

海洋コンクリート表層部における粗骨材露出現象の再現のための基礎的実験

廣川 一巳*・渡辺 一郎**・柳谷 豊***

Research for reproduce phenomenon of exposed a coarse aggregate in a marine concrete surface

HIROKAWA Kazumi, WATANABE Kazuo, YANAGIYA Yutaka

要 旨

寒冷地の海洋コンクリート構造物は、乾湿繰り返しや凍結融解、塩化物等の作用を受け凍害を起こすことがある。凍害の中でも粗骨材露出現象はモルタルが粗骨材上面で剥離する現象で、構造物自体は健全で粗骨材も損傷しないが信頼性や美観を損ねるといった特徴を持つ。本研究ではコンクリート表面に凍結融解を繰り返し与え、実際に粗骨材露出現象を再現し、その試験方法を確立することを目的とした。

Abstract

Marine concrete structures in cold region are exposed to severe conditions. In winter the structures receive the frost damages such as freezing and thawing, and the surface of them receives the damages directly. But the phenomenon of exposed aggregates that is a kind of frost damage is not known to many researchers. This research aims to reproduce a coarse aggregate exposure phenomenon by giving the action of the freezing and thawing repeatedly on the surface of the concrete, and also to establish the method for the examination.

1. はじめに

海洋コンクリート構造物は、夏季には乾燥や水の浸透による水分変化、日射による温度変化、海水の作用、空気中の炭酸ガスなどを表層部に受け冬季には表面水およびコンクリート内部水による凍結融解作用を受ける。特に寒冷地のコンクリート表層部はこれらの作用を直接受けるため一層厳しい環境におかれ、凍害を起こすことがある。ここで言う凍害とは、コンクリート構造物が水分の凍結融解作用によって起こる、ひび割れ、スケーリングなどにより表層部から劣化していく現象の総称で、月平均気温が0℃以下となる地域で問題となり、日本では沖縄を除く国内全域が対象となる。本研究のテーマでもある粗骨材露出現象とは

凍結融解の繰り返し作用によりコンクリート表面から深さ2mm付近のモルタルが粗骨材上面で剥離し、年数の経過とともに剥離面積は広がるが、剥離深さは進行せず、粗骨材自体が剥落することはないという現象¹⁾(写真-1)で、先に述べた凍結融解作用によってコンクリート表面が広範囲で剥離し続け、やがて粗骨材も剥がれる表面剥離(スケーリング)とはこの点で異なる。スケーリングは、

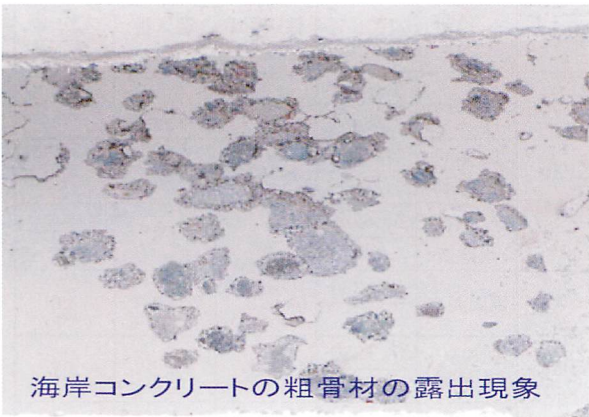


写真-1 海岸コンクリートの例

* 助 教 授 環境都市工学科
** 苫小牧工業高等専門学校専攻
科環境システム工学専攻
*** 技術専門員 環境都市工学科

表-1 配合表

水セメント比 W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE助剤
50	5.0±1.0	4.5±0.5	41	136	272	805	1199	2.72	0.816
55	5.0±1.0	4.5±0.5	43	136	247	855	1169	2.47	0.741

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、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、このスケーリングでの損傷は減り、代わって粗骨材露出現象が見られるようになってきた。この種の剥離は、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ていたが、最近では、スパイクタイヤの使用禁止に伴う塩化物系凍結防止剤の使用量急増などにより内陸側でも見られるようになってきた。ただ粗骨材露出現象が構造物の機能そのものを損なう事という事はないが、コンクリートに対する信頼性や美観を損ねるという点で粗骨材露出現象の防止、メカニズムの解明の意義は大きいといえる。また、その試験方法に関しては、従来JISやASTMで規格化されていた急速凍結融解条件での実験では、凍結融解の環境条件が厳しすぎるためにコンクリート細かく砕けてしまい、粗骨材露出現象の再現が困難であった。

