論文 実海洋環境におけるタウマサイト硫酸塩劣化の可能性

細川 佳史*1·北澤 健資*2·野崎 隆人*3·山田 一夫*4

要旨:石灰石微粉末・骨材を使用したセメント硬化体に対し,寒冷海洋環境における海水の滞留の有無がタ ウマサイト硫酸塩劣化(TSA)に及ぼす影響について検討するため,北海道沿岸部において暴露試験(30ヶ月) を実施した。その結果,海水の滞留を模擬した環境では,一部の試験体にTSA が認められたが,海水が滞留 しない環境ではTSA は認められなかった。このことから,海洋環境では海水の滞留がTSA の一要因となる ことが明らかとなった。また,同種の滞留環境であり,かつ海水より低硫酸イオン濃度の土壤環境ではTSA は認められなかったことから,TSA には硫酸イオンの供給量も影響することが確認された。 キーワード:タウマサイト,硫酸塩劣化,石灰石骨材,石灰石微粉末,pH,海洋環境

1. はじめに

コンクリートが受ける劣化の一つに硫酸塩劣化があ る。硫酸塩劣化の中でも、低温かつ石灰石骨材を使用し たコンクリート構造物にタウマサイト (thaumasite, ソー マサイトとも称される) 硫酸塩劣化(TSA = Thaumasite Sulfate Attack) と呼ばれる特異な劣化現象が、2000年頃 よりイギリスを中心に確認された¹⁾。TSAが発生する条件 として, ①硫酸塩もしくは硫化物(酸化して硫酸イオン を生成する条件が必要)の存在, ②水の存在, ③炭酸塩 の存在(石灰石骨材,石灰石微粉末や地下水,大気中の 二酸化炭素が起源),④低温(タウマサイトの生成温度 域は15℃以下とされる^{2),3)}),⑤Siの存在(C-S-Hの分 解により供給)が挙げられる。これまで、日本には硫酸 塩土壌は少なくTSAが起こる条件を全て満足する環境は 限られるものと考えられていた。実際に国内で報告され た事例は、レンガ造トンネルに施工したセメント系補修 材でのTSAである⁴⁾。しかし,近年,第三紀海成層を盛土 した住宅地などは物理的硫酸塩劣化が報告されるなど, 一定規模の硫酸塩土壌の存在が認識されつつある。一方, 硫酸塩は海水にも含まれていることから、国内でも北海 道など一部寒冷海洋地域では上記のTSAの条件を満たす 可能性があるが、現在まで、国内の沿岸構造物でTSAが 発生したという報告はない。また、海外でも海洋構造物 の目地モルタル部にTSAが発生したという報告⁵⁾がある が、その劣化がタウマサイトの生成によるものであるか は不透明である。いずれにしても,国内外を問わず,海 洋環境におけるタウマサイト生成に関しては明確な知見 が存在していないのが現状である。

このような背景から,著者らの一部は,人工海水中でのタウマサイト生成の可能性について室内試験を行ってきた^{6),7),8)}。これらの試験で,浸せき溶液の交換頻度を

週1回ならびに月1回とし、石灰石骨材を用いたモルタ ル硬化体の人工海水への暴露試験を実施した結果、タウ マサイトの生成には上記条件に加えて、溶液のpHの影 響が大きいことが確認された^{の,8}。すなわち、溶液の交 換頻度を月1回とした場合、溶液のpHの11.0までの上 昇、ならびにタウマサイトの生成が認められたが、週1 回とした場合、pHは8付近に保たれ、タウマサイトの生 成は認められなかった。このようなタウマサイトの生成 に及ぼすpHの影響については、Gazeらが同様の報告を しており、pH10.5以上でなければタウマサイトの生成は 起こらず、また高 pH であるほど生成が活発になるとし ている⁹。したがって、実環境におけるTSA についても、 周辺環境のpH が重要な因子であることが予想される。

