

コンクリートの表面剝離に及ぼす諸要因の影響

前 川 静 男*・廣 川 一 巳**

Factors Affecting Scaling of Concrete Surface

Shizuo MAEKAWA and Kazumi HIROKAWA

要 旨

塩水に接するコンクリートが、凍結融解の繰り返し作用を受けて表層部のモルタルが粗骨材との界面で剝離する現象を対象として、関係する諸要因の影響を明らかにするために実験を行なった。

その結果、セメントの種類、水セメント比、AE 剤の有無、養生、型わくに接する面と打込み面との差などの影響が大きいことがわかった。また、粗骨材とモルタルとの付着性状が凍害による剝離に及ぼす影響についても別途に実験を行なった。

Abstract

Freeze-thaw tests have been carried out to investigate the effects of concrete mix, test procedure and other factors on the scaling of concretes in salt water. The following factors contribute to the scaling resistance of concrete: (1) Type of cement (2) Water cement ratio (3) Air content (4) Curing condition (5) Surface exposure (6) Aggregate-cement bond.

1. ま え が き

凍結融解の繰り返し作用によるコンクリートの損傷の一形態として表面剝離 (scaling) がある。これを大別すると、コンクリート表面が広い範囲で剝離するものと、粗骨材に接して数ミリ厚さのモルタルが剝離し、周囲のコンクリートは健全であるものとの二通りの場合がある。前者は AE コンクリートが普及する以前のコンクリートに多かったが、近年 AE コンクリートを用いるようになってコンクリートの耐久性が改善されるに伴い、そのような形の損傷は減り、代って後者すなわち粗骨材上の表層部モルタルの剝離が多くなってきた。この種の剝離は、北海道の港湾・海岸などで塩分の影響を受けるコンクリートでよく見られる。

この報文は、(1)剝離に及ぼす諸要因の影響を求めるために行なった実験、(2)剝離に及ぼす粗骨材の影響を調べるために、人工的に加工した骨材を含む 7 種類の粗骨材を用いて行なった実験の結果

について述べたものである。

2. 剝離に及ぼす諸要因の影響

2. 1 実験概要

取り上げた要因は表 1 に示す 10 個で、これを L_{16} 型直交表に割付けた。また、交互作用として、セメントの種類×養生温度、セメントの種類×養生中の湿潤程度、セメントの種類×融解時における作用水の有無、試験面の位置×養生温度の 4 個も求めるようにした。実験は 2 回繰返した。表 1 中のガラスとは、2 mm 厚の板ガラスを所定の寸法の正方形に切ったもので、これをモルタル中に埋込んで人工の粗骨材の役割をさせた。

細骨材は錦岡海岸産 (比重 2.70, 吸水率 1.38%), AE 剤はピンソル W をセメント重量の 0.025% 使用した。モルタルの砂セメント比は W/C=50% では 3.1, 60% では 3.3 とした。供試体は $4 \times 4 \times 16$ cm のモルタル製で、中にガラス板を 1 個につき 4 枚埋込んだ。モルタルを打込んでから約 24 時間後に脱型し、材令 7 日までは温度と水分供給の条件を表 1 の中に示す各 2 水準とし、その後は室温が 18~20℃ の空气中に置いた。

* 教 授 土木工学科

** 助 手 土木工学科

表1 実験計画

要 因	1 水 準	2 水 準
1 セメントの種類	普通ポルトランド	高炉B種
2 ガラスの埋込み深さ	1.5 mm	2.5 mm
3 水セメント比	50 %	60 %
4 AE剤	有	無
5 ガラスの表面	平 滑	すりガラス
6 ガラスの大きさ	1×1 cm	2×2 cm
7 試験面の位置	打込時の側面	打込時の上面
8 養生温度	20℃	40℃ ^{注1}
9 養生時の湿潤程度	水 中	散 水 ^{注2}
10 融解時の作用水	溜めたまま	除 去

注1 材令2～7日の間6時間は40℃18時間は約18℃

注2 3日に1回の割合で1日3回散水

凍結融解試験は材令28日から実施した。試験方法はRILEMの融氷剤を用いるコンクリートの凍結融解試験法を参考にして、まず供試体の側面をモルタルで囲って上面に水が溜るようにし、そこに作用水として3%のNaCl溶液を深さ約8mmになるように入れ、凍結は-15℃で18時間、融解は+18℃で6時間（いずれも室温）かけ、1日1サイクルで15サイクルまで試験した。剥離状態は3サイクルごとに記録した。