本研究では、粗骨材露出現象の要因ともいえる凍結融解作用に着目し、コンクリートが曝される環境下に、より適した緩速凍結融解条件で実験を行い、粗骨材露出現象のための試験方法の確立と、粗骨材露出現象の再現を目的とした。

2. 実験概要

表-2 養生方法および練り混ぜ性状

W/C	試験水	養生方法	練り混ぜ温度(℃)	空気量 (%)	スランブ (cm)
NP50	錦岡海水	5w+23d	21.7	4.5	5.2
		28w			
	3%NaCl水溶液	5w+23d	20.1	4.4	5.0
		28w			
	3%CaCl ₂ 水溶液	5w+23d	21.3	4.6	5.5
		28w			
NP55	錦岡海水	5w+23d	22.5	4.9	5.6
		28w			
	3%NaCl水溶液	5w+23d	19.7	4.2	4.7
		28w			
	3%CaCl ₂ 水溶液	5w+23d	21.0	4.3	5.4
		28w			

2.1 使用材料および配合

使用材料としてセメントは普通ポルトランドセメント(密度=3.15),粗骨材は静内産(密度=2.74),細骨材は浜厚真産(密度=2.77)を用い、混和剤はAE減水剤(変性リグニンスルホン酸化合物)、およびAE助剤を用いた。配合は表-1に示すように、水セメント比(W/C)は50%と55%の2ケース、練り混ぜ温度は20℃、目標空気量は4.5±0.5%,目標スランブは5.0±1.0cmとした。

2.2 養生条件および練り混ぜ性状

表-2に示すように、供試体の養生方法は5日間水中養生後、材齢28日まで恒温恒湿環境(20℃,55%)で空气中乾燥したもの(以下、5w+23dと略記)と、28日間水中養生したもの(以下、28wと略記)の2パターン。凍結融解試験に使用する試験水は、錦岡海岸で採取した海水(以下、Seaと略記)、3%塩化ナトリウム水溶液(以下、Naと略記)、3%塩化カルシウム水溶液(以下、Caと略記)の3パターンとして、養生方法・試験水を組み合わせて計6種類のパターンにより実験を行った。

2.3 供試体

供試体は、ASTM C 672-92²⁾に準拠し、供試体表面積は最小で0.046㎡、最小深さ75mm。また、供試体の本数は、各実験1パターンにつき3本作製し、発泡スチロール型枠側面を試験面(図-1)となるようにし、粗骨材露出現象の再現を行った。供試体作製の手順は以下1)~5)に示す。

- 1) 図-1に示すように、内寸が縦180mm×横 280mm×深さ120mmの発泡スチロール型枠の側面に、縦80mm×横160mmのコンクリート打設用の穴を開ける。
- 2) 供試体の試験面を平滑にするための鉄板を入れ、水溜の枠を作るために20mm厚のスタイロフォームを型枠上縁と平行にはめ、ふたを閉じガムテープで密閉する。
- 3) 内部の鉄板に、剥離剤を塗布した後、型枠にコンクリートを打ち込む。
- 4) 1層あたり25回、3層突き固め、各層毎にセメ

- ントナイフで試験面をスケーピングの後、打ち込み口を閉じ、室温20℃の恒温室内にて静置（封緘養生）
- 5) コンクリート硬化後、材齢1日で脱型。鉄板及びスタyroフォーム除去した後、純水中で養生を行う。
- 6) 表-2に示すような各養生期間に従って養生した後、コンクリートと型枠の隙間からの水漏れを防ぐため、コンクリート表面の接触縁に沿ってコーキング処理を施す。

