

コンクリートの水密性の研究

正員 村 田 二 郎*

要 旨 本文は、コンクリートの透水試験の一方法を考案し、その信頼度を検討した結果、入念に打込み締固めた場合におけるコンクリートの水密性を試験するための満足な方法であることが確かめられたので、この試験方法を用い、コンクリートの水密性について基礎的に研究した結果を述べたものである。すなわち、セメント、骨材および混和材料の種類、コンクリートの配合、供試体の材令および養生方法がコンクリートの水密性におよぼす影響、マス コンクリートの水密性および新旧コンクリートの打継目の水密性について実験した結果を述べ、かつ、これらの実験結果をもととして水密性を必要とするコンクリート部材の設計に関する一提案をしたものである。

1. 緒 言

コンクリートまたは鉄筋コンクリート構造物がしけったり、これから水がもれたりしないものであることは地下室、水槽などの場合に必要であるばかりでなく、構造物を耐久的にすること、衛生的にすること、エフロレンスを防ぐことなどのためにも大切である。

また、海水、酸、アルカリ、凍結融解などのためにコンクリートが腐食されるおもな原因の一つは水密性の不足による場合が多い。

コンクリートまたは鉄筋コンクリート構造物を水密的にするためには、必要に応じて防水工、防湿工などを施すことがあるが、コンクリート自体を水密にすることが最もよい方法である。

構造物の水密性は、従来いわれているように、用いるコンクリートの品質よりも工事現場におけるコンクリートの打込み締固めなどの施工の良否に大きい関係のあるものであるが、コンクリートの材料、配合、養生方法などによってもコンクリートの水密性にかなりの差異が生ずるのであり、これらの間の大体的関係は今日までの研究によって示されている。

すなわち、吉越盛次¹⁾、McMillan, F. R.²⁾、Norton, P. T.³⁾、Ruetters⁴⁾、Cook, H. K.⁵⁾、Vuorinen, J.⁶⁾、Nycander, P.⁷⁾、Powers, T. C.⁸⁾の諸氏はコンクリートまたはセメントペーストの水密性に関し有益な論文を発表している。

しかし、これらの研究の大部分はアウト プット方法によって試験を行なっている。アウト プット方法は一定の圧力のもとで供試体に加えた水が単位時間に単位面

積から流出する量をはかり、圧力と流出した水量との関係からコンクリートの透水性を求めるものであって、透水の解析は容易であるが、比較的密度の高い長期材令のコンクリートの場合には、試験にはなほだしく長時日を要するばかりでなく、流出量が得られず試験できない場合が多い。このため、粗骨材の最大寸法を特に大きくしたコンクリートの場合を除いて、初期材令における試験に限られるか、または供試体の厚さをごく薄くして試験を行なったものが多く、なお十分でない点があると思われる。特に長期材令におけるコンクリートの水密性、マス コンクリートの水密性、新旧コンクリートの打継目の水密性、水密性をもとしたコンクリートの配合および厚さの設計方法などまだ研究すべき点が相当に多い。

そこで、筆者はまず十分に養生したコンクリートにも適用できる透水試験方法について研究した。すなわち、供試体に圧入した水の平均浸透深さを測定し、これと水圧の大きさおよび水圧を加えた時間との関係を理論的実験的に研究し、これらの関係から得られる拡散係数をコンクリートの水密性の尺度とする浸透深さ試験方法を考案した。そしてこの試験方法の信頼度を検討した結果、長期材令のコンクリートの場合も短時日で試験でき、試験誤差も比較的少なく、プラスチックなコンクリートを入念に打込み締固めた場合におけるコンクリートの水密性を試験するための満足な方法であることが確かめられたので、この試験方法を用いて次の諸点について研究したのである。

重力ダムに用いるコンクリートは水密性の大きいことが大切であって、従来 マス コンクリートの水密性について多くの貴重な研究がある。しかし、これらの研究の多くは試験装置 その他の都合から、マス コンクリートから 60 mm 程度以上の粒を除いたコンクリートについて実験したものであり、このような試験方法によって得られた透水試験の結果から マス コンクリートの水密性を論ずることの可否について検討したものはほとんどない。

筆者は マス コンクリートの水密性とこれから大粒の粗骨材をふるい去ったコンクリートの水密性との関係について実験し、大粒の粗骨材を除いたコンクリートについて透水試験を行なっても、その試験結果から入念に打込み締固めた場合における マス コンクリートの水密性をある程度推定できることを確かめ、このような試験方法によって、AE 剤、セメント分散剤およびフライアッシュの使用が マス コンクリートの水密性におよぼす影

* 東京都立大学助教授 工学部土木工学科

響、打込み時のコンクリートの温度および養生温度がマスコンクリートの水密性におよぼす影響について研究した。これはマスコンクリートにおいては、温度ひびわれの発生を防ぐために、これらの混和材料を用いて単位セメント量を少なくすること、打込み時および硬化後のコンクリートの温度をなるべく低く保つことが必要であって、このようにして造ったマスコンクリートの水密性を検討したのである。

次に、構造物からのろう水は新旧コンクリートの打継目の施工の不備による場合が非常に多いのであって、水密打継目の施工方法の研究はきわめて重要である。浸透深さ試験を用いれば打継目の水密性を容易に試験できることが確かめられたので、この試験方法によって打継目の各種施工方法と水平および鉛直打継目の水密性との関係を数量的に示し、水密的な打継目を造るための施工方法について論じた。

その他、セメント、骨材および混和材料の種類、コンクリートの配合、供試体の材合および養生方法などが水密性におよぼす影響を明瞭に示し、水密コンクリートを造るための施工方法を論ずるとともに、浸透深さ試験によってコンクリートの配合および厚さと水密性との関係のある程度示しうることから、これらの試験結果を用いて水密性から必要なコンクリートの配合および厚さの大体のめやすを与える方法を述べ、水密性を必要とするコンクリート部材の設計に関する一方法を提案した。

本文は、以上の諸点について、昭和30年1月より昭和35年11月までの間に山梨大学工学部土木工学科教室において研究した結果を取りまとめたものである。

本研究の実施に当っては、文部省より科学研究費交付金を受け、国分正胤先生より終始懇篤な御指導を賜わり、また故吉田徳次郎先生よりはしばしば貴重な御指示、御教訓を賜わった。ここに謹んで厚く御礼申上げる。

2. 使用材料

実験に用いたセメントは、主として日本セメントKK西多摩工場製の普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントである。セメントの種類とコンクリートの水密性との関係を検討するための実験においては、早強ポルトランドセメント、シリカセメントおよび高炉セメントも用いた。これらのセメントの試験成績は表-1のようであった。また、セメントの粉末度とコンクリートの水密性との関係を研究するために、同一のクリンカーを粉砕して製造した粉末度の相違するセメントを用いた。表-2は粉末度の相違するセメントの

表-1 用いたセメントの試験成績 (1)

セメントの種類	比重	粉末度 ブレン (cm ² /g)	凝 結		安定性 (煮沸 法)	フロー (mm)	曲げ強さ(kg/cm ²)			圧縮強さ(kg/cm ²)		
			始発 (時分)	終結 (時分)			3日	7日	28日	3日	7日	28日
普通セメント	3.15	2980	2-20	4-0	良	214	32.1	47.1	68.3	125	213	360
中庸熱セメント	3.19	3050	2-15	4-10	良	243	20.9	31.9	64.0	76.3	130	347
早強セメント	3.14	4010	2-10	3-30	良	218	41.3	54.0	65.1	241	311	445
シリカセメント	3.05	4040	2-20	4-10	良	199	29.6	41.6	55.6	121	202	308
高炉セメント	3.06	3960	2-40	4-25	良	189	28.8	35.6	57.2	125	183	333

表-2 用いたセメントの試験成績 (2)

(同一のクリンカーを粉砕して製造した粉末度の相違するセメント)

粉末度 ブレン (cm ² /g)	比重	凝 結		安定性 (煮沸 法)	フロー (mm)	曲げ強さ(kg/cm ²)			圧縮強さ(kg/cm ²)			
		始発 (時分)	終結 (時分)			3日	7日	28日	3日	7日	28日	
3980	3.14	2-0	3-40	良		203	34.5	44.0	57.8	143	212	400
2990	3.14	2-10	4-5	良		205	30.9	38.6	61.0	109	174	348
2510	3.15	2-50	5-20	良		189	25.9	36.4	56.0	93.9	147	288

試験成績である。

砂は山梨県御勅使川産のもので、その比重は2.65、吸水量は1.72%である。

表-3 用いた砂の粒度

ふるい目 (mm)	通過百分率
5	100
2.5	85.4
1.2	64.2
0.6	38.2
0.3	14.7
0.15	4.6
洗い試験で失われる量(%)	1.22
粗粒率	2.93

砂の使用に当っては、室内乾燥状態としたものをふるい分け、所定の割合に配合し、表面乾燥飽和状態となるに必要な水量を加えてよくかき混ぜ約15分間放置した後用いた。砂の粒度は表-3に示すようである。

砂利は御勅使川産のもので、その比重は2.66、吸水量は1.31%であり、あらかじめふるい分けたものを表-4の粒度に配合し、表面乾燥飽和状態として用いた。

表-4 用いた砂利の粒度

ふるい目 (mm)	通 過 百 分 率			
	最大寸法 100 mm	最大寸法 80 mm	最大寸法 40 mm	最大寸法 25 mm
150	100	100	100	100
100	100	100	100	100
80	85	100	100	100
60	70	85	100	100
50	60	75	100	100
40	50	65	100	100
25	30	40	70	100
15	15	25	40	50
10	5	10	15	25
5	0	0	0	0
粗粒率	8.38	7.93	7.31	6.52

また、粗骨材の形状がコンクリートの水密性におよぼす影響を研究するために用いた砂利および砕石は、山梨県釜無川産の砂利と、これと同じ採取場から産出する玉石を破砕して製造した砕石であって、これらの比重は2.65、吸水量は1.58%であった。

用いたAE剤はビンゾールおよび国産AE剤(日本曹

達KK製)であって、それぞれ1% および0.1% 溶液としたものを練り混ぜ水に混ぜて用いた。セメント分散剤はポゾリス No.8 である。

フライアッシュは日本セメントKK東電フライアッシュ千葉工場製のもので、その試験成績は表-5 のようであった。

表-5 用いたフライアッシュの試験成績

比重	粉末度 フレン (cm ² /g)	所要水量比 (%)	圧縮強度比 (%)	
			7日	28日
2.20	3560	91	92	121

3. 浸透深さ試験方法について

(1) 供試体の製造

供試体の形状は直径と高さがほぼ等しい円柱形とし、その直径は粗骨材の最大寸法を25mm 以下、40mm および80mm とした場合、それぞれ15cm, 20cm および30cm とした。これは表-10 に示してある供試体の寸法と試験誤差との関係についての実験結果から、供試体の直径は試験誤差をなるべく小さくするため、用いる粗骨材の最大寸法の5倍程度以上とするのが適当と考えたからである。

これらの供試体を製造するに当っては、直径15cm, 高さ30cm および直径20cm, 高さ40cm の圧縮強度試験用型わくおよび直径30cm, 高さ30cm の円筒形型わくを用い、コンクリートを2層または3層にわけて、そ

れぞれ所定の高さまで詰めた。コンクリートの締固めはすべて手突きとし、各層を標準の突き棒で、供試体の直径が15cm, 20cm および30cm の場合、それぞれ25回, 45回および100回、均等に突き固めた。

8. に述べるマス コンクリートの実験では、粗骨材の最大寸法を100mm としたコンクリートを用いたが、適当な型わくを入手できなかったため、直径30cm, 高さ30cm の円筒形型わくを用いた。この場合は、コンクリートを2層に詰め、各層を振動棒の直径が約2.5cm の小型内部振動機を用いて適度に締固めた。

(2) 浸透深さ試験方法

供試体を所定期間水中で養生した後、金剛砂を用いて供試体の両端面を清浄平滑に仕上げ、ワイヤブラシを用い側面の油類を取り除き、供試体の直径が15cm, 20cm および30cm の場合、それぞれ7日, 10日および14日間約20~25°C の室内において乾かした。供試体を乾かす期間は水の浸透部の明瞭度および浸透深さに影響をおよぼすのであって、表-6 の実験結果から、試験値に影響をおよぼさない範囲内でなるべく水の浸透部が明瞭に認められるように定めたのである。

乾燥期間中約20~25°C に保った供試体の側面に、あらかじめ溶融したパラフィンとロジンの1:1混合物を塗布し、打込んだときの供試体の底面を上にして試験機のコンテナに設置した。供試体の温度を20°C 以上としておくことは、パラフィンロジンの混合物との密着をよくし、接着部からのろう水を防ぐためにぜひ必要であ

表-6 試験前に供試体を乾かす期間が平均浸透深さおよび浸透部の明瞭度におよぼす影響

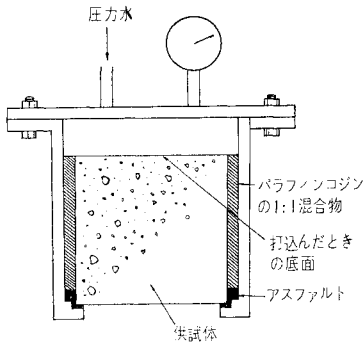
コンクリートの配合					スランプ (cm)	試験水圧 (kg/cm ²)	試験時間 (hr)	乾かす 期間 (日)	平均浸透 深さ (cm)	供試体の 重量減 (%)	浸透部の明瞭度	供試体の形 状および寸 法			
粗骨材の 最大寸法 (mm)	単位セ メント量 (kg)	単位水量 (kg)	水セ メント比 (%)	細骨材率 (%)											
25	302	166	55	42	8	10	48	1	1.9 2.1 2.3 2.0	2.1	0.36 0.45 0.28 0.27	0.34	断面全体にわたって、 不明瞭であって、浸透 部を確認することかき わめて困難であった	φ15×15cm 円柱形	
								3	2.0 2.0 1.7 3.0	2.2	0.60 0.68 0.75 0.89	0.73			部分的に不明瞭な箇所 があった
								7	2.3 2.0 1.8 2.2	2.1	1.14 1.02 1.04 1.29	1.12			大体明瞭であって浸透 部を確認できた
								14	2.8 2.8 3.4 2.5	2.9	1.40 1.47 1.73 1.63	1.56			明瞭であった
40	269	156	58	38	8.5	20	48	3	3.9 3.7 3.5 3.1	3.6	0.29 0.40 0.53 0.57	0.45	断面全体にわたって不 明瞭な供試体が多かっ た	φ20×20cm 円柱形	
								7	3.5 4.2 4.4 3.5	3.9	0.63 0.68 0.96 0.84	0.78			部分的に不明瞭な箇所 があった
								10	3.5 3.1 5.0 3.6	3.8	0.97 1.09 1.10 1.19	1.09			大体明瞭であって浸透 部を確認できた
								14	4.6 4.1 4.1 4.2	4.3	1.05 1.08 1.38 1.27	1.20			明瞭であった

供試体の材令は28日とした。
 試験時における平均水温は、粗骨材の最大寸法を25mm および40mm とした場合、それぞれ25.5~26.5°C および24.0~26.5°C であった。

る。

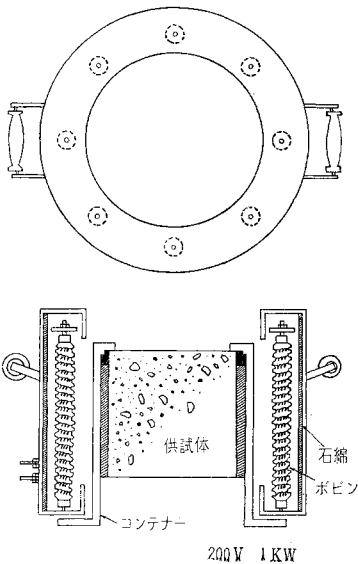
図-1 に示すように、供試体とコンテナとの間げきにまず底部約 1cm の厚さまでアスファルトを流し込み、その上にパラフィン ロジンの混合物を詰めて水密

図-1 供試体の設置



におよびアスファルトを用いると、アスファルト中の油が水中に混じる恐れがあることなどのためである。

図-2 円筒形ヒーター



印画上で、断面の全面積および水の浸透部の面積をプランメーターを用いて測定し、平均浸透深さを求め、次式を用いてコンクリートの拡散係数を計算した。

$$\beta_i^2 = \alpha \frac{\mu}{\mu_{20}} \frac{D_m^2}{4t\epsilon^2} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 β_i^2 : コンクリートの拡散係数 (cm²/sec)

D_m : 平均浸透深さ (cm)

t : 水圧を加えた時間 (sec)

μ, μ_{20} : それぞれ試験時温度および 20°C における水の粘性係数 (g/cm²sec)

α : 換算係数

ϵ : (14) 式の積分下限の値

(3) コンクリートの拡散係数

(2) の (1) 式は、次のようにして得られたものである。

a) コンクリート中の水の流れ 比較的高密度の空げき体に相当な圧力で水を圧入する場合、空げき体内の水の流れ方は熱の伝導に類似のもの、すなわち、拡散流れと考えられている。従って、一次元の流れについて考えれば、次の拡散流れの圧力に関する基礎方程式が成立する。

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \beta^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \dots\dots\dots(2)$$

ここに β^2 : 拡散係数

ただし (2) 式において、拡散係数 β^2 が $\partial p/\partial t$ にくらべて、十分大きく $\partial^2 p/\partial x^2 = 0$ とみなされる場合は、圧力の分布が場所的に直線変化となっていわゆるダルシー流れとみなすことができる。よってまずコンクリートの拡散係数 β^2 の値について検討した。

今、一様な断面を有するコンクリート供試体の側面を水密に保ち、一端面から水を圧入する場合を考える。

コンクリート中の水の流れはダルシーの法則に従うものとする。一次元の流れに対するダルシーの法則は次式で与えられる。

$$u = -\frac{k}{w_0} \frac{\partial p}{\partial x} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 u : 流速、 k : 透水係数、 w_0 : 水の単位重量

図-3

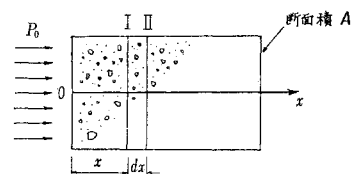


図-3 のように、供試体内に微小距離はなれた 2 断面 I, II を考えると

断面 I から dt 時間に流入する水量:

$$Q_i = u(x)Adt$$

断面 II から dt 時間に流出する水量:

$$Q_o = u(x+dx)Adt$$

$$\Delta Q = Q_i - Q_o = -\frac{\partial u}{\partial x} dx Adt \dots\dots\dots(4)$$

(4) 式は I, II 断面間の水の増加量を示すのであって、これは I, II 断面間の水およびコンクリート (空げきを除いたコンクリートの実体部) の収縮量の和にひとしい。

$$\Delta Q = \Delta Q_w + \Delta Q_c \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 ΔQ_w : 水の収縮量、 ΔQ_c : コンクリートの実体部の収縮量

また、水およびコンクリートが圧縮されたのは、I, II 断面間において、圧力 p が dt 時間に dp だけ増加したためと考える。

コンクリートの空げき率を v 、水およびコンクリート

の実体部の圧縮率をそれぞれ E_w, E_c とすれば

$$dp = E_w \frac{\Delta Q_w}{v \Delta x} = E_c \frac{\Delta Q_c}{(1-v) \Delta x} \dots\dots\dots (6)$$

また、水とコンクリートとを共通に考えた場合の圧縮率を E とすれば

$$dp = E \frac{\Delta Q}{\Delta x} \dots\dots\dots (7)$$

(5), (6) および (7) 式より

$$E = \frac{1}{\frac{v}{E_w} + \frac{1-v}{E_c}} \dots\dots\dots (8)$$

$$\therefore dp = \frac{1}{\frac{v}{E_w} + \frac{1-v}{E_c}} \frac{\Delta Q}{\Delta x}$$