2. 2 結果と考察

剥離の程度を評価する方法として次の三つの方法によった。

(1) 露出したガラスの面積に着目するもの。

粗骨材上のモルタル剥離率(%)

$$= \frac{\text{露出したガラスの表面積}}{\text{埋込んだガラスの表面積}} \times 100$$

(2) ガラスの露出面積が100%になるときの凍結融解サイクル数を内挿または外挿法で求め、表2の階級値で剥離抵抗の程度を表わすもの。

(3) ガラスが露出するか否かに関係なく、試験面のモルタルの全剥離面積に着目するもの。

全モルタル剥離率(%)

$$= \frac{\text{モルタルの剥離面積}}{\text{モルタルの表面積}} \times 100$$

この研究の目的である粗骨材上のモルタル剥離に関しては(1)、(2)の評価法が適当であり、(3)は一応の参考と考えた。

凍結融解15サイクルにおける試験結果を三つの評価方法で表示したのち、要因効果を求めるために分散分析を行なった結果を表3に示す。ここで、有意水準1%で有意なものを**、有意水準5%で有意なものを*で表わす。また、有意となった要因について各水準の母平均を求め、要因効果を図1に示す。以下、粗骨材上の剥離に及ぼす要因効果の大きかったものから順に考察する。

(1) セメントの種類

高炉セメントのほうが普通ポルトランドセメントよりも剥離が著しかった。このような傾向は他の研究者によってもすでに報告されていることである。高炉セメントが不利になる条件としては、強度が低かったこと（28日強度がポルトランドセメントの89%）、同一AE剤量のときの空気量が少な目であったこと（ポルトランドセメントの11.8%に対して9.3%）などがあるが、剥離程度はこれだけでは説明できないような較差があった。これに関連することとして、セメント協会コンク

表3 分散分析の結果

要 因	粗骨材上のモルタル剥離率		剥離抵抗階級値		全モルタル剥離率	
	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
1 セメントの種類	**	**	**	**	**	**
2 養生温度		**		*		*
3 1×2		*		*		*
4 試験面の位置	**	**	**	*	**	*
5 水セメント比		**		**	*	*
6 2×4						
7 ガラスの埋込み深さ	**		*			
8 養生中の湿潤程度	**		**			
9 1×8			*	*		
10 AE剤	*	**	**	**	**	**
11 ガラスの表面		*	*	*	*	**
12 融解時の作用水		**				*
13 1×12		*				
14 ガラスの大きさ			*	*	*	

表2 剥離抵抗の階級値

階 級 値	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ガラスの露出面積が100%になるときのサイクル数	0～1	2～3	4～6	7～9	10～15	16～30	31～60	61～120	121～200	201～