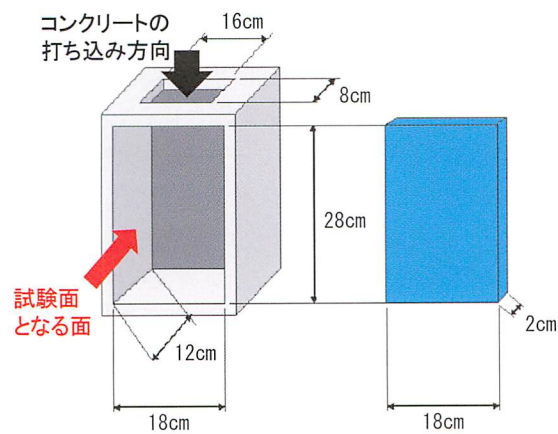


図-1 使用型枠寸法

2.4 凍結融解試験

凍結融解による供試体の表面温度を-10℃～+10℃に設定するため、凍結時間を-10℃の冷凍室にて16時間、融解時間を+20℃で相対湿度55%の恒温室内にて8時間と設定した。

以下1)～7)に凍結融解試験の手順を示す。

- 1) 試験面上に水深が10mmの高さになるように試験水を満たす。
- 2) 水分の蒸発を防ぐため、試験面をラップで覆ってから凍結させる。
- 3) 融解は、試験水を毎回新しいものと交換し、凍結と融解の過程を1サイクル/日として計20サイクル行い、1サイクル毎に試験面を目視観察する。また定期的に試験面を純水で洗浄する。
- 4) 供試体表面に剥離が認められた場合は、剥離部分をOHPシートにトレースしてから剥離面積をプランメータにより測定し、累積剥離面積を求め、凍結融解開始時の全露出部分に対する割合を剥離率とし、剥離ごとに算出し、剥離の程度の評価に用いる。
- 5) 4)の後で剥離片を回収し、剥離片自体はアセトンに浸しておく。

- 6) 5)に続き、剥離片をアセトンで水和反応を停止させた後D-dryし、74 以下に微粉碎して粉末X線回折の試料とし、剥離片の化学組成を調べる。
- 7) 定期的に写真撮影を行い、剥離状況を記録する。

3. 結果および考察

3.1 水セメント比と剥離率の関係

図-2は水セメント比55%、図-3は50%で作製したコンクリートの表面に、表-2の養生方法と試験水の組み合わせの実験パターンで凍結融解を与え、その20サイクル間の剥離率を表したものである。

図-2, 3より、コンクリートの水セメント比を小さくすることで、粗骨材露出現象に対する抵抗性が増し、コンクリート表面の剥離が少なくなったことが確認された。

このことは、コンクリートが凍害によって劣化するのは、毛管空隙だけでなく細孔径分布が $10^4 \sim 10^5$ 程度の空隙が多い場合と考えられているが、水セメント比を小さくすることで、これら組織がより微細になり、また密実な組織が形成され

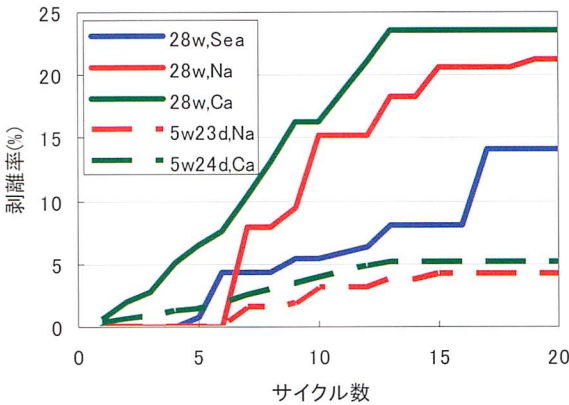


図-3 剥離率 W/C=55%

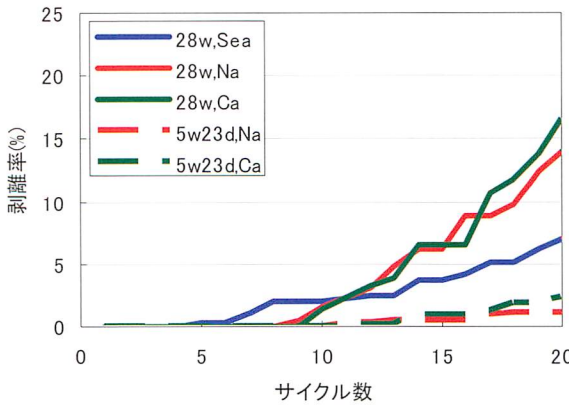


図-4 剥離率 W/C=50%

るため、凍結時の膨張に対する抵抗性の向上(強度、弾性率の向上、塩化物イオンの拡散低下³⁾)と、透水性の低下による外部からの水の浸入が抑えられること(水密性の向上)で、コンクリート表面の剥離が起こりにくくなったと考えられる。

