

# 透水型枠使用コンクリート表面に発生する 微細ひびわれの原因と影響に関する研究

片山功三\*・小林茂敏\*\*

コンクリート構造物の耐久性向上技術の一つとして透水型枠工法に関心がもたれている。本実験的研究では、透水型枠使用の際に発生する場合のある微細ひびわれや亀甲模様について、それらの原因とコンクリートの耐久性への影響を実験結果に基づき考察した。その結果、微細ひびわれはコンクリートの表層部分と内部との乾燥収縮量の違いに起因して発生するが、耐久性に大きな影響を与える要因にはならないこと、また、亀甲模様の発生は微細ひびわれ周辺の白華現象と関係していることなどの知見が得られた。

**Keywords:** permeable form, micro crack, efflorescence phenomena, concrete durability

## 1. 序 論

塩害等によるコンクリートの早期劣化の問題の発生とともに、コンクリート構造物の耐久性向上技術に関する要請が高まっている。こうした中で、透水型枠の使用によるコンクリートの耐久性の改善ということにも大きな関心がもたれている。

透水型枠は、型枠（せき板）のコンクリートに接する面に布等を張り、型枠内に打ち込まれたコンクリートから空気や水が抜けるようにした型枠である。

せき板の表面に布等を張り、コンクリートの表面を美しく仕上げる発想は古くからあるが、最近の透水型枠は布や排水方法に特に工夫をこらし、脱気や排水の能率が高められている。

透水型枠は他に脱水型枠・布張り型枠などさまざまな呼び方でも呼ばれているが、本論文では透水型枠と呼ぶ。

透水型枠がコンクリートの耐久性向上に関して着目される理由は、気泡が抜けてコンクリート表面が美しくなるばかりでなく、残留気泡による断面欠損が生じにくく、また、型枠から余剰水を排出させることによって、コンクリート表層部の水セメント比が低減し、ペースト分の濃い緻密な層が表面近傍に形成されるため、外部から炭酸ガスや塩分が浸入しにくいコンクリートができることにある。

数年前より各種の透水型枠が市販され、実用に供されている。その性能については文献<sup>1)</sup>等で紹介されており、一部のもの、公的機関での審査においてもその性能が証明され<sup>2)</sup>、高い評価を得ている。

しかし、こうした利点が認められている反面、透水型枠を使用した事例の中には、報文<sup>3)</sup>において指摘されて

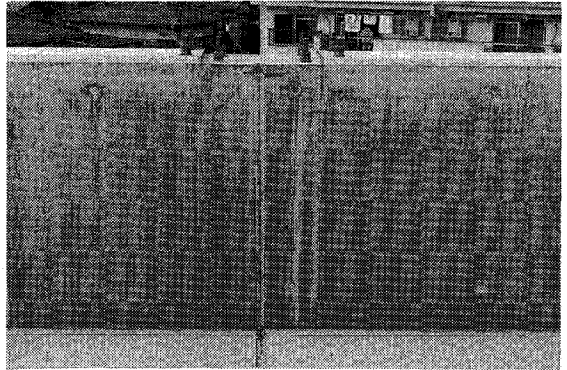


写真1 高架橋壁高欄に発生した亀甲模様

いるように、脱型後のコンクリート表面にいわゆる亀甲状のひびわれ模様（以下、亀甲模様と呼ぶ。）が発生する場合が見受けられる（写真-1）。

著者らは、上記報文で紹介された試験施工に立ち会い、試験体および実際の構造物について経時的に目視観察する機会を得た。観察の結果、亀甲模様の発生には時間が必要であり、コンクリート表面に発生した微細ひびわれ部分で色彩の変化が起こり顕在化する傾向が認められた。

本論文は、著者らが実施した実験結果に基づき、透水型枠を使用したコンクリート表面に発生する微細ひびわれや亀甲模様の原因について考察を加え、また、それらのコンクリートの耐久性への影響を明らかにしようとするものである。

## 2. 実験概要

実験の計画にあたっては、透水型枠の銘柄や施工業者は異なるものの、微細ひびわれや亀甲模様が同様に発生した前記報文の事例を参考にした。

\* 正会員 (株)熊谷組技術開発本部企画管理部企画課係長  
(〒162 新宿区津久戸町2-1)

\*\* 正会員 建設省土木研究所地質化学部長

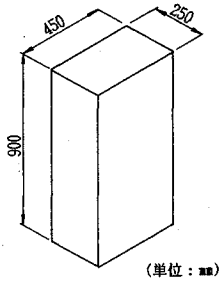


図-1 試験体形状 (単位: mm)

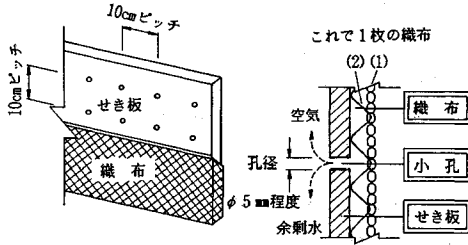


図-2 実験に用いた透水型枠の構造



写真-2 型枠組立状況

(1) 試験体の製作

試験体形状は図-1に示す壁状のものとし、厚みは25cmとした。

実験に使用する透水型枠としては、せき板に孔をあけ、その上に二重織りの織布を張り付けたもの(図-2)を選定し、これを試験体の前面に使用した。また、背面および側面には化粧合板型枠(JIS2種)を使用した(写真-2)。

(2) コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの配合は表-1のとおりである。コンクリートは、アジテータ車から直接型枠内へ2度に分けて投入した。締固めは棒状内部振動機(φ32mm)を使用し、締固め時間は1m<sup>3</sup>当たり200秒とした。

(3) 特性値の選定

前記事例から、微細ひびわれ等の発生にはコンクリート打込み後の早期脱型や脱型後のコンクリート表面の急

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

呼び度	スランブの範囲(cm)	空気量の範囲(%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad*
210	8±2.5	4±1	60	46.1	163	272	846	1,153	0.544

\* Ad: 標準形 A E 減水剤

表-2 実験に用いた因子と水準

因 子	水 準				
	1	2	3	4	5
A: 型枠存置期間	M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>2</sub>		
B: 養生方法	無養生	散水養生	室内養生	送風養生	被膜養生

