過程ではなく、濾過過程と圧密過程とが複合していることを示している。この傾向は、配合および圧力が相違しても同様であり、加圧力が $p=4.5 \text{ kg/cm}^2$ 以下、水結合材比が40～50％程度の場合には、注入モルタルの加圧脱水過程は濾過過程と圧密過程とが複合しているといえる。

2.2.3 脱水固化層の水結合材比

所定の経過時間において加圧脱水を停止して、そのときの試料の水結合材比の高さ方向の分布を測定した結果を図-6、図-7に示す。加圧脱水を途中で停止した場合、脱水が全く行なわれていないで混練時の水結合材比を保つ流動領域と、脱水が作用して水結合材比が減少している脱水固化層の2層に試料が大別されている。脱水固化層は自立する程度に固化している。これは注入モルタル中の水分が下部排水面から脱水された結果、セメント、フライアッシュおよび砂の粒子が接触することにより物理的に固化した状態であると想定される。

図-4と図-6、あるいは図-5と図-7とを比較すると、間げき水圧が減少し始める脱水境界面と脱水固化層の高さとは良く一致している。つまり、脱水境界面以下では注入モルタル中の水がある程度脱水された結果、セメント、フライアッシュおよび砂の粒子が接触することにより有効応力が生じて圧密が生じているが、脱水境界面の上部では有効応力がゼロであり全く脱水過程が生じていないことになる。

注入モルタルの加圧脱水過程では脱水境界面が形成さ

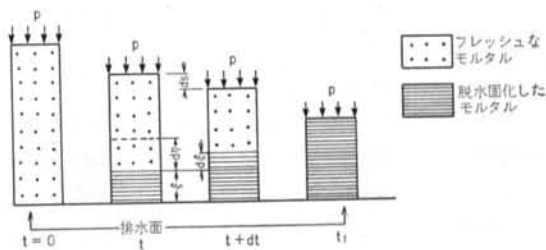


図-8 注入モルタルの加圧脱水の理想化モデル

れ、その境界面が時間とともに移動していくことが以上の実験で判明した。

2.2.4 注入モルタルの加圧脱水過程

ここでは脱水過程に脱水境界面が移動していくことを前提にして、注入モルタルの加圧脱水過程を定量的に扱ってみる。なお、液状粘土に関してはその加圧脱水過程がほぼ明らかにされている⁴⁾ので、その理論を参考にして注入モルタルの加圧脱水過程を理論的に考察する。

図-8は、注入モルタルの加圧脱水過程を理想化したモデルである。時刻 t に層厚 ξ の脱水固化層があり、その層厚が dt 時間中に $d\xi$ だけ増加すると考える。この $d\xi$ の層厚増加をもたらすモルタルの流動領域の時刻 t における要素 $d\eta$ とすると、要素 $d\eta$ に含まれていたセメント、フライアッシュおよび砂の粒子がすべて $d\xi$ 部分に残り、 $d\eta-d\xi$ に相当する水分が層厚 ξ の脱水固化層を通して dt 時間内に排水されると考える。この場合、 $ds=d\eta-d\xi$ の体積収縮が生じることになる。

ここで、土質工学で通常使用している物理量である間げき比 e を注入モルタルに適用する。つまり、注入モルタルの場合の間げき比 e は、

$$e = V_v / V_{C+F+S}$$

と定義する。 V_v は単位体積当たりの水および空気の体積、 V_{C+F+S} は単位体積当たりの「セメント+フライアッシュ+砂」の体積である。ただし、モルタル中の空気量はごく微量なため無視する。

上記の加圧脱水過程は、注入モルタルの間げき比 e を用いれば、ある時間 t に初期間げき比が e_0 である注入モルタルの要素 $d\eta$ が dt 時間後に間げき比 e の $d\xi$ 要素に変化し、その際脱水された水 $d\eta-d\xi$ が脱水固化層を通して排水されることになる。この場合、仮定条件としては、

- (1) 脱水過程のセメントの水和反応は無視する、
- (2) $d\eta$ 要素が $d\xi$ 要素に転化する場合セメント、フライアッシュ、砂の粒子はすべて $d\eta$ 要素に残る、
- (3) セメント、フライアッシュ、砂の粒子以外の水 $d\eta$