しかしながら,実際の海洋環境では,海水の高い緩衝 能力によって pH は 8 程度で安定するため,寒冷地域で あっても海洋環境下で TSA が発生するような条件は極 めて限定的であると考えられる。逆に,海水の pH が上 昇し TSA の可能性が高まる海洋環境は,上述の室内暴露 試験で溶液の交換頻度を減じることと相似な状況,すな わち,コンクリートの周囲で海水が滞留する特殊な環境 といえる。そこで本研究では,海水の滞留が TSA に及ぼ す影響について検討するために,寒冷海洋環境において 通常の海洋環境と人工的に海水の滞留を模擬した環境で の暴露試験を実施した。ここでは,2008 年 1 月~2010 年 6 月までの暴露試験の結果について報告する。

2.実験概要

2.1 試験材料

本試験ではモルタルとコンクリートを評価対象とし た。使用した材料を表-1に示す。OPC および BB につ いては市販品を用いた。各セメントの化学分析値とブレ

*1 太平洋セメント(株) セメント・コンクリート研究部セメント化学チーム 博(工) (正会員)
*2 太平洋セメント(株) セメント・コンクリート研究部セメント化学チーム 修(理)
*3 太平洋セメント(株) セメント・コンクリート研究部セメント技術チーム 修(工) (正会員)
*4(株)太平洋コンサルタント 営業推進部 博(工) (正会員)

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント(OPC), ρ=3.15 g/cm ³ 高炉セメント B 種(BB), ρ=3.05 g/cm ³						
	天然けい砂	セメント強さ試験用標準砂(SJ), ρ=2.64 (絶乾) g/cm ³					
細骨材	山砂	静岡県掛川産山砂(S), $\rho = 2.57$ (表乾)g/cm ³					
	石灰石	三重県藤原産石灰岩砕砂(SL), $\rho = 2.70$ (表乾)g/cm ³					
粗骨材	高質砂岩	茨城県桜川産砕石(G), ρ =2.65(表乾)g/cm ³					
	石灰石	埼玉県武甲産石灰石砕石(GL), $\rho = 2.70$ (表乾) g/cm ³					

表-2 セメントの化学分析値とブレーン比表面積

セメント	比表面積		化学組成 (mass%)							
	(cm^2/g)	Ig.loss	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO_3	Na ₂ O	
OPC	3470	2.47	20.23	4.93	2.62	63.13	2.39	2.02	0.23	
BB	3970	1.51	25.29	8.46	1.92	55.81	3.02	2.04	0.25	

表-3 モルタルの配合

水准夕	W/C	水	セメント(kg/m ³)		細骨材(kg/m ³)		
小平石	W/C	(kg/m ³)	OPC	BB	SJ(天然けい砂)	SL(石灰石)	
5NS			520	_	1518	_	
5NL	0.5		520			1552	
5BL		260	—	520	—	1538	
3NS		200	867	—	1227	—	
3NL	0.3		867	_	_	1255	
3BL			_	867	—	1230	

表-4 コンクリートの配合

水淮夕	Comont	W/C	s/a	Air 量			単位量		高性能 AE 減水剤		
水単石 Celli	Cement	W/C	(%)	(%)	W	С	S	G	SL	GL	(C×%)
Con5NS	OPC	0.5	47	45 ± 15	175	350	808	957	—		0.9
Con5NL	ore	0.5	42	4.5 ± 1.5	167	334			736	1033	0.6

ーン比表面積を表-2 に示す。なお、XRD/Rietveld 法による鉱物組成分析の結果、OPC は石灰石微粉末を
 3.8mass%含有するものであった。

2.2 配合

モルタル試験体の配合を表-3に示す。5NSおよび3NS は骨材として天然けい砂のみを用いているが,前述のと おりOPCに3.8mass%の石灰石が含まれていることから, 本試験では全ての配合に石灰石が含まれている。モルタ ルの練混ぜは,公称容量10リットルの練混ぜ機を用い, JIS R 5201:1997 の練混ぜ方法の手順に準拠して φ10×20cmの円柱供試体を作製した。試験体の前養生は, 材齢28日まで20℃の水中養生を行った。W/C=0.3の水 準では,W/C=0.5と同等のワーカビリティが確保できる ように,高性能AE減水剤を適宜添加し調整した。