激な乾燥、流動化剤の使用等が影響していると考えられた。そこで、実験に用いる特性値として①コンクリート表層部の水分量と②コンクリート表面の微細ひびわれ発生量を選定した。

(4) 因子と水準の設定

因子として型枠存置期間(A)および養生方法(B)の2つを採用し、繰返しのない2因子要因実験(2元配置)とした。さらに、水準数は、後述のように、Aは3水準、Bは5水準とした。したがって、AとBとの水準組合せは15通りである(表-2)。なお、流動化剤を現場で添加する場合の影響を調べるため、流動化剤(目標スランブを15cmとし、ナフタリンスルホン酸系化合物を主成分とする流動化剤を選定)の添加の有無により、同様の実験を2回行った。

a) 型枠存置期間

型枠存置期間は次式<sup>4)</sup>による積算温度に基づいて算定した。

$$M = \sum (\theta + A) \Delta t$$

ここに、M: 積算温度 (°C・h)

$\theta$ :  $\Delta t$  時間中のコンクリート温度 (°C)

A: 定数=10°C

$\Delta t$ : 時間 (h)

前記事例での養生期間中の平均的な外気温を10°C、コンクリート打込み後2日目に脱型する場合を基準(M<sub>0</sub>)に、その半分(M<sub>1</sub>)、さらに平均的な外気温を20°C、コンクリート打込み後5日目に脱型する場合を想定して、その3倍(M<sub>2</sub>)とした。

① M<sub>1</sub>=480°C・h [= (10+10)×24]

② M<sub>0</sub>=960°C・h [= (10+10)×48]

③ M<sub>2</sub>=2880°C・h [= (20+10)×96]

b) 養生方法

① 無養生: 屋外に放置

② 散水養生: 屋外で5日間散水の後、そのまま放置

③ 室内養生: 2日間屋外放置、その後一度散水し、室内に放置

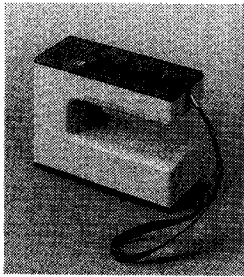


写真-3 水分計

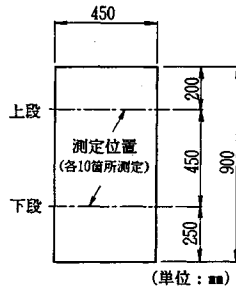


図-3 水分量測定位置

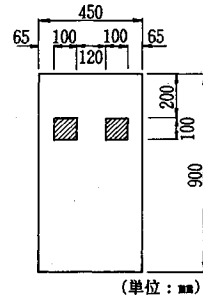


図-4 微細ひびわれ測定範囲

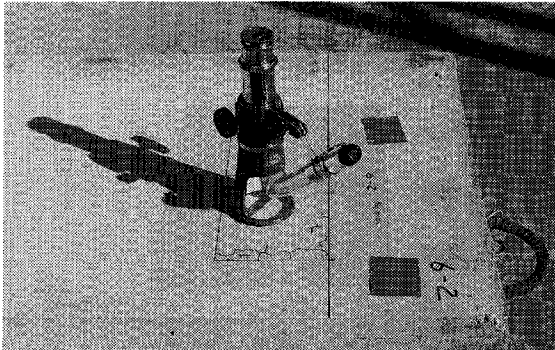


写真-4 微細ひびわれの測定

のことから、亀甲模様として目視確認できる時期およびその進行状況を把握するため、試験体の透水型枠使用面の観察を継続的に行った。

### 3. 実験結果

#### (1) コンクリート表層部の水分量

透水型枠最下部の桧木上で集水した型枠からの排水量は  $0.5 \sim 1.6 \text{ l/m}^2$  程度であり、既往の実験における平均的な値  $2.0 \text{ l/m}^2$  と比べて幾分少なかった。

透水型枠側のコンクリート表層部の水分量については、脱型後の水分量の減少度合いに対する各因子（型枠存置期間と養生方法）の影響を調べるため、次式により計算される水分量減少率を特性値（水分量）の代わりに用いた。

$$\text{水分量減少率 (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100$$

ここに、 $A$ ：脱型時の水分量測定値（%）

$B$ ：各材令での水分量測定値（%）

なお、脱型時における水分量の測定値は  $8.5 \sim 12 \%$ （測定範囲上限）にあり、型枠存置期間の各水準での測定値の範囲は  $1 \sim 2 \%$  程度であった。一方、参考のために測定した合板型枠側の脱型時の水分量はいずれも測定範囲を超えていた。材令1週以降の水分量減少率の計算結果を図-5に示す。

この水分量減少率に対して、各材令について分散分析を行った結果、各要因の分散比  $F_0$  として表-3の値が得られた。この結果、流動化剤を添加した場合には、各因子ともに有意となったが、流動化剤無添加の場合には、添加した場合に比べて各因子の効果は顕著ではなかった。なお、分散分析は、膜養生剤の使用を考慮し、被膜養生を含む場合と含まない場合の2通りについて行った。

また、流動化剤添加の有無による水分量減少率への影響を調べるため、図-5の各材令について対応のある2組の平均値の差の検定（有意水準5%）を行ったが、材令2週以外は平均値間に有意差はなかった。

これらの結果から、以下のことがわかった。

- ④ 送風養生：屋外で5日間送風（風速<sup>5)</sup>：5 m/s）の後、そのまま放置
- ⑤ 被膜養生：屋外で被膜剤（エチレン酢酸ビニル系）を塗布後、そのまま放置

#### (5) コンクリート表層部の水分量測定方法

コンクリート表層部の水分量（表面から4 cm深さまでの平均水分率）をK社製水分計（測定方式：高周波容量式（20 MHz）、測定範囲：0~12%（コンクリート）、測定精度： $\pm 0.5 \%$ ）を用いて測定した（写真-3）。

測定は、透水型枠側のみとし、図-3に示す位置で行った。測定時期は、材令1週までの毎日と、2, 3週後および1, 3か月後とした。

#### (6) コンクリート表面の微細ひびわれ発生量測定方法

コンクリート表面に発生した微細ひびわれをP社製ショップ顕微鏡（倍率：20倍）にて観察し、透明プラスチック板（10 cm×10 cmの枠を作製）に油性インクペンで書き写した後、枠内にあるひびわれの長さを測り、総延長を求めた（写真-4）。