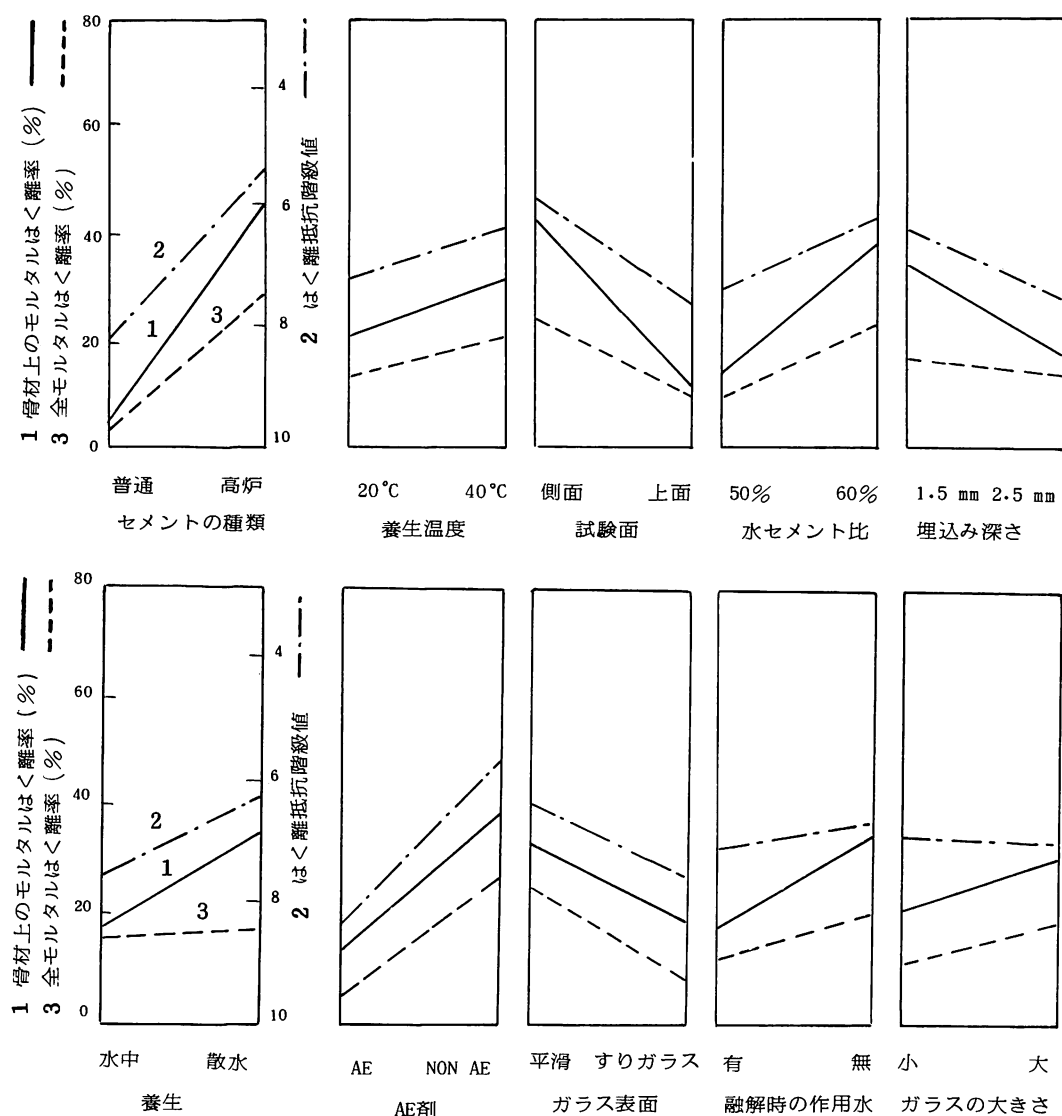


図1 剝離に及ぼす各要因の効果

リート専門委員会では、高炉セメントが普通ポルトランドセメントに比べて初期に乾燥を受けるとその部分が多孔化する傾向が大きく、スケーリングが多いという実験結果を発表している。¹⁾

なお、交互作用では表3のうちの5例だけが5%有意となったが、これはいずれもセメントの種類に関するものであって、高炉セメントは普通ポルトランドセメントに比べて40℃養生のときが20℃養生よりも、散水養生のときが水中養生よりも、融解時に作用水を除いて空気に触れるほうが継続して水に接しているときよりもいずれも剝離しやすいという傾向を示すものであった。

高炉セメントでも全く剝離を生じていない供試体もあることから、適切な使用方法により剝離抵抗性のすぐれたコンクリートを得る可能性があるといえよう。

(2) AE 剤

AE 剤の剝離抵抗性向上の効果が大きいことは知られており、この実験でもそのとおりであった。なお、Non AE のときは、凍結融解サイクルの初期にはガラス上のモルタルが剝離し、次いで周囲に広がって全面的に剝離するのに対して、AE のときはガラス上のモルタル剝離に留まる形式が多いという違いはあったが、いずれの場合でもガラ

ス（粗骨材）に接する部分が剥離に対して一番の弱点となっていた。

(3) 打込み時の上面と側面

打込み時の上面（こて仕上げをする面）と側面（型わくに接する面）とでは、上面のほうが剥離が少なかった。一般的には、上面は型わくで保護されていないので乾燥の影響を受け強度発現の点では不利であり、またブリージングのために上面の品質は劣るので耐久性は型わくに接する面より低いと考えられるが、今回の試験結果は逆であった。これは上面が打込み後から脱型して水中浸漬されるまでの約1日間に乾燥の影響を受け、モルタルの飽水度が低減したことの効果と思われる。このような脱型までの乾燥の影響については田畑らの研究²⁾でも明らかにされており、筆者らも消波ブロックの現地調査で上面のほうが剥離が少ないという幾つかの例を認めている。

(4) 水セメント比

水セメント比の小さいほうが剥離が少なかった。1回目の実験では水セメント比の効果が有意とならなかったが、これは $W/C=50\%$ で Non AE の供試体のうちの2個が1回目の実験だけ剥離したことの影響であって、AE 剤の要因効果が大きいため水セメント比の効果が表われなかったことによる。

