

論文 海洋コンクリート構造物の凍害による表層モルタルはく離に関する実験的検討

廣川 一巳^{*1}・渡辺 暁央^{*2}・近藤 崇^{*3}・木村 直生^{*4}

要旨：本研究は、寒冷地の海洋コンクリートに発生する凍害の一種である粗骨材露出現象に着目した研究である。コンクリート暴露面に深さ 10mm の海水あるいは濃度 3% の塩水を湛水させ、1 日の間でコンクリートの表面温度が+5~-10°C に変化する凍結融解試験を実施し、粗骨材が露出するモルタルのはく離の変化を測定した。その結果、標準養生後直ちに凍結融解試験を実施するより、標準養生後に一定期間気中で乾燥させることではく離が抑制された。また、シラン系含浸材を塗布するとはく離がほとんど認められず、粗骨材露出現象に対して有効な対策になることが確認された。

キーワード：海洋コンクリート、粗骨材露出現象、はく離率、炭酸カルシウム、シラン系含浸材

1. はじめに

寒冷地におけるコンクリートの凍害は、粗骨材の品質に基づくポップアウトや凍結融解の繰り返しにより崩壊が進行するスケーリングに主眼が置かれた検討が実施されている。特に、海洋コンクリートや凍結防止剤の影響を受けるコンクリートは、塩害と凍害の複合劣化が発生し、劣化の進行が早いことが知られている。一方、ポップアウトに近い形態の劣化として、コンクリート表層部の粗骨材界面において、凍結融解によりモルタルのはく離する粗骨材露出現象という劣化形態も提言されている(写真-1 参照)^{1),2)}。この劣化は、海洋構造物コンクリートにて発生しており、時間経過とともにはく離の面積は広がるものの、深さ方向には劣化が進行せず、スケーリングのようにコンクリートが崩壊することはない。そのため、構造物の力学的強度低下等は発生せず、単に美観の問題として扱われることが多く、構造物の維持管理の観点では重要視されていない。しかし、この劣化は、AE 剤による適切な空気量を確保しても比較的短期間の凍結融解作用で発生するため、工事完了後の竣工検査前に劣化が顕在化してしまう事例もあり、発注者および施工者ともに対応に苦慮するのも事実である。

著者らは、この粗骨材露出現象について検討するために、実環境に近い温度条件で凍結融解実験を行い、再現実験を試みている^{3),4)}。粗骨材のはく離を簡単に発生させるためには、スケーリングの実験と同様に塩水浸漬したコンクリート供試体に対して、+10~-10°C 程度の急激な凍結融解を繰り返すことにより再現することが可能である。既往の研究では、この温度条件において塩水浸漬下の凍結融解を繰り返す実験を実施した。水セメント比

が 50 および 55% の供試体について標準養生終了直後から実験を行うとモルタルのはく離が発生した。一方、標準養生後に一定期間気中での自然乾燥をした後に実験を行ったものは、はく離が小さくなった。この要因として、骨材界面の水分の逸散および界面の炭酸化による強度の増大が推定された。

しかし、この実験で行ったような+10~-10°C の急激な温度変化は、実環境では発生しない。そこで、本研究では、北海道苫小牧市の実環境のコンクリート構造物が実際に受ける温度履歴を測定した結果、温度条件が+5~-10°C 程度であるため、その条件下で粗骨材露出現象を実験的に発生させることを試みた。このときのコンクリートの状況を把握する目的に、コンクリート中に浸透する塩分量を把握し、粗骨材露出現象に与える影響を検討した。また、この劣化を防止する上で、表層モルタルの炭酸化が有効であるという視点から、コンクリート中に水酸化カルシウムを多く生成させる配合の供試体を作製し、それを炭酸化させた場合の劣化状況を検討した。さらに、実用的な劣化防止の観点から、シラン系含浸材を試験面



写真-1 粗骨材露出現象

*1 苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科教授 (正会員)

*2 苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 苫小牧工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博士(工学)