測定は、図-4に示す試験体上部の2か所について行い、その平均値を微細ひびわれ発生量とした。測定時期は、材令1週、1, 3, 6か月および1年とした。

#### (7) 亀甲模様発生の確認方法

実際の構造物を観察した結果、時間の経過とともに、微細ひびわれ部分が幅数 mm にわたって濡れ色となり、亀甲模様として目立つようになる傾向が認められた。こ

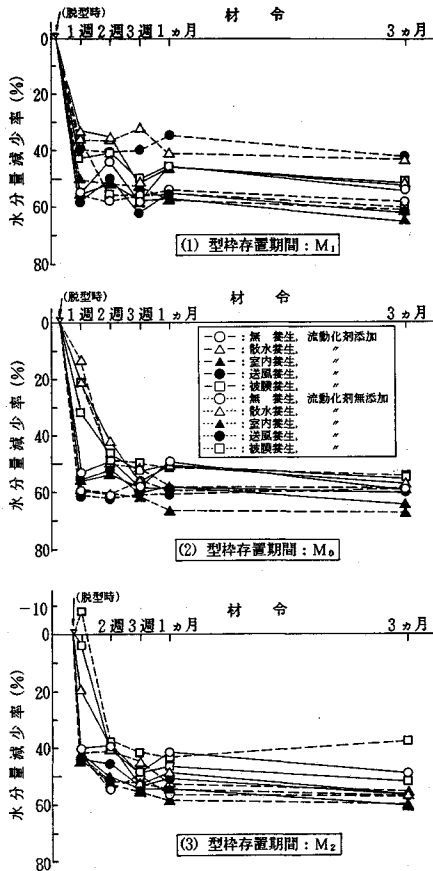


図-5 コンクリート表層部の水分量減少率

表-3 水分量減少率の分散分析結果 (分散比  $F_0$ )

要因		材令				
		1週	2週	3週	1ヵ月	3ヵ月
流動	A: 型枠存置期間	11.9 **	11.1 **	7.98 *	11.9 **	4.73 *
	B: 養生方法	19.5 **	6.61 *	6.06 *	9.23 *	3.30
化剤	A: 型枠存置期間	15.0 **	18.6 **	5.59 *	21.7 **	9.44 **
	B: 養生方法	49.6 **	17.4	2.12	23.0 **	7.48 *
無	A: 型枠存置期間	-	3.12	2.33	3.47	1.60
	B: 養生方法	-	4.53	5.10	13.56 **	6.22 *
加	A: 型枠存置期間	3.65	2.70	1.72	1.56	1.34
	B: 養生方法	1.97	4.77 *	3.41	4.69	3.63

(注) 1. F分布表の5%限界値:  $F(2, 8; 0.05)=4.46$ ,  $F(4, 8; 0.05)=5.14$   
 $F(2, 6; 0.05)=3.84$ ,  $F(3, 6; 0.05)=4.76$   
 2. F分布表の1%限界値:  $F(2, 8; 0.01)=8.65$ ,  $F(4, 8; 0.01)=10.9$   
 $F(2, 6; 0.01)=7.01$ ,  $F(3, 6; 0.01)=9.78$   
 3. \*: 5%有意, \*\*: 1%有意  
 4. 上段: 養生方法, 下段: 被膜養生除く  
 5. -: 分散比  $F_0 < 1$

(1) コンクリート表層部の水分量は、脱型後材令1週くらいまでの間に急激に減少し、その後は時間の経過とともに徐々に減少する傾向にある。散水と被膜養生を行った試験体では、他の養生方法に比べ水分量の減少度合いが少ないことから、この脱型後の急激な水分量の低下は乾燥によるものと考えられる。

(2) 流動化剤添加の有無はコンクリート表層部の水分量減少率にはほとんど影響しないが、流動化剤を添加

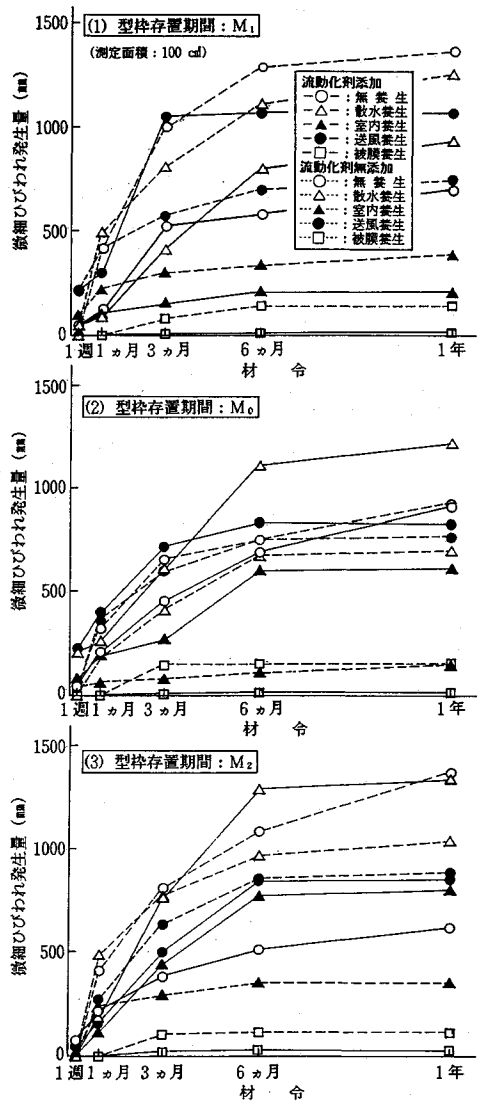


図-6 コンクリート表面の微細ひびわれ発生量の測定結果

した方が型枠存置期間および養生方法の水分量減少率への影響が顕著である。

(3) 型枠存置期間および養生方法の違いが水分量減少率に及ぼす影響については、型枠存置期間では  $M_0$  の場合が最も減少率が大きくなる傾向が認められるが、養生方法では各材令で一定の順序となっておらず特定の傾向は認められない。