$-d\xi$ は脱水固化層 ξ を通じて dt 時間にすべて供試体外に排出される、

以上の3項目が挙げられる。

注入モルタルの凝結の終結は遅延剤の効果により10～16時間であり、終結時でセメントの水和に使われる水の量はセメント重量の0.5%程度である⁴⁾ことを考慮すると、加圧脱水の終了する数10分間では化学反応はほとんど生じていないことになるため、(1)は無視できる、(2)、(3)は固体および液体の保存則であるため成立する。

ここで、脱水固化層内の水の流れに対して Darcy の法則を適用すると、式(1)が成り立つ。

$$d\eta - d\xi = (k \cdot p / \gamma_f \cdot \xi) \times dt \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 k ：脱水固化層の透水係数

p ：加圧力

γ_f ：水の単位体積重量

また、 $d\eta$ 要素と $d\xi$ 要素に含まれるセメント、フライアッシュ、砂の量は同一であるから、式(2)が成り立つ。

$$\begin{aligned} d\eta / d\xi &= (V_{c+F+S} + V_{w0}) / (V_{c+F+S} + V_{wd}) \\ &= (1 + e_0) / (1 + e) \quad \dots\dots(2) \end{aligned}$$

ここで、 V_{w0} ：注入モルタルの保有水の体積

V_{wd} ：脱水固化層の保有水の体積

ここで、脱水ひずみ ε_a を定義すると式(2)より、

$$\varepsilon_a = (d\eta - d\xi) / d\xi = (e_0 - e) / (1 + e) \quad \dots\dots(3)$$

脱水ひずみは、脱水によって形成された後の要素の厚さに対する脱水によって生じる要素厚さの変化の比であり、一種のひずみである。

式(1)と式(3)から $d\eta$ を消去すると、加圧脱水の基本式(4)が得られる。

$$d\xi / dt = k / (\varepsilon_a / p \times \gamma_f) \cdot \xi \quad \dots\dots(4)$$

加圧力 p が一定の場合、式(4)を積分して $t = 0$ のとき $\xi = 0$ という初期条件を考慮すると、式(5)が成り立つ。

$$\xi = \sqrt{2pk / \varepsilon_a \cdot \gamma_f} \times \sqrt{t} \quad \dots\dots(5)$$

つまり、加圧力が一定の場合は、脱水固化層は $\sqrt{t}$ に比例して増加することを式(5)は示している。

また、脱水量を V 、沈下量を S 、脱水容器の面積を A とすると、

$$dV / A = dS = d\eta - d\xi = \varepsilon_a \cdot d\xi \quad \dots\dots(6)$$

しかも、 ε_a は p のみの関数のため、加圧力が一定の場合、

$$S = \varepsilon_a \cdot \xi \quad \dots\dots(7)$$

が成り立つ。また、式(5)、(6)、(7)より式(8)が導びかれる。

$$V / A = S = \sqrt{2pk \cdot \varepsilon_a / \gamma_f} \times \sqrt{t} \quad \dots\dots(8)$$

つまり、加圧力 p が一定の加圧脱水では、沈下量 S は $\sqrt{t}$ に比例することになる。このことは2.2.1の実験結果と一致している。以上の結果より、注入モルタルの加

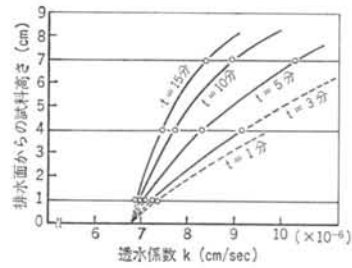


図-9 脱水固化層内の透水係数の経時変化

圧脱水過程は基本的には濾過過程であり、圧密を無視した濾過理論でも加圧脱水の特性を表わしていることになる。

以上より、注入モルタルの加圧脱水の基本式は式(8)で表わされることが判明した。なお、脱水固化層の透水係数 k および間げき比 e は、排水面に最初に形成される固化層の値を用いる条件である。

2.2.5 注入モルタルの加圧脱水利論の適用

前項で考察した加圧脱水利論と注入モルタルの加圧脱水実験結果との比較を行ない、その妥当性を検討する。

式(8)から脱水量 V あるいは沈下量 S を求めるには、透水係数 k および脱水ひずみ ε_a を求める必要がある。ここでは、P50配合の加圧力 $p = 2.5 \text{ kg/cm}^2$ の場合を例にして k と ε_a を求める。