$dp = \frac{\partial p}{\partial t} dt$ および (4), (3) 式を代入することによって

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{\frac{v}{E_w} + \frac{1-v}{E_c}} \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$= \frac{k}{w_0 \left(\frac{v}{E_w} + \frac{1-v}{E_c} \right)} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \dots\dots\dots (9)$$

従って、拡散係数 β^2 は次式で与えられる。

$$\beta^2 = \frac{k}{w_0 \left(\frac{v}{E_w} + \frac{1-v}{E_c} \right)} \dots\dots\dots (10)$$

または

$$\beta^2 = \frac{kE}{w_0} \dots\dots\dots (11)$$

β^2 の数値を計算するに当っては、空げきを除いたコンクリートの実体部の圧縮率 E_c は不明であるから、(10) 式を用いることはできない。しかし、コンクリートに加える水圧が 20 kg/cm^2 程度以下の場合には、(11) 式の圧縮率 E は通常の方法で試験したコンクリートの初期弾性係数とポアソン比とを用いて計算した体積弾性係数に近似のものと仮定し、(11) 式を用いて β^2 の概略の値を計算することができる。これは、 β^2 の数値そのものでなく、大体のオーダーを知るのが目的であるから、このように仮定して差し支えないものと思われる。

表-7 は (11) 式を用いて計算した β^2 の大体の範囲を示すものである。

表-7 コンクリートにおける β^2 の範囲

コンクリートの透水係数 ⁽¹⁾ k (cm/sec)	コンクリートと水とを共通に考えた場合の圧縮率 E (g/cm ²)	水の単位重量 w_0 (g/cm ³)	コンクリートの拡散係数 β^2 (cm ² /sec)
$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^8 \sim 2.4 \times 10^8$	1	$1 \sim 1 \times 10^{-4}$

次に、 $\partial p / \partial t$ の値は表-8の実験結果を用いて計算した。

表-8 はモルタルおよび粗骨材の最大寸法を 25 mm としたコンクリートを用い、試験水圧を $5 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$

表-8 水圧を加えた時間と平均浸透深さとの関係

モルタルまたはコンクリートの配合						平均浸透深さ: D_m (cm)										$D_m = \frac{Kt^{1/2}}{m}$ といふときの "m" の値							
粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント量 (kg)	単位水量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スラブ厚 (cm)	試験時間: t (hr)																	
						試験水圧 (kg/cm ²)	平均水温 (°C)	6	16	24	48	72	116	216	312								
5	458	243	53	3.54	3.5	28日	20	5	0.29	0.88	1.04	1.36	1.00	1.43	1.22	—	—	3.5					
								15	0.69	0.91	1.18	1.04	1.56	1.20									
								70	0.54	0.71	0.93	1.35	0.87	1.05									
								0.49	0.49	0.99	0.95	—	1.18										
								10	0.79	0.79	1.58	1.46	1.87	1.62									
								16	0.72	1.04	1.24	1.29	1.33	1.33					1.32	1.69	1.70	—	—
20	0.82	1.13	0.99	1.28	1.23	1.33	1.76	1.82	1.88	2.11	—	—	3.4										
14	0.75	—	1.17	1.55	1.56	1.56	—	—	—														
20	0.95	0.86	1.25	1.35	1.40	1.53	1.89	1.85	2.21	2.15	2.51	—	—	—	—	—	—						
20	0.92	1.11	1.20	1.42	1.67	1.53	1.95	1.98	2.51	—	—	—	—	—	—	—	—						
20	21	—	—	—	—	—	—	—	1.72	1.74	—	—	—	—	—	—	—	—					
20	21	—	—	—	—	—	—	—	1.69	1.74	—	—	—	—	—	—	—	—					
20	21	—	—	—	—	—	—	—	1.81	1.74	—	—	—	—	—	—	—	—					
25	371	167	45	40	7.5	28日	20	20	0.90	1.27	1.52	2.28	2.23	2.48	2.43	—	—	3.5					
								20	1.28	1.08	1.48	2.03	1.92	2.07					2.16	2.24			
								20	1.05	0.97	1.31	1.87	2.18	2.18					2.24	2.24			
								20	1.15	1.81	1.97	2.46	3.03	2.81					—	—			
								20	1.17	1.91	2.21	2.46	2.84	2.79					—	—			
								20	1.19	1.69	1.82	2.02	2.55	2.42					2.92	2.90	3.25	3.05	—
20	1.77	1.87	1.98	2.23	3.22	3.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—							
25	274	170	62	43	11	28日	10	13	1.19	2.72	2.33	2.50	3.29	3.70	3.72	—	—	—	3.5				
13	1.65	1.87	2.17	2.17	2.85	3.09	3.17	3.70															
1.89	1.54	1.92	2.03	2.16	2.85	2.83	2.94	3.17	3.70														
1.63	2.23	2.12	3.06	3.36	3.75	—	—	—	—														
20	—	—	—	5.13	5.89	—	—	—	—														
20	—	—	—	5.26	5.48	5.30	6.05	6.26	—	—	—	—	—	—						—	—	—	—
20	—	—	—	4.25	5.35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
20	—	—	—	4.98	5.26	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
*296	163	55	42	7	28日	5	20	2.23	—	3.14	3.72	4.37	5.12	4.72	—	—	—	3.7					
							20	1.63	2.80	2.84	3.89	3.07	3.30						3.65	3.40	3.97	4.62	
							20	2.01	3.09	2.39	3.39	3.07	3.30						3.65	4.25	3.78	—	—
							20	2.23	2.62	2.88	3.30	3.30	3.86						—	—	—	—	—
							20	—	—	—	—	—	—						—	—	—	—	—
							20	—	—	—	—	—	—						—	—	—	—	—

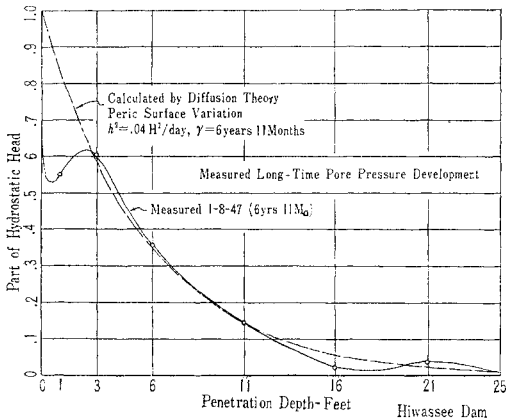
備考 供試体の寸法は、直径 15 cm 、高さ 15 cm の円柱形とした。供試体の養生は約 21°C の水中とした。ただし、*印の供試体は材令 7 日まで水中養生し以後 $24 \sim 26^\circ \text{C}$ の室内に放置した。

とし、水圧を加えてからの経過時間を 6~312 時間に变化させた場合の平均浸透深さの増加状況を示すものであって、 $\partial p/\partial t$ を計算するに当っては、供試体内の水圧分布を場所的に直線変化と仮定した。このように仮定しても $\partial p/\partial t$ の大体のオーダーを知ることはできるものと思われる。

表-8 から計算した $\partial p/\partial t$ の値は $1.6 \times 10^{-1} \text{ g/cm}^2/\text{sec} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^2/\text{sec}$ であって、表-8 の実験に用いたコンクリートは粗骨材の最大寸法が 25 mm 以下のものであるから、これらのコンクリートの β^2 の値は、一般に表-7 に示した範囲のうち $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ に近いものである。従って、 $1/\beta^2$ は $\partial p/\partial t$ にくらべて無視できない値を有するのである。

また、米国の Hiwassee ダムにおいて、ダム内に上流面から 1~60.8 ft の間に 16 個の圧力計を埋め込み、ダム内に浸透した水の圧力を 15 年間にわたって測定した。Hornby, P.L. 氏はこれらの実測値がコンクリート中の水の流れを拡散流れとして計算した圧力の値とよく一致すると述べている⁹⁾。図-4 は貯水してから 6 年 11 箇月後におけるダム内の水圧の実測値と計算値とを示すものである。

図-4 コンクリート ダム内の水圧の実測値と計算値との関係



以上のことから、相当の圧力でコンクリート中に圧入された水の流れは一般に拡散流れに近いものと考えることができる。

なお、長さ l の供試体について、図-3 に示すように原点を水圧を加える端面にとり、 x 軸を水の流れの方向にとって

初期条件 $p(x, 0) = 0$

境界条件 $p(0, t) = P_0$ …… 加えた水圧

$p(l, t) = 0$ …… 水の浸透部先端における水圧

のもとに (2) 式をとけば、次の解が得られる。

$$p(x, t) = P_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right)$$

$$-P_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \left(\sin \frac{n\pi x}{l} \right) e^{-\frac{n^2 \pi^2 \beta^2 t}{l^2}} \dots (12)$$

(12) 式は、 β^2 または t が十分大きい場合、または l が十分小さい場合は $p(x, t)$ が場所的に直線変化となり、ダルシー流れとなることを示すものである。すなわち、コンクリート中に圧入された水の流れは一般に拡散流れに近いものと考えられるが、非常に空けきの多いコンクリートまたは水圧を加えてからの経過時間を非常に長くした場合、供試体の厚さをごく薄くした場合にはダルシー流れと見なすことができるものと思われる。

b) コンクリートの拡散係数 供試体に圧入した水の浸透深さを測定することによって、コンクリートの拡散係数は、次式から得られる。

$$p(x, t) = P_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\beta\sqrt{t}} \right) = \frac{2P_0}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{x}{2\beta\sqrt{t}}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \dots (13)$$

(13) 式は、供試体の長さを無限長とし、初期条件 $p(x, 0) = 0$ 、境界条件 $p(0, t) = P_0$ 、 $p(\infty, t) = 0$ のもとに (2) 式をといた解である。これを用いることとしたのは、拡散係数 β^2 を (12) 式から求めるのが合理的であるが、(12) 式を用いて β^2 を計算することが非常に困難であるのに対し、(13) 式の余誤差関数は正規分布表を利用して容易に求められ、 β^2 の計算にはなほ便利であるからである。

今、水の平均浸透深さを D_m 、 $x = D_m$ における水圧を P_f とすれば

$$P_f = \frac{2P_0}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{D_m}{2\beta\sqrt{t}}}^{\infty} e^{-\lambda^2} d\lambda \dots (14)$$

P_f の値を適当に選定すれば、(14) 式から拡散係数 β^2 を求めることができる。

表-9 は、モルタルおよび粗骨材の最大寸法を 25 mm および 40 mm としたコンクリートを用い、試験水圧を 5~20 kg/cm² に相違させた場合の試験水圧と平均浸透深さとの関係を示すものであって、試験水圧が 5~20 kg/cm² の範囲内では (14) 式における P_f を 1 kg/cm² とすれば、(14) 式から計算される D_m と P_0 との関係が表-9 の実験結果とほぼ一致する。

よって $P_f = 1 \text{ kg/cm}^2$ とした場合の $\frac{D_m}{2\beta\sqrt{t}} = \xi$ とかけば、

$$\beta^2 = \frac{D_m^2}{4t\xi^2} \dots (15)$$

このように、 P_f の値は、これを実験的に定めたのであるが、 P_f の値の 10% の差異が拡散係数試験値におよぼす影響は、試験水圧が 5~20 kg/cm² の範囲内では約 4~9% に過ぎない。

次に、表-8 に、コンクリートにおいては水圧を加えてからの経過時間ともなう D_m の増加状況が $t^{1/2}$ に比

表一9 試験水圧と平均浸透深さとの関係

モルタルまたはコンクリートの配合										平均浸透深さ : D_m (cm)			
粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント量 (kg)	単位水量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	砂セメント比	スランブ (cm)	材令 (日)	試験時間 (hr)	平均水温 (°C)	試験水圧 : P_0 (kg/cm ²)			
										5	10	20	
5	414	240	58		4.02	4	28	48	20	1.03	1.62	2.00	
										1.15	1.57	2.01	
										1.09	1.54	1.96	
										(0.71)	(1.00)	(1.27)	
										1.00	1.60	1.83	
		387	240	62		4.36	2.5	28	48	20	1.65	1.93	3.17
											1.53	1.87	3.15
											1.84	2.08	2.92
											(0.82)	(1.00)	(1.40)
										1.82	2.16	2.58	
												2.77	
	↑									0.54	0.74	0.86	
										(0.73)	(1.00)	(1.16)	
										0.71	0.99	1.21	
										(0.72)	(1.00)	(1.22)	
	458	243	53		3.54	3.5	28	48	20	1.04	1.29	1.29	
										(0.81)	(1.00)	(1.00)	
										1.16	1.33	1.53	
										(0.87)	(1.00)	(1.15)	
										1.14	1.62	1.85	
										(0.70)	(1.00)	(1.14)	
										1.22	1.70	2.11	
										(0.72)	(1.00)	(1.24)	
25	296	163	55	42		7	28	48	20	1.50	2.10	2.55	
										1.40	2.01	2.47	
											1.41	2.37	2.84
											1.52	(1.00)	2.83
											1.43	1.90	2.81
											(0.64)	2.91	3.49
											1.85	2.91	3.49
		*296	163	55	42		7	28	48	20	2.57	3.90	5.01
											2.52	3.83	4.39
										2.43	3.62	4.12	
										(0.73)	(1.00)	(1.21)	
										2.97	3.09	3.98	
	283	164	58	42		7.5	28	48	20	1.74	2.32	2.99	
										1.74	2.31	2.80	
										1.65	2.46	3.59	
										(0.70)	(1.00)	(1.31)	
										1.56	2.53	3.22	
										1.74	2.44	3.22	
40	296	157	53	37		9	28	48	20	1.51	2.43	3.16	
										2.06	2.57	2.95	
											1.81	2.27	2.72
											(0.71)	(1.00)	(1.20)
										1.63	2.57	2.98	
	270	143	53	35		8	28	48	20	—	3.03	3.01	
											2.99	(1.00)	
											3.10	3.64	
												(1.21)	
											4.75	4.75	
平均浸透深さ比の平均値										0.74	1.00	1.21	
$P_f=1 \text{ kg/cm}^2$ とした場合の (14) 式から計算される平均浸透深さ比										0.78	1.00	1.20	
備考	供試体の寸法は、粗骨材の最大寸法を 25 mm 以下および 40 mm とした場合それぞれ直径 15 cm, 高さ 15 cm および直径 20 cm 高さ 20 cm の円柱形とした。 供試体の養生は、約 21°C の水中とした。ただし * 印の供試体は、材令 7 日まで水中養生し、以後 22~24°C の室内に放置した。 () 内の数値は、試験水圧を 10 kg/cm ² としたときの平均浸透深さを 1.00 とした場合の平均浸透深さ比である。 † 印の試験値は、いずれも供試体 3~4 個の試験値の平均値であって、詳細は表一8に示してある。												

例せず、ほぼ $i^{1/3.5}$ に比例することが示されている。このように経過時間にとまう D_m の増加の割合が理論値より小となるのは、セメント中の遊離石灰と水中の重炭酸塩との化合による生成物その他によって空げきが閉そくされること、水の浸入によってセメント粒子が膨張すること、および浸透した水のアルカリ濃度に差異が生ずるために浸透圧がおこることなどによるものと思われる。

したがって、(15) 式によって計算される β^2 の値は経過時間にとまなって減少するのであって、その時間的变化はほぼ $i^{1/3}$ に逆比例することになる。そこで、水圧を加えてから単位時間後の拡散係数 β^2 を基準とし、換算係数 α を用い、試験時における水の粘性をも考慮すれば β_i^2 は (1) 式で与えられるのである。

(4) 浸透深さ試験方法の信頼度

コンクリートの透水試験が誤差をとまないやすいことは従来知られていることであり、アウト プット方法を

用いた諸学者の実験において、試験値の変動係数が 60~70% に達するものは珍しくない。

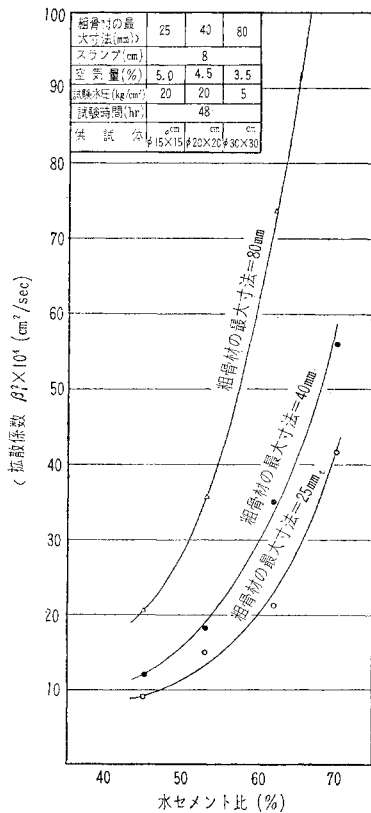
表一10 は、筆者が粗骨材の最大寸法を 25 mm および 40 mm としたコンクリートを用い、アウト プット方法による場合と浸透深さ方法による場合の試験値の変動係数を比較した実験の結果であって、浸透深さ方法による場合の試験値の変動係数は、供試体の直径を用いる粗骨材の最大寸法の 5 倍以上とした場合、約 24~30% となっており、アウト プット方法による場合の約 1/3 に過ぎない。

また、図一5 は粗骨材の最大寸法を 25 mm, 40 mm および 80 mm とし、スランブを約 8cm, 空気量をそれぞれ約 5%, 約 4.5% および約 3.5% とした AE コンクリートを用い、材令 28 日における水セメント比と拡散係数との関係を実験した結果であって、従来いわれている水セメント比と透水係数との関係ときわめてよい類似性を示している。

表—10 浸透深さ方法およびアウト プット方法による試験値のばらつき

透 水 試 験 方 法		浸 透 深 さ 方 法			ア ウ ト プ ッ ト 方 法	
コンクリートの配合	粗骨材の最大寸法 (mm)	25	40		25	
	単位セメント量 (kg)	283	269		302	
	単 位 水 量 (kg)	164	156		181	
	水セメント比 (%)	58	58		60	
	細 骨 材 率 (%)	42	38		44	
	ス ラ ン プ (cm)	7.5	8.5		14	
供 試 体 の 形 状 お よ び 寸 法	φ 15×15 cm 円柱形	φ 20×20 cm 円柱形	φ 15×15 cm 円柱形	φ 15×10 cm 円板形	直径 2 cm の 中心孔を持つ φ 15×15 cm 中空円筒形	
材 令 (日)	28			7		
試 験 水 圧 (kg/cm ²)	10	20	10	10		
拡 散 係 数 (cm ² /sec)	7.6 8.6 12.1 8.1 8.5 11.3 14.4 13.7 13.6	10.2 13.4 13.2 15.5 11.8 26.2 17.4 20.5 15.9 21.2 12.0	11.7 15.7 32.7 13.5 12.3 14.1 12.6 9.9 11.7 12.6 14.3 9.4	14.3 6.5 3.2 6.8 2.7 2.6 2.0 3.2 2.8 1.6 2.0 3.0	4.2×10 ⁻⁶ cm ² /sec	0.8 2.3 5.0 0.5 3.9 8.8 3.1 1.3 2.2
	ま た は 透 水 係 数 (cm/sec)	11.0×10 ⁻⁴ cm ² /sec	16.1×10 ⁻⁴ cm ² /sec	14.2×10 ⁻⁴ cm ² /sec	2.0 cm/sec	3.1×10 ⁻¹⁰ cm/sec
供 試 体 の 個 数	11	11	12	12	9	
試 験 値 の 変 動 係 数 (%)	23.8	30.1	42.8	84.4	74.8	
備 考	浸透深さ方法における試験時間は、48 時間とした。					

図—5 水セメント比と拡散係数との関係



以上のことから、浸透深さ試験によって得られるコンクリートの拡散係数を入念に打込み締固めた場合におけるコンクリートの透水性を測る尺度として用いて差しつかえなく、また試験誤差の小さいことをあわせ考えれば、その試験値には十分な信頼度をおいてよいことがわかる。

なお、本文末尾の 写真—1~22 は供試体内の水の浸透状況の一例を示すものである。

4. セメント、骨材および混和材料がコンクリートの水密性におよぼす影響

(1) セメントの種類および粉末度がコンクリートの水密性におよぼす影響

普通ポルトランドセメント、中層熱ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、シリカセメントおよび高炉セメントの5種のセメントを用いたコンクリートの拡散係数および圧縮強度を比較した。

コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法を 25 mm、スランプを約 6.5 cm、ポゾリス No. 8 に国産 AE 剤を併用して空気量を約 5.4%、単位セメント量を 260 kg とし、単位水量が最小となるように定めたのである。

供試体の材令は 14 日、28 日、3 月および 6 月とし、供試体の養生は約 21°C の水中とした。

透水試験における試験水圧は 10 kg/cm² または 20 kg/cm² とし、試験時間は 48 時間とした。

拡散係数試験値および圧縮強度試験値はそれぞれ供試

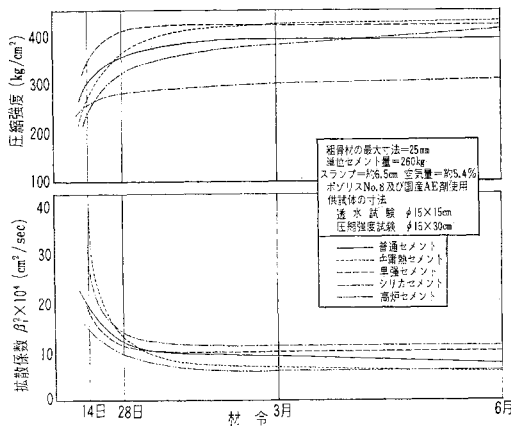
体4個および3個の試験値の平均値とした。

実験に用いたコンクリートの配合および実験の結果はそれぞれ表-11および図-6のようになった。

表-11 実験に用いたコンクリートの配合

セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	単位セメント量 (kg)	単位水量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
普通ポルトランドセメント	25	260	129 (1.00)	49.6	37	6.5	5.4
中熱ポルトランドセメント			121 (0.94)	46.1	38	7.0	5.5
早強ポルトランドセメント			129 (1.00)	49.6	37	6.0	5.3
シリカセメント			133 (1.03)	51.2	37	6.5	5.4
高炉セメント			124 (0.96)	47.7	37	6.0	5.4

図-6 セメントの種類がコンクリートの水密性および圧縮強度におよぼす影響



実験に用いた各種セメントはそれぞれ一社製のものであるから、セメントの種類とコンクリートの水密性との関係を一般的に論ずることはできないが、この実験の範囲内では図-6から次のことが認められる。

セメントの種類とコンクリートの水密性の増進状況との関係は、高炉セメントの場合を除いて、一般に各種セメントを用いたコンクリートの強度特性と同様な傾向を示すのであって、用いたセメントの種類によるコンクリートの水密性の差異は初期材令においては大きいものの、材令28日以後はその差異が小さい。すなわち、材令14日においては、用いたセメントの種類によりコンクリートの拡散係数は約 $12.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ から $37.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ に変化し、その差は約 $25.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ であるが、材令28日においては、約 $10.7 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ から約 $13.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ に過ぎない。これは、コンクリートの打込み後約1箇月以上湿潤養生を継続できる場合には、いずれのセメントを用いてもコンクリートの水密性には大差ないのであり、水密的なコンクリートを得るためのセメントの選択はコンクリートの配合その他の選定に比べあまり重要でないことを示すものである。

次に、高炉セメントを用いたコンクリートの初期強度

は他のセメントを用いた場合に比べ最も小さいにもかかわらず、水密性は初期材令においても大となっている。

常山氏は高炉セメントを用いたモルタルの吸水量試験の結果から、スラグの化学成分によって多少の相違があるが、一般に粉末度の比較的高いスラグを混合した高炉セメントモルタルの吸水量は初期材令においても普通ポルトランドセメントを用いたモルタルより小となることを明らかにし、適当な化学成分および粉末度を有するスラグの混入によってモルタル内部の組織がポルトランドセメントのみを用いた場合より早期に密実になると述べている^{10), 11)}。筆者の用いた高炉セメントはスラグとポルトランドセメントクリンカーの配合比が約50:50であるが、混合粉碎方式によって製造されたものであるから、このセメント中のスラグおよびポルトランドセメントの個々の粉末度は不明である。しかし、表-1に示したように、この高炉セメントのブレン比表面積が約 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ であることからスラグの粉末度は相当に高いものと思われる。従って、この高炉セメントが初期材令においてもコンクリートの水密性によい影響を与えたのはスラグの粉末度が相当に高いことおよび高炉セメントの比重が小さいために他のセメントを用いた場合よりコンクリート中の微粉末の絶対容積が多くなることなどにもよるものと思われる。

しかし、高炉セメントは各製造会社によってその品質に相当の差異があり、また粉末度を高めることが水密性を増すうえに有効であっても水密性以外の他の性質に悪い影響をおよぼすことがあるから、その使用に当っては造る構造物に応じて、たとえばコンクリートの温度上昇、乾燥による収縮などについても十分な調査、研究が必要である。

次にセメントの粉末度とコンクリートの水密性との関係について実験した結果が表-12に示してある。

表-12は、粗骨材の最大寸法を25mm、スランプを約7cm、水セメント比を55%としたコンクリートにおいて、ブレン比表面積を約 $2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ 、約 $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ および約 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ としたセメントを用いた場合の拡散係数および圧縮強度を比較したものである。用いたセメントは同一のクリンカーを粉碎して製造したものであって、同じ化学成分を有するものである。

供試体の材令は28日および3月とし、供試体の養生方法は試験の材令まで約21°Cの水中とした場合と、材令7日まで約21°Cの水中とし以後試験の材令まで24~26°Cの恒温室内に放置した場合の2種とした。

表-12より次のことが認められる。

試験の材令まで水中で養生した場合は、粉末度の高いセメントを用いたコンクリートの水密性は初期材令においては粉末度の低いものより相当に大であるが、材令に

表—13 粗骨材の形状がコンクリートの水密性におよぼす影響

粗骨材の最大寸法=25 mm, 供試体の材令=28日

粗骨材	AE 剤またはセメント分散剤	コンクリートの配合				スランブ (cm)	空気量 (%)	平均浸透深さ (cm)	平均水温 (°C)	拡散係数 $\beta_t^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)	圧縮強度 (kg/cm ²)
		単位セメント量 (kg)	単位水量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)						
普通砂利	用いない	300	158 (1.00)	52.7	40	8	1.7	2.5 2.8 2.7 2.5 } 2.6	18.5	8.5 11.1 10.4 8.4 } 9.6	383 387 368 } 379
		280	159	56.8	41	7	1.4	2.6 2.7 3.1 3.8 } 3.0	19	8.9 10.2 13.1 21.0 } 13.3	336 338 333 } 336
		260	162	62.3	42.5	8	1.7	3.4 3.8 4.1 3.6 } 3.7	19	15.9 19.8 22.6 17.9 } 19.0	283 294 283 } 287
砕石	用いない	300	174 (1.10)	58.0	45	8.5	2.3	4.2 3.1 2.7 2.8 } 3.2	19	24.5 12.9 10.2 11.0 } 14.7	360 372 385 } 372
		280	174	62.2	46	8	2.4	3.3 3.3 3.4 3.8 } 3.5	19	14.8 15.0 18.0 20.1 } 16.5	340 327 330 } 332
	ビンゾール	300	159 (1.00)	53.0	41	8.5	4.9	2.3 3.3 2.6 2.5 } 2.7	20	7.1 14.8 9.2 8.4 } 9.9	365 350 367 } 361
	ポゾリス No. 8	300	145 (0.92)	48.3	41.5	8.5	5.0	2.7 2.9 1.8 3.2 } 2.5	19	9.6 8.9 4.2 13.8 } 9.1	405 397 414 } 405
備考	透水試験供試体は、直径 15 cm, 高さ 15 cm の円柱形とした。試験水压を 20 kg/cm ² , 試験時間を 48 時間とした。										

品質を有するものである。また、いずれの粗骨材もあらかじめふるい分けしたものを所定の割合に配合し粒度を同一にして用いた。

コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法を 25 mm, スランブを約 8 cm, ビンゾールまたはポゾリス No. 8 を用いたときの空気量を約 5% とし、単位セメント量を 300 kg, 280 kg および 260 kg とし、所要のスランブが得られる範囲内で単位水量が最小となるように定めたのである。

供試体の材令は 28 日とし、透水試験における試験水压は 20 kg/cm², 試験時間は 48 時間とした。

実験に用いたコンクリートの配合および実験の結果は表—13 のようになった。表—13 より次のことが認められる。

単位セメント量およびコンシステンシーを同じくした砂利および砕石を用いたコンクリートにおいて、圧縮強度に大差はないが、水密性は砕石を用いた場合の方が小となっている。すなわち、砕石を用いたコンクリートの拡散係数は砂利を用いた場合の約 1.2~1.6 倍となるのであって、このことは、砕石を用いる場合には砂利を用いたコンクリートと同じウォーカビリティーおよび水密性のコンクリートを得るために単位セメント量を約 7% 増す必要のあることを示すものである。これは表—13 に示すように、砕石を用いる場合、砂利を用いたコンクリートと同じウォーカビリティーを得るために必要な単位水量が約 10% 増すためであって当然の結果である。

しかし、AE 剤またはセメント分散剤を用いれば、従来いわれているように、砕石を用いたコンクリートのウ

ォーカビリティーをいちじるしく改善できるのであって、ビンゾールおよびポゾリス No. 8 を用いることによって、砂利を用いたコンクリートと同じウォーカビリティーを得るために必要な単位水量をそれぞれ 0% および 8% 減らすことができた。このため水密性も改善され、単位セメント量を 300 kg とした比較的富配合のコンクリートにおいても砂利を用いた場合と同等以上となっており、特にポゾリス No. 8 を用いた場合は圧縮強度も約 7% 大となっている。これは、粗骨材として砕石を用いる場合に良質なセメント分散剤を用いることは、コンクリートのウォーカビリティーを改善するのみならず、水密性および圧縮強度を増すためにも有効であることを明瞭に示すものである。

(3) 混和材料がコンクリートの水密性におよぼす影響

a) AE 剤およびセメント分散剤 図—7 は AE 剤およびセメント分散剤がコンクリートの水密性におよぼす影響について実験した結果である。実験に用いた AE 剤はビンゾール、セメント分散剤はポゾリス No. 8 であって、コンクリートの配合は粗骨材の最大寸法を 40 mm, スランブを約 8.5 cm, 空気量を約 4.5%, 水セメント比を 45%, 53% および 62% とし、単位水量が最小となるように定めた。この場合、ビンゾールおよびポゾリスを用いたときの単位水量は、これらを用いない場合のそれぞれ約 89% および約 82% となった。

供試体の材令は 28 日、透水試験における試験水压は 10 kg/cm² とした。拡散係数および圧縮強度試験値はそれぞれ供試体 3 個および 2 個の試験値の平均値とした。

図-7 AE 剤およびセメント分散剤がコンクリートの水密性におよぼす影響

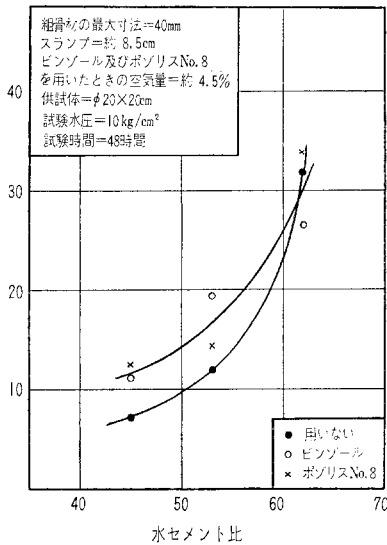


図-7 において、AE コンクリートの水密性は AE 剤を用いないものにくらべ、水セメント比が小さい場合は小であるが水セメント比が約 62% 以上の場合は大となっている。すなわち、水セメント比を 45% とした場合 AE コンクリートの拡散係数は AE 剤を用いないものの大約 1.6 倍となっているが、水セメント比を 62% とした場合はほぼ同等となっている。

水セメント比が比較的小さい場合に AE コンクリートの水密性が小となる理由は、5. (3) に示すように、大きい水圧のもとで水がコンクリートに圧入される場合には AE コンクリートの微細気泡中にも水が浸入して水途を短縮するため、比較的ブリージングの少ない富配合のコンクリートにおいては、空気量が増すほど水密性が小となることによるのである。また、水セメント比が大きい場合に AE コンクリートの水密性が大となるのは、従来いわれているように、AE 剤およびセメント分散剤の使用によってコンクリートのウォーカビリティーが改善されブリージングが減ざれることが貧配合コンクリートにおいて特にいちじるしいことによるのであって、このことは筆者がさきに報告した¹²⁾ マス コンクリートの水密性におよぼす AE 剤およびセメント分散剤の影響についての実験結果にも明瞭に示されている。

この実験に用いたコンクリートにおいて、水セメント比およびコンシステンシーを一定とした場合、AE コンクリートの単位セメント量は AE 剤を用いない場合より約 11~18% 少なくなっている。一般に、単位セメント量を同等とした場合には、適当な空気量を有する AE コンクリートは AE 剤を用いないコンクリートと同等以上の水密性を有するものであり、また AE 剤、セメント分散剤の使用によってコンクリートのウォーカビリティーが

改善され工事現場において部分的な欠点の少ない均等質なコンクリートが得られやすいことを考えれば、これらの混和剤を用いることは構造物のコンクリートの水密性を容易かつ安全に増すための有効な手段であり、特に貧配合コンクリートの場合、骨材の粒度、形状が適当でない場合、加わる水圧が小さい場合その効果が大きいものと思われる。

b) フライアッシュ フライアッシュの使用がマスコンクリートの水密性におよぼす影響について実験した結果が 8. (3) に示してある。この実験においても、セメントの 1 部を適当量のフライアッシュでおきかえた場合にはこれを用いない場合にくらべ、初期材合における水密性は相当に小となるが長期材合においては大となり、従来いわれている関係と大体同様な関係が示されている。これは、重力ダム内部のコンクリートのように水圧が加わるまで長期間湿潤養生が継続される場合に、良質なフライアッシュを用いることは長期強度の増進のみでなく、長期における水密性を増すためにも有効であることを示すものである。

なお、山崎氏は品質の異なる数種のフライアッシュを用いたコンクリートの透水試験を行い、フライアッシュの品質の差異によってコンクリートの水密性に差異が生ずることばかりでなく、球形粒子が多くてコンクリートの単位水量を比較的多く減らすことができるような従来品質がよいといわれているフライアッシュでも、砂の微粒が少ない場合および貧配合コンクリートの場合にはブリージングが増し、球形粒子が比較的少ないものよりかえって水密性が小なることを指摘している¹³⁾。これをそのまま一般のマス コンクリートに適用することはできないが、フライアッシュの使用に当って、コンクリートの単位水量を多量に減ざられるものが必ずしも水密性にもよい影響を与えるものではないことに注意しなければならない。

(4) 防水物質について

コンクリート材料の選択、配合、打込み、養生などに十分注意すればコンクリート自体を水密的にすることは不可能ではないが、比較的容易かつ安全にコンクリートの水密性を増す目的でコンクリートの練り混ぜの際に防水物質を加えることがある。

防水物質には従来、水をはじく性質を有するものと、粉末で単にコンクリートの空げきをみたく役目をする岩石粉末、粘土などがある。

防水物質の効果を試験する方法については、Kocatas-kin, Suenson 両氏の有益な研究¹⁴⁾がある。両氏の研究によれば、防水物質は防湿の目的で用いる場合、雨水の浸透を防ぐ目的で用いる場合および水圧をとまらう水の浸透を防ぐ目的で用いる場合などがあり、これらの場合に対する防水物質の効果には必ずしも平行性がなく、た

たとえば防湿の効果はすぐれていても、水圧をともなう透水に対してはほとんど効果がないものもある。このため、防水物質の効果は単に一つの透水試験方法のみによって評価できないのであって、湿気の透過度の試験、毛细管吸水試験および水圧を加える透水試験を行なう必要があることを指摘している。しかし、これらの試験は比較的厚さの薄いモルタル供試体の場合には可能であるが、コンクリート供試体に適用することが困難なものもある。

本研究においては、防水物質を添加したコンクリートの水密性を検討しようとしたのであり、また恒温恒湿槽を入手できなかったために、浸透深さ試験のみによってその水密性を試験したのである。

表-14 は、2, 3 の市販の防水剤を用いたコンクリートとこれを用いないコンクリートとの拡散係数および圧縮強度を比較したものである。

実験に用いた防水剤はいずれも水をはじく性質を有するものであり、粘性の強い液状であった。原料の主成分は、防水剤 M は重合油アルミニウム、防水剤 S および NS はワックス、蛋白質および脂肪酸であって、防水剤 G (ドイツ製) については調査できなかった。これらの

使用に当っては、製造者の示方に従いコンクリートの使用水量の 1/50~1/30, あるいはセメントの 1~3% をあらかじめ練り混ぜ水に溶して用いた。

コンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法を 25 mm, スランブを約 10 cm, 単位セメント量を 300 kg とし、所要のスランブが得られる範囲内で単位水量が最小となるように定めたのである。

供試体の材令は 28 日とし、供試体の養生は約 21°C の水中とした。透水試験における試験水圧は 20 kg/cm², 試験時間は 48 時間とした。

表-14 において、これらの防水剤を製造者の示方通りに用いるとコンクリートに多量の気泡が発生するのであって、防水剤の種類および使用量により空気量は約 5~14% となっている。このためコンクリートのウォッカピリチーはいちじるしく改善され、防水剤を用いない場合に比べ、あるウォッカピリチーのコンクリートを得るために必要な単位水量が約 13~27% 少なくなっている。

しかし、コンクリートの拡散係数は防水剤を用いない場合の大約 1/3 から 1.3 倍となり、防水剤の種類によってその効果が相当に異なることが示されており、なかに

表-14 防水剤を用いたコンクリートの拡散係数および圧縮強度
粗骨材の最大寸法=25 mm, 単位セメント量=300 kg

防 水 剤 種 類	使 用 量	コンクリートの配合			スランブ (cm)	空気量 (%)	平均浸透深さ (cm)	平均水温 (°C)	拡 散 係 数 $\beta_0^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)	圧 縮 強 度 (kg/cm ²)		
		単位水量 (kg)	水セメント比 (%)	細骨材料 (%)								
用 い ない		175 (1.00)	58.3	42	9.5	1.1	2.9 2.8 3.0	2.9	20	11.1	341 336 345	341 (1.00)
		M	使用水量の 1/30 (5.0 kg/m ³)	149 (0.85)	49.7	34	11.5	8.9	2.5 2.3 2.3 2.2	2.3	22	6.8
S	使用水量の 1/50 (2.7 kg/m ³)	133 (0.76)	44.3	29	10	11.1	2.9 2.8 4.2 2.7	3.1	22	12.8	207 202 209	206 (0.61)
	使用水量の 1/30 (4.3 kg/m ³)	128 (0.73)	42.7	27	11	14.4	3.2 3.3 2.9 3.9	3.3	20.5	14.6	169 170 158	166 (0.48)
NS	使用水量の 1/50 (2.9 kg/m ³)	147 (0.84)	49.0	33	10.5	7.3	1.9 2.2 2.0 2.3	2.1	25	5.2	232 244 241	239 (0.70)
	使用水量の 1/30 (4.9 kg/m ³)	146 (0.83)	48.7	32	10.5	7.9	2.4 1.6 1.6 1.5	1.8	25	3.9	211 214 214	213 (0.63)
	使用水量の 1/20 (7.2 kg/m ³)	143 (0.82)	47.7	32	10	8.8	2.0 1.8 1.9 1.7	1.9	25	4.1	198 188 191	192 (0.56)
G	セメントの 1% (3 kg/m ³)	152 (0.87)	50.7	38	10	5.1	2.2 2.3 2.7 1.7	2.2	24	6.1	302 295 292	296 (0.87)
	セメントの 2% (6 kg/m ³)	147 (0.84)	49.0	36	10	6.1	2.4 2.1 3.0	2.5	26	7.2	281 285 275	285 (0.84)
	セメントの 3% (9 kg/m ³)	145 (0.83)	48.3	35	10	7.8	2.0 2.8 2.0 2.4	2.3	24	6.4	254 244 248	249 (0.73)
ボゾリス No. 8	セメントの 0.25% (0.8 kg/m ³)	145 (0.83)	48.3	38	9.5	4.6	1.9 2.1 1.8 2.0	2.0	21	5.0	375 365 392	377 (1.11)