(2) コンクリート表面の微細ひびわれ発生量

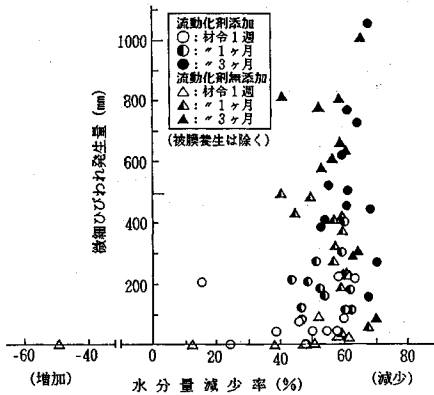
コンクリート表面の微細ひびわれ発生量の測定結果を図-6に示す。

実験に取り上げた2つの因子については、各材令における分散分析の結果、各要因の分散比  $F_0$  は表-4のようになった。被膜養生を除いて計算すれば、流動化剤を

表一4 微細ひびわれ発生量の分散分析結果 (分散比  $F_0$ )

要因		材令				
		1週	1ヵ月	3ヵ月	6ヵ月	1年
流動 加	A: 型枠存置期間	2.55 2.82	2.91 3.33	—	—	—
	B: 養生方法	3.12 2.22	8.40 ** 2.93	7.40 ** 2.69	14.3 ** 4.45	16.0 ** 4.64
流動 無	A: 型枠存置期間	1.78 1.87	2.91 3.33	3.20 5.73 *	3.92 5.38 *	4.30 6.18 *
	B: 養生方法	1.47 1.36	12.4 ** 3.95	21.0 ** 18.1 **	26.2 ** 20.0 **	32.9 ** 26.7 **

(注) 1. F分布表の限界値については表一3と同じ  
 2. \*: 5%有意, \*\*: 1%有意  
 3. 上段: 全養生方法, 下段: 被膜養生除く  
 4. —: 分散比  $F_0 < 1$



図一7 水分量減少率と微細ひびわれ発生量との関係

添加しない場合にはいずれの因子も有意となったが、添加した場合にはいずれの因子も有意とはならなかった。

また、流動化剤添加の有無による微細ひびわれ発生量への影響についても、水分量減少率と同様に、対応のある2組の平均値の差の検定を材令1週以降1年までの各材令について行ったが、いずれも平均値間に有意差はなかった。

これらの結果から、以下のことがわかった。

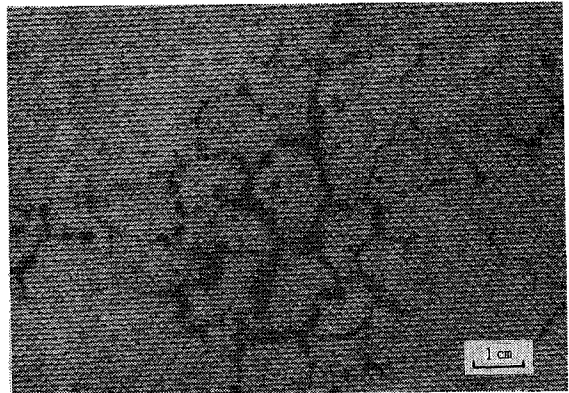
(1) コンクリート表面の微細ひびわれの進行は時間の経過とともに停止する傾向にある。

(2) 型枠存置期間は、流動化剤無添加の場合には材令1か月以降の微細ひびわれ発生量に影響し、 $M_0$ あるいは $M_1$ の場合に少なくなる傾向にある。

(3) 養生方法は、微細ひびわれ発生量に影響するが、流動化剤添加の場合にみられるように特に被膜養生の影響が大きく、被膜養生を行うと微細ひびわれ発生量はきわめて少なくなる。

(4) 流動化剤添加の有無は微細ひびわれ発生量に影響しないが、型枠存置期間および養生方法の微細ひびわれ発生量への影響は無添加の方が顕著である。

次に、コンクリート表層部の乾燥による微細ひびわれ発生量への影響について、試験体上段(図一3)での水分量減少率と微細ひびわれ発生量(材令1週, 1か月お



写真一5 コンクリート表面に発生した亀甲模様

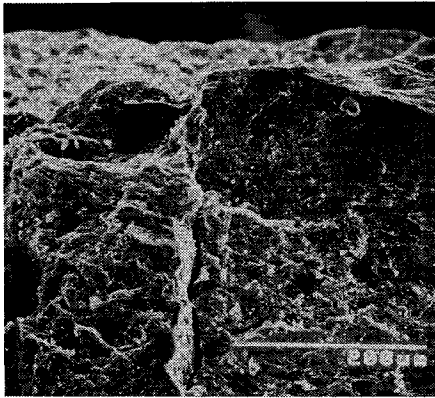
表一5 亀甲模様の発生状況

実験条件	測定材令									
	2週	1ヵ月	2ヵ月	3ヵ月	4ヵ月	6ヵ月	9ヵ月	11ヵ月	1年	
流動 養生	無 $M_1$					■	■	■	○	○
	無 $M_0$					■	■	■		○
	養生 $M_2$					■	■	■		○
	散水 $M_1$					■	■	■		
	散水 $M_0$					■	■	■		
	養生 $M_2$					■	■	■		○
流動 化剤 添加	室内養生 $M_1$									
	室内養生 $M_0$									
	室内養生 $M_2$									
	送風養生 $M_1$					■	■	■	○	○
	送風養生 $M_0$					■	■	■	○	○
	送風養生 $M_2$					■	■	■	○	○
流動 化剤 無添加	室内養生 $M_1$									
	室内養生 $M_0$									
	室内養生 $M_2$									
	送風養生 $M_1$	□	□	□		■	■	■		
	送風養生 $M_0$	□				■	■	■		○
	送風養生 $M_2$					■	■	■		○
被膜 養生	$M_1$									
	$M_0$									
	$M_2$									
	送風 $M_1$									
	送風 $M_0$									
	送風 $M_2$									

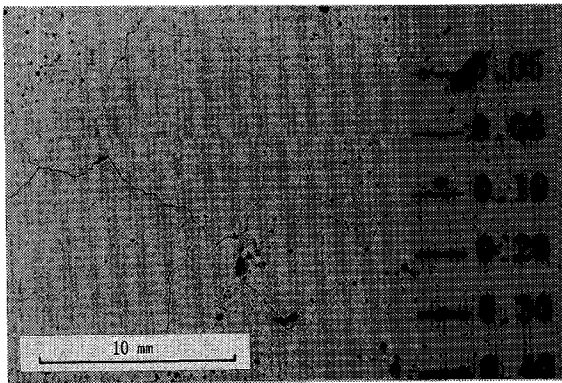
よび3か月)との関係を図一7に示す。これから、水分量減少率が40%程度までは微細ひびわれは発生せず、それを超えると発生し始め、水分量減少率がさらに大きくなるとともに発生量が増大するという傾向が認められる。