コンクリート試験体の配合を表-4 に示す。モルタル の場合と同様,石灰石骨材を用いていない Con5NS にも OPC に由来した石灰石が含まれている。コンクリートは パン型ミキサ(公称容量 55L)を用い JIS A 1138:2005 に 準拠して練り混ぜた。試験体の形状および前養生方法は モルタルと同様とした。

2.3 暴露環境

表-5 に本試験の暴露環境とそれぞれの環境の平均気 温,15℃以下日数および硫酸イオン濃度を示す。通常の 寒冷海洋環境として、北海道網走市鱒浦漁港の干満帯に 試験体を設置した。また、海水の滞留環境を模擬するた め、写真-1 に示すように北海道紋別市の沿岸土壌中に プラスティックコンテナを設置し, コンテナ内に試験体 とともに海水と沿岸の土壌を入れ海水滞留環境とした。 コンテナ埋設とは別に、低硫酸イオン濃度の滞留環境と して, 紋別市の沿岸土壌への直接埋設も行った。なお, 本報告で用いる「滞留環境」とは、セメント硬化体から のアルカリ成分の溶出により、周辺環境の pH が上昇す る環境を指している。土壌への直接埋設は閉鎖系とは言 い難く, 溶脱による pH 上昇があるかは不明確である。 しかしながら, タウマサイト劣化問題の契機となったイ ギリス南西部の M5 motorway の事例では、埋め戻しに用 いた現地の土壌に含まれる黄鉄鉱(FeS)の酸化の過程 で発生する硫酸の影響により厳しい硫酸塩環境になった と考えられている¹⁰⁾。FeS2を多く含む土壌は酸性硫酸塩 土壌になりやすく, pHが3以下となる場合も報告されて いる¹¹⁾。したがって,タウマサイト劣化が報告された周 辺環境の pH 変化は不明であるが,セメント硬化体から の溶脱により周辺土壌の pH が上昇することでタウマサ イト硫酸塩劣化に至った可能性は十分考えられる。以上 から,本報告では紋別土壌埋設も「滞留環境」と考える こととする。

暴露期間中の 2008 年1月~2010 年6月までの平均気 温は、気象庁 DB から算定すると 5.6℃となった。一方、 同期間内において日平均気温が 15℃以下であった日数 を気象庁 DB でカウントし,年あたりに換算すると約270 日となった。すなわち、冬季を中心に年間当たり270日 は気温が15℃以下になる日があると言える。紋別の沿岸 土壌中の温度は、埋設コンテナ内にデータロガーを設置 して直接測定した。図-1 に示すように、暴露を開始し た 2008 年 1 月から 11 月までの平均温度は 12.1℃であっ た。測定記録が約10ヶ月分しかないが、11月以降は冬 季のため温度はより低下することから、コンテナ内の平 均温度は12.1℃以下であると考えられる。また、温度が 15℃以下の日数(年あたりに換算)は約228日と算定さ れた。以上のように、いずれの暴露環境においても、タ ウマサイトの生成条件である 15℃以下の期間が冬季を 中心に年間の1/2~2/3存在することが確認された。