*4 苫小牧工業高等専門学校 専攻科環境システム専攻

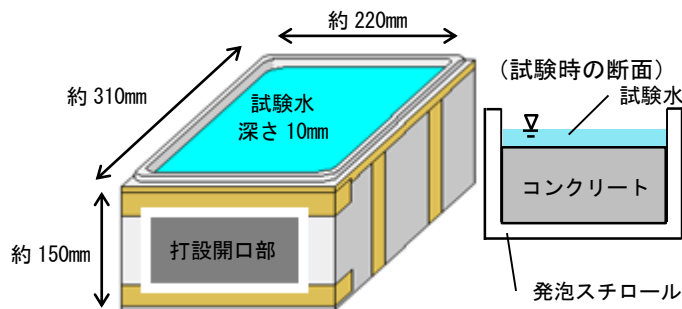


図-1 供試体概略図

(開口部を上にして打設し、この状態で試験実施)

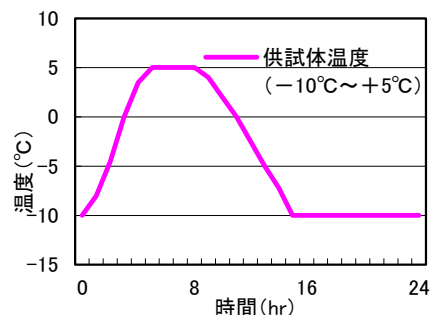


図-2 1サイクルの供試体表面の温度変化

表-1 標準供試体の配合および練上がり性状

W/C(%)	単体量(kg/m ³)						練上がり性状		
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 助剤	スランプ	空気量	練上がり温度
45	145	322	796	1164	3	0.16	5.5cm	5.3%	22.1°C
55	140	255	811	1180	2.5	0.13	5.5cm	4.6%	18.3°C

表-2 水酸化カルシウム増量コンクリート供試体の配合および練上がり性状

W/B (%)	貝殻割合	単体量(kg/m ³)							練上がり性状		
		水	セメント	貝殻	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 助剤	スランプ	空気量	練上がり温度
55	内割 1%	140	253	2.5	811	1180	2.5	0.13	3.0cm	3.4%	22.8°C
	内割 3%		247	7.6	811				4.0cm	4.8%	21.8°C
	外割 3%		255	7.6	804				5.0cm	4.5%	22.0°C

に塗布した供試体を作製して、効果の確認を行った。本稿では、以上の検討から、粗骨材露出現象について得られた知見を紹介する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および供試体

(1) 標準供試体

セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16 g/cm³）、粗骨材は静内産川砂利（密度=2.74g/cm³）、細骨材は浜厚真産陸砂（密度=2.69g/cm³）を用い、混和剤は AE 減水剤（変形リグニンスルホン酸化合物）、AE 助剤を用いた。供試体は ASTM C 672⁹⁾に準拠し、図-1に示すように蓋付きの発泡スチロールに打設のための開口部を設けて、蓋の内側に鋼製薄板を設置して封鎖してコンクリートを打設した。水セメント比は海洋コンクリートの基準となる 45%の供試体および 55%の供試体を作製した。スランプは 5.0±1.0cm、空気量は 4.5±0.5%を目標に打設を行った。配合および練上がり性状を表-1に示す。

打設後は打設開口部を封鎖して、24 時間静置した後、発泡スチロールの蓋と鋼製薄板を外して、コンクリート

と発泡スチロールの隙間にシーリング材で防水処理して養生を行った。養生方法は 14 日間標準養生したもの（以下、14w と略記）と、5 日間標準養生後、9 日間空气中乾燥（温度 20°C、相対湿度 60%）したもの（以下、5w9d と略記）の 2 パターンとした。

(2) 水酸化カルシウム増量コンクリート供試体

コンクリート中の水酸化カルシウムを増量する方法として、焼成した貝殻粉末を混入したコンクリートを作製した。貝殻粉末は炭酸カルシウムであるが、これを 1000°Cで焼成すると酸化カルシウムになる。これをセメントに混入してコンクリートを打設した場合、酸化カルシウムと水との反応で、水酸化カルシウムが生成され、コンクリートの膨張を発生させる^{6,7)}。本研究では、異常な膨張が発生しない程度に混入量を抑制して供試体を作製した。使用する貝殻はホッキ貝殻であり、天日干して乾燥・粉碎した後、1000°Cで 1 時間焼成する。焼成した貝殻粉末のうち 106μm ふるいを通過したものを使用した。表-2に示すように水セメント比が 55%のコンクリートの配合で、内割配合はセメント置換、外割配合は細骨材置換とした。2.1(1)に示す標準供試体と同様に打設および養生を行った。