(5) ガラスの埋込み深さ

ガラスの埋込み深さの大きいほうが剥離抵抗が大きかった。

(6) ガラスの表面状態

すりガラスよりも平滑なガラスのほうが剥離抵抗が大きかった。これについては後述の実験と合わせて別途に考察する。

(7) 養生、融解時の作用水の有無その他

剥離に及ぼすその他の要因効果で、2回の実験のうち1回だけ有意となったものについて述べると、養生温度は 40°C のような高温は不利であること、散水養生よりも水中養生（いずれも7日間）のほうがよいこと、融解サイクル中に作用水を除いて空気にあてるほうが作用水を残しておくよりも剥離が多いことという結果を得た。

一回目と二回目の実験では剥離程度に有意差はなかったが、同一試験条件の供試体間で個々に比較すると、顕著な相違が生じたものが3件あった。すなわち、供試体番号2, 12, 15ではガラス上のモルタル剥離率で62~75%対0%というものであった。この種の実験では実施上の僅かな違いでも結果に大きな影響を与えることがあるので留意

すべきである。

2. 3 まとめ

剥離に影響する要因として、セメントの種類、AE 剤の有無、水セメント比、打込み時の上面と側面の差、粗骨材（この場合はガラス）の埋込み深さと表面性状などの効果が大きいことがわかった。

剥離の評価方法として、最終サイクルにおける粗骨材上のモルタル剥離率と、粗骨材の露出面積が100%になるときのサイクル数により決る階級値との二つを用いた。前者は剥離の進行速度が考慮されていない点で不満はあるが、いずれによっても一応妥当な成果が得られたものと思う。

3. 粗骨材の種類と剥離抵抗性

3. 1 実験概要

2で述べた実験では、粗骨材として埋込んだガラスの表面性状が剥離抵抗性に影響を及ぼしたが、本章ではこの問題に焦点を絞って行なった実験について述べる。実験は表4に示す7種類の粗骨材を用い、凍結融解試験と骨材とモルタルとの付着試験とから成る。

粗骨材の寸法は、ガラスとプラスチックフィルムは $2 \times 2 \text{ cm}$ の面積とし、岩石はカッターで約 2 cm 立方体に切り出した。細骨材は浜厚真産で、各使用材料の比重と吸水率は表5に示す。

凍結融解試験用の供試体は $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ のモルタル製で、高炉セメントB種を用い、水セメント比は60%、砂セメント比2.8とし、AE 剤としてビンソルWをセメント量の0.025%使用した。粗骨材の埋込み深さは2 mm とし、1個の供試体に同種類の粗骨材3個を埋込んだ。

養生は28日水中養生と7日水中21日空气中養生との2種類で、養生温度は 20°C とした。

凍結融解試験は恒温試験槽を用い、供試体を3%のNaCl溶液中に浸漬したままとしたほかは前述の実験と同じ方法によって行ない、材令28日から開始し83サイクルで終了した。

粗骨材とモルタルの付着強度は直接引張試験により求めた。粗骨材の種類と寸法は凍結融解試験に用いたものと同じであり、打継ぎ面は水平面として前記と同じ配合のモルタルを高さ7 cm 打継いで供試体とした。粗骨材試料は一種類につき6個（砂岩は4個）一組とし、このうち岩石試料は打継ぎの前1時間吸水させた。養生は 20°C で水中

表4 粗骨材の種類

名 称	種 別 等
ガラス	厚さ 2 mm
すりガラス	〃
プラスチックフィルム	OHP用
花コウ岩	
砂岩	
れんが	耐火れんが
軽岩	樽前産火山礫

表5 比重と吸水率

骨 材	比 重	吸水率 (%)
細 骨 材	2.75	1.58
花コウ岩	2.83	0.39
砂 岩	2.54	1.83
れ ん が	1.57	23.0
軽 岩	1.19	56.8

28 日間行ない、引張試験はミハエリス二重でこ形試験機を利用して直接引張を加えるようにした。使用したモルタルの 28 日圧縮強度は 268 kgf/cm²、曲げ強度は 57 kgf/cm² であった。

3. 2 結果と考察

凍結融解による粗骨材上のモルタル剥離率（以下単にモルタル剥離率という）の変化は図 2 に、粗骨材とモルタルの付着試験結果は表 6 に示す。付着試験の破断は、ガラス、すりガラス、花コウ岩、砂岩では粗骨材とモルタルの界面で生じたが、れんがと軽石はその強度が弱いため、破断は粗骨材部で生じた。