2.4 測定項目

表-6 に試料の採取時期と測定項目を示す。試験体は 暴露開始後10ヶ月後並びに30ヶ月後に回収し、外観観 察から剥離などの変状がないか確認を行った。ただし、 網走海水浸せきの試験体は、30ヶ月後のみ確認を行った。 海水の滞留環境を模擬した紋別コンテナ埋設の試験体で は,動弾性係数と劣化面積率を測定し劣化状態の評価を 行った。動弾性係数は JISA 1127:2001 に準拠して測定し た。また、劣化面積率は、供試体の変状領域を OHP シ ートに写し取ってスキャナでデジタル画像に変換し、画 像解析ソフトにて劣化領域の面積率を求めて算定した。 タウマサイトの生成の有無は XRD を用いて判定した。 尾野らは、海水レベルの硫酸イオン濃度では、浸せき期 間1年においても硫酸イオンの浸透深さは 2mm 程度で あることを報告している¹²⁾。そこで,XRD 用の試料は, 特に硫酸イオン濃度が高いと予想される供試体の表層部 の2~3mmを採取し、メノウ乳鉢で粉砕した後、細骨材 を分離するため 150µm のふるいを通過させて調製した。 また、タウマサイトと XRD の回折ピークが近接するエ トリンガイトを選択的に溶解させるため、調整試料に Na₂CO₃溶液処理を施した¹³⁾。XRD は, X線源: CuKa, 管電圧:50kV,管電流:350mA,走查範囲:5~65deg, ステップ幅: 0.0234, スキャンスピード: 0.13sec/step の 条件で行った。

表-5	暴露環境の平均気温,	15℃以下日数および硫酸塩
	濃度	

暴露環境	滞留 環境	硫酸イオ ン濃度 (mg/kg)	平均 気温 (℃)	温度 15℃以下 日数 ^{**4}
網走海水浸せき	×	2650 ^{%1}	5.6 ^{**2}	約 270
紋別土壤埋設	0	390 ^{**3}	<10.1	約 220
紋別コンテナ埋設	0	3500	<u><u></u>\12.1</u>	ボリ 228

※1 一般的な海水中の濃度¹²⁾

※2 気象庁 DB より算出

※3 地盤工学会基準 JGS 0241-2000 に準拠し測定

※4 1年あたりの日平均温度15℃以下の日数





表-6 試料採取時期と測定項目

暴露環境	採取 時期	外観 観察	動弾性 係数	XRD	劣化面 積率
網走海水浸せき	30ヶ月	0	—	_	—
幼园上嬸囲劲	10ヶ月	0	_		
秋 加上 表 连成	30ヶ月	0	—	_	-
対別コンテナ囲乳	10ヶ月	0	0	_	_
秋川コンノノ 埋政	30ヶ月	0	0	0	0

3. 試験結果

3.1 外観観察

写真-2に、一例として、各暴露条件での暴露 30 ヶ月 経過後の Con5NL の外観を示す。網走海水浸せきと紋別 土壌埋設の試験体では、暴露 30 ヶ月後においても、骨材 やセメントの種類に関わらずひび割れや剥離などの外観 上の劣化はなく,モルタル,コンクリート,いずれの水 準でも健全な状態を保持していた。一方,紋別コンテナ 埋設の試験体は,暴露10ヶ月後では他の暴露環境と同様 に外観上の劣化は確認されず健全な状態を維持していた が,30ヶ月経過後では,モルタル試験体の5NSとコン クリート試験体のCon5NS,Con5NLにおいて,表層部分 の一部が剥離し,その内部が白色化していることが確認 された。特に,Con5NLの供試体については変状が他よ り著しく,素手でも簡単に崩れるほどであった。これは, 既往報告のTSAが生じた試験体に見られる現象¹⁴⁾と同 様であることから,本試験体に生じた変状もTSAの可能 性が考えられた。そこで次に述べるXRDによる同定を 行った。

3.2 XRD

紋別コンテナ埋設の試験体の外観観察から一部の試験 体に TSA の可能性が考えられたため、タウマサイトの生 成の有無について XRD による判定を行った。XRD の測 定結果を図-2 に示す。外観観察で変状が確認されたモ ルタル試験体の 5NS およびコンクリート試験体の Con5NS, Con5NL では、Na₂CO₃処理後も 2 θ = 9.0° と 16.0°の両位置に回折ピークが残存したことから、これ らの試験体にはタウマサイトが生成していることが確認 された。一方、外観観察で健全な状態であった試験体は、 Na₂CO₃処理を行うことで、9.0° と 16.0°の回折ピーク が消失したことから、これらの試験体にはタウマサイト は生成していないものと判定された。