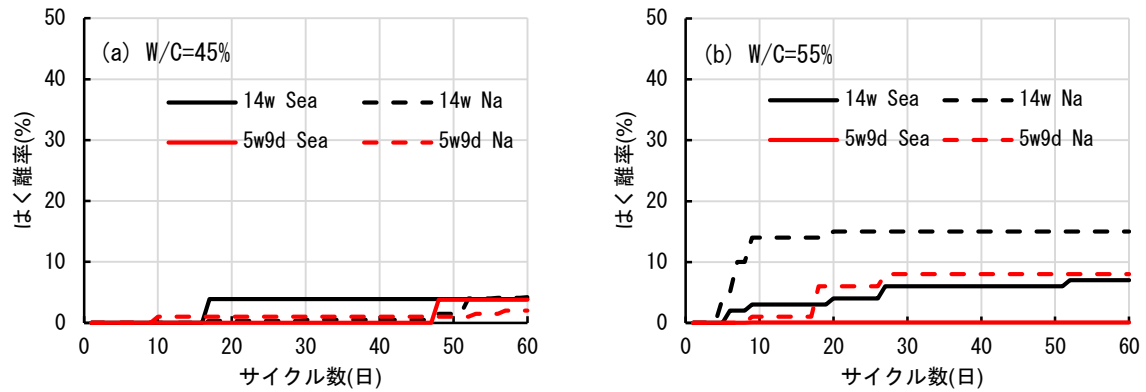


図-3 標準供試体におけるはく離率の変化

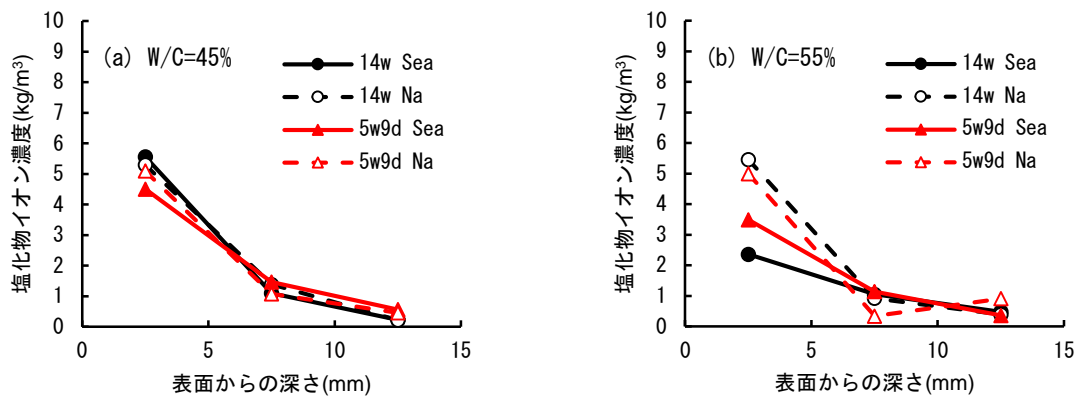


図-4 60 サイクル終了後の供試体中の塩化物イオン濃度

(3) シラン系含浸材塗布供試体

2.1(1)に示した水セメント比が 55%の標準供試体と同じ配合において、14w および 5w9d の養生に相当するように、13 日間の標準養生後に 1 日の気中乾燥を行ったもの (以下、13w1d と略記)、および 5 日間の標準養生後に 9 日間の気中乾燥を行ったもの (5w9d) について、シラン系含浸材の塗布を行った。双方の供試体ともに、含浸前にコンクリートの表層部研磨処理等の素地調整を行わず、型枠脱型面に直接含浸材を塗布し、1 日気中乾燥させた後、凍結融解試験を実施した。また、比較のため、同じ養生条件にて含浸材を塗布しない供試体も作製した。

2.2 凍結融解試験

凍結融解試験に使用する試験水は、苫小牧市錦岡海岸で採取した海水 (以下、Sea と略記)、塩分濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液 (以下、Na と略記)、の 2 パターンとした。ユニット型温湿度供給装置と接続した試験室において、図-2 に示すようにプログラム運転により 8 時間の融解作用と 16 時間の凍結作用を与え、供試体の表面温度を $-10 \sim +5^{\circ}\text{C}$ になるように制御し、この一連の過程を 60 サイクルまで行った。