表6 モルタルとの付着強度

粗 骨 材	付 着 強 度 (kgf/cm ²)
ガ ラ ス	14.4
すりガラス	12.0
フ ィ ル ム	0.0
花 コ ウ 岩	15.4
砂 岩	11.6
れ ん が	6.8
軽 石	3.3

凍結融解試験の結果、水中 7 日 空気中 21 日養生のものは、最終の 83 サイクルでも剥離が少なく、粗骨材の影響が明瞭に表われなかったので、水中 28 日養生のものについて考察する。この場合は剥離の多いすりガラス、プラスチックフィルム、砂岩のグループと、剥離の少ない花コウ岩、軽石、れんが、ガラスのグループとに分れる。

プラスチックフィルムは平滑で付着強度はゼロで、剥離抵抗性も小さい材料であるといえる。ガラスは平滑であるがセメントと化学反応する³⁾ため付着強度は大きい。すりガラスは平滑なガラスを 100 番紙ヤスリでこすったものであるが、付着強度、剥離抵抗性とも平滑なガラスより小さく、とくに後者についてはその程度が著しかった。砂岩はすりガラスと同様に、付着強度の大きさに比べて剥離抵抗性が小さかった。砂岩は比重が 2.54 と小さく、吸水率がやや大きく、石質に問題があったのかも知れない。

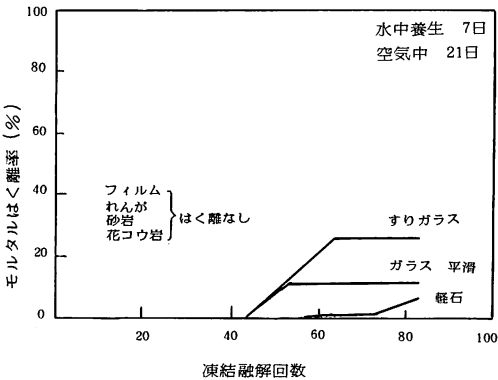
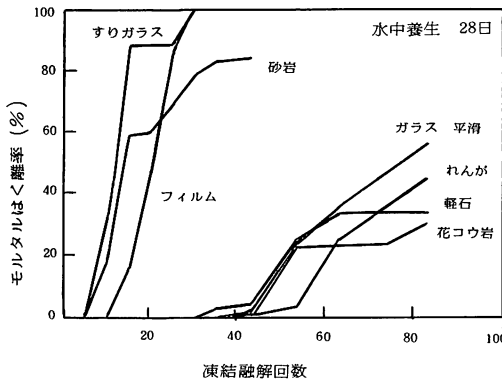


図2 凍結融解試験結果

剥離の少ないグループの中で、花コウ岩とガラスは材質が堅硬で付着強度も大きいことから妥当な結果といえよう。軽石とれんがは吸水率がそれぞれ 56.8%, 23.0% であり、一般にはこのようなポーラスな材料は耐凍害性が劣るとされているが、実験では剥離抵抗性がよかった。軽石とれんがは、表面全体に 0.1~0.5 mm 程度の大きさの空げきが分布していて接着効果を高めていることのほかに、鉱物の化学反応による効果もあるのではないかと考える。

3. 3 まとめ

粗骨材とモルタルの付着強度は剥離抵抗性と関係はあるが、それだけで剥離抵抗性の優劣を判定できるほどの関連性は見出せなかった。しかし、粗骨材の表面組織が剥離に大きく関係することが明らかとなった。また、粗骨材の付着性状の影響よりも水中養生をした後にコンクリートを乾燥させて飽水度を下げる効果のほうが剥離抵抗性に大きな影響を与えることがわかった。

4. あ と が き

今回の実験により、コンクリートの剥離に関係する因子の影響を求めるとともに、今まで資料の少なかった粗骨材とモルタルの付着性状と剥離の関係についてある程度明らかにすることができた。実験の実施にあたり、本校卒業生鈴木智之、林田雅幸、伊藤徹也、田丸芳弘の諸氏の協力を頂いたことを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 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.446, 1985 年 12 月
- 2) 田畑，洪，鎌田：コンクリートの耐凍害性におよぼす脱型までの取扱いの影響，日本建築学会構造系論文報告集第 367 号，昭和 61 年 9 月
- 3) 岩崎訓明：コンクリートの特性，p 63，共立出版，昭和 50 年

(昭和 61 年 11 月 29 日受理)