(1) 透水係数 k の算出

脱水固化層の透水係数を求める方法は2通り考えられる。一つは、脱水固化層を作製した後その固化層の透水試験を行なって透水係数を求める直接的な方法であり、§3.で記述する。もう一つは、固化層内の間げき水圧分布から求めた有効応力の勾配、すなわち動水勾配と固化層内の流速から Darcy の法則を使用して透水係数を求める方法である。後者の方法によれば、1回の脱水実験により脱水固化層内の透水係数の分布、およびそれらの経時変化も求めることが可能である。そこで、本項では後者の方法により透水係数を求める。

前述したように、加圧脱水過程においては脱水境界面以下の固化層内に関する Darcy の法則により式(1)が成立しているので、式(6)を考慮して式(1)を変形すると式(9)が得られる。

$$k = \frac{1}{A} \times \frac{dV}{dt} \times \frac{\gamma_f \cdot \xi}{p} = \frac{dS}{dt} \times \frac{\gamma_f \cdot \xi}{p} \quad \dots\dots(9)$$

つまり、図-2の脱水量の経時変化曲線から dS/dt を、図-4から動水勾配 $\gamma_f \cdot \xi / p$ を求めれば、式(9)から透水係数が算出できる。ここで、加圧時間 $t = 1, 3, 5, 10, 15$ 分、排水面からの固化層厚さ $\xi = 1, 4, 7 \text{ cm}$ の位置に関して求めた透水係数を図-9に示す。なお、 $\xi =$

配 合	加 圧 力 P (kg/cm ²)	水結合材比 $W/(C+F)$ (%)	透水係数 $k(\times 10^{-6})$ (cm/sec)	間げき比 e	脱水ひずみ ε_d	脱 水 量 曲 線 $V(\text{cm}^3) : t(\text{min})$		(a) (f)
						(i) 計算式	(ii) 実験式	
P50	1.5	34.2	7.0	0.417	0.136	$V=34.6\sqrt{t}$	$V=33.4\sqrt{t}$	0.97
	2.5	33.7	6.8	0.411	0.140	$V=42.1\sqrt{t}$	$V=45.4\sqrt{t}$	1.08
	4.5	33.0	5.7	0.402	0.148	$V=54.0\sqrt{t}$	$V=57.9\sqrt{t}$	1.07
F50	1.5	37.0	5.0	0.390	0.099	$V=23.4\sqrt{t}$	$V=22.2\sqrt{t}$	0.95
	2.5	35.6	4.2	0.375	0.110	$V=29.3\sqrt{t}$	$V=29.1\sqrt{t}$	0.99
	4.5	33.0	2.8	0.345	0.135	$V=35.3\sqrt{t}$	$V=38.3\sqrt{t}$	1.08

表—3 加圧脱水特性値

4 cm, $t = 1$ 分および $\xi = 7$ cm, $t = 1$, 3 分の値は脱水境界面がその位置まで到達していないため算出不能である。図—9 から分かるように、脱水固化層内の透水係数は加圧時間が増加するに伴い減少し、また排水面に近いほど小さな値を示している。この傾向は、図—6 の水結合材比の経時変化とも良く一致している。つまり、脱水固化層内の透水係数は水結合材比と良い相関があることが分かる。

図—9 において、各曲線を延長して最初に形成された脱水固化層の透水係数を求めると $k \approx 6.8 \times 10^{-6}$ cm/sec が得られるので、この値を脱水理論式に使用する。

(2) 脱水ひずみ ε_d の算出

脱水ひずみ ε_d は式(3)で表わされるので、注入モルタルの初期間げき比 e_0 と排水面近傍の脱水固化層の間げき比 e から算出する。

e_0 は、表—1 のモルタル配合から算出する。

$$e_0 = \frac{V_{w0}}{V_{C+F+S}} = 0.609$$

e は、図—6 の水結合材比の値から算出する。

$$e = \frac{V_{wd}}{V_{C+F+S}} = 0.411$$

これらの値を式(3)に代入して、脱水ひずみ $\varepsilon_d = 0.140$ が求まる。

以上より得られた $k = 6.8 \times 10^{-6}$ cm/sec, $\varepsilon_d = 0.140$ を使用して、式(8)より脱水量曲線を求めると、

$$\frac{V}{A} = S = 0.0693\sqrt{t} \quad (t: \text{sec})$$

したがって、 $V = 42.1\sqrt{t}$ ($t: \text{min}$) が得られる。

実験No.1 と No.3 のケースについて同様な方法で脱水量曲線を求め、実験式と計算式とを比較した結果を表—3 に示す。実験式の計算式に対する比は 0.95~1.08 であり、両者は比較的良く一致している。つまり、注入モルタルの加圧脱水過程は、前述した加圧脱水理論にほぼ従うものと考えられる。