写真-2は水セメント比55%, 写真-3は水セメン



写真-2 28wSea (W/C=55%)

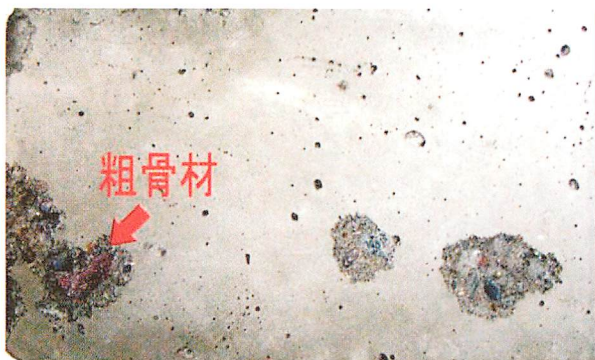


写真-3 28wNa (W/C=50%)

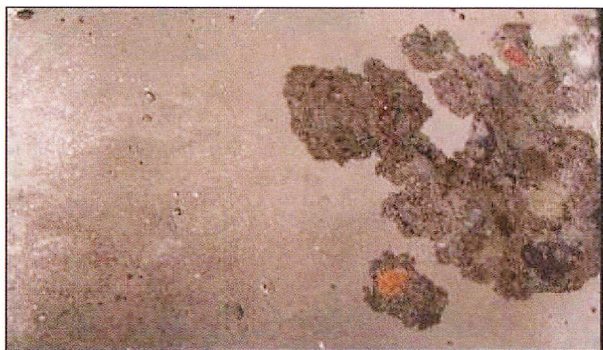


写真-4 28wNa (W/C=55%)



写真-5 5w23dNa (W/C=55%)

ト比50%の配合で供試体を28日間水中養生し、試験水に海水を20サイクル凍結融解与えたときの写真である。これらの写真からも水セメント比が小さい供試体ほど表面の剥離が少ないことが確認された。

3.2 養生方法と剥離率の関係

写真-2は28日間水中養生(28w)、写真-3は5日間水中養生後23日間空気中乾燥(5w+23d)の各供試体に、試験水3%NaCl水溶液を用い、20サイクルの凍結融解を与えたときの写真である。

これらの写真から5w+23dの供試体においては28wより粗骨材露出現象が起きにくくなっていることがわかる。これは鮎田らの研究¹⁾からも明らかのように、コンクリートを水中養生後乾燥させることで、コンクリート中の自由水が失われ、その後の試験中に再吸水されにくくなり、凍結可能水量が少なくなるためと、コンクリート表層部の炭酸化が促進され、凍結融解に対する抵抗性が増加したことが考えられる。

ただし、28wにおいては水中養生直後に凍結融解を与えているため、供試体中の凍結水量が5w+23dに比べて多いため凍結水圧が高かったことも原因の一つと思われる。

また、供試体(28w)は水中養生を続けていたことで、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (水酸化カルシウム)の結晶化が進み、一度晶出した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は、あまり水に溶出せず、炭酸化が進行しないものと考えられる⁴⁾。

3.3 試験水と剥離率の関係

図-2に示されるように、W/C=55%では、海水、3%塩化ナトリウム水溶液、3%塩化カルシウム水溶液の順で剥離率が大きくなっている。また図-3に示されるようにW/C=50%では、海水では剥離がなく、3%塩化ナトリウム水溶液、3%塩化カルシウム水溶液の順で剥離率が大きくなっていることがわかる。このことから試験水に用いている、海水(成分:NaCl+他)、塩化ナトリウム水溶液(NaCl)、塩化カルシウム水溶液(CaCl_2)の各成分に着目してみると、各試験水に Cl^- (塩化物イオン)が含まれていることから、粗骨材露出現象を引き起こす要因が塩化物であると考えられる。

また、セメント水和物が塩化物イオンをある程度まで固定化できる⁵⁾ことから、塩化物イオン量の多い試験水ほど、表面から浸透した外来塩化物イオンがその固定能を上回るのが早く、結果として剥離が生じやすくなったのではないかとと思われる。