備 考 | 試験水圧は 20kg/cm², 試験時間は 48 時間とした。

は、この実験のように大きい水圧を加えた場合には、防水剤を用いないものよりかえて水密性を減ずるものもある。また、ある程度防水の効果はあっても、防水剤を用いたコンクリートの圧縮強度はすべての場合防水剤を用いないものより小となり、大約 50~90% となっている。

高い水圧のもとで行なった透水試験において、防水剤の添加によってかえてコンクリートの水密性が低下したり、また圧縮強度が減じたりするのは主として空気量がいちじるしく多くなることによるものと思われる。また、このように空気量が多くなることは、気象作用に対するコンクリートの耐久性についても不安がある。

水をはじく性質を有する防水剤は、その原料が主として油、しゃぼんなどであるから、これをコンクリートに添加した場合ある程度気泡が発生することは当然であるが、製造者はその製造および使用量の決定に当っては、空気量がコンクリートの水密性以外の諸性質に大きい影響をおよぼすことを考え、防水剤を添加した場合の空気量が極端に多くならないように注意しなければならない。

別に、ポゾリス No.8 を用いたコンクリートの水密性について実験し、その結果を表-14 の下欄に示した。ポゾリス No.8 を用いたコンクリートの拡散係数は比較的防水効果があると考えられる防水剤を用いたコンクリートと同等であり、圧縮強度はこれを用いないコンクリートより約 10% 大となっている。これは、ある種の防水剤を用いるよりも、このような混和剤を用いた場合の方がかえて安全に防水の目的を達せられる場合があることを示すものである。

従って、防水剤の使用に当っては、なるべく使用目的に合した試験方法によってその防水の効果を確認することおよびコンクリートまたはモルタルの水密性以外の諸性質におよぼす影響を十分検討すること、また、防水剤が一般に高価であるから、これらの使用が有利であるか、単位セメント量の増加、コンクリートまたはモルタルの厚さの増加、他の混和材料の使用などによる方が有利であるかも十分に比較研究することが必要である。

次に、本研究においては岩石の微粉末、粘土などに関する実験は行なわなかったが、貧配合コンクリートにこれらの混和材料を用いればコンクリート空気をみたく水密性を増す場合があるといわれている。

山崎氏¹³⁾の研究によれば、粗骨材の最大寸法を 30 mm、単位セメント量を約 240 kg としたコンクリートにおいて、セメントの 30% を硬砂岩粉末でおきかえた場合、これを用いない場合にくらべ単位水量は約 4% 増すにもかかわらず、水密性はいちじるしく改善され透水係数は大約 1/17 となることが示されている。この実験に用いた硬砂岩粉末のブレン比表面積は 3640 cm²/g

で、用いたセメントよりやや高い粉末度を有するものであった。

しかし、Ruettgers 氏の研究¹⁴⁾によれば、セメントの 50% をセメントとほぼ同じ粉末度を有する白雲岩粉末でおきかえた場合、その透水係数は水セメント比を同一としたこれを用いないコンクリートの約 2 倍となり、水・(セメント+白雲岩粉末)比と同じ水セメント比を有するコンクリートにくらべ約 500 倍となることが示されている。

このように、コンクリートの水密性におよぼす岩石粉末の影響は岩石粉末の品質によっていちじるしく相違するものであり、また、コンクリートの材料、配合などによってもその効果に差異の生ずるものであるから、その使用に当っては、十分な調査、研究がぜひ必要である。

5. コンクリートの配合が水密性におよぼす影響

(1) 水セメント比がコンクリートの水密性におよぼす影響

水セメント比の相違によってコンクリートの水密性にいちじるしい差異の生ずることは当然であるが、水セメント比とコンクリートの拡散係数との関係を確かめるために、粗骨材の最大寸法を 25 mm、40 mm および 80 mm とし、スランプを約 8 cm、国産 AE 剤を用いて空気量をそれぞれ約 5%、約 4.5% および約 3.5% とした AE コンクリートにおいて、水セメント比を 45%、53%、62% および 70% に相違させた場合の材令 28 日における拡散係数を比較したのである。

供試体の寸法は 3. (1) に述べたように、粗骨材の最大寸法を 25 mm、40 mm および 80 mm とした場合、それぞれ直径 15 cm、高さ 15 cm、直径 20 cm、高さ 20 cm および直径 30 cm、高さ 30 cm の円柱形とし、透水試験における試験水圧は 5 kg/cm²、または 20 kg/cm²、試験時間は 48 時間とした。

実験の結果は表-15 のようになり、図-5 はこれを図示したものである。

表-15 および 図-5 において、水セメント比とコンクリートの拡散係数との関係は、従来よく知られている水セメント比と透水係数との関係とはほぼ同様となることが示されている。

すなわち、粗骨材の最大寸法およびコンシステンシーを一定としたコンクリートにおいて、拡散係数は水セメント比が大であるほど大となり、水セメント比が約 55% 以上になると急激に増加することが示されている。

水セメント比の増加にともなうコンクリートの拡散係数の増加の割合は、たとえば水セメント比を 60% としたコンクリートの拡散係数は水セメント比を 50% とした場合の約 1.8~2.2 倍、平均約 2 倍となっており、

表—15 粗骨材の最大寸法および水セメント比がコンクリートの水密性におよぼす影響

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg)	単位水量 (kg)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	試験水圧 (kg/cm ²)	平均浸透深さ (cm)	平均水温 (°C)	拡散係数 $D_t \times 10^4$ (cm ² /sec)	圧縮強度 (kg/cm ²)		
25	45	327	147	37	7	4.7	20	2.5	18.5	8.6	9.0	370	
								2.4		8.0			
								2.1		6.0			
								1.9		5.1			
	3.5	17.2	383										
	3.2	13.8	425										
	3.8	9.9	313										
	3.1	13.6	322										
3.0	12.0	324											
62	240	149	41	8.5	4.9	3.4	19.0	15.7	21.2	258			
						3.1		12.8		242			
						5.4		40.2		254			
						3.9		21.2		254			
3.4	15.9												
70	214	150	43	8	5.1	5.7	19.5	44.0	41.7	189			
						5.6		42.8		187			
						5.5		40.7		189			
						5.4		39.2		189			
40	45	316	142	33	8	4.4	20	3.2	19.0	14.4	11.9	382	
								2.3		7.5			367
								3.4		15.7			364
								2.7		10.1			377
	2.9	11.5	313										
	3.0	12.7	309										
	3.7	18.6	314										
	4.7	30.0	302										
53	270	143	35	8	4.6	4.0	19.0	22.1	35.0	251			
						4.9		32.1		240			
						4.9		33.0		225			
						6.2		52.5		232			
62	232	144	37	8	4.5	5.7	18.5	44.7	56.0	175			
						7.0		67.2		195			
						7.2		72.7		201			
						5.3		39.5		210			
80	45	264	119	27	8	3.4	5	3.1	24.5	27.4	20.6	365	
								2.8		21.9			360
								2.6		18.0			363
								2.3		15.0			
	3.9	42.9	295										
	2.6	17.9	299										
	3.8	40.1	294										
	3.8	41.8	294										
53	224	119	29	9	3.6	6.4	25.0	114	73.7	223			
						3.6		35.0		255			
						4.4		52.3		257			
						5.8		94.0		252			
62	194	120	31	8	3.5	6.7	24.5	123	132	183			
						7.4		152		182			
						7.1		141		187			
						6.4		113		198			

備考

透水試験供試体は、粗骨材の最大寸法を 25, 40 および 80 mm とした場合、それぞれ $\phi 15 \times 15$ cm, $\phi 20 \times 20$ cm および $\phi 30 \times 30$ cm とした。
試験時間を 48 時間とした。供試体の材令は 28 日である。

この割合は用いた粗骨材の最大寸法が大であるほどいくぶん大となった。

拡散係数が 2 倍となることは、ある一定の水圧を一定時間コンクリートに加えた場合の平均浸透深さが約 1.4 倍となることを示すものであり、これは、10. で述べるように、ある水圧をうけるコンクリートを造る場合、水密性から必要なコンクリートの厚さを、水セメント比 60% のコンクリートを用いる場合は、水セメント比 50% のコンクリートを用いる場合の約 1.4 倍以上とする必要のあることを示すものである。しかし、この所要厚さの割合は実験室で入念に締めて造った供試体のコンクリートについて行なった実験の結果から得たものであって、一般に、水セメント比の大きいコンクリートは材料の分離の傾向が大きく、構造物のコンクリートに部分的な欠点が生じやすいことを考えれば、構造物のコンクリートにおいては、水セメント比の相違による所要厚さの割合をさらに大きくする必要があるものと思われる。

しかして、表—15 に水セメント比を 60% としたコンクリートにくらべ、水セメント比を 50% としたコンクリートにおける単位セメント量の増加は約 15% に過ぎないことが示されている。

コンクリート部材の水密性は、用いるコンクリートの品質のみでなく、部材の厚さに大きい関係のあることは当然であるが、浸透深さ試験の結果は、これらの関係がある程度示し得るものである。コンクリートの水密性が主としてセメントの単位量に対する水量の関数であることばかりでなく、その所要厚さをも考えれば、水密的なコンクリートを通常経済的かつ安全につくるためには、所要のウォーカービッチャーが得られる範囲内で単位水量を最小とすることがきわめて大切である。

(2) 粗骨材の最大寸法がコンクリートの水密性におよぼす影響

表—15 および 図—5 は粗骨材の最大寸法とコンクリートの水密性および圧縮強度との関係も示している。

すなわち、従来よく知られているように、水セメント比およびコンシステンシーを一定としたコンクリートにおいて、粗骨材の最大寸法の相違によって圧縮強度に大差はないが、粗骨材の最大寸法が大であるほど水密性は小となるのであって、水セメント比が45%から70%の範囲内では、粗骨材の最大寸法を40mmとしたコンクリートの拡散係数は、25mmとした場合の約1.3~1.6倍、平均約1.4倍となり、粗骨材の最大寸法を80mmとしたコンクリートの拡散係数は40mmとした場合の約1.7~2.4倍、平均約2倍となっている。

これは、ブリージングによって、セメントペースト中の孔げきよりも大きい空げきが粗骨材の下面にでき、この空げきは浸透水の移動に対して動水抵抗の最も小さい水途となるのであって、粗骨材の最大寸法が大きいほどこの空げきは大きくなり、その数も増すことから当然である。

筆者の実験においても、供試体を割ったとき、水の浸透が粗骨材の下面および側面においていちじるしいことが明瞭に認められた。

一般に、よいコンクリートを経済的につくるには、粗骨材の最大寸法をなるべく大とするのがよいが、水密性を必要とするコンクリートをつくる場合には、他の一般の場合よりコンクリートのウォーカビリチーをよくするためのみならず、粗骨材の最大寸法が大きいほど水密性は相当に小となるものであるから、用いる粗骨材の最大寸法を他の一般の構造物の場合よりいくぶん小さく選ぶのが安全である。また、このようにすれば水密性から必要なコンクリートの厚さも一般に薄くすることができ、所要のコンクリート材料費が少なくてすむ場合が多い。

(3) 空気量がコンクリートの水密性におよぼす影響

粗骨材の最大寸法を25mm、水セメント比を53%、スランブを約8cmとしたコンクリートにおいて、国産AE剤を用いて空気量を約1.7~9.6%に相違させた場合の拡散係数および圧縮強度を比較した。

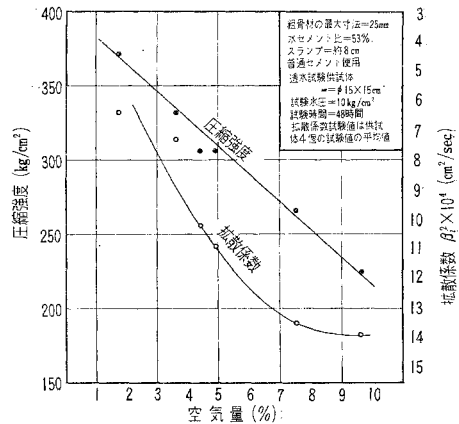
供試体の材令は28日とし、透水試験における試験水圧は10kg/cm²、試験時間は48時間とした。

実験に用いたコンクリートの配合および実験の結果はそれぞれ表-16および図-8のようになった。図-8に、水セメント比およびコンシステンシーを一定とした

表-16 実験に用いたコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg)	単位水量 (kg)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
25	53	308 (1.00)	163	42	8	1.7
		289 (0.94)	153	41	8	3.6
		279 (0.94)	148	39	8.5	4.4
		275 (0.89)	146	39	7	4.9
		259 (0.84)	137	37	7.5	7.5
		237 (0.77)	125	34	7.5	9.6

図-8 空気量がコンクリートの水密性および圧縮強度におよぼす影響



プラスチックなコンクリートに相当な水圧を加えた場合には、空気量の増加にともなって圧縮強度と同様に水密性も低下することが示されている。すなわち、空気量を約5%および7.5%としたコンクリートの拡散係数はAE剤の用いない場合のそれぞれ約1.7倍および約2.1倍となるのであって、空気量が6%程度以下においては空気量1%の増加によって拡散係数は大約20%増加している。

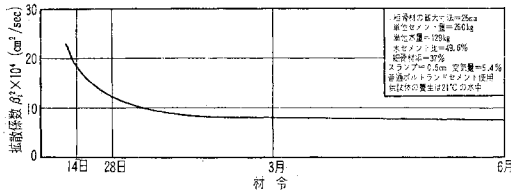
AEコンクリートにおいては、ブリージングによって生じた毛細管を通して浸透する水をエントレインドエアーがおさえる作用をし、水密性を増すといわれているが、この実験の場合のように比較的大きい水圧が加えられる場合には、微細気泡中にも水が浸透して水途を短縮するから、比較的ブリージングの少ないプラスチックなコンクリートにおいては空気量が増すほどかえって水密性が低下することを示すものである。

AEコンクリートの空気量と水密性との関係については従来数編の有益な論文^{(5),(6),(7)}が発表されているが、それらの実験結果にはかなりの差異がある。これは、空気量と水密性との関係が、実験に用いた砂の粒度、コンクリートの配合、供試体の寸法、試験水圧などによって相違するからである。しかし4.(3)に述べたように、一般に適当な空気量を有するAEコンクリートは、単位セメント量が同等であれば、AE剤を用いないコンクリートと同等以上の水密性を有するものであり、またAEコンクリートはウォーカビリチーがよくて同等質なコンクリートが得られやすいから、水密的なコンクリートを容易かつ安全に造るためには適当な空気量を有するAEコンクリートを用いるのが有利である。

6. 材令がコンクリートの水密性におよぼす影響

図-9は、供試体を水中で養生した場合の材令とコンクリートの水密性との関係の一例を示したものである。

図-9 材令とコンクリートの水密性との関係



これは、普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法を 25 mm, スランプを約 7cm, 空気量を約 5.5%, 単位セメント量を 260 kg としたコンクリートを約 21°C の水中で養生した場合の実験結果である。

図-9 において、水中養生を継続する場合は、従来いわれているように、コンクリートの水密性は材令の増加とともに増大し、その増大する割合は初期材令においていちじるしいことが示されている。すなわち、材令 14 日における拡散係数にくらべ、材令 28 日の拡散係数は約 60% となるが、その後材令 6 月まで養生しても約 40% となるに過ぎない。

これは、材令にともなう水密性の増加が、主としてセメントの水和の進行によるものであるから当然の結果である。すなわち、セメントの水和作用が進むにつれてゲルが発達し、始めのセメント粒子の容積より大となって漸次間げきをせばめるのである。Powers 氏の研究⁹⁾によれば、ゲルの容積は終局的には始めのセメント粒子の容積の約 2 倍まで増大するといわれている。

以上のことは、コンクリートの水密性を増すためには早期における湿潤養生がきわめて大切であることを示すものである。

材令とコンクリートの水密性との関係は、セメントの種類および粉末度、コンクリートの配合、打込み温度および養生温度などによって相当に差異のあるものであって、これらの関係が表-17 に示されている。

表-17 は、4. および 8. に示す実験の結果を材令について整理したものであって、材令 28 日の拡散係数を 1.0 とした場合の拡散係数比で示してある。供試体の養生はいずれも所定の温度の水中である。

表-17 において、セメントの種類、粉末度、コンクリートの配合および温度などと水密性の増進状況との関係は、一般にこれらと強度増進状況との関係と類似の傾向にあることが示されている。たとえば、中庸熱セメントを用いた場合は、材令 28 日以降においても、なお水密性はある程度増大するのであって、材令 6 月における拡散係数は材令 28 日の場合の約 1/2 となるが、早強セメントを用いた場合は、材令 28 日以後 6 月まで水中養生を継続しても、拡散係数はほとんど減少しないのである。

また、フライアッシュを用いた場合は、材令にともな

表-17 材令とコンクリートの水密性との関係

事項	備考	拡散係数比				備考	
		14日	28日	3月	6月		
セメントの種類	普通セメント	1.6	1.0	0.8	0.6	約21°C	
	中庸熱セメント	2.9	1.0	0.5	0.5		
	早強セメント	1.7	1.0	0.8	0.9		
	シリカセメント	2.2	1.0	0.8	0.9		
	高炉セメント	1.2	1.0	0.5	0.6		
セメントの粉末度	ゴレーン比表面積 (cm²/gr)	2510	—	1.0	0.5	普通セメント	
	2990	—	1.0	0.6	約21°C		
	3980	—	1.0	0.7	—		
フライアッシュの使用	代替率 (%)	0	—	1.0	0.6	中庸熱セメント	
	20	—	1.0	0.4	約21°C		
	40	—	1.0	0.1	—0.02		
打込み温度	5°C	10.1	1.0	0.8	0.5	中庸熱セメント	
	20°C	8.5	1.0	0.8	0.5		約21°C
	30°C	3.3	1.0	0.4	0.4		0.3
養生温度	10°C	10.8	1.0	0.2	—	中庸熱セメント	
	20°C	6.0	1.0	0.5	—		
	30°C	2.2	1.0	0.5	—		

う水密性の増加の割合がいちじるしく大となる。すなわち、材令 1 年における拡散係数は材令 28 日の場合にくらべ、フライアッシュを用いない場合は約 1/2 となるに過ぎないが、セメントの 40% をフライアッシュでおきかえた場合には約 1/50 となっている。これはフライアッシュを用いたコンクリートの拡散係数が初期材令においては、これを用いない場合より相当に大きいからであって、フライアッシュを用いる場合には、水圧が加わるまでに長期間の湿潤養生が必要であることを示すものである。

7. 養生方法がコンクリートの水密性におよぼす影響

6. において、供試体を水中で養生した場合の材令にともなう水密性の増加の割合が、初期材令においていちじるしいから、水密的なコンクリートを造るためには、初期養生がきわめて大切であることを述べた。

Per Nycander 氏は水密的なコンクリートを造るためには、打込み後乾燥させないというだけでは不足なのであって、なるべく早く水を加えて養生しなければならぬ。このため、水養生が困難なコンクリート壁、柱などの施工においては、スライディングホームを用い、ただちに散水して養生するのがよいと述べ、初期養生の大切であることを強調している⁷⁾。

しかし、初期養生を十分に行なっても、その後水圧をうけるまでの間にコンクリートをかわかせば、コンクリートの水密性はいちじるしく低下するのであって、特に用いたセメントのプレーン比表面積が約 3 000 cm²/g 以上の場合は、乾燥期間が長いほど水密性が小となることを 4. (1) に指摘した。