また、表—3 から次のことが判明した。P50, F50両

配合とも加圧力が大きいほど間げき比が小さくなるのでその結果透水係数が小さく、脱水ひずみが大きくなることが分かる。また、その割合は F50 より P50 の方が小さい。なお、加圧力が同一の場合、脱水固化層の水結合材比は F50 配合の方が P50 配合より大きい、間げき比が小さいため透水係数が小さい。また、脱水ひずみも小さいために F50 配合の方が脱水量（沈下量）が小さいことになる。

2.2.6 アルミニウム粉末の影響

図—6 と図—7 において、見掛けの脱水終了点までに排水面近傍の水結合材比が、わずか 2% 程度であるが減少している。液状粘土の加圧脱水理論では、その値は見掛けの脱水終了点までは一定値を示す仮定であり、このことは圧密過程でも濾過過程でも基本的にいえることである。

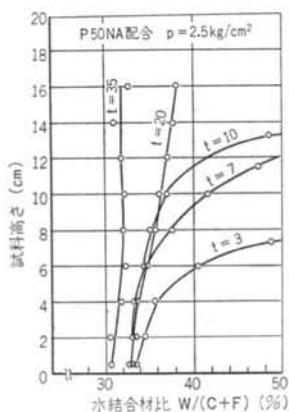
そこで、注入モルタルと通常の濾過や圧密の対象となる泥水や粘土との主な相違点を考えると、以下の 2 点が挙げられる。

(1) 注入モルタルは、時間経過に伴い化学反応が進行する。

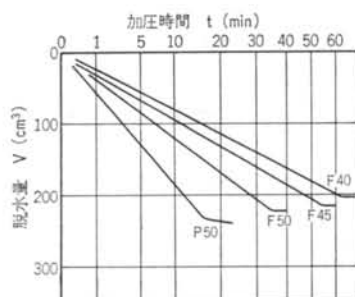
(2) 注入モルタルは、混和剤中に含まれるアルミニウム粉末がセメント中のアルカリ成分と反応して微細な H_2 気泡を発生して膨張する。

(1) は 2.2.4 で記述したように無視してもよい。(2) は注入モルタル特有の性質であるので、P50 と P50 NA 配合の実験結果を比較してみる。P50 NA 配合は、P50 の配合から膨張剤であるアルミニウム粉末を除いたものである。脱水量、沈下量および間げき水圧分布の経時変化は両配合とも大差がない。図—10 に P50 NA 配合の水結合材比の経時変化を示す。図—6 と図—10 を比較すると、P50 NA 配合では排水面近傍の水結合材比の変化は 1% 未満である。排水面近傍の試料は排水面からの厚さが 1 cm であるから、排水面における脱水固化層の水結合材比は一定であるとみなせる。

以上より、注入モルタルの脱水過程において排水面に



図一10 水結合材比の経時変化



図一11 脱水量の経時変化

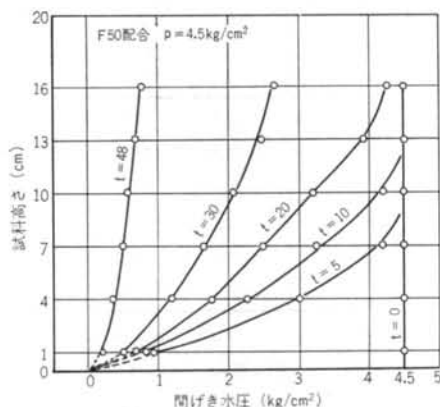
形成される固化層の水結合材比のわずかな変動は、アルミニウム粉末による H_2 気泡の発泡による影響のためと考えられる。なお、上蓋に小穴を設けたモールド内にプレバクドコンクリートを充填しておく、注入モルタルの膨張量と同量の水がしぼり出されてくる現象が生じることが報告されている³⁾が、脱水時間中の発泡量は少ないことおよび膨張量はボイルシャルルの法則に従う⁶⁾ことが明らかになっているので、加圧脱水実験では無視しても良いと考えられる。

また、排水面近傍の透水係数、間げき比、脱水ひずみはP50、P50 NA 配合とも大差はなく、注入モルタルの膨張特性は注入モルタルの加圧脱水理論の適用には影響がないと判定して良い。