(3) 亀甲模様の発生状況

本実験では、透水型枠を用いたコンクリート表面に、



写真—6 微細ひびわれの電子顕微鏡写真



写真—7 亀甲状のひびわれ(合板型枠使用)

材令4か月頃から、特に無養生と送風養生の場合において、雨後、表面が乾くにつれて全面的に亀甲模様が出現した(写真—5)が、この模様は、表面全体の乾燥が進むにつれて目立たなくなった。しかし、1年も経つと、亀甲模様は部分的ではあるが常時目視できるまでになった。材令2週以降の亀甲模様の発生状況は表—5のとおりである。

#### 4. 微細ひびわれの発生原因に対する考察

##### (1) 透水型枠による微細ひびわれの特徴

透水型枠を使用したコンクリート表層部に発生した微細ひびわれの電子顕微鏡写真を写真—6に示す。ひびわれ幅は $10\mu\text{m}$ 程度であり、ひびわれの深さは、この写真では明らかではないが、別途撮影した写真から最大でも3mm程度であった。

微細ひびわれの発生は、局部的ではなく、コンクリート表面全体にわたっていた。図—4の測定範囲内での発生密度は最大で $130\text{ m/m}^2$ 程度であった。これは、メッシュ幅約1.5cmの格子模様に対応する。

合板型枠を使用したコンクリート表面にも写真—7に示すように、透水型枠の場合と同様に亀甲状に発生した

ひびわれがみられたが、透水型枠の場合と比べ、ひびわれは開口しており、その幅や深さは大きかった。

##### (2) 発生原因の推定

従来から、亀甲状のひびわれが発生する事例として、モルタル仕上げコンクリートのモルタル部分に発生するものが知られている。これは、仕上げ材料のモルタルの収縮をそれよりも収縮量の少ない下地のコンクリートが拘束するために発生するといわれている<sup>6)</sup>。また、コンクリートの乾燥収縮に最も大きな影響を及ぼすものは単位水量であり、それが少ないものほど収縮量が小さくなることが知られている。モルタルとコンクリートの単位水量を比べると、一般にモルタルの方が多く、したがって収縮量も大きい。これらのことから、従来の亀甲状のひびわれは、コンクリートが乾燥に対して自由に収縮できないように拘束されている場合に生ずる乾燥収縮ひびわれと考えることができる。

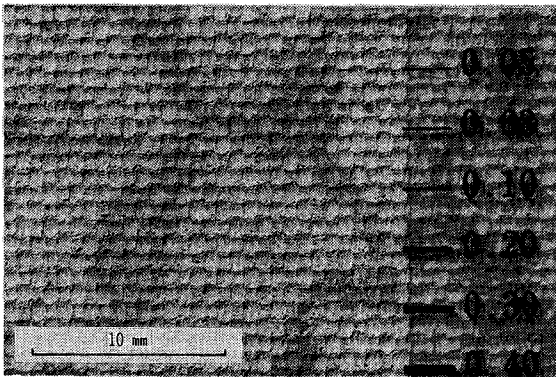
ここでは、透水型枠の使用に伴って発生する微細ひびわれもこうした乾燥収縮ひびわれと考えられるのか否かを考察する。

透水型枠を使用してコンクリートを打ち込んだ場合には、張り付けられた布を通して余剰水と混入空気が型枠外へ排出されるため、コンクリートの実質水セメント比が低下し、特に表層部分(コンクリート表面から5mm程度)では、排水に伴うセメント粒子の移動により、セメント量が合板型枠を使用した場合に比べ増大している<sup>7)</sup>。合板型枠を使用した場合でも表層部分では粗骨材が少なくモルタル分が多くなる傾向にあるが、透水型枠を使用した場合にはそれが顕著となっている。

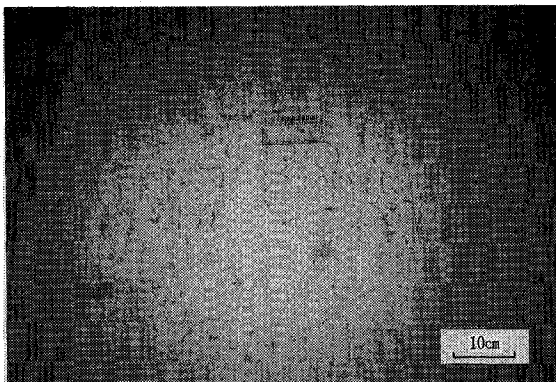
また、透水型枠の場合、本実験結果(図—7)から、微細ひびわれの発生にはコンクリート表層部の乾燥が影響していると考えられる。

これらのことから、透水型枠を使用したコンクリートにおける表層部と内部のコンクリートとは前述の仕上げ材料(モルタル)と下地コンクリートのような関係にあり、透水型枠の使用に伴って発生する微細ひびわれも乾燥収縮ひびわれと考えることができる。ただし、モルタル仕上げの場合との相違点は、モルタル仕上げは厚さが数cm程度であるのに対し、透水型枠の場合にできる緻密なモルタル層の厚さは数mm程度であるため、ひびわれ間隔や幅が著しく小さくなることである。ひびわれ間隔や幅が小さくなる理由は、鉄筋コンクリート部材のひびわれ間隔や幅はかぶり厚が薄くなるほど小さくなるという実験的事実<sup>8),9)</sup>において、モルタル層を「かぶり」、それを拘束する内部のコンクリートを「鉄筋」とみなすことにより説明できるのではないかと考える。

なお、被膜養生をした場合に微細ひびわれがほとんど発生していないのは、コンクリート表面に塗布された膜養生剤(ポリマー)によってコンクリート表面の引張強



写真一八 亀甲模様 (透水型枠使用)



写真一九 亀甲模様 (従来型枠使用)