表—18 供試体の乾燥がコンクリートの水密性におよぼす影響
粗骨材の最大寸法=25 mm

材令	水中養生期間	単位セメント量=280 kg 単位水量=144 kg 水セメント=51.4% 細骨材率=36.5% スランプ=約 7.5 cm 空気量=約 5.1%			単位セメント量=280 kg 単位水量=144 kg 水セメント比=51.4% 細骨材率=36.5% 塩化カルシウム=セメントの 2% スランプ=約7.5 cm, 空気量=約5%			単位(セメント+消石灰)量=280 kg 消石灰代替率=10% 水(セメント+消石灰)比=59% 細骨材率=40% スランプ=約 7.5 cm AE 剤用いない				
		拡散係数 $\beta_1^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)	供試体の 重量減 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	拡散係数 $\beta_1^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)	供試体の 重量減 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	拡散係数 $\beta_1^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)	供試体の 重量減 (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)		
	3日	—	—	—	55.6 62.4 66.2	61.4 (3.5)	1.87	281	—	—	—	
28日	7日	71.8 63.6 49.2	61.5 (2.9)	2.09	46.8 34.5 47.8	43.0 (2.5)	1.31	317	212 138 110	153 (8.5)	2.12	273
	28日	22.6 20.9 20.3	21.3 (1.0)	—	19.9 15.7 16.5	17.3 (1.0)	—	335	16.0 19.2 18.6	17.9 (1.0)	—	322
3月	7日	321 322 310	318 (18.1)	2.24	81.6 104 75.3	86.9 (5.7)	1.80	342	761 677 642	693 (76.2)	3.34	244
	28日	46.8 72.1 53.2	57.4 (3.3)	1.42	69.3 36.1 49.6	51.7 (3.4)	1.38	362	—	—	—	—
	3月	16.1 18.0 18.8	17.6 (1.0)	—	15.3 11.1 19.3	15.2 (1.0)	—	355	9.7 9.2 8.5	9.1 (1.0)	—	353

備考 透水試験供試体は直径 15 cm, 高さ 15 cm の円柱形とした。試験水圧は 5~15 kg/cm², 試験時間は 6~48 時間とした。

供試体の乾燥による水密性の低下については、従来、Powers, T. C.⁸⁾, McMillan, F. R.²⁾ 氏などの研究がある。

Powers 氏の研究によれば、水セメント比 50% のセメントペースト供試体を約 140 日間湿潤養生した後、湿度 93% および 73% に保ったガラスビン中に順次に移し、1200 日間できるだけ徐々に乾燥した場合でも、その透水係数は乾燥しない場合の約 70 倍となることが示されており、これはセメントペースト中の空げきの間にくもの巣状に存在するゲルのある部分が乾燥収縮によって破壊され、空げきが互いに連絡し水が通りやすくなることによると述べている。また McMillan 氏はモルタル供試体を材令 3 日まで湿潤養生し、以後室内に放置した場合、材令 7 日における透水係数と材令 180 日における透水係数がほぼ同等となることを示し、これは供試体が厚さ、わずか 2.5 cm の円板形であるため、乾燥によって水分が急速に失われ、水和の進行が完全に停止したことによるものと述べている。

表—18 は、筆者がブレン比表面積が約 3000 cm²/g の普通ポルトランドセメントを用い、材令 3 日、7 日および 28 日まで水中養生し以後室内に放置した場合と、水中養生を継続した場合とのコンクリートの拡散係数を比較した実験の結果である。

用いたコンクリートの配合は、粗骨材の最大寸法を 25 mm, スランプを約 7.5 cm, ビンゾールを用いて空気量を約 5%, 単位セメント量を 280 kg としたものと、これに塩化カルシウムをセメントの 2% 添加したものと、およびセメントの 10% を消石灰でおきかえたものとのである。

透水試験供試体は直径 15 cm, 高さ 15 cm の円柱形と

し、試験水圧は 5 kg/cm², 試験時間は 6~48 時間とした。

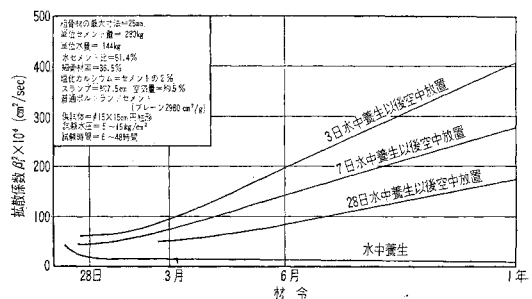
表—18 において次のことが認められる。

塩化カルシウムまたは消石灰を用いない場合、供試体の乾燥による水密性の低下の程度は、たとえば、材令 7 日まで水中養生し以後室内に放置した場合の拡散係数は、水中養生を継続した場合にくらべ、材令 28 日において約 2.9 倍、材令 3 月において約 18 倍となっている。

塩化カルシウムを添加した場合は、乾燥による供試体の重量の減少もいくぶん減り、水密性の低下の程度もいくぶん少なくなり、上記の関係は、材令 28 日において約 2.5 倍、材令 3 月において約 5.7 倍となっている。

しかし、消石灰の使用は、乾燥による水密性の低下をかえっていちじるしくするのであって、たとえば、材令 7 日まで水中養生し、以後材令 3 月まで室内に放置した場合の拡散係数は、水中養生を継続した場合の約 76 倍となっている。なお 図—10 は塩化カルシウムを添加したコンクリートを材令 3 月以後も引き続いて室内に放置した場合の拡散係数の増加の状況を示したものである。

図—10 供試体の乾燥がコンクリートの水密性におよぼす影響



散係数とを比較したのである。

実験に用いたマス コンクリートの配合は、単位セメント量を 170 kg および 150 kg とし、フライアッシュを用いる場合はその置き換え率をセメントの 20% および 40% とした5種類とした。

用いたセメントは中庸熱ポルトランド セメント, AE 剤はビンゾール, セメント分散剤はボゾリス No.8 である。

透水試験供試体は、粗骨材の最大寸法を 100 mm とした場合、直径 30 cm, 高さ 30 cm の円柱形とし、40 mm 以上および 25 mm 以上の粒をふるい去った場合はそれぞれ直径 20 cm, 高さ 20 cm の円柱形および直径 15 cm, 高さ 15 cm の円柱形とした。これらの供試体は、粗骨材の最大寸法を 100 mm としたコンクリートを練り混ぜ、その1部から 40 mm 以上および 25 mm 以上の粒をふるい去り、1バッチのコンクリートから同時に1個あて製造したのである。コンクリートの締固めは 3. に述べたように、マス コンクリートの場合は小型内部振動機を用い、40 mm および 25 mm 以下のコンクリートの場合は手突きとした。

供試体の材令は 28 日, 3月および1年とし、供試体の養生は約 21°C の水中とした。

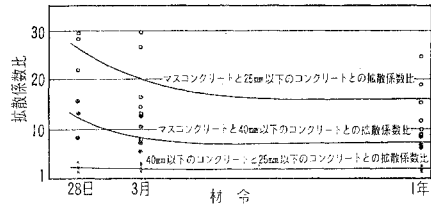
透水試験における試験水圧は、粗骨材の最大寸法を 100 mm とした場合は 5 kg/cm², 40 mm 以上および 25 mm 以上の粒をふるい去った場合は 10~20 kg/cm² とし、試験時間は 24 時間または 48 時間とした。

実験に用いたコンクリートの配合および実験の結果は表-19 に示すとおりである。

表-19 において、粗骨材の最大寸法を 100 mm としたコンクリートの拡散係数試験値のばらつきが相当に大きいので、これと大粒の粗骨材をふるい去ったコンクリートの拡散係数との関係を明確に論ずることは困難であるが、試験値のばらつきが比較的小さい 40 mm 以下および 25 mm 以下のコンクリートの拡散係数の間にはほぼ一定の関係のあることが認められることから、これらとマス コンクリートの拡散係数との間にもコンクリートの配合に関らず大体一定の関係があるとしてよいものと思われる。しかしこの関係は供試体の材令によっていくぶん相違することが認められる。すなわち、図-11 に示すように、材令が長いほどマス コンクリートの拡散係数と大粒の粗骨材をふるい去ったコンクリートの拡散係数との割合は小となっている。たとえば、マス コンクリートの拡散係数は 40 mm 以下のコンクリートの拡散係数にくらべ、材令 28 日においては 8.3~15.7 倍, 平均約 12.4 倍であるが、材令 1年においては、6.3~8.6 倍, 平均約 7.3 倍となっている。

これは、コンクリートが比較的動水抵抗の大きい骨材およびモルタル部と、動水抵抗の小さい粗骨材とモルタ

図-11 材令と拡散係数比との関係



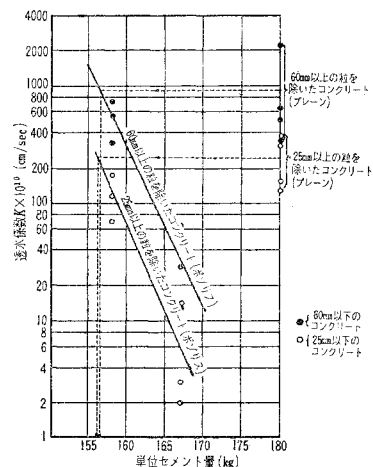
ルの結合部分からなっており、初期材令においてはモルタル部の水密性が比較的小さいので、大きい砂利を用いたコンクリートと小さい砂利を用いたコンクリートにおける水の浸透深さの割合が、長期材令におけるよりも大となるためと思われる。

しかし、材令が約6月以降においては、図-11 に示すように、この拡散係数の割合はほぼ一定となるのであって、粗骨材の最大寸法を 100 mm としたマス コンクリートの拡散係数は、40 mm 以上の粒をふるい去ったものの 6.3~8.6 倍, 平均約 7.3 倍, 25 mm 以上の粒をふるい去ったものの 10~24.5 倍, 平均約 16 倍となっている。

この関係は、水圧の大きさおよび水圧を加えてからの経過時間が一定である場合、マス コンクリートにおける平均浸透深さが 40 mm 以上および 25 mm 以上の粒をふるい去った場合のそれぞれ約 2.7 倍および約 4 倍となることを示すものである。

また、図-12 は筆者がさきに報告した¹⁵⁾セメント分散剤がマス コンクリートの水密性におよぼす影響の実験結果である。この実験においては、粗骨材の最大寸法を 150 mm としたマス コンクリートの配合から、あらかじめ 60 mm 以上および 25 mm 以上の粒を除いて練り混ぜたコンクリートを用い、アウト プット方法によって試験したのである。図-12 において、ボゾリスを用いれば、これを用いないコンクリートと同じウォーカビリ

図-12 マス コンクリートの単位セメント量と透水係数との関係



チーおよび水密性を有するコンクリートを得るために必要な単位セメント量を相当に減ぜられるのであって、その減ぜられる程度が 60 mm 以下のコンクリートの場合と、25 mm 以下のコンクリートの場合とでほぼ同等となることが示されている。

以上のことは、マス コンクリートの水密性とこれから大粒の粗骨材をふるい去ったコンクリートの水密性との間には、マス コンクリートの配合に関らずほぼ一定の関係のあることを示すものである。従って、試験装置その他の都合からやむを得ずマス コンクリートそのものの透水試験を実施できない場合には、これから大粒の粗骨材を除いたコンクリートについて試験を行えば、その試験結果から入念に打込み締固めた場合におけるマス コンクリートの水密性をある程度推定できると思われる。

(2) AE 剤およびセメント分散剤がマス コンクリートの水密性におよぼす影響

AE 剤およびセメント分散剤がマス コンクリートの水密性におよぼす影響については、さきに土木学会論文集に報告した¹²⁾。この実験結果によれば、良質な AE 剤およびセメント分散剤を用いれば、これらを用いないコンクリートにくらべ、単位セメント量をある程度減じてもおまなマス コンクリートの水密性は改善されるのであって、特に良質なセメント分散剤を用いる場合には、単位セメント量が 160~180 kg の範囲の AE 剤を用いたコンクリートおよび用いないコンクリートにくらべ、同じウォーカビリチーおよび水密性を有するために必要な単位セメント量を、それぞれ約 6~10% および約 13% 減じることが示されている。

従って、良質なセメント分散剤をマス コンクリートに用いることは、温度ひびわれの発生を防ぐのみならず、コンクリート自体の水密性を増すためにも有効な手段である。

(3) フライアッシュがマス コンクリートの水密性におよぼす影響

フライアッシュの使用がマス コンクリートの水密性におよぼす影響の実験結果は表一19 に示されている。

すなわち、粗骨材の最大寸法を 100 mm、スランブを約 3 cm、ポゾリス No. 8 を用いて空気量を約 3% としたマス コンクリートにおいて、セメントの 0%、20% および 40% をフライアッシュでおきかえた場合の拡散係数および圧縮強度を比較したのである。

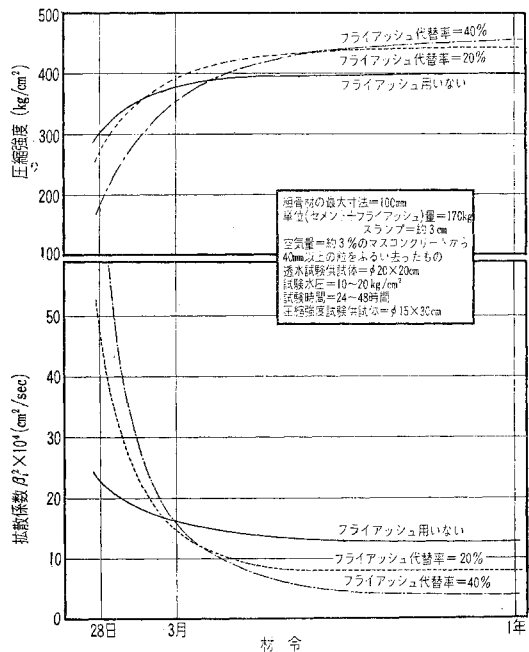
供試体の材令は 28 日、3 月および 1 年とし、供試体の養生は約 21°C の水中である。

表一19 において、セメントの 20~40% をフライアッシュでおきかえた場合のコンクリートの水密性は、従来いわれているように、初期材令においてはフライアッシュを用いない場合より小であるが、材令 3 月においては

ほぼ同等となり、材令 1 年においてはフライアッシュの使用量が多いほど小となることが示されている。

すなわち、マス コンクリートから 40 mm 以上の粒をふるい去ったコンクリートについて論ずれば、図一13 に示すように、セメントの 20% および 40% をフライアッシュでおきかえた場合の拡散係数はフライアッシュを用いない場合にくらべ、材令 28 日においてはそれぞれ約 2.2 倍および約 6 倍であるが、材令 1 年においてはそれぞれ約 0.6 倍および約 0.3 倍となっている。この関係は粗骨材の最大寸法を 100 mm としたマス コンクリートにおいても、25 mm 以上の粒をふるい去ったコンクリートにおいても、ほぼ同様である。

図一13 フライアッシュがマス コンクリートの水密性および圧縮強度におよぼす影響



これは、マス コンクリートのように十分な湿潤養生が期待できる場合に、良質なフライアッシュを適量用いることは、コンクリートの温度上昇速度の減少および長期強度の増進のみならず、長期における水密性を増すためにも有効であることを明瞭に示すものである。

(4) 打込み温度および養生温度がマス コンクリートの水密性におよぼす影響

表一20 は、粗骨材の最大寸法を 150 mm、スランブを約 3 cm、単位セメント量を 180 kg としたマス コンクリートの配合から、あらかじめ 25 mm 以上の粒を除いて練り混ぜたコンクリートについて、打込み温度を約 5°C、20°C および 30°C に相違させた場合の拡散係数および圧縮強度を比較した実験の結果である。

透水試験供試体は製造後それぞれ打込み温度と同じ温度に保った室内に 2 時間おいた後、約 20°C に保った室

表-20 打込み温度がマス コンクリートの水密性におよぼす影響

マス コンクリートの配合: 粗骨材の最大寸法=150 mm, 単位セメント量=180 kg, 単位水量=98 kg, 水セメント比=54.4%, 細骨材率=27%, スランプ=約 3 cm

実験に用いたコンクリートの配合: 粗骨材の最大寸法=25mm, 単位セメント量=334 kg, 単位水量=182 kg, 細骨材率=59.7%

打込み温度 (°C)	スランプ (cm)	材令	材令										
			3日	7日	14日	28日	3月	6月	1年				
5.5	12	拡散係数	—	—	53.1 67.8 84.6 10.4	77.5	5.9 10.5 6.8	7.7	7.0 4.9 7.0	6.3	3.5 3.9 3.6	3.7 1.9 2.3	2.6
		$\beta_i^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)											
		圧縮強度 (kg/cm ²)	84.1	153	255	356	425	449	461				
21.0	9.5	拡散係数	—	—	67.1 55.5 57.6 58.4 76.1 52.8	61.3	5.4 6.8 7.8 9.2 7.0 7.1	7.2	4.0 6.5 4.3 8.7 6.3	6.0	2.1 3.2 4.0 5.3 7.1 5.5	4.5 2.5 3.6 4.1	3.1
		$\beta_i^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)											
		圧縮強度 (kg/cm ²)	87.7	154	227	320	389	419	439				
29.5	9	拡散係数	—	—	28.7 76.4 45.4 31.4 43.9 30.3	42.7	7.5 14.3 22.3 12.7 9.4 11.2	12.9	2.9 3.5 5.1 7.1 6.8	5.1	4.8 7.5 4.0 3.8 5.5 5.9	5.2 5.2 4.4 1.5 2.4 2.4	3.5
		$\beta_i^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)											
		圧縮強度 (kg/cm ²)	92.1	145	226	321	395	412	438				
備考	透水試験供試体は、直径 15 cm, 高さ 15 cm の円柱形とした。 試験水圧を 10~20 kg/cm ² , 試験時間を 24~48 時間とした。試験時における平均水温は 18.0~29.0°C であった。 圧縮強度試験値は供試体 3 個の試験値の平均値である。												

内に移し、材令 2 日より約 21°C の水中で養生した。

供試体の材令は 14 日, 28 日, 3 月, 6 月および 1 年とし、透水試験における試験水圧は 5~20 kg/cm², 試験時間は 24 時間または 48 時間とした。

また表-21 は、粗骨材の最大寸法を 150 mm, スランプを約 5.5 cm, ポゾリス No. 8 を用いて空気量を約 3% とし、単位セメント量を 153 kg としたマス コンクリートの配合からあらかじめ 25 mm 以上の粒を除いて

表-21 養生温度がマス コンクリートの水密性におよぼす影響

マス コンクリートの配合: 粗骨材の最大寸法=150 mm, 単位セメント量=153 kg, 単位水量=86 kg, 水セメント比=56.2%, 細骨材率=25.5%, ポゾリス No. 8 =セメントの 0.25%, スランプ=約 5.5 cm, 空気量=約 3%

実験に用いたコンクリートの配合: 粗骨材の最大寸法=25 mm, 単位セメント量=287 kg, 単位水量=161 kg, 細骨材率=57.8%, スランプ=18.5~20 cm, 空気量=5.4~6.0%

養生温度 (°C)	材令	材令					
		14日	28日	3月			
10	拡散係数	846 871 835	851	64.9 147 50.1 54.2	79.1	12.0 14.8 9.6 10.9	11.8
	$\beta_i^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)						
	圧縮強度 (kg/cm ²)	134	213	394			
20	拡散係数	105 125 106	112	20.7 19.2 22.1 13.3	18.8	9.0 9.5 6.5 9.8	8.7
	$\beta_i^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)						
	圧縮強度 (kg/cm ²)	182	313	373			
30	拡散係数	38.9 27.7 31.2	32.6	23.8 12.2 13.6 10.6	15.0	9.3 7.3 7.9 7.6	8.0
	$\beta_i^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)						
	圧縮強度 (kg/cm ²)	229	322	368			
備考	透水試験供試体は、直径 15 cm 高さ 15 cm の円柱形とした。 試験水圧を 5~10 kg/cm ² , 試験時間を 24~48 時間とした。 試験時における平均水温は、19.5~21.0°C であった。 圧縮強度試験値は、供試体 3 個の試験値の平均値である。						