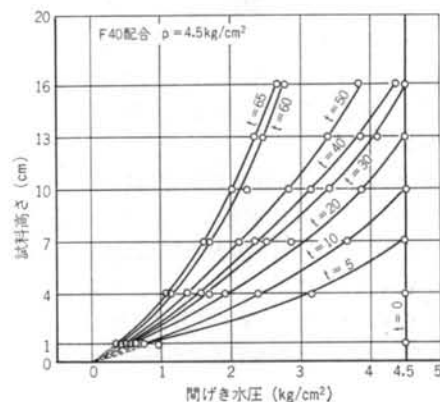
2.2.7 配合の影響

プレバクドモルタルの水結合材比は通常48~50%であるが、流動化モルタルは高性能減水剤の効果によりその水結合材比の使用範囲は30~50%と広い。そこで、本項では後者のモルタルの水結合材比の相違が脱水過程に及ぼす影響を検討する。

加圧力 $p = 4.5 \text{ kg/cm}^2$ の場合の3配合の脱水量の経時変化を図一11に示す。水結合材比が小さいほど脱水速度が遅いことが分かる。図一12と図一13に、F50とF40配



図一12 間げき水圧の経時変化



図一13 間げき水圧の経時変化

合の間げき水圧の経時変化を示すが、水結合材比が小さいほど脱水境界面の進行速度も遅くなっている。

2.2.5と同様にして求めた配合別の加圧脱水特性値を表一4に示す。水結合材比が小さいほど、脱水固化層の透水係数と脱水ひずみとともに小さくなるため、脱水速度が遅くなっていることが分かる。

§ 3. 脱水膜の物性と脱水固化層の形成速度

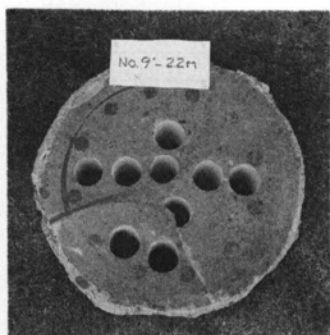
前章では、注入モルタルの加圧脱水過程をほぼ明らかにした。本章ではその結果を基にして、実際の PIP くいモルタルに生じる脱水固化過程について検討する。

3.1 脱水膜

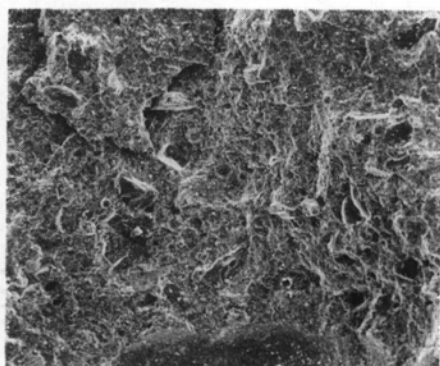
透水係数が約 2 cm/sec の砂礫層に施工した PIP くい断面を写真一1に示す。断面は、オーガ径と一致したくい体部とその外周部とに大別されている。配合分析の結果、外周部の水セメント比と空げき率はくい体部のそ

配 合	加 圧 力 p (kg/cm ²)	水結合材比 $W/(C+F)$ (%)	透水係数 $k(\times 10^{-6})$ (cm/sec)	間 げ き 比 e	脱水ひずみ ε_d	脱 水 量 曲 線 $V(\text{cm}^3) : t(\text{min})$		$\frac{(a)}{(i)}$
						(i) 計 算 式	(a) 実 験 式	
P50	4.5	33.0	5.7	0.402	0.148	$V=54.0\sqrt{t}$	$V=57.9\sqrt{t}$	1.07
F50		33.0	2.8	0.345	0.135	$V=35.3\sqrt{t}$	$V=38.3\sqrt{t}$	1.08
F45		29.7	2.0	0.356	0.134	$V=29.9\sqrt{t}$	$V=29.4\sqrt{t}$	0.98
F40		27.2	1.8	0.377	0.129	$V=27.9\sqrt{t}$	$V=25.7\sqrt{t}$	0.92