2.3 含有塩分試験

含有塩分試験は、JIS A 1154 硬化コンクリート中に含

まれる塩化物イオンの試験方法にしたがい行った。これを行う前処理として、所定の凍結融解試験を終えた供試体の中心部分から直径 100mm のコアを採取して、その表層部から 0-5、5-10、10-15mm の厚さで切断し、粉砕機を用いてそれぞれ粉末を作製した。その後、硝酸(1+6)を用いて抽出を行い、電位差滴定により塩化物イオン量を測定した。

3. 標準供試体による粗骨材露出現象の再現

3.1 凍結融解試験

図-3 は水セメント比 45% および 55% の供試体のはく離率を示したものである。はく離率は、使用した供試体の露出面のモルタルがはく離し、粗骨材が露出している部分をトレースして囲いはく離面積を求め、このはく離面積を供試体の露出面積当たりの割合として算出したものである。水セメント比 45% の供試体はどの養生方法に関しても 10~15 サイクル程度ではく離が始まっており、はく離率は 14w Sea の 4.2% が最大となっている。また、他の養生方法に関してははく離率は 2~3.9% であった。全体的にはく離率は小さいことが分かる。

一方、水セメント比 55% の供試体については、どの養生方法についても 5~10 サイクル程度ではく離が始まっ

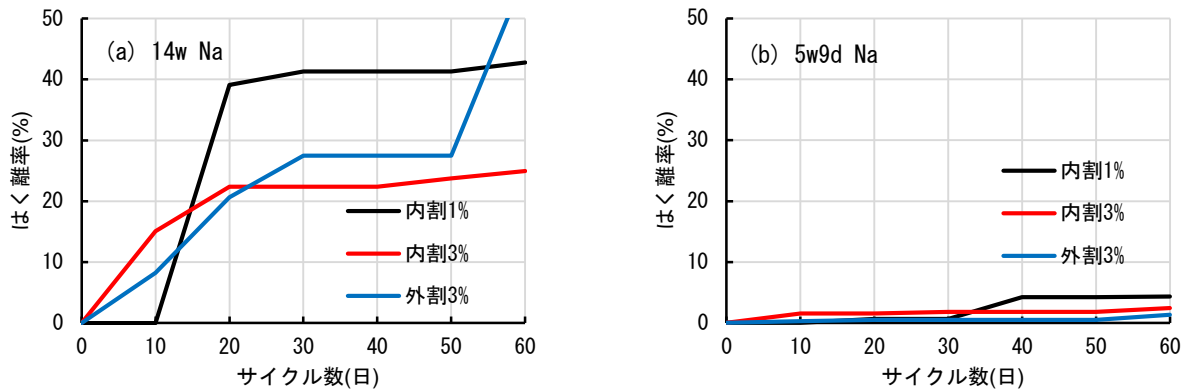


図-5 水酸化カルシウム増量させたコンクリートのはく離率 (W/C=55%, 3%濃度塩水による試験)