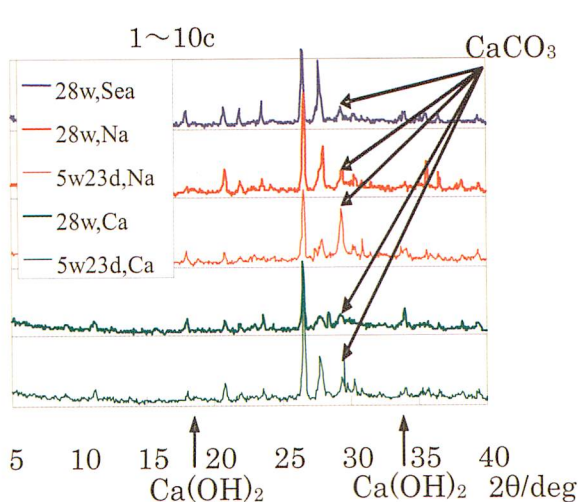


図-4 W/C=50%の粉末X線回折結果(0~10c)

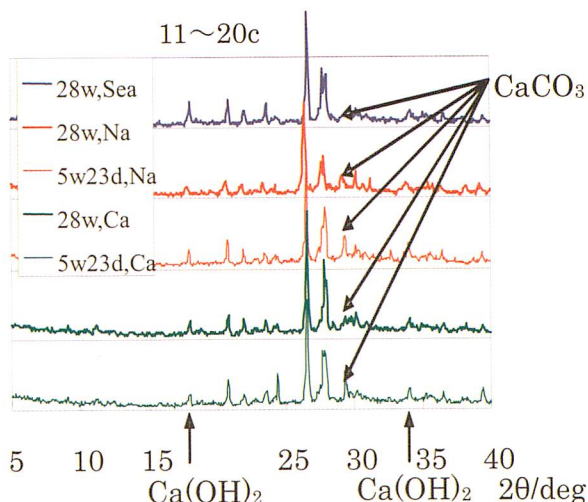


図-5 W/C=55%の粉末X線回折結果(11~20c)

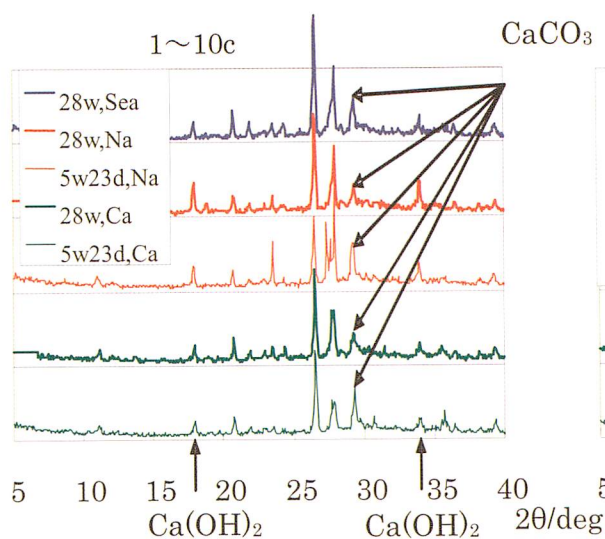


図-6 W/C=55%の粉末X線回折結果(0~10c)

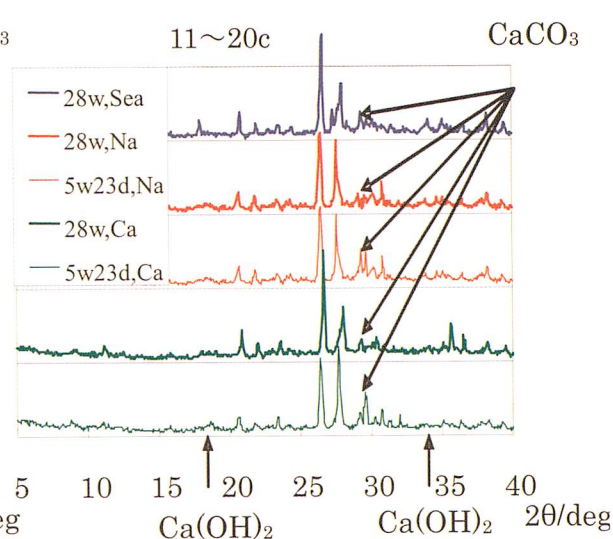


図-7 W/C=55%の粉末X線回折結果(11~20c)