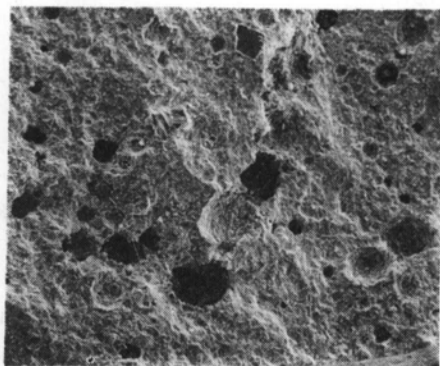
表—4 加圧脱水特性値



写真—1 PIP くい断面



写真—2 X線マイクロアナライザによる脱水膜の拡大写真（×30倍）



写真—3 X線マイクロアナライザによる PIP くい体部モルタルの拡大写真（×30倍）

これらの約 1/2 であり、緻密な組織構造となっている。両者の拡大写真を写真—2、3 に示す。外周部は PIP くい施工中に加圧脱水の結果形成されるので、以後「脱水膜」と称する。脱水膜は PIP くい脱水固化過程に大きく影響すると考えられるので、次節でその物性を代表する透水係数を把握する。

3.2 脱水膜の透水係数

脱水膜の形成過程における被圧履歴を考慮して、加圧脱水容器内に厚さ約 3 cm の脱水膜を作製して、その透水係数を測定した。実験手順の概略を図—14 に示す。

透水係数の測定は、セメントの水和反応の影響を無くするため短時間で終了すること、および Darcy の法則が適用される範囲の動水勾配を保持することを考慮して、加圧式の定水位試験方法とした。図—15 に測定方法の概略を示す。式(9)に透水係数の算出式を示す。

$$k = \frac{Vd}{At(p+w) - VL/k_1} \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 k ：脱水膜の透水係数 V ：透水量

d ：脱水膜の厚さ A ：容器内断面積

t ：透水時間 p ：加圧力

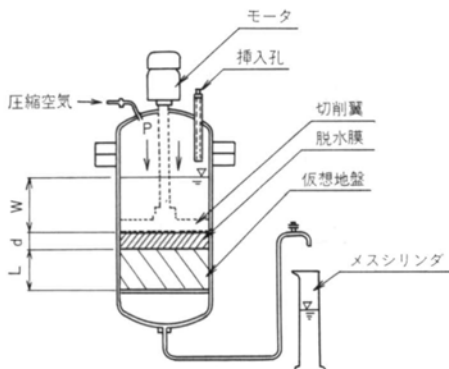
w ：投入水のヘッド圧 L ：仮想地盤の厚さ

k_1 ：仮想地盤の透水係数

4 種類の配合の実験結果を表—5 に示す。表—5 の値



図—14 脱水膜の透水係数測定手順の概略



図一15 加圧脱水容器と透水係数測定方法

配合	脱水膜の透水係数 $k (\times 10^{-6} \text{cm/sec})$
P50	3.45
F50	2.14
F45	1.48
F40	1.12

注) 加圧力 $p = 5 \text{ kg/cm}^2$
加圧時間 $t = 25 \text{ 分}$

表一5 脱水膜の透水係数

と、表一4の排水面近傍の脱水固化層の透水係数の値と比較する。加圧力は、それぞれ 5 kg/cm^2 と 4.5 kg/cm^2 でわずかしこ相違していないにもかかわらず、透水係数は脱水膜の方が小さく、両者の比率は約 $0.16 \sim 0.76$ であった。この原因は、厚さ約 3 cm の脱水膜内での圧密過程のためと考えられるが、今後詳細に検討する必要がある。

なお、脱水膜の透水係数は同一加圧力の場合、プレパクトモルタルより流動化モルタルの方が小さく、また水結合材比が小さいほど小さくなっている。この傾向は、§2の結果と同一である。

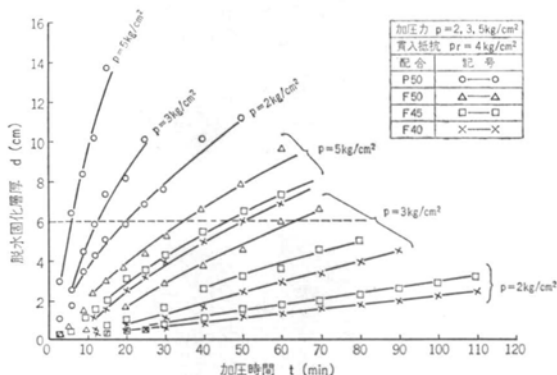
3.3 脱水固化層の形成速度

前節では、脱水膜の透水係数は脱水固化層の透水係数よりも小さいことが判明した。この結果、PIPくいの施工中にオーガの周辺に形成される脱水膜は、くい体部のモルタルの脱水固化をある程度遅延させると考えられる。そこで、脱水膜を抵抗とした場合のモルタルの脱水固化層厚の経時変化を求めて、耐力材の挿入可否判定を推定する。