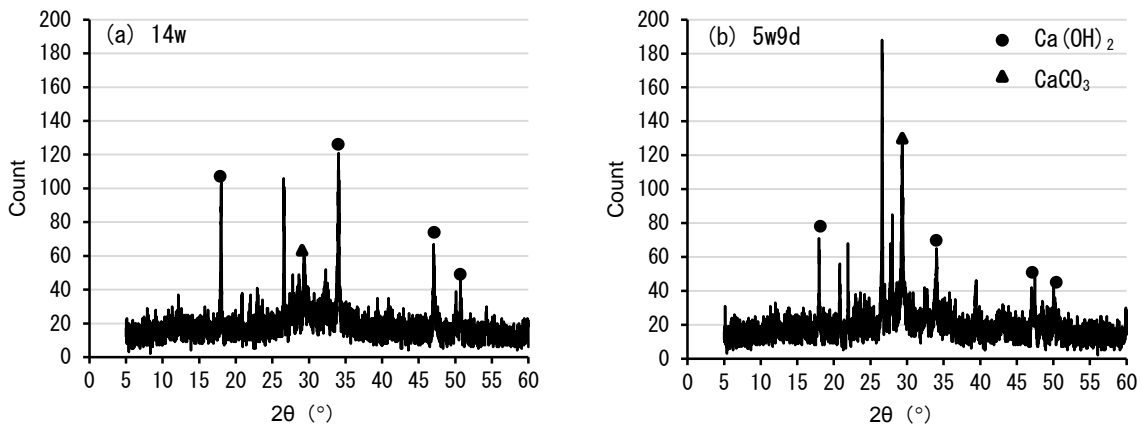


図-6 表層モルタルのX線回折 (水酸化カルシウム増量コンクリート, 外割3%)

しており、はく離率は14w Naの15%が最大となっている。また、他の養生方法に関してもはく離率は水セメント比45%の供試体と比較すると大きくなっている。

既往の研究⁴⁾では、水セメント比の小さな供試体の方が水セメント比の高い供試体より剥離が抑制されるということがわかっており、本研究でもその効果を確認することができたと言える。また、標準養生のみを行うより標準養生後に気中乾燥を行うことで供試体のはく離は抑制されるということがわかっており、本研究でもその効果を確認することができた。

3.2 含有塩分試験

図-4は水セメント比45%および55%の供試体の凍結融解試験終了後の塩分含有量を示したものである。表面から深くなるに従って塩分浸透量が少なくなっている。しかし、水セメント比、養生方法あるいは塩水と海水の違いがあっても、ほとんど塩分浸透に差は認められず、モルタルのはく離率と比較しても有意な関連性がないようである。塩分浸透量の相違により劣化に差が発生することを想定していたが、粗骨材露出現象は含有塩分量が

影響するのではなく、塩分の影響による凝固点降下が発生の要因となっている可能性が考えられる。これについては、さらなる検討が必要である。

4. 水酸化カルシウム増量コンクリートの凍結融解試験

図-5は、水セメント比55%の供試体に焼成貝殻粉末をセメント質量に対してそれぞれ内割1%、内割3%、外割3%の割合で混入した供試体のはく離率を示したものである。図-5(a)に示す標準養生のみを行った供試体は、はく離率に大きなばらつきが見られるが、図-3(b)に示す標準供試体の標準養生のものと比較してはく離率が大きくなっている。これは、焼成貝殻粉末を混入することにより、内部組織の膨張が発生し、空隙構造が粗くなったため、凍害の影響を受けやすくなったことが考えられる。

一方、図-5(b)に示す気中乾燥を行った供試体は、貝殻粉末を混入することにより、はく離率が非常に小さくなっている。乾燥養生で含水率が低下している状況から塩水を湛水させて凍結融解試験を行っているため、標準

養生よりはく離が抑制される。しかし、図-3 (b)に示す気中養生と比較してもはく離率が小さくなっている。この理由は、水酸化カルシウムを増量させたコンクリートを気中養生したことにより、表層部の炭酸化が促進されたことが原因の一つと推察される。図-6は、貝殻粉末を外割3%混入した水酸化カルシウム増量コンクリートにおいて、凍結融解試験を実施する前に、表層部モルタルを採取してX線回折を行った結果である。標準養生の14wと比較して、気中養生を行った5w9dは、炭酸カルシウムの明瞭なピークが確認されている。これは、水酸化カルシウム増量コンクリートを気中養生することにより炭酸カルシウムが多く生成されたことを示すデータといえる。炭酸化の進行程度については、今後、さらなる検討が必要であるが、はく離防止に炭酸カルシウムの生成が重要であることを裏付ける結果とも考えられる。