度が大きくなったことに起因しているものと思われる。

## 5. 亀甲模様の原因に対する考察

本実験では、透水型枠を使用したコンクリート表面において、微細ひびわれは脱型後1週目に顕微鏡で確認されたが、亀甲模様は材令4か月以降、時間の経過とともに徐々に目視できるようになった。微細ひびわれは、亀甲模様を形作る濡れ色をした変色部のほぼ真ん中に認められた(写真一八)が、室内養生の試験体のように、時間が経っても、微細ひびわれ部分に変色部が生じない場合もみられた。

これに対して、写真一七に示したように、合板型枠を使用した場合に発生したひびわれには、塵埃が付着し黒っぽい筋となっているが、透水型枠の場合のような変色部は生じていない。しかし、合板型枠を使用した場合にも、透水型枠の場合と同じような微細ひびわれが発生した事例が報告されており<sup>10)</sup>、微細ひびわれ部分に変色部が認められる。このことは、亀甲模様は、使用するコンクリートの材料や配合によっては、従来型枠でも発生する可能性があり、必ずしも透水型枠特有の現象ではないことを示唆しているものと考えられる(写真一九)。

ここでは、透水型枠を使用した場合の亀甲模様につい

て、微細ひびわれ部分が時間の経過とともに亀甲模様に変化するメカニズムを当該部分における色彩の変化に着目して考察する。

コンクリート表面からは絶えず水分が蒸発しているので、水とともに運ばれてきたセメント中の遊離石灰やケイ酸カルシウムの水和生成物である水酸化カルシウムがコンクリート表面に析出する。さらに、時間の経過とともに、空気中の炭酸ガスを受けて、炭酸カルシウムが変わってゆき、色が白くなる。いわゆる白華現象が生じている。白華の発生は、セメント硬化体表面における水分の蒸発に起因しており、表面乾燥が起こる条件のもとに、できるかぎり多く蒸発が行われることが必要であり、気温が低く、比較的湿度が高く、適当な風速のときに多量に発生するといわれている<sup>11)</sup>。

コンクリート表面にひびわれが発生した場合には、そのひびわれ幅があまり大きくなければ、毛細管現象により、ひびわれにつながった毛細管(孔隙)からひびわれに水分が集まってくる。したがって、ひびわれのきわめて近くのコンクリートは、ひびわれに集まってくる水分の影響で、ひびわれのないところよりもセメント硬化体の含有水が多くなっている。ひびわれ幅がきわめて小さい場合には、ひびわれ部分やその近傍の水分の蒸発はゆっくりとしたものになるので、水酸化カルシウムがコンクリート表面に析出できず、白華現象が生じにくくなる。また、雨水などによるひびわれ部分への浸透水が蒸発する場合も同様である。したがって、当該部分の色は黒っぽいコンクリート本来の色であり続ける。また、ひびわれ部分は、湿っていれば黒っぽい濡れ色になるので、雨上がりの後などに特に目立つようになる。このような理由から、時間の経過とともに、ひびわれの周辺に白華現象の進行が他よりも遅れた黒ずんだゾーンが形成されるものと考えられる。

次に、養生方法別に亀甲模様の発生状況を白華現象との関係で考察する。

室内養生を行った試験体で亀甲模様の発生が皆無に近いのは、試験体が雨の降らない室内に置かれる時間が長いから、ひびわれに水分が満たされることがなく、全体的に蒸発が起こり白華現象が進んだためと考えられる。

散水養生を行ったコンクリート表面は他のものと比べて白っぽく、微細ひびわれは発生したものの亀甲模様はほとんどみられなかった。これは、脱型後の散水により材令初期のコンクリート表層部の乾燥が抑えられ、被膜養生以外のものに比べそれだけセメント硬化体の含有水が多くなり、それが蒸発することによって全面に多量に白華が生じたためと考えられる。

無養生のものと送風養生したものでは微細ひびわれが比較的多く発生し(図一六)、いずれも亀甲模様が明瞭に現れた。これは前述のメカニズムによるものと考えられ

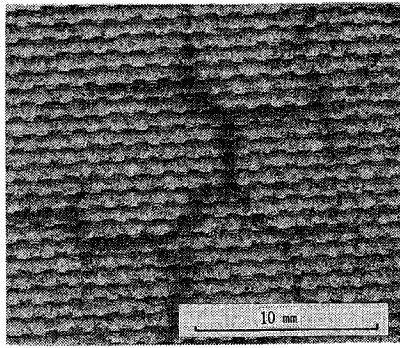


写真-10 微細ひびわれの自然填充状況

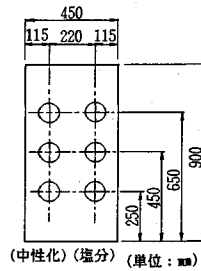


図-8 コア採取位置

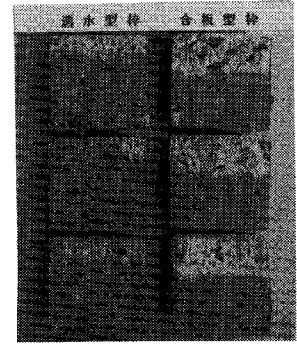


写真-11 中性化促進試験結果の一例 (室内養生)

る。

被膜養生したものに亀甲模様が現れなかったのは微細ひびわれの発生が少なかったためと考えられる。

微細ひびわれそれ自体の変化状況については、写真-10に示すように、長期的には当初開口していた微細ひびわれが析出物（炭酸カルシウム）で埋められていく傾向が認められる。

## 6. 微細ひびわれの耐久性への影響に対する考察

透水型枠に関する既往の多くの実験では、透水型枠を使用した場合のコンクリートの耐久性に及ぼす効果の検証に材令28日で採取したコア供試体を用いて、合板型枠を使用した場合との比較を行っている。しかし、これらの実験では、コンクリート表面の微細ひびわれに関して特に問題提起はなされていなかった。したがって、微細ひびわれの有無とは無関係に各種耐久性試験が実施されており、微細ひびわれの発生が確認された供試体を用いた試験結果の報告は皆無と思われる。

材令1か月程度のコンクリート表面には、本実験結果からもわかるように、被膜養生等の特殊な養生を行わない限り、多数の微細ひびわれの存在が予想される。このことは、透水型枠を使用したコンクリート表面に発生した微細ひびわれはコンクリートの耐久性にほとんど影響を及ぼしていないことを示唆していると考えられる。