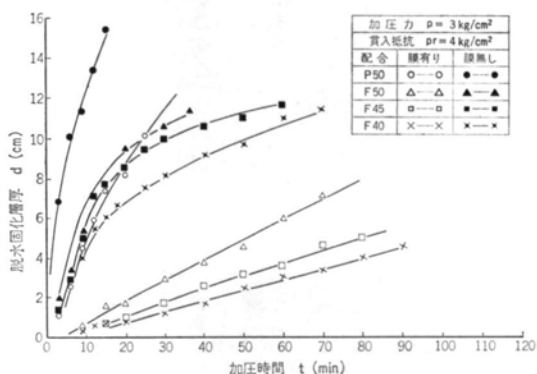
実験手順の概略を図一16に示す。脱水固化層厚は、図一15の脱水容器の挿入孔から先端の貫入抵抗 $p_r = 1 \text{ kg/cm}^2$ および $p_r = 4 \text{ kg/cm}^2$ の鉄筋棒を自重で貫入させた場合の高止り量で表示した。



図一16 脱水固化層厚測定手順の概略



図一17 脱水固化層厚の経時変化



図一18 脱水固化層厚の経時変化

注入モルタル4種類の配合について、加圧力 $p = 2, 3, 5 \text{ kg/cm}^2$ 、貫入抵抗 $p_r = 4 \text{ kg/cm}^2$ の場合の脱水固化層厚の経時変化を図一17に示す。いずれの配合も、当然のことながら加圧力が高いほど固化層厚の形成が速くなっている。また、その速さはプレパクトモルタルより流動化モルタルの方が遅く、水結合材比が小さいほど遅くなっている。図一17から、流動化モルタルはプレパクトモルタルに比較して同一加圧力時における脱水固化層

厚が $d = 6\text{ cm}$ に達するまでの時間が約6～10倍に遅延できると分かる。

脱水膜の有無についての比較データを図-18に示す。図中「脱水膜無し」とは、脱水容器内に作製した仮想地盤の上に直接フレッシュモルタルを投入して加圧脱水を行なったときの値である。それらの曲線を脱水膜の厚さである3 cm 分だけ原点を移動させて、「脱水膜有り」の場合の曲線と比較しても、脱水膜が存在したときの方が脱水固化層厚の進行が遅いことが分かる。このことは、3.2で記述したように脱水固化層の下部3 cm 部分の透水係数よりも脱水膜の透水係数の方が小さいことにより説明できるとともに、脱水膜は PIP くい体内部のモルタルの脱水固化を遅延させるという推論が正しかったことを示している。

3.4 耐力材の挿入可能深度の推定

本節では、以上の実験結果を基にして、耐力材である鉄筋かごの挿入可能深度の推定を行なう。

PIP くいにおけるモルタルの脱水固化過程は次のように考えられる。所定深度までオーガで削孔した後、オーガ先端から注入されたモルタルはその自重と周辺の地下水圧との圧力差により、くい周辺部より徐々に脱水されてゆく。その脱水固化層がオーガの外径部まで到達すると、回転しているオーガにより脱水固化層が切削されて、その結果オーガの外周部に脱水膜が形成される。その後オーガの引き上げ開始時から、くい体部のモルタルの脱水固化層が周辺部から中心に向かって進行してくる。

この際鉄筋かごの挿入可否判定は、オーガの引き上げ開始時から鉄筋かごの挿入完了までの時間 t_1 と、鉄筋かごの先端支圧力以上の抵抗を有するモルタルの脱水固化層が鉄筋かごのかぶりまでに到達するまでの時間 t_2 とを比較することにより判定可能と考えられる。 t_1 はくいの仕様、施工機械、地盤条件により過去の実績データから定められる。また、 t_2 は注入モルタルの配合、鉄筋かごの形状寸法から求まる貫入抵抗 p_r 、注入モルタルの自重と地下水位との圧力差から定まる加圧力 p 、および鉄筋のかぶり d をパラメータとして室内実験データから定められる。