さらに、 CaCl_2 は容易に水に溶けるため、塩化物がCaを溶出させてしまって骨材界面部分に空隙を形成し、そこが凍結し、結果として破壊するのではないかということも考えられる。

3.4 剥離片の化学分析結果

図-4, 5はW/C=50%の供試体に、図-6, 7はW/C=55%の供試体にそれぞれ凍結融解を0~10サイクル、11~20サイクル与えたときに、生じた剥離片の粉末X線回折の結果である。

図-4, 5, 6, 7から剥離片の粉末X線回折の結果は、水酸化カルシウムが概ね 18.1° の強度ピークの方が 34.1° の強度ピークより大きくなる傾向が見られ、稀に 18.1° の強度ピークの方が 34.1° の強度ピークより小さく出る場合もあり、水中養生を続けた供試体では、水酸化カルシウムの強度ピ

ークが大きく、水酸化カルシウム結晶が多く晶出していると思われる。これは水セメント比が異なる供試体においても同様の結果であった。また炭酸カルシウムに関しては、養生方法によってピークに違いが大きく見られた。

しかし、凍結融解のサイクル数について回折結果を比較すると、凍結融解のサイクル数が11~20サイクルと多く与えられた供試体では、水酸化カルシウムの強度ピークが小さく出ている。これは、一度晶出した水酸化カルシウムが、あまり水に溶出せず、炭酸化も進行しないことから、塩化物の作用によって水酸化カルシウムが分解する等のことが考えられる。

また、養生方法が5w+23dの供試体の回折結果では、水セメント比の異なる供試体においても、共に 29° 付近の炭酸カルシウムの強度ピークが大き

く出ている。このことから、コンクリート表層部が養生後空中乾燥することで炭酸イオン(CO_3^{2-})の作用による反応で炭酸化が促進され、その結果、粗骨材露出現象が起きにくくなったと考えられる。

4. まとめ

以上のことより以下のことが分かった。

- (1) この試験方法においても、コンクリートを養生後乾燥させることで、コンクリートの炭酸化は増加し、剥離率は減少する傾向を示した。
- (2) 粗骨材露出現象を引き起こす要因として塩化物イオン量が大いことがわかった。
- (3) 剥離率と水セメント比の関係から、水セメント比の増加に伴い、コンクリートの炭酸化程度は減少し、剥離率は増大する傾向を示した。
- (4) 水中養生を続けた供試体では、水酸化カルシウムの結晶が晶出しやすくなることがわかった。
- (5) 試験方法として凍結融解作用の表面温度を $-10^{\circ}\text{C}\sim+10^{\circ}\text{C}$ にしても、粗骨材露出現象の再現が可能なことが分かった。
- (6) 目的である粗骨材露出現象の再現にほぼ成功した。このことから本実験が、粗骨材露出現象の試験方法としても使えることがわかった。

本研究を行うにあたり、実験を全般にわたって協力していただいた、環境都市工学科5期 山田 剛氏、同学科7期 淵脇 正広氏。また粉末X線回折装置を貸していただいた物質工学科ならびに装置の使用にあたりお世話いただいた遠藤 俊二技術専門員に深く感謝申し上げます。

5. 参考文献

- 1) 鮎田，林，猪狩：海岸コンクリートの冬季における剥離現象について，土木学会次学術講演会33
- 2) American Society for Testing and Materials：Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM C 672, Annual Book of ASTM Standards, part 14, pp.402, 1993
- 3) 岸谷 孝一：セメント硬化体の内部組織への侵食性物質の作用機構と耐久性，コンクリート工学Vol. 19, No. 11, pp. 29～35, 1981

- 4) 廣川，奥田，柳谷：寒冷地の海洋コンクリート表層部の微視構造について，苫小牧工業高等専門学校地域共同センター研究成果報告集第一号，pp. 47～55, 2002
- 5) 梅村，露木，原田：モルタル硬化体中の塩化物イオンの透過性と固定化に及ぼす混和材の影響，コンクリート工学論文集第9巻第1号，pp. 143, 1998

(平成16年12月15日受理)