本研究では、微細ひびわれのコンクリートの耐久性に及ぼす影響を調べるため、1年を経過した試験体から図-8に示す位置で採取したコア供試体に対し、塩分浸透および中性化促進試験を実施した（上段部は微細ひびわれ測定位置に相当）。コア採取はすべての試験体から行い、同時に比較のため、無養生および室内養生を行った試験体の合板型枠を用いたコンクリート面からも採取した。

### (1) 塩分浸透促進試験

塩分浸透促進試験は、型枠面以外をエポキシ樹脂等でシールした供試体を用いて、乾湿繰り返し方法で行った。高温高湿環境は、金属材料の耐食性を試験する方法とし

表-6 塩分浸透深さの測定結果

(単位: mm)

			流動化剤添加			流動化剤無添加		
			M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>2</sub>
透 水 型 枠	無養生	上	19.6	33.0	34.5	40.9	36.7	51.2
		中	20.5	15.7	22.0	26.3	35.0	26.1
		下	19.3	22.6	16.8	48.5	26.1	26.6
		Av	19.8	23.8	24.4	38.6	32.6	34.6
	散水養生	上	31.2	39.9	32.2	46.0	19.6	31.1
		中	18.9	29.0	23.2	29.1	18.5	20.3
		下	20.3	19.7	21.7	27.7	16.7	28.6
		Av	23.5	29.5	25.7	34.3	18.3	26.7
	室内養生	上	45.6	43.4	30.8	43.5	30.1	37.8
		中	35.4	16.7	27.2	45.9	39.9	33.5
		下	41.3	19.8	20.8	29.5	33.0	24.1
		Av	40.8	26.6	26.3	39.6	34.3	31.8
送風養生	上	40.4	39.8	29.2	33.9	32.5	28.6	
	中	32.5	34.3	29.7	25.1	46.6	30.6	
	下	25.2	30.8	23.8	26.0	13.6	23.0	
	Av	32.7	35.0	27.6	28.3	30.9	27.4	
被膜養生	上	41.2	39.3	25.9	50.4	48.8	27.1	
	中	33.9	27.0	21.9	38.2	26.1	29.0	
	下	25.1	24.2	16.5	34.9	36.5	20.4	
	Av	33.4	30.2	21.4	41.2	37.1	25.5	
合板型枠	無養生	上	53.6	53.0	54.7	64.6	54.0	62.5
		中	56.6	50.4	46.9	54.9	63.9	56.0
		下	51.8	49.7	44.9	48.5	55.7	59.5
		Av	54.0	51.0	48.8	56.0	57.9	59.3
室内養生	上	69.8	45.6	51.1	65.9	56.6	70.5	
	中	53.6	42.4	47.9	54.6	54.4	53.8	
	下	48.6	43.9	46.5	49.1	50.5	60.9	
	Av	57.3	44.0	48.5	56.5	53.8	61.7	

て JIS Z 2371 に規定されている塩分噴霧試験装置を用い、槽内温度 35°C、濃度 5% の塩水を噴霧した。また、低温低湿環境は、温度 15°C、相対湿度 65% とした。試験開始から3か月後にコアを割裂し、その破断面に 0.1% フルオレスセインナトリウム水溶液と 0.1N 硝酸銀水溶液を噴霧し、白色化した部分の深さを測定した。

表-6 は各供試体における平均塩分浸透深さの測定結果である。透水型枠の場合には、型枠存置期間が長くなるほど塩分浸透深さが浅くなる傾向が認められる以外には、養生方法・流動化剤の有無の影響は少ない。透水型枠の場合の塩分浸透深さは合板型枠の場合に対して、無養生では 35~70%、室内養生では 50~70% 程度であり、透水型枠の効果が認められる。

微細ひびわれが塩分浸透深さに与える影響について



表一 中性化深さの測定結果

(単位: mm)

		流動化剤添加			流動化剤無添加			
		M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>0</sub>	M <sub>2</sub>	
透	無養生	上	19.1	17.0	28.6	29.4	15.9	26.2
		中	15.3	13.9	20.1	18.9	16.4	13.0
		下	18.0	14.4	20.0	23.1	14.8	9.3
		Av	17.5	15.1	22.9	23.8	15.7	16.2
水	散水養生	上	21.8	25.9	22.8	27.1	17.6	18.8
		中	16.1	25.4	17.3	20.5	11.1	11.9
		下	16.1	18.2	20.4	18.4	9.5	16.7
		Av	18.0	23.2	20.2	22.0	12.7	15.8
型	室内養生	上	38.8	30.5	35.1	39.3	33.8	22.3
		中	37.8	28.8	31.8	37.0	35.6	13.1
		下	38.8	26.0	24.8	26.3	31.6	25.1
		Av	38.5	28.4	30.6	34.2	33.7	20.2
枠	送風養生	上	26.1	20.8	28.0	26.8	27.4	14.3
		中	22.9	23.0	20.0	21.8	21.0	20.8
		下	18.4	17.9	19.7	25.3	14.9	15.9
		Av	22.5	20.6	22.6	24.6	21.1	17.0
枠	被膜養生	上	23.0	16.5	23.3	28.5	24.2	20.6
		中	23.3	19.4	19.3	24.0	11.8	12.8
		下	20.4	16.5	14.5	15.5	17.6	15.3
		Av	22.2	17.5	19.0	22.7	17.9	16.2
合板	無養生	上	39.2	37.2	35.3	40.7	42.0	41.5
		中	33.6	32.7	31.3	36.9	35.3	36.1
		下	33.9	33.0	36.1	33.5	34.9	35.3
		Av	35.6	34.3	34.2	37.0	37.4	37.6
型枠	室内養生	上	47.5	47.9	42.1	45.4	51.5	42.3
		中	40.0	38.1	41.4	42.6	46.3	42.6
		下	43.7	41.4	39.0	42.7	48.1	44.0
		Av	43.7	42.5	40.8	43.6	48.6	43.0

は、これらの間に相関関係がないことから、その影響はほとんどないものと考えられる。これは、微細ひびわれの深さが浅いことによるものと考えられる。

(2) 中性化促進試験

中性化促進試験は、塩分浸透促進試験と同様の供試体を温度 40℃、相対湿度 40%、二酸化炭素濃度 10% の試験槽内に入れ、3 か月間放置した後、これを取り出し割裂した。中性化深さの測定は、破断面にフェノールフタレイン 1% アルコール溶液を噴霧し、無着色部分の深さを測定した(写真-11)。