図-19に t_1 と t_2 の関係を示す。 t_1 は施工実績23例から求めた値を示した。 t_2 は鉄筋かごのかぶり $d = 6\text{ cm}$ の場合、つまり脱水固化層厚が6 cmに到達するまでの加圧時間を、モルタルの配合、貫入抵抗 p_r 、加圧力 p 別に図-17などから求めた。なお、くい長の表示は、地下水位が G.L. -5 m にあると仮定した場合のくい先端の圧力差と加圧力とが等値になるよう算出した。

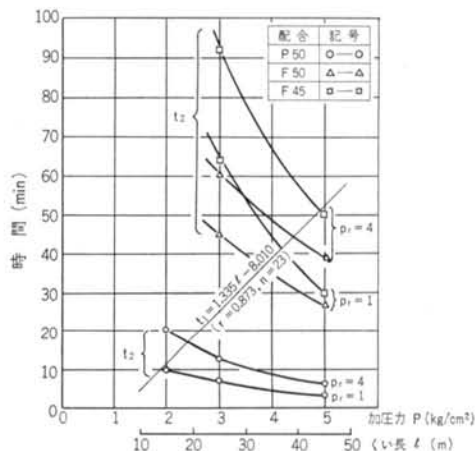


図-19 t_1 と t_2 との関係

ここで、鉄筋かごの挿入可能深度を推定してみると、図-19において $t_1 < t_2$ であれば鉄筋かごは挿入可能と判定されるので、P50配合のプレパクトモルタルの場合は約20m、F50、F45配合の流動化モルタルの場合は35～40mが挿入可能深度となる。つまり、かぶりが6 cmで一般的な施工条件の PIP くいを施工する際、くい長が20m以上の場合は流動化モルタルを使用することが望ましいという結論が得られる。

§ 4. おわりに

注入モルタルの加圧脱水特性を定量的に把握する目的で、数種の脱水実験を行なった。その結果得られた主な結論を要約すると、以下のようになる。

(1) 注入モルタルの加圧脱水過程は、圧密を含めた濾過過程とみなせる。また、その脱水過程には液状粘土の加圧脱水理論がほぼ適用できる。

(2) 注入モルタルの加圧脱水において、排水面に最初に形成される脱水固化層の透水係数と間げき比を測定すれば、加圧脱水理論式により脱水量曲線が算出できる。

(3) 透水係数の大きな地盤に施工した PIP くいの周辺部には脱水膜が存在する。脱水膜は、加圧脱水されたくい体部のモルタルよりも緻密な組織構造になっており、透水係数も小さい。そのため、くい体内部のモルタルの脱水固化層の形成速度を遅延させる。

(4) PIP くに通常使用しているプレパクトモルタルに比較して、高性能減水剤を使用した流動化モルタルを使用すれば、脱水固化層の形成速度を6～10倍程度遅延させることができる。その程度は、水結合材比が小さいほど大きい。その理由は、脱水膜と脱水固化層の透水係数お

よび脱水ひずみが小さくなるためである。

(5) 注入モルタルの配合、加圧力、鉄筋かごの貫入抵抗をパラメータとして脱水固化速度を測定した。そのデータを基にして、鉄筋かごの挿入可能深度を推定すると、プレパクトモルタルを使用した場合約20mとなる。つまり、くい長が20m以上となる場合には流動化モルタルを使用することが望ましい。

以上述べたように、本報では PIP くい注入モルタ

ルに生じる脱水固化過程を定量的に検討し、鉄筋かごの挿入可能深度を推定した。この挿入可能深度と現場での施工実験で得られた挿入深度の結果とは、比較的良好な相関が得られることが確認されている。しかし、挿入可能深度の推定には鉄筋かごの施工精度、注入モルタルの温度などの影響もあるので、今後さらに研究を進めていく必要があると考えられる。

＜参考文献＞

- 1) P. C. Carman: "Fundamental Principles of Industrial Filtration" Trans. Institution of Chemical Engineers, Vol. 16 (1938)
- 2) 土木学会編: "水理公式集(昭和60年版)" p. 458
- 3) 今井五郎: "液状粘土の一次元圧密特性に関する基礎的研究" 東京大学学位論文 pp. 412~524
- 4) W. Czernin: "建設技術者のためのセメントコンクリート化学" 技報堂 pp. 53~58
- 5) 岩崎訓明: "プレパックドコンクリートの施工方法に関する基礎的研究" 土木学会論文集 第98号(昭和38年10月) pp. 26~40
- 6) 新見芳男, 岡田武二, 堀口 寛: "深水中で施工するプレパクトコンクリートに関する基礎実験" 清水建設研究所報 第10号(昭和42年10月)