練り混ぜたコンクリートについて、養生温度を約 10°C, 20°C および 30°C に相違させた場合の拡散係数および圧縮強度を比較した実験の結果である。

透水試験供試体は製造後約 48 時間約 20°C の室内におき、その後所定の温度の水中で養生した。

供試体の材令は 14 日, 28 日および 3 月とし、透水試験における試験水圧は 5 kg/cm² または 10 kg/cm², 試験時間は 24 時間または 48 時間とした。

表-20 および表-21 において、コンクリートの打込み温度および供試体の養生温度が低い場合のコンクリートの水密性は、高い場合にくらべ、初期材令においては小であるが、長期材令においてはほぼ同等となるのであって、この関係は従来いわれている打込み温度および養生温度と圧縮強度の増進状況との関係と類似の傾向を示すものである。すなわち、打込み温度を約 5°C とした場合の拡散係数は、約 30°C とした場合にくらべ、材令 14 日においては約 1.8 倍であるが、材令 1 年においては約 0.7 倍となっている。また、養生温度を約 10°C とした場合の拡散係数は、約 30°C とした場合にくらべ、材令 14 日においては約 2.5 倍であるが、材令 3 月においては約 1.5 倍となっている。

これは、マス コンクリートの温度ひびわれを少なくするために、打込み時および硬化後の温度をなるべく低く保つことは、長期強度の増進のみでなく、長期における水密性にもよい影響を与えることを示すものである。

9. 新旧コンクリートの打継目の水密性

新旧コンクリートの打継目が構造物の弱点となり、施工法がよほどよくないと構造物の強度、耐久性、および

水密性をそこなうことは従来いわれているところである。

水槽の壁、トンネルの巻立などからのろう水はほとんど大部分打継目の部分からおこっており、また、特に水密を要する構造物でない場合でも、打継ぎ部が水密でなければ、そこから水が浸入して構造物の耐久性を減じたり、鉄筋を錆びさせたりするのであって、水密的な打継目をつくることはきわめて重要である。

打継目の強度については、従来多くの有益な論文^{16), 17), 18)}が発表されているが、打継目の水密性についてこれを定量的に論じたものは非常に少ない。これは、主として、打継目の水密性を試験するための適当な試験方法が提示されなかったことによるものと思われる。

本章は、東京大学 国分正胤教授の方法に従って、直径と軸とをふくむ面を打継ぎ面とする円柱形供試体を用い、浸透深さ試験方法によって、水平および鉛直打継目における打継目の各種施工方法と水密性との関係について研究した結果を述べたものである。

(1) 供試体の製造および養生

透水試験供試体は直径 20 cm、高さ 20 cm の円柱形とし、打継目を有するものはその直径と軸とをふくむ面を打継ぎ面とした。

水平打継目を有する供試体を製造するときに用いた型わくは、直径 20 cm、高さ 40 cm の圧縮強度試験用型わくの上面にふたをつけ、側面を巾約 6 cm、長さ約 30 cm にわたって切り取ったもので、これを横にすえ、切り開いたすき間からコンクリートを詰めるようにしたものである。

供試体の製造に当っては、あらかじめ一端から 20 cm のところに仕切りを設けた半円形断面の型わくにコンクリートを詰めて、長さ 20 cm の半円柱形の旧コンクリートを造り、旧コンクリートの打継ぎ面を所定の方法で処理した後、一部を切り開いてある上半部の型わくを組み、旧コンクリート面を水平にして新コンクリートを打継いだ。旧コンクリートは型わくに 2 層に分けて詰め、各層を突き棒で 30 回平等に突き固めた後、上面を木鏝で軽くならし、たいらに仕上げた。新コンクリートは旧コンクリートと同様な方法で打込み締固めた後、型わくの壁に沿い入念にナイフでスペーシングして、厚さが薄くなっている隅の部分にも十分コンクリートがゆきわたり、打継目に欠損部ができないようにつとめた。

比較に用いた打継目を有しない供試体の製造に当っては、上に述べた型わくを組み、上部のすき間からコンクリートを 3 層に分けて詰めた。このとき、第 1 層および第 3 層は 1/4 量のコンクリートを詰めた後突き棒で 30 回突き、第 2 層は 1/2 量のコンクリートを詰め、突き棒で 60 回突き固めた。

水平打継目に関する実験に用いた供試体は、上記のよ

うにして製造したから、水圧はコンクリートの打込み方向に直角方向に加えられたのである。

鉛直打継目を有する供試体を製造するときに用いた型わくは、直径 20 cm、高さ 40 cm の圧縮強度試験用型わくであって、その中に直径と軸とをふくむ面に仕切りを入れておいて、20 cm の高さに旧コンクリートを打込み、旧コンクリートが硬化した後仕切りを取って、旧コンクリート面を所定の方法で処理し、新コンクリートを打継いだ。

コンクリートの打込みおよび締固めの方法は、新旧コンクリートとも 2 層に分けて詰め、各層を突き棒で 25 回突き固めた。新コンクリートを突き固めた後、ナイフでスペーシングして新旧コンクリートが十分密着するようにつとめた。

打継目を有しない供試体は、コンクリートを 3 層に分けて詰め各層を突き棒で 45 回突き固めて造った。

鉛直打継目に関する実験に用いた供試体は、このようにして製造したから、水圧はコンクリートの打込み方向に平行に加えられたのである。

旧コンクリートの打継ぎ面を処理する時期は、すべて旧コンクリートを打込んでから約 24 時間後とし、打継ぎ面の処理が終わったのちただちに新コンクリートを打継いだ。

製造した供試体は、新コンクリートの材令 1 日において脱わくし、材令 28 日まで約 21°C の水中で養生した後、10 日間室内で乾かし、透水試験を行なった。

(2) 打継ぎ方法が水平打継目の水密性におよぼす影響

粗骨材の最大寸法を 25 mm、スランブを約 7.5 cm、水セメント比を 55% としたコンクリートおよびスランブを約 10 cm、水セメント比を 68% としたコンクリートを用い、通常のコンクリート工事において起こりうる場合を考えて、次の 4 種の水平打継目における拡散係数と打継目を有しないものの拡散係数とを比較した。

(1) 旧コンクリート打継ぎ面のレイタンスをタワシで洗い落とし、表面のみ乾いた状態として打継ぐもの。

(2) 旧コンクリート打継ぎ面をワイヤー ブラシで約 2 mm 削り取って粗にし、表面のみ乾いた状態とし、コンクリート中のモルタルを約 8 mm 厚さに敷きならして打継ぐもの。

(3) (2) と同様な方法で打継ぎ、2 時間後に振動を与えて再び締固めるもの。

(4) 旧コンクリート打継ぎ面をワイヤー ブラシで約 2 mm 削り取って、粗にし、表面のみ乾いた状態とし、水セメント比 32% のセメントペーストを約 5 mm 厚さに塗って打継ぐもの。

(4) の打継ぎ面に塗りつけたセメントペーストの厚さを約 5 mm としたのは、打継ぎ部における水密性を試

表—22 打継ぎ方法と水平打継目の水密性との関係

打継ぎ方法	粗骨材の最大寸法=25 mm 単位セメント量=296 kg, 単位水量=163 kg 水セメント比=55%, 細骨材率=42% スランプ=7.5 cm					粗骨材の最大寸法=25 mm 単位セメント量=260 kg, 単位水量=177 kg 水セメント比=68%, 細骨材率=45% スランプ=10 cm				
	試験水圧 (kg/cm ²)	試験時間 (hr)	平均浸透深 (cm)	平均水温 (°C)	拡散係数 $\beta_f^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)	試験水圧 (kg/cm ²)	試験時間 (hr)	平均浸透深 (cm)	平均水温 (°C)	拡散係数 $\beta_f^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)
(1) 旧コンクリート打継ぎ面のレイトンスをタワシで洗い落して打継ぐ	5	48	4.2 4.8 4.4 3.3	27.5	44.9 59.9 50.2 28.6 (3.23)	—	—	—	—	—
(2) 旧コンクリート打継ぎ面をワイヤーブラシで約2mm削り取って粗にし、コンクリート中のモルタルを約8mm厚さに塗って打継ぐ	10	48	2.9 3.6 3.0 2.6	27.0	13.5 21.0 13.9 10.7 (1.04)	10	48	4.5 3.9	4.2	20.0 37.9 29.0 (1.00)
(3) (2)と同様な方法で打継ぎ2時間後再振動締固めを行なう	10	48	2.5 1.9 3.7 2.1	24.5	10.2 5.9 23.5 7.9 (0.84)	—	—	—	—	—
(4) 旧コンクリート打継ぎ面をワイヤーブラシで約2mm削り取って粗にし、水セメント比32%のセメントペーストを約5mm厚さに塗って打継ぐ	—	—	—	—	—	10	48	2.2 2.4 2.7 3.3	2.6	20.0 9.1 10.3 13.9 20.6 (0.41)
打継目を有しないもの	20	48	3.5 3.0 3.6	23.0	15.4 11.2 15.9 (1.00)	20	48	4.9 4.7 5.1	4.9	19.0 33.3 30.5 36.0 (1.00)

験するためいくぶん厚くしたのである。

透水試験における試験水圧は、打継目を有する供試体においては 5 kg/cm² または 10 kg/cm²、打継目を有しない供試体においては 20 kg/cm² とし、試験時間は 48 時間とした。

実験の結果は 表—22 のようになった。

表—22 において、水平打継目の水密性は、旧コンクリート打継ぎ面のレイトンスを洗い落しただけで新コンクリートを打継いだ場合には、打継目を有しないものより相当に小となるのであって、その拡散係数は打継目を有しないものの大約 3 倍となっている。しかし、旧コンクリートの品質の悪い部分を取り除き、旧コンクリート面にセメントペーストまたはモルタルを塗りつけた後に新コンクリートを打継げば、打継目を有しないコンクリートと同程度の水密性が得られることが示されている。すなわち、モルタルを敷いて打継いだ場合および約 2 時間後これに再振動締固めを行なった場合の拡散係数は、打継目を有しないものの拡散係数のそれぞれ約 104% および約 84% となっており、再振動締固めが打継目の水密性を増すために効果のあることも示されている。

打継ぎ面にセメントペーストを塗りつけて打継いだ場合は、あらかじめセメントペーストの厚さをいくぶん厚くしておいたから、水圧を加えた後に引張強さ係数試験によって供試体を割ったとき、大部分セメントペースト部で切れた。従って、表—22 に示す試験値は、打継ぎ部のセメントペーストにおけるものであって、その拡散係数は打継目を有しないものの 1/2 以下となっている。試験後破面からセメントペーストをはぎ取って、新旧コンクリートにおける水の浸透状況を確認したが、これらの部分における浸透深さはいずれも打継目を有しない供試体の場合と同程度であることが認められた。

以上のことは、プラスチックなコンクリートでつくった水平打継目においては、従来の打継ぎ方法によって入念に施工すれば、打継目が水密性に対して特に弱点とはならないことを示すものである。

しかし、旧コンクリート打継ぎ面にそのまま新コンクリートを打継いだ場合の拡散係数が打継目を有しないものの大約 3 倍にもなったことは、旧コンクリートの材料の分離によって、打継ぎ面のコンクリートの品質がいちじるしく悪くなり、十分な打継目をつくることができないことを実証しているものであって、新旧コンクリートの打継目の施工に当ってはまず材料の分離ができるだけ少ないように旧コンクリートを造り、十分に養生することがきわめて重要であることを示している。しかし、いかに注意しても材料の分離はさけられないから、旧コンクリート上部の品質の悪い部分を取り除いてから打継ぐことが必要となるのである。

(3) 打継ぎ方法が鉛直打継目の水密性におよぼす影響

(2) に述べた水平打継目に関する実験に用いたコンクリートと同じ配合のコンクリートを用い、鉛直打継目を有する供試体を造り、鉛直打継目における拡散係数と打継目を有しないものの拡散係数とを比較した。

打継ぎ方法は (2) で述べたと同様な 4 種の方法とした。

透水試験における試験水圧は、打継目を有する供試体においては 5 kg/cm² または 10 kg/cm²、打継目を有しない供試体においては 20 kg/cm² とし、水圧はコンクリートを打込んだ時の供試体の底面から加えた。

試験時間は 48 時間とした。

実験の結果は 表—23 のようになった。

表—23 において、旧コンクリート打継ぎ面を水で洗っただけで新コンクリートを打継いだ場合には、供試体 4

表—23 打継ぎ方法と鉛直打継目の水密性との関係

打継ぎ方法	粗骨材の最大寸法=25 mm 単位セメント量=296 kg, 単位水量=163 kg 水セメント比=55%, 細骨材率=42% スランプ=7.5 cm					粗骨材の最大寸法=25 mm 単位セメント量=260 kg, 単位水量=177 kg 水セメント比=68%, 細骨材率=45% スランプ=10 cm					水圧の 加え方				
	試験 水圧 (kg/ cm ²)	試験 時間 (hr)	平均浸透深さ (cm)	平均 水温 (°C)	拡散係数 $\beta_t^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)	試験 水圧 (kg/ cm ²)	試験 時間 (hr)	平均浸透深さ (cm)	平均 水温 (°C)	拡散係数 $\beta_t^2 \times 10^4$ (cm ² /sec)					
(1) 旧コンクリート打継ぎ面のレイタン スをタワシで洗い落して打継ぐ	5	48	供試体4個のうち3個は5 kg/cm ² の水圧を5~10分加えたとき他の1個は供試体上部に水を 満たしたとき継目から漏水した		—	—	—	—	—	—	打込んだ 時の供試 体の底面 から加え る				
(2) 旧コンクリート打継ぎ面をワイヤー ブラシで約2mm削り取って粗にし、 コンクリート中のモルタルを約 8mm厚さに塗って打継ぐ	10	48	2.3 2.3 2.5 3.1	2.6	27.0	8.8 8.5 10.6 9.8 15.4	(1.01)	10	48	3.61 3.2		3.4	20.0	24.71 19.6	22.2 (0.71)
(3) (2)と同様な方法で打継ぎ2時間後 再振動締固めを行う	10	48	2.4 2.4 2.2 3.6	2.7	24.5	9.4 9.5 8.5 22.4	12.4 (1.18)	—	—	—		—	—	—	—
(4) 旧コンクリート打継ぎ面をワイヤー ブラシで約2mm削り取って粗にし 水セメント比32%のセメントペ ーストを約5mm厚さに塗って打継ぐ	—	—	—	—	—	—	—	10	48	2.8 2.2 1.8 2.2		2.2	20.0	14.4 8.8 6.4 8.9	9.6 (0.31)
打継目を有しないもの	20	48	2.5 3.0 3.5 2.8	3.4	25.0	7.2 10.9 14.2 9.5	10.5 (1.00)	20	48	4.9 4.5 5.0 4.7		4.8	19.0	33.2 27.6 33.6 30.7	31.3 (1.00)
(2)と同じ	10	48	4.0 4.3 4.6	4.3	20.0	29.7 34.0 39.0	34.2	—	—	—	—	—	—	—	打込んだ 時の供試 体の上面 から加え る

個のうち3個は 5 kg/cm² の水圧を 5~10 分加えたとき、残りの1個は供試体の上に水をみただけでまだ圧力を加えないうちに打継目からろう水した。これは、旧コンクリート打継ぎ面が平らであるために、新コンクリート中の水が打継ぎ面に沿って上昇しやすく、打継ぎ面に沿って多量の連続した水途ができたため、打継部における動水抵抗がほとんどなくなったものと思われる。

旧コンクリート打継ぎ面をワイヤー ブラシで削り砂利を突出させた後、この面にセメント ペーストまたはモルタルを塗って打継いだ場合には打継目の水密性は、打継目を有しないコンクリートとほぼ同等となっている。しかし、この試験値は打込んだときの供試体の底面から水圧を加えた場合のものであって、打込んだときの供試体の上面から水圧を加えた場合には、その拡散係数は、表—23の最下欄に示すように、底面から加えた場合の約3倍となっている。

国分教授は鉛直打継目を有する高さ 30 cm の円柱形供試体を造り、これをワイヤー ソーで切断して、高さ 15 cm ずつの2個の供試体とし、それぞれの打継目の引張強さ係数を試験した結果、打継目の上半部の強度は下半部の強度の約 60% となることを示している。

筆者の実験結果は打継目の上部約 4.5 cm の区間の水密性であるから、その低下の程度がいちじるしかったと思われるが、国分教授の実験に用いたコンクリートの配合が粗骨材の最大寸法を 25 mm、スランプを約 15 cm、水セメント比を 60% としたものであり、打継ぎ方法も旧コンクリート打継ぎ面を水で洗っただけで砂利の突出ていない平らな面にセメント ペーストを塗って打継

いだものであって、筆者の実験におけるよりも打継ぎ面にそっておこる新コンクリートのブリージングがいちじるしいことを考えれば、一般に、打継目の上部の水密性が下部にくらべて小となる割合は強度減少の割合よりもさらにいちじるしいものと思われる。

このように鉛直打継目においては、打継ぎ面を粗にしてセメント ペーストまたはモルタルを塗って入急に打継いでもコンクリートの水密性は小となるのであって、プラスチックなコンクリートで造った高さがわずか 20 cm の供試体においてすら打継目の上部の拡散係数は下部の約3倍にもなるのであるから、実際の構造物の鉛直打継目においては、その上部の水密性はいちじるしく小となるものと思われる。

以上のことは、水密を要する鉛直打継目の施工に当たっては、材料の分離ができるだけ少ないように新コンクリートを打継ぐことが特に重要であるばかりでなく、プラスチックなコンクリートを用いた場合でも、粗雑な方法で打継げば打継目の動水抵抗がほとんどなくなるのであるから、新コンクリートから分離した水が打継ぎ面にそって上昇するのを妨げるために、旧コンクリート打継面を粗にしてセメント ペーストまたはモルタルを塗って打継ぐことがぜひ必要であることを示している。

しかし、入急に施工しても鉛直打継目の上部における水密性の低下はまぬがれないことが示された。これは、水密的な鉛直打継目を造るには、打継目の上部におけるコンクリートの品質を改善するために、新コンクリートの打込み後適当な時期に再振動締固めを行なうことおよび適当な水止めを用いる必要のあることを示すものである。

10. 水密性を必要とするコンクリート部材の設計に関する一提案

水密性を必要とするコンクリート部材を設計する場合、部材の厚さおよび用いるコンクリートの配合は所要の水密性、強度、耐久性などを考慮して定める必要がある。

しかし、従来、水密性をもとしたコンクリートの断面寸法の計算方法、あるいはコンクリートの配合の設計方法について論じた研究はほとんどなく、現在、水密性を必要とするコンクリート部材でも、その断面寸法は強度の計算、施工上の必要、経験などからこれを定めており、また水密コンクリートの配合については、諸外国においても、水セメント比の最大値の標準を示しているに過ぎない。

コンクリート部材の水密性は用いるコンクリートの品質のみでなく、部材の厚さに関係があることは当然である。コンクリートの厚さに無関係に水セメント比を定めているのは不十分であって、部材の厚さをも考えて水セメント比その他を定めるのが合理的である。

コンクリート部材の水密性は、工事現場における施工の良否の影響をいちじるしくうけるものであり、また供試体の場合とは材料分離の程度に相当の差違があるから、実験室においてプラスチックなコンクリートを入念に打込み締固めて造った供試体について行なった透水試験の結果をそのまま適用することはできないが、これをもととして水密性から必要なコンクリート部材の厚さ、およびコンクリートの配合のめやすが得られれば、はなはだ便利である。

浸透深さ試験の結果は、コンクリートの品質および厚さと水密性との関係をおおむね程度示しうるのであって、この試験結果をもととして水密性から必要なコンクリートの厚さおよびコンクリートの配合の大体のめやすを与えることができる。

たとえば

$$\text{設計水圧: } P_0 = 5 \text{ kg/cm}^2$$

用いるコンクリートの拡散係数: $\beta_i^2 = 20 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ である場合の水の平均浸透深さを計算する。