3.3 動弾性係数

表-7 に紋別コンテナ埋設試験体のタウマサイト生成 の有無,動弾性係数比(暴露10ヵ月後に対する30ヵ月 後の動弾性係数の比)および劣化面積率(変状の認めら れた試験体のみ測定)を示す。タウマサイトの生成が確 認された Con5NS と Con5NL では,動弾性係数の低下が 他の配合に比べてやや目立った(8~9%の低下)。ただし, タウマサイトの生成が確認されなかった 3NL において も動弾性係数は7%低下した。一方,タウマサイトの生 成が確認された 5NL には動弾性係数の低下はほとんど なく,タウマサイトの生成が確認されなかった 5NL, 5BL, 3NS とほぼ同等な値であった。以上のことから,タウマ サイトの生成の有無と動弾性係数の低下との間には明確 な相関性は確認されなかった。

3.4 劣化面積率

表-7 に示すように,表層の変状が最も激しかった Con5NL では,劣化面積率が約35%となった。一方,5NS および Con5NS の劣化面積率はそれぞれ0.85 と3.51%と いうように Con5NL より小さく,剥離などの外観上の劣 化は試験体の一部に留まるものであった。



写真-2 各暴露環境での暴露 30 ヶ月の Con5NL の外観



- 図-2 暴露 30 ヶ月経過した紋別コンテナ埋設した試験 体の Na₂CO₃処理前後の XRD パターン(Ett:エトリ ンガイト, Tha:タウマサイト)
 - 表-7 紋別コンテナ埋設試験体のタウマサイト生成 の有無、動弾性係数比及び劣化面積率

配合	タウマサイト 生成の有無	動弾性 係数比	劣化面積率 (%)
5NS	有	0.99	0.85
5NL	無	1.00	—
5BL	無	0.99	—
3NS	無	0.98	—
3NL	無	0.93	—
3BL	無	1.04	_
Con5NS	有	0.92	3.51
Con5NL	有	0.91	34.9

4. 考察

4.1 海水の滞留がタウマサイトの生成に及ぼす影響

本研究では、海洋環境でのタウマサイトの生成におい て、海水の滞留という特殊な条件がタウマサイト生成に 及ぼす影響に主眼を置き暴露試験を行った。その結果, 実際の海洋環境すなわち海水の滞留のない環境に暴露し た試験体は、外観上の変化は無く健全な状態を保持して いたが、滞留環境を模擬した紋別コンテナ埋設の試験体 には,一部の試験体にタウマサイト生成による表層の剥 離などの変状が確認された。この結果は、著者らが実施 した過去の室内試験における人口海水への暴露試験の結 果と一致している ⁶。過去の室内試験では、溶液の交換 がない場合、セメント硬化体からの溶脱によって浸せき 溶液の pH が上昇し、暴露環境はタウマサイトの生成が 活発になる環境となった。本研究においても、コンテナ 埋設の条件では海水の交換がないため,硬化体からのア ルカリの溶出によってコンテナ内の海水の pH が室内試 験と同様に上昇し、これによりタウマサイトの生成が促 進されたものと考えられる。従って、実際の海洋環境に おいても、滞留のある環境ではタウマサイトの生成のリ スクは高まることが予想される。Schmidt らは、タウマ サイトの平衡定数などの熱力学データを示すと共に,タ ウマサイト単独では 45℃まで安定に存在することを熱 力学的計算から求め、生成に重要な因子は温度よりもむ しろ pH であると報告している¹⁵⁾。したがって,連続的 に海水の交換が起こり滞留が生じないような通常の海洋 環境では、低温環境や、石灰石微粉末あるいは石灰石骨 材の使用, 硫酸塩の供給など, これまでに指摘されてき たタウマサイトの生成条件が満たされていても, TSA の 発生リスクは極めて小さいものと推察された。