表一は各供試体における平均中性化深さの測定結果である。透水型枠の場合には、型枠存置期間・流動化剤の有無による中性化深さへの影響は認められないが、養生方法においては、透水型枠・合板型枠ともに室内養生を実施した供試体での中性化の進行が顕著である。室内養生で中性化深さが増進する原因としては、室内ではコンクリートに雨水などによる水分の供給がほとんどないことにより、コンクリート表面が最も乾燥し、炭酸ガスの浸入量が多くなったため<sup>12)</sup>と考えられる。

透水型枠の場合の中性化深さは合板型枠の場合に対して、無養生では 40~70%、室内養生では 45~90% 程度であり、透水型枠の効果が認められる。

また、塩分浸透試験結果と同様に、微細ひびわれ発生量と中性化深さとの間に相関関係は認められない。

これらの耐久性試験結果から、透水型枠を用いた際に発生する微細ひびわれはコンクリートの耐久性能に大き

な影響を与えるような要因にはならないと判断される。

7. 結 論

本実験的研究では、微細ひびわれや亀甲模様の発生にはコンクリート打込み後の早期脱型や脱型後のコンクリート表面の急激な乾燥、流動化剤の使用等が影響していると考え、特性値としてコンクリート表層部の水分量とコンクリート表面の微細ひびわれ発生量を、また因子として型枠存置期間と養生方法を採用し、さらに流動化剤の有無を考慮した実験を行った。そして、その結果に基づき微細ひびわれ等の発生原因を考察した。さらに、微細ひびわれのコンクリートの耐久性への影響についても考察した。

本実験的研究において得られた微細ひびわれおよび亀甲模様の発生原因と微細ひびわれのコンクリートの耐久性への影響に関する知見を要約すると次のようになる。

(1) 微細ひびわれの発生原因は脱水によってコンクリート表面に形成された緻密なモルタル層の乾燥収縮によるものと考えられる。

(2) 微細ひびわれの発生には、脱型後の養生方法が大きく影響するが、型枠存置期間や流動化剤の影響は少ない。養生方法の中では、被膜養生は微細ひびわれの発生を防止する効果大きい。

(3) コンクリート表層部の水分量減少率は、流動化剤を添加した場合に、型枠存置期間および養生方法の影響が大きかった。型枠存置期間については各測定材令において M<sub>0</sub>(積算温度: 960℃・h) の場合が最も減少率が大きくなる傾向にあったが、養生方法については各測定材令で一定の順序となっておらず特定の傾向は認められなかった。また、水分量減少率と微細ひびわれ発生量との間には、水分量減少率がある限界値を超えると微細ひびわれが発生し始め、さらに水分量減少率が大きくなるとともに微細ひびわれ発生量が増大する傾向が認められた。

(4) 亀甲模様の発生には養生方法の影響が大きく、亀甲模様の顕在化には微細ひびわれ周辺の白華現象が関係していると考えられる。早期に脱型した場合にも、実際の亀甲模様の抑制方法として散水養生が効果的である。

(5) 微細ひびわれはコンクリートの耐久性に大きな影響を与える要因とはならなかった。これは、微細ひびわれの深さが浅いためであると考えられる。

本実験結果から、流動化剤については、添加・無添加の場合のそれぞれの平均値間に有意差はなかったが、2つの因子(型枠存置期間と養生方法)の効果に与える影響に関しては、水分量減少率では添加の場合が、また微細ひびわれ発生量では無添加の場合がそれぞれ顕著であった。この流動化剤の影響に関する検討については今

後の課題と考えている。

最後に、本研究の実施にあたり、ご協力やご助言をいただいた建設省中部地方建設局静岡国道工事事務所の関係各位および実験の実施に協力していただいた(株)熊谷組の関係各位に深謝の意を表するものである。

#### 参 考 文 献

- 1) たとえば、小林茂敏：脱水型枠のすすめ，セメント・コンクリート，No. 519, 1990. 5.
- 2) (財) 国土開発技術研究センター：一般土木工法・技術審査証明書，1988. 3.
- 3) 山田政克・三木栄一・中川美礼：繊維型枠工法を用いたコンクリート，セメント・コンクリート，No. 517, 1990. 3.
- 4) (社)土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，p. 146, 1986. 10.
- 5) (社)セメント協会コンクリート専門委員会：初期の乾燥がコンクリートの諸性質に及ぼす影響，セメント・コンクリート，No. 466, 1985. 12.
- 6) 馬場明生：ひびわれ被害の実態—外壁—，コンクリート工学，Vol. 20, No. 11, 1982. 11.
- 7) 笠井芳夫・佐藤孝一・菅 一雅・長野基司：透水型わくおよび合板型わくを用いた表層コンクリートのセメント量，セメント技術年報，42, 1988.
- 8) 角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅，コンクリートジャーナル，Vol. 8, No. 9, 1970. 9.
- 9) Gergely, P. and Lutz, L.A. : Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members, ACI, SP-20, 1968.
- 10) 田上富重：コンクリートのクレーム事例シリーズ(その6) 橋脚部に発生したひびわれ，コンクリートニュース，No. 23, 1989. 10.
- 11) 斎藤鶴義・石井四郎：セメント製品の白華について，小野田研究報告，第19巻，第1冊，第70号，p. 88, 1967.
- 12) 佐伯竜彦・大賀宏行・長滝重義：コンクリートの中性化の機構，コンクリート工学年次論文報告集，11-1, 1989. (1990. 10. 17 受付)

## STUDY ON CONCRETE SURFACE MICRO CRACKS WHEN USING PERMEABLE FORMS

Kozo KATAYAMA and Shigetoshi KOBAYASHI

Permeable form methods have become the subject of attention as a technology to improve concrete durability. This paper describes the possible cause of both micro cracks and their visible irregular pattern, and their effect to the concrete durability, which probably occur with the use of permeable forms, based on the results of our experiments. It is described that these phenomena are mainly caused by the difference of dry shrinkage between the outer surface layer of concrete and the inner concrete, and that the occurrence of the irregular pattern is closely related to the efflorescence phenomena. As these cracks are extremely small in width and depth, it can be thought that they will not effect concrete durability within the scope of our experimental study.