3. (2) に示した (1) 式において、水温の影響を無視すれば

$$\beta_i^2 = \alpha \frac{D_m^2}{4t\xi^2}$$

$$D_m = 2\xi \sqrt{\frac{t}{\alpha \beta_i^2}} \dots\dots\dots (16)$$

(16) 式において、水圧が加わってから 30 年後の平均浸透深さを設計の基準にとるものとすれば

$$t = 30 \text{ 年} = 9461 \times 10^5 \text{ sec}$$

$$\alpha = 7.027 \text{ (表-24 参照)}$$

$$\xi = 0.905 \text{ (表-25 参照)}$$

表-24 α の値

経過時間		α の値 ($=t\tau^3$)
年	sec	
10	$31\,536 \times 10^4$	4 388
20	$63\,072 \times 10^4$	5 906
30	$94\,608 \times 10^4$	7 027
50	$157\,680 \times 10^4$	8 747

表-25 ξ および ξ^2 の値

P_0 (kg/cm ²)	P_f (kg/cm ²)	ξ	ξ^2
3	1	0.688	0.470
5	1	0.905	0.819
10	1	1.163	1.353
15	1	1.301	1.693
20	1	1.386	1.921

備考 P_f は水の浸透部の平均深さにおける水圧であって、3章に述べたように 1 kg/cm^2 とした。

$$\beta_i^2 = 20 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

を (16) 式に代入することによって

$$\text{平均浸透深さ } D_m = 29.7 \text{ cm}$$

なお、水圧が加わってから、10 年後、20 年後、および 50 年後の平均浸透深さは次のようになる。

$$10 \text{ 年後 } D_m = 21.7 \text{ cm}$$

$$20 \text{ 年後 } D_m = 26.5 \text{ cm}$$

$$50 \text{ 年後 } D_m = 34.5 \text{ cm}$$

この場合の設計水圧を部材に加わる実際の水圧に相当な安全率を考えて定めれば、上記のようにして算出した平均浸透深さはそのまま水密性から必要なコンクリート部材の厚さを与えることになる。

このような安全率を定めることは、はなはだ困難な問題であるが、次のようにして安全率に対する一つのめやすを与えることができると思われる。

粗骨材の最大寸法を 25~100 mm としたコンクリートについて行なった 8. までの実験結果によれば、同じ配合のコンクリートを入念に打込み締固めて造った数個の供試体における拡散係数試験値の変動係数は約 20~60% であり、試験値の最大値は平均値の約 1.1~2.5 倍、平均約 1.5 倍となっている。しかし、最大値が平均値の 2 倍以上となるのは、粗骨材の最大寸法を 100 mm とした場合にまれにおこるのであって、大部分は 2 倍以下となった。

従って、実験室において同じ配合のコンクリートを入念に打込み締固めて造った数個の供試体における拡散係数試験値の最大値は平均値の通常 2 倍以下になると考えてよいものと思われる。

次に工事現場における計量の誤差その他によっておこる水密性の変動に対する安全率を 2 と考える。これは、図-5 に示すように、水セメント比が約 60% 以下のコンクリートにおいて水セメント比の約 10% の差異に相当するものである。

図-14 水圧を加えてからの経過年数と平均浸透深さとの関係

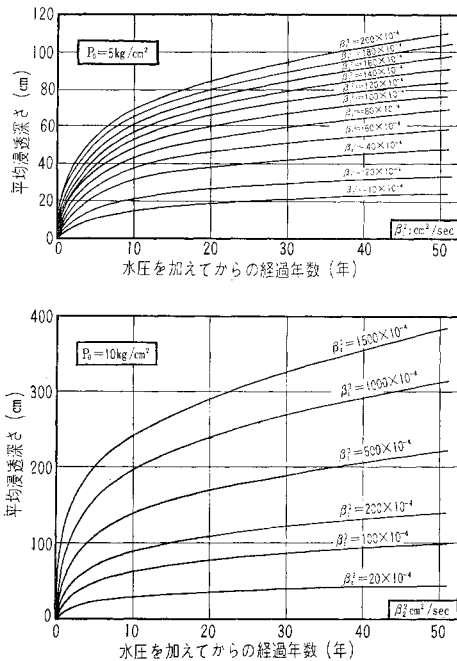
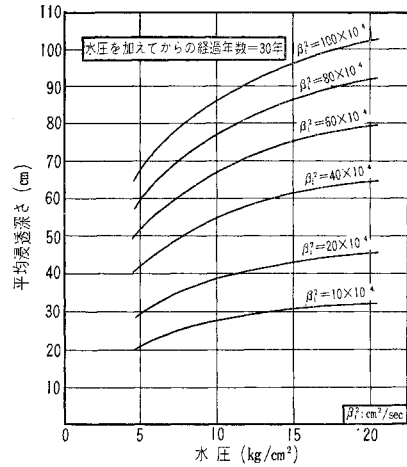


図-15 水圧の大きさと平均浸透深さとの関係



以上のことから、部材のコンクリートの拡散係数は、これと同じ配合のコンクリートで造った供試体の試験結果の4倍程度以上となるものと思われる。

拡散係数は平均浸透深さの2乗に比例するものであり、また表-9に示すように、平均浸透深さは近似的に水圧の平方根に比例することを考えれば、拡散係数が4倍以上となること、すなわち、平均浸透深さが2倍以上となることは、設計水圧を実際に加わる水圧の4倍以上に選べばよいことを示すものである。

強度の場合と異なって、構造物におけるコンクリートの水密性の不足がただちに人畜に大きい被害をおよぼすことはほとんどないと思われるし、またコンクリートの厚さを2倍とすることにより、これを水が透過するに要する年数は大よそ12倍となることもあわせ考えれば、工事現場において、コンクリートの入念な打込み締固めおよび十分な養生が期待できる場合には、水密性から必要な部材の厚さは供試体について行なった実験結果をもととして計算した平均浸透深さの3倍程度とすれば安全と思われるのであって、これを換言すれば、設計水圧は部材に実際に加わる水圧の

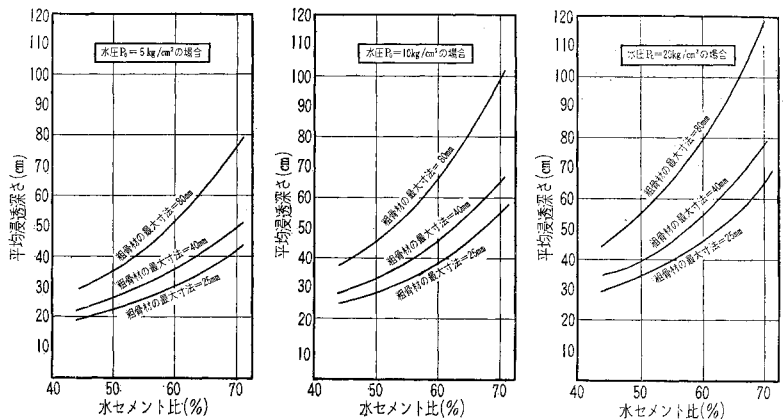
約10倍に選べばよいものと思われる。

図-14は水圧を5 kg/cm² および 10 kg/cm² とした場合の経過年数と平均浸透深さとの関係を示したものであって、経過年数を10~50年とした場合の $\beta_i^2 = 10 \times 10^{-4} \sim 200 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ および $\beta_i^2 = 20 \times 10^{-4} \sim 1500 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ に対する平均浸透深さが示してある。

また図-15は水圧の大きさと平均浸透深さとの関係を示したものであって、水圧を5~20 kg/cm² とした場合の $\beta_i^2 = 10 \times 10^{-4} \sim 100 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ に対する平均浸透深さが示してあり、水圧の値に、部材に実際に加わる水圧の10倍とした設計水圧の値を入れれば、平均浸透深さの値がただちに水密性から必要な部材の厚さを与えるのであって、これらの図は与えられた水圧および拡散係数から所要の部材の厚さのごく大体を定めるのに便利なるものである。

図-16 表-15に示した実験結果から、経過年数を
図-16 コンクリートの配合と平均浸透深さとの関係
(水圧を加えてから30年後)

コンクリートのスランプ約8cm、空気量・粗骨材の最大寸法を25mm、40mmおよび80mmとした場合それぞれ約5%、約4.5%および約3.5%



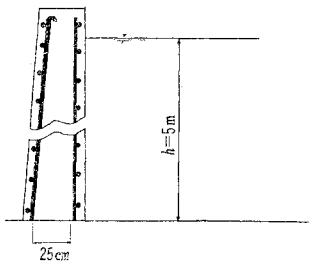
30年とした場合の平均浸透深さを計算し、水セメント比および粗骨材の最大寸法と平均浸透深さとの関係を示したものであって、水密性から必要なAEコンクリートの配合その他の大体のめやすを与えることができる。

たとえば図-17に示すような鉄筋コンクリート止水壁において最大水深が5mである場合、これに用いるAEコンクリートの配合を定める。

設計水圧： $P_0 = 0.5 \times 10 = 5 \text{ kg/cm}^2$

水密性に対して有効に働くコンクリートの厚さを鉄筋の水平純間隔の25cmと考える。

図-17 計算例



水圧が加わってから30年後の平均浸透深さを基準としてコンクリートの配合を定めるものとすれば、図-16より粗骨材の最大寸法を40mmとする場合は、空気量を約4.5%として水セメント比を約48%以下とし、粗骨材の最大寸法を25mmとする場合は空気量を約5%として水セメント比を約53%以下とすればよいことになる。

また、この場合、粗骨材の最大寸法を25mm、水セメント比を62%としたコンクリートを用いれば、水密性から必要なコンクリートの厚さは約33cmとなり、この壁の単位長さ当りのコンクリートの量は、水セメント比を53%としたコンクリートを用いる場合に比べ約30%増加する。表-15に水セメント比を53%としたコンクリートの単位セメント量は同じコンシステンシーを有する水セメント比62%のコンクリートの場合に比べ約15%増加するに過ぎないことが示されている。従って、ある水密性を有する部材を造る場合、水セメント比を53%としたコンクリートを用いる場合は、62%としたコンクリートを用いる場合より、単位長さの部材を造るために必要なコンクリートの量が減じ、骨材量のみならずセメント量も約10%減少することとなり、一般に経済的かつ安全に水密コンクリートを造りうることがわかる。

以上のように、水密性を必要とする部材を設計するに当たっては、用いるコンクリートの品質のみならず、コンクリートの厚さをも考えて、これを定めるのが合理的と信ぜられるのであって、図-14、図-15、図-16は所要の水密性を有するコンクリート部材を造るために必要なコンクリートの配合および部材の厚さを定めるのに実用

上便利なものと思われる。

しかし、これらの図から得られたコンクリートの厚さおよび配合を用いれば、かならず水密的なコンクリート部材を造り得るというのではなく、9.までに述べた諸点に注意して、施工を完全にすることがきわめて大切である。

11. 結 論

コンクリートの透水試験方法として、従来一般に用いられている供試体からの流出量を測定するアウトプット方法は材令の若いコンクリートには適用できるが、長期材令の比較的高密度のコンクリートの場合には相当な水圧を長時間加えても流出量が得られず試験できない場合が多い。そこで筆者はコンクリートに圧入した水の平均浸透深さを測定し、これと水圧の大きさおよび水圧を加えた時間との関係から得られる拡散係数を水密性の尺度とする浸透深さ試験方法を考案し、その信頼度を検討した結果、入念に打込み締固めた場合におけるコンクリートの水密性を試験するための満足な方法であることが確かめられたので、この試験方法を用い、セメント、骨材および混和材料の種類、コンクリートの配合、供試体の材令および養生方法などがコンクリートの水密性におよぼす影響、マスコンクリートの水密性および新旧コンクリートの打継目の水密性などについて基礎的に研究したのであって、この実験の範囲内で次のことがいえると思われる。

(1) 設計の不完全その他の原因で構造物にでるひびわれからろう水する場合を除けば、コンクリートからのろう水の原因は、ほとんどすべて打込み締固めなどの施工の不完全にあるということが出来る。従って、ウォーカビリチーのよいコンクリートを用いることが、材料の分離を少なくし、工事現場において部分的な欠点の少ない均等質なコンクリートが得られやすいことから、コンクリートの水密性を増すためにきわめて重要である。このため、良質なAE剤またはセメント分散剤を用いて適当な空気量を有するAEコンクリートとすることが水密性を大とすために得策な場合が多く、特に貧配合コンクリートの場合、骨材の形状が適当でない場合などにおいてその効果が大きいことが確かめられた。

すなわち、水セメント比およびコンシステンシーを一定としたプラスチックなコンクリートに相当な水圧を加えた場合、水セメント比が比較的小さい場合には空気量が増すほど水密性は小となり、たとえば粗骨材の最大寸法を25mm、水セメント比を53%、スランプを約8cmとしたコンクリートにおいて、空気量1%の増加によって拡散係数は約20%増加したが、水セメント比を約60%以上とした場合には適当な空気量を有するAEコンクリートの水密性はAE剤を用いない場合より大とな

ったし、単位セメント量およびコンシステンシーを一定とした場合には、一般に AE コンクリートの水密性は AE 剤を用いないコンクリートと同等以上となった。

AE 剤およびセメント分散剤の使用によるコンクリートの水密性の改善はマス コンクリートにおいて特にいちじるしいことが認められた。すなわち、単位セメント量を 139~180 kg としたマス コンクリートにおいて、AE 剤およびセメント分散剤を用いて単位セメント量がある程度減じててもなおコンクリートの水密性は改善されるのであって、特に、良質なセメント分散剤を用いれば、AE 剤を用いたコンクリートおよびこれを用いないコンクリートと同じウォーカビリティーおよび水密性を得るために必要な単位セメント量をそれぞれ約 6~10% および約 13% 減ぞられた。また、一般に碎石を用いれば砂利を用いたコンクリートより水密性が小となるが、単位セメント量を 300 kg とした比較的富配合のコンクリートにおいても、良質なセメント分散剤を用いればその水密性は砂利を用いたコンクリートと同等となるのみならず、圧縮強度も約 7% 増加した。以上の実験結果は透水試験の際の水圧を 10~20 kg/cm² とした場合であって、加わる水圧が小さい場合にはこれらの混和剤の効果はさらに大となるものと思われる。

(2) 粗骨材の最大寸法およびコンシステンシーを一定としたコンクリートにおいて、水セメント比が大であるほどコンクリートの水密性はいちじるしく小となり、水セメント比とコンクリートの拡散係数との関係は従来よく知られている水セメント比と透水係数との関係と同様な傾向を示した。すなわち、水セメント比を 60% としたコンクリートの拡散係数は水セメント比を 50% とした場合の約 2 倍となった。これは、ある水圧をうけるコンクリート部材を造る場合、水密性から必要なコンクリートの厚さを、水セメント比 60% のコンクリートを用いる場合は、水セメント比 50% のコンクリートを用いる場合の約 1.4 倍以上とする必要のあることを示すものである。コンクリートの水密性が主としてセメントの単位量に対する水量の関数であるばかりでなく、水密性から必要なコンクリートの厚さおよび水セメント比の相違によるコンクリートの材料分離の程度の差異をも考えれば、水密的なコンクリート部材を経済的かつ安全に造るためには、所要のウォーカビリティーが得られる範囲内でコンクリートの単位水量を最小とすることがきわめて大切である。

(3) 水セメント比およびコンシステンシーを一定としたコンクリートにおいて、用いた粗骨材の最大寸法によってコンクリートの水密性が相違するのは当然であるが、これを確かめた結果、粗骨材の最大寸法を大とするほど水密性は小となり、たとえば粗骨材の最大寸法を 80 mm としたコンクリートの拡散係数は 25 mm とした

場合の約 3 倍となった。従って、水密コンクリートを造るためには他の一般の場合よりコンクリートのウォーカビリティーをよくするためのみならず、粗骨材の最大寸法の相違によるコンクリートの水密性の差異をも考えて、用いる粗骨材の最大寸法を他の一般の構造物の場合よりいくぶん小さく選ぶのが安全である。

(4) マス コンクリートの水密性とこれから大粒の粗骨材をふるい去ったコンクリートの水密性との間には、マス コンクリートの配合に関らず大体一定の関係が認められた。この関係は供試体の材令によっていくぶん相違するが、材令が約 6 月以後においては、粗骨材の最大寸法を 100 mm としたマス コンクリートの拡散係数は 40 mm 以上および 25 mm 以上の粒をふるい去った場合のそれぞれ約 7 倍および約 16 倍となった。従って、試験装置その他の都合からマス コンクリートの透水試験が実施できない場合でも、この関係を用いれば大粒の粗骨材を除いたコンクリートについて行なった透水試験の結果から、入念に打込み締固めた場合におけるマス コンクリートの水密性をある程度推定できると思われる。

(5) マス コンクリートの施工に当っては、構造物の水密性、耐久性および安定に重大な関係のある温度ひびわれの発生を防ぐことがきわめて重要である。このため、マス コンクリートにおいては単位セメント量をなるべく少なくすること、打つときのコンクリートの温度および硬化後のコンクリートの温度をなるべく低く保つことなどが必要であるが、このような施工法によってマス コンクリート自体の水密性が低下することは少なく、むしろ改善される場合の多いことが確かめられた。すなわち、(1) に述べたように、マス コンクリートにおいて良質なセメント分散剤を用いて単位セメント量を 13% 程度減じてても、その水密性はこれを用いないコンクリートと同等となった。また、良質なフライアッシュを用いて単位セメント量を少なくとも長期材令における水密性は改善されるのであって、たとえばセメントの 20% および 40% をフライアッシュでおきかえた場合、材令 1 年における拡散係数はこれを用いない場合のそれぞれ約 60% および 40% となった。また、コンクリートの打込み温度および硬化後の温度を低くしても、長期材令におけるコンクリートの水密性は打込み時および硬化後の温度を高くした場合と同等以上となった。

従って、マス コンクリートにおいて、AE 剤、セメント分散剤またはフライアッシュを用いて単位セメント量を少なくすること、打込み時および硬化後の温度を低く保つことは温度ひびわれの発生を防ぐのみならず、長期強度の増進および長期における水密性を増すためにも有効な手段である。

(6) 材令にとまらぬコンクリートの水密性の増加の

割合は用いたセメントの種類および粉末度、混和材料、コンクリートの配合、養生温度などによって多少相違するが、一般に初期材令においていちじるしい。たとえば普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを約21°Cの水中で養生した場合、材令14日における拡散係数にくらべ、材令28日の拡散係数は大約60%となるが材令6月まで養生しても大約40%となるに過ぎない。これはコンクリートの水密性を増すためには初期材令における湿潤養生がきわめて大切であることを示すものである。

しかし、初期材令において十分な湿潤養生を行なってもその後コンクリートを乾かせばコンクリートの水密性はいちじるしく低下するのであって、たとえば材令7日まで水中養生し以後材令28日まで室内に放置した場合の拡散係数は水中養生を継続した場合の大約2~17倍となった。

乾燥によるコンクリートの水密性の低下は粉末度の低いセメントを用いた場合ほどいちじるしいが、粉末度の高いセメントを用いた場合は空中に放置する期間が長いほど水密性が小となることが認められた。すなわち、ブレン比表面積が約3000および約4000 cm²/gのセメントを用いたコンクリートを材令7日まで水中養生し以後室内に放置した場合、材令3月における拡散係数は材令28日の場合のそれぞれ約1.4倍および約1.6倍となった。現在市販されているセメントはそのブレン比表面積が一般に3000 cm²/g以上であるから、空中に放置する期間が長いほど水密性が小となることに注意しなければならない。また塩化カルシウムその他の混和剤を用いても乾燥によるコンクリートの水密性の低下を防ぐのにあまり効果はなかった。

従って、水密性の大きいコンクリートを造るためには初期養生のみならずコンクリートが水に接するまで湿潤養生を継続することがきわめて大切である。

(7) プラスチックなコンクリートを用いて造った水平打継目において旧コンクリート打継ぎ面のレイタンスを洗い落して新コンクリートを打継いだ場合には、打継目の拡散係数は打継目を有しないもの大約3倍となった。しかし、旧コンクリートの上部の品質の悪くなった部分を取り去って打継ぎ面にセメントペーストまたはモルタルを塗って入念に打継いだ場合には、その拡散係数は打継目を有しないものと同等となった。