4.2 外部硫酸塩濃度の影響

紋別コンテナ埋設の試験体では TSA が確認された一 方で、同じ滞留環境と考えられる紋別土壌埋設の試験体 では外観観察からは剥離などの変状は認められず、暴露 30ヶ月経過後も健全な状態を保っていた。これは、沿岸 土壌に含まれる硫酸イオン濃度(=390mg/kg)が海水と比 較して低いことに加え、埋設場所までは年間を通じてほ とんど海水が到達せず、硫酸イオンの供給量が少なかっ たためと考えられる。Lothenbach らは、硫酸塩が浸透す る環境下でタウマサイトが生成するためには、セメント 硬化体内の SO₃/Al₂O₃モル比が 3 を超えることが必要で、 3 以下ではエトリンガイトが生成すると報告しており¹³⁾、 これは Juel¹⁶ らの実験報告とも整合している。したがっ て、本研究の紋別土壌埋設では、コンテナ埋設と同様の 滞留環境であるものの、外部から供給される硫酸イオン 量が低いため、TSA が抑制されたと考えられた。

4.3 W/C および混和材の影響

W/C の影響に着目すると, 紋別コンテナ埋設の試験体 のうち, W/C=0.5 である 5NS で TSA が確認されたが, W/C=0.3 である 3NS では TSA は確認されなかった。こ れは, W/C の低減によって組織を緻密化し,物質移動抵 抗性を高めることが TSA の抑制に効果的であることを 示すものである。一方,高炉スラグを含む 5BL, 3BL に おいても,硬化体組織の変状やタウマサイトの生成は確 認されなかった。既往の報告¹⁷⁾にもあるとおり,高炉ス ラグなどのポゾラン材料も,これらが物質移動抵抗性を 高める効果から TSA の抑制に繋がる。このように物質移 動抵抗性の増大は TSA の抑制に効果的であることが確 認された。ただし,本結果は暴露 30 ヶ月の条件で示され たものであり,低 W/C やポゾランを使用した場合であっ ても,さらに長期間の暴露によって硫酸イオンが浸透し TSA が発生することもあり得る。

4.4 タウマサイトの生成と弾性体としての機能

既に述べたように、 タウマサイトの生成と動弾性係数 の低下との間には明確な相関性がなく、また、タウマサ イトが生成している試験体の動弾性係数はタウマサイト が生成していない試験体とほぼ同等であった。このこと は、TSA が確認された試験体であっても弾性体としての 機能を保持していることを示している。したがって、タ ウマサイトの生成は表層部分にとどまっており、内部ま で TSA が進行していないものと推察された。過去の著者 らの検討では、タウマサイトが表面に生成したモルタル 供試体の強度や動弾性係数は、タウマサイトが生成しな かった供試体とほぼ同等であったことを確認しているが ⁷⁾, 今回の結果はそれらの結果と整合している。また, 上述したように、尾野¹²⁾らは、海水レベルの硫酸イオン 濃度では、浸せき1年では硫酸イオンはコンクリート内 部へほとんど浸透せず、浸透深さは 2mm 程度であるこ とを報告している。したがって、本試験の30ヶ月の暴露 期間では硫酸イオンは深部まで浸透せず、さらにタウマ サイトの生成によって表層部の SO₃/Al₂O₃ モル比が高く なるため浸透した硫酸イオンは表層部に集積し, TSA が 内部まで進行しなかったものと推察された。

以上のように、石灰石を含む試験体を寒冷海洋環境下 に暴露した結果、海水が滞留する環境、すなわち硫酸イ オン濃度が高く試験体周囲の pH が高位で維持されると いう特殊な環境では TSA が生じる可能性があることが 明らかとなった。同時に、タウマサイトが生成した試験 体は、その生成が表層部に限られ、一方で弾性体として の機能は保持し得ることも明らかとなった。BRE (Building Research Establishment)を中心とした研究の中 間報告では、「タウマサイトは非常に限られた環境条件下 でのみ生成し、またタウマサイトが生成しても劣化への 影響は小さい」と考察しているが¹⁸, 今回の試験結果は BRE の考察を裏付ける結果であったといえる。ただし, 今後 TSA が進行し, 表層のマトリックスが脆弱になれば, 硫酸塩の浸透速度が大きくなり劣化が加速度的に進むこ とも懸念される。網走及び紋別での海洋暴露試験は現在 も継続中であり,ここで示した測定は今後も実施し,実 海洋環境における TSA の可能性について検討を続ける 予定である。