5. シラン系含浸材の塗布による劣化対策

図-7は、シラン系含浸材を塗布した水セメント比が55%のコンクリート供試体のはく離率である。なお、含浸材の凍結融解試験においては、図-3の標準供試体において劣化が大きい水セメント比が55%のみを対象とした。高水セメント比のコンクリートにおいては、含浸材を塗布しない場合、いずれの養生方法においても粗骨材露出現象が発生している。しかし、含浸材を塗布することにより、気中乾燥をほとんど行っていない13w1dにおいてもはく離が発生していない。これは、供試体を乾燥させてからシラン系含浸材を塗布しているため、凍結融解試験時に外部からの水分供給が阻害されたことが原因と考えられる。また、コンクリート中に塩分の浸透が大幅に抑制されるため、塩分の影響によるコンクリート表層部の急激な温度変化が発生しにくい環境になったのではないかと考えられる。今後は、含浸材塗布によるコンクリートの温度変化に着目した研究の遂行が必要といえる。劣化抑制の原因は不明確ではあるが、この結果は、養生終了後、直ちに含浸材を塗布すれば、粗骨材露出現象を防止できることを示しており、現場における有効な対策になると考えられる。

6. まとめ

本研究は、海洋コンクリート構造物が凍結融解を受けることによって発生する粗骨材露出現象を実験的に再現したものである。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 実環境に近い温度変化である+5~-10℃の凍結融解条件において、水セメント比45%および55%の供試体での粗骨材露出現象の再現をすることができた。
- (2) 低水セメント比の方がはく離抑制に効果的であり、また標準養生のみを行うより標準養生後に気中乾

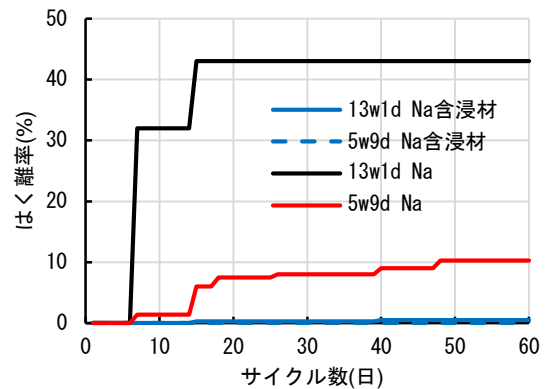


図-7 含浸材塗布コンクリートのはく離率 (W/C=55%, 3%濃度塩水による試験)

燥を行う方がはく離の抑制に効果的である。

- (3) 水セメント比および養生方法が違っていても、本実験終了後のコンクリート中の塩分浸透量に大きな差はなく、塩分浸透量と剥離率には有意な関連性が認められなかった。
- (4) 焼成した貝殻粉末を混入して水酸化カルシウムを増加させたコンクリートを作製した場合、標準養生後直ちに凍結融解試験を実施すると、普通コンクリートより大きなはく離率となる。しかし、気中乾燥を行った供試体は、普通コンクリートよりはく離率が小さくなる。
- (5) シラン系含浸材を塗布したコンクリートは、ほとんどはく離が認められず、粗骨材露出現象の防止に有効であることが確認できた。

謝辞

本研究の実験は、苫小牧工業高等専門学校環境都市工学科および環境システム工学専攻の学生の卒業研究および特別研究の一環として実施したものである。協力していただいた学生に、謝意を示す。

参考文献

- 1) 佐伯昇, 鮎田耕一, 前川静男: 北海道における海岸および港湾コンクリート構造物の凍害による表面剥離損傷, 土木学会論文報告集, 第327号, pp.151-162, 1982
- 2) 鮎田耕一, 桜井宏, 小笠原育穂: 流氷海域に暴露したコンクリートの劣化性状, セメント・コンクリート論文集, No.47, pp.474-479, 1993
- 3) 廣川一巳, 前川静男: 粗骨材の表面粗さとモルタルの付着性状について, 苫小牧工業高等専門学校紀要, 第34号, pp.121-124, 1999.2
- 4) 廣川一巳, 渡辺一郎, 柳谷豊: 海洋コンクリート表

- 層部における粗骨材露出現象再現のための基礎的
実験，苫小牧工業高等専門学校紀要，第 40 号，
pp.53-58, 2005.2
- 5) 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
- 6) 上村清志，廣川一巳，渡辺暁央：焼成ホッキ貝殻粉
末を混入したモルタルの初期膨張特性，コンクリー
ト工学年次論文集，Vol.34, No.1, pp.556-561, 2012.7
- 7) 石井允都，廣川一巳，渡辺暁央：焼成ホッキ貝殻粉
末および焼成ホタテ貝殻粉末混入モルタルの膨張
特性の相違について，コンクリート工学年次論文集，
Vol.35, No.1, pp.1567-1572, 2013.7