従って、水密を要する新旧コンクリートの打継目の施工に当っては、まず材料の分離ができるだけ少ないように旧コンクリートを造り、これを十分に養生することがきわめて重要である。しかし、プラスチックなコンクリートを用いて入念に施工しても材料の分離はさけられないから旧コンクリートの上部の品質の悪くなった部分を取り去る必要があるのであって、このようにして入念に

打継げば水平打継目の水密性は打継目を有しないものと同等とし得るのである。

しかし、鉛直打継目においては、旧コンクリート打継ぎ面を洗って新コンクリートを打継いだ場合には打継目における動水抵抗はほとんどなくなり、旧コンクリート打継ぎ面を粗にしてセメントペーストまたはモルタルを塗って入念に打継いだ場合でも、打継目の下部における拡散係数は打継目を有しないものと同等となるが、上部の拡散係数は大約3倍となった。この関係はプラスチックなコンクリートで造った高さがわずか20cmの供試体の場合であるから、実際の構造物の鉛直打継目においてはその上部の水密性はいちじるしく小となるものと思われる。

従って、水密性を必要とする鉛直打継目を造るためには材料の分離ができるだけ少ないように新コンクリートを打継ぐことが特に重要であり、また新コンクリートから分離した水が打継ぎ面に沿って上昇するのを妨げるために旧コンクリート打継ぎ面を粗にすることが必要である。しかし、このような注意をして入念に打継いでも打継目の上部における水密性が相当に小となることはさけられないから、鉛直打継目においては適当な水止めを用いることが必要となる。また新コンクリートを打込んだ後適当な時期に再振動締固めを行なうことが必要と思われる。

(8) 水密性を必要とするコンクリート部材の厚さおよび用いるコンクリートの配合は所要の水密性、強度、耐久性などを考えて定めるのが合理的なのであって、浸透深さ試験の結果をもととして水密性から必要なコンクリートの配合および厚さの大体のめやすを与えることができる。

参考文献

- 1) 吉越盛次：“コンクリートの水密性試験方法に関する一提案”，電力技術研究所所報 土木第2巻第4号 昭和25年
- 2) F. R. McMillan, & Inge Lyse: “Some Permeability Studies of Concrete,” ACI Journal Dec. 1929
- 3) Paul T. Norton, & D. H. Pletta: “The Permeability of Gravel Concrete,” ACI Journal May 1931
- 4) Ruettgers, E. N. Vidal & S. P. Wing: “An Investigation of the Permeability of Mass Concrete with Particular Reference to Boulder Dam,” ACI Journal March-April 1935
- 5) Herbert K. Cook: “Permeability Tests of Lean Mass Concrete,” ASTM Proceeding 1951
- 6) Jukka Vuorinen: “Some Tests on the Effect of Air-Entrainment on the Tensile Strength and Watertightness of Concrete by Making Use of the Splitting Test,” Quatrieme Congres des Grands Barrages, New Delhi 1951

- 7) Per Nycander: "Betongens Vattentäthet," Statens Provningsanstalt Meddelande 113, 1954
 - 8) T. C. Powers, L. E. Copeland, J. C. Hayes, & H. M. Mann: "Permeability of Portland Cement Paste," ACI Journal Nov. 1954
 - 9) Technical Monograph No. 67, Tennessee Valley Authority 1950: "Measurements of the Structural Behavior of Norris and Hiwassee Dams"
 - 10) 常山源太郎: "高炉スラグを多量に混ぜたセメントモルタルの吸水性と強さ", セメントコンクリート No. 123 昭和32年5月
 - 11) 常山源太郎: "スラグの細かさと高炉セメントモルタルの毛細管吸水量", セメントコンクリート No. 145 昭和34年3月
 - 12) 村田二郎: "中空円筒形供試体を用いるコンクリートの透水試験方法", 土木学会論文集 63号, 昭和34年7月
 - 13) 山崎寛治: "鉱物質微粉末がコンクリートの諸性質におよぼす影響", 日本セメント株式会社研究所要報 第172号 昭和32年11月
 - 14) F. Kocataskin, & E. G. Swenson: "Methods of Rating Concrete Waterproofing," ASTM Bulletin No. 229 April 1958
 - 15) 村田二郎: "セメント分散剤がマスコンクリートの水密性に及ぼす影響", 土木学会論文集 46号昭和32年6月
 - 16) 吉田徳次郎: "新旧コンクリートの接合について", 土木学会誌, 大正12年6月
 - 17) 吉田徳次郎: "再び新旧コンクリートの接合について", 土木学会誌, 昭和5年3月
 - 18) 国分正胤: "新旧コンクリートの打継目に関する研究", 土木学会論文集 8号 昭和25年12月 (原稿受付: 1961.4.10)
-

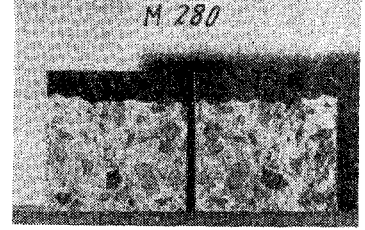
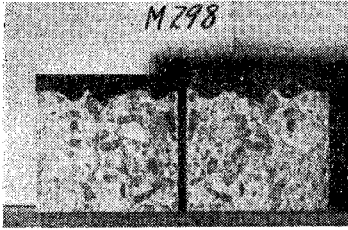
写真一1~6 試験時間を変化させた場合 (その1)

粗骨材の最大寸法=25 mm, 単位セメント量=296 kg, 単位水量=163 kg, 水セメント比=55%, 細骨材率=42%, スランプ=約 6.5 cm, 材令=28 日 (材令 7 日まで水中, 以後空中放置), 試験水圧=5 kg/cm²

写真一1 試験時間=6 時間

写真一2 試験時間=16 時間

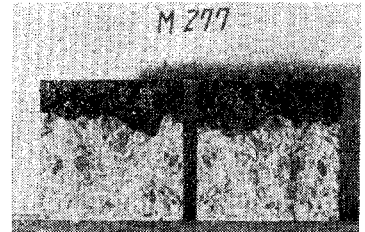
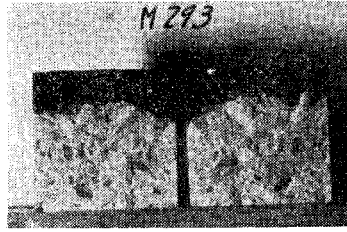
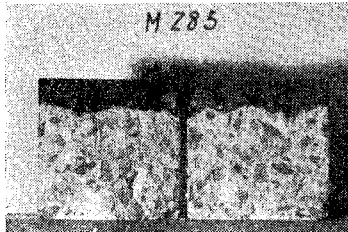
写真一3 試験時間=24 時間



写真一4 試験時間=48 時間

写真一5 試験時間=72 時間

写真一6 試験時間=116 時間



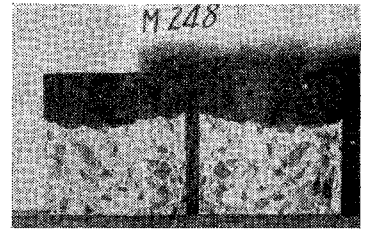
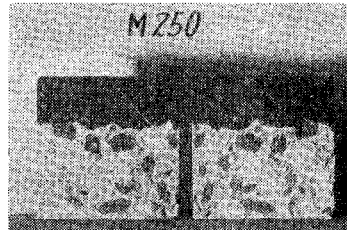
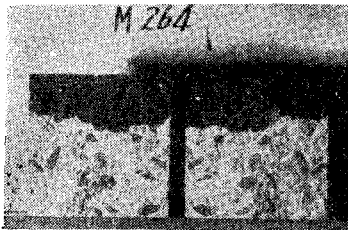
写真一7~9 試験時間を変化させた場合 (その2)

粗骨材の最大寸法=25 mm, 単位セメント量=260 kg, 単位水量=177 kg, 水セメント比=68%, 細骨材率=45%, スランプ=約 10 cm, 材令=28 日, 試験水圧=20 kg/cm²

写真一7 試験時間=48 時間

写真一8 試験時間=72 時間

写真一9 試験時間=116 時間



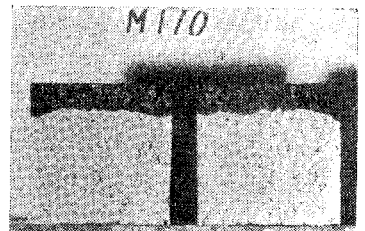
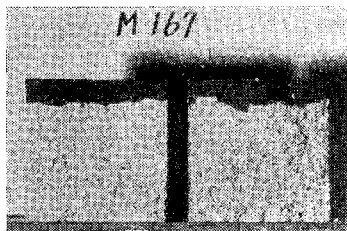
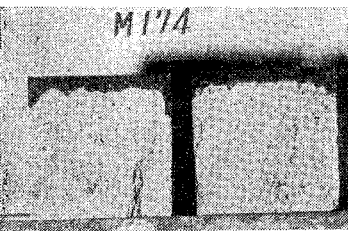
写真一10~12 試験時間を変化させた場合 (その3)

単位セメント量=414 kg, 単位水量=240 kg, 水セメント比=58%, セメント砂比=1:4.02, スランプ=約 2.5 cm, 材令=3 月, 試験水圧=20 kg/cm²

写真一10 試験時間=48 時間

写真一11 試験時間=216 時間

写真一12 試験時間=312 時間



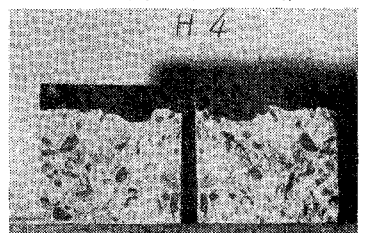
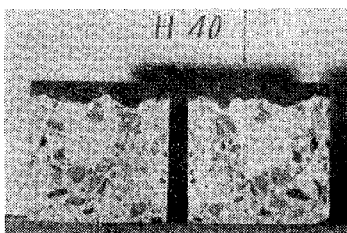
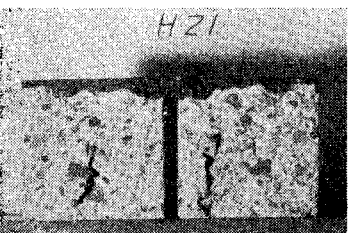
写真一13~15 試水験圧を変化させた場合

粗骨材の最大寸法=25 mm, 単位セメント量=296 kg, 単位水量=163 kg, 水セメント比=55%, 細骨材率=42%, スランプ=約 7 cm, 材令=28 日, 試験時間=48 時間

写真一13 試験水圧=5 kg/cm²

写真一14 試験水圧=10 kg/cm²

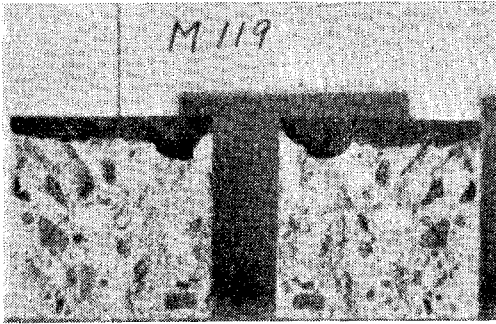
写真一15 試験水圧=20 kg/cm²



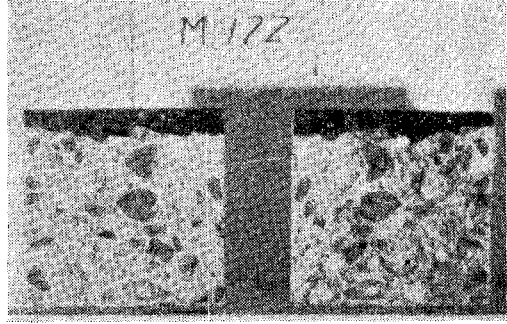
写真—16~19 試験前の供試体の乾燥期間を変化させた場合

粗骨材の最大寸法=25 mm, 単位セメント量=302 kg, 単位水量=166 kg, 水セメント比=55%, 細骨材率=42%, スランプ=約 7 cm, 材令=28 日, 試験水圧=10 kg/cm², 試験時間=48 時間

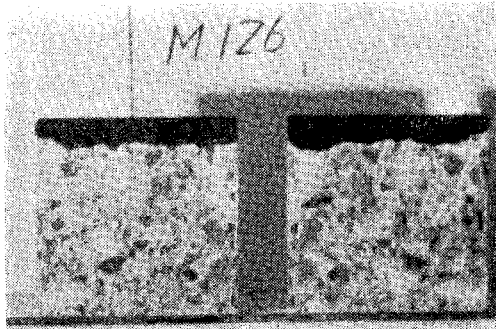
写真—16 乾燥期間=1日



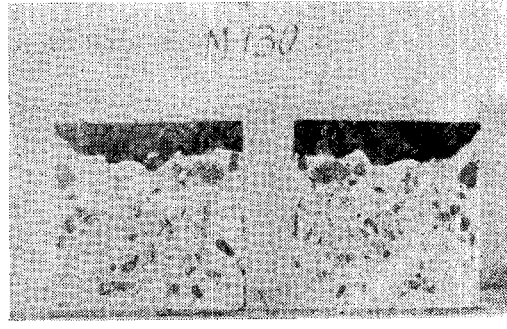
写真—17 乾燥期間=3日



写真—18 乾燥期間=7日



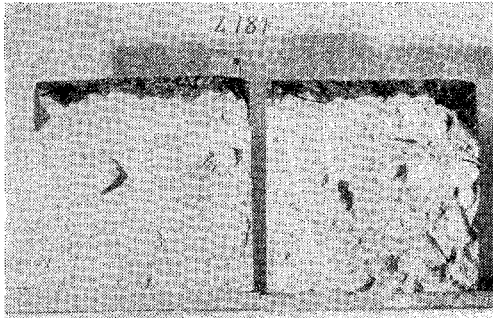
写真—19 乾燥期間=14日



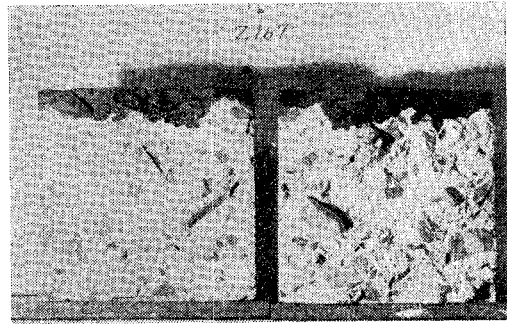
写真—20~23 水セメント比を相違させた場合

粗骨材の最大寸法=80 mm, スランプ=約 8 cm, 空気量=約 3.5%, 材令=28 日, 試験水圧=5 kg/cm², 試験時間=48 時間

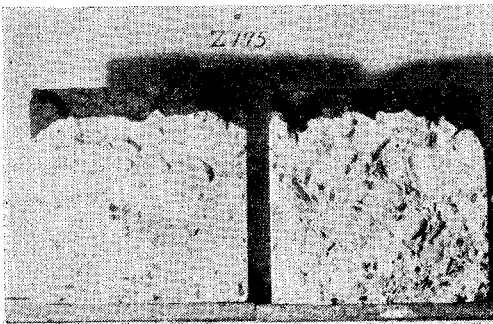
写真—20 水セメント比=45%



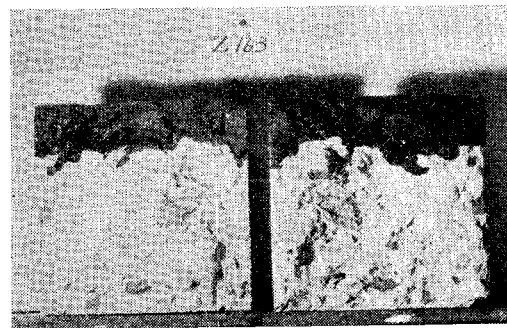
写真—21 水セメント比=53%



写真—22 水セメント比=62%



写真—23 水セメント比=70%



STUDIES ON THE PERMEABILITY OF CONCRETE

By Jiro Murata, C.E. Member

SYNOPSIS

This paper describes the results of basic studies conducted on the watertightness of concrete using a method of testing the permeability of concrete devised by the author.

The output method heretofore used as a means of testing water passage through concrete affords ease of analysis of permeability, but in the case of concrete of advanced ages with comparatively high density it not only requires a long period of time to perform the tests, but it is often impossible to measure any outflow of water. The author thus made an investigation of methods of testing permeability which could be applied to concrete of advanced age which had been thoroughly cured. The average depth of penetration of water forced under pressure into concrete was measured and the relation between this and the hydrostatic pressure and the period of time the pressure was applied was theoretically and experimentally studied. The coefficient of diffusion obtained from this relation was used as a measure of watertightness in the depth of penetration method of testing permeability. The reliability of this method was investigated and it was established that even with concrete of advanced age tests could be completed within a short period of time with comparatively little error in test results and that it was a satisfactory method of testing the watertightness of carefully placed and consolidated concrete. Therefore, this method was used in the study of the following:

Experiments were carried out on the effect of the variety of cement, aggregate and admixtures, mix proportions, age of specimens, and methods of curing, on watertightness of concrete. It was found that the use of air-entraining agents and cement dispersing agents of good quality was a convenient means for safely making watertight concrete, especially in cases of lean mixes, when the particle shape of aggregate was unsuitable and when hydrostatic pressure

applied was low.

In studying the relation of water-cement ratio and watertightness of concrete in conjunction with the thickness of concrete, it was found that minimum unit water content consistent with achieving required workability was of extreme importance in economically obtaining a watertight concrete member.

As the rate of increase with age in watertightness is greater at early ages, it is of importance to cure thoroughly at the beginning. However, in spite of thorough curing at early ages watertightness decreases greatly on subsequent prolonged drying and it is necessary to continue moist curing until exposure to water conditions in order to obtain a watertight concrete.

It is important for concrete in gravity dams to have great watertightness and there has been much valuable research carried out on the watertightness of mass concrete. However, because of limitations of testing apparatuses, many of these studies have been made on mass concrete from which particles of around 60 millimeters or larger have been sieved out and there has been hardly any one that has considered the pros and cons of discussing watertightness mass concrete basing on permeability results of such test methods. The author used mass concrete of five different mix proportions containing aggregate, the maximum size of which is 100 millimeter aggregate and by comparing the coefficient of diffusion of this mass concrete with concrete obtained by screening out particles larger than 40 millimeters and 25 millimeters from the mass concrete, ascertained that there was a nearly constant relation regardless of mix proportions. Using this relation, even though it may not be possible to conduct permeability tests of the mass concrete itself, an estimate of the watertightness of a carefully placed and consolidated mass concrete can be made to some extent from the test values of small specimens

made concrete obtained by wet screening of the mass concrete. The effects of the use of air-entraining agents, cement dispersing agents and fly-ash, the temperature of the concrete at the time of placement and curing temperature on watertightness of mass concrete were investigated and it was shown that reduction of unit cement content of mass concrete through the use of these admixtures and maintaining the temperature of concrete at the time of placement and after hardening as low as possible not only help to prevent temperature cracking, but are effective in increasing watertightness at later ages.

Leakage of water through structures is due to poor work at the joints between the old and new concrete in a great many cases and studies of the proper method of making a watertight joint are of extreme importance. The author using a cylindrical specimen with a construction joint made so as to include the diameter and

axis of the cylinder as devised by Prof. M. Kokubu of Tokyo University, has shown the relations between various methods of making construction joints and the watertightness of horizontal and vertical construction joints quantitatively through test by the depth of penetration method and has discussed the methods of constructing watertight construction joints.

It is natural that the watertightness of a concrete member should depend not only on the quality of the concrete, but also on the thickness of the member. From the fact that the relation of (the thickness and the estimation of concrete mix) to the watertightness can be shown to some extent through (the test of penetration depth), [the author has used the test results as a yardstick for the estimation of mix and thickness required for watertightness and has proposed a method of designing concrete members requiring watertightness.