5. まとめ

石灰石微粉末・骨材を含むセメント硬化体に対し,寒 冷海洋環境における海水の滞留がタウマサイト硫酸塩劣 化に及ぼす影響について検討するため,寒冷海洋環境下 において,通常の海洋環境と人工的に海水の滞留を模擬 した環境での暴露試験を実施した。30ヶ月間の暴露試験 により得られた知見を以下にまとめる。

- (1)海水の滞留のある環境下では、一部の試験体の表層 に剥離とタウマサイトの生成が確認された。これは、 滞留環境下では硬化体からのアルカリ溶出によって 周囲のpHが上昇、高位で保持され、タウマサイトの 生成が促進される環境となったためと推察された。
- (2) 海水の滞留が生じないような通常の海洋環境ではタ ウマサイトの生成は認められなかった。したがって、 低温,石灰石の含有,硫酸塩の供給などのタウマサ イトの生成が満たされる条件下であっても,滞留の ない環境では TSA の発生リスクは極めて小さいもの と推察された。
- (3) 海水中よりも低い硫酸イオン濃度の滞留環境では TSA は生じなかった。これは、硫酸イオンが浸透し た領域のセメント硬化体の SO₃/Al₂O₃ モル比が 3 に達 しないためであり、TSA には硫酸イオンの供給量も 影響することが確認された。
- (4) 低 W/C や高炉セメント B 種を用いた試験体にはタウ マサイトの生成は確認されず, W/C の低減やポゾラ ンの添加による物質移動抵抗性の向上が TSA の抑制 に効果的であることが明らかとなった。
- (5) 動弾性係数の測定から, TSA が確認された試験体で あっても、タウマサイトの生成は表層部に限られ、 その弾性体としての機能を保持していることが明ら かとなった。

謝辞:本研究の海洋暴露試験の実施にあたり,北見工業 大学学長鮎田耕一先生,技術専門官猪狩平三郎先生,専 門技術長岡田包儀先生,その他関係各位に多大なるご協 力,ご助言を頂きました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- Bridge Design & Engineering: Proceedings of the First international Conference on Thaumasite in Cementitous Materials, 2002
- John Bensted: Scientific background to thaumasite formation in concrete, World Cement Research, Vol.29, No.11, pp102-105, 1998
- Crammond, N.J.: Thaumasite in failed cement mortars and renders from exposed brickwork, Vol.15, No.6, pp.1039-1050, Nov.1985
- 4) 上田洋,西尾壮平,渡邉恭崇,一條健吾: Thaumasite の生成によるセメント系補修材の劣化,コンクリー ト工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.687-692, 2008
- Ted Sibbick, Derek Fenn and Norah Crammond: The occurrence of thaumasite as a product of seawater attack, Cem. Concr. Compos., Vol.25, No.8, pp.1059-1066, Dec.2003
- 6) 野崎隆人,河野克哉,山田一夫:モルタル浸せき試験におけるタウマサイトの生成条件,土木学会第64回年次学術講演会講演概要集,pp.471-472,2009.9
- 本間健一ほか:石灰石フィラーセメント、三成分系 セメントの化学抵抗性、セメント・コンクリート論 文集, No.56, pp.455-462, 2002
- Nozaki, T., Ogawa, S., Hirao, H., Kono, K. and Yamada, K.: A required condition of thaumasite formation in marine environments, sixth international conference on concrete under severe conditions, environment and loading, Merida, Yucatan, Mexico, Vol.1, pp.85-90, 2010
- Gaze, M.E. and Crammond, N.J.: The formation of thaumasite in a cement:lime:sando mortar exposed to cold magnesium and potassium sulfate solutions, Cem. Concr. Res., Vol.22, No.3, pp.209-222, Jun.2000
- 10) Crammond, N. : Bridge Design & Engineering, Second quarter, pp.51-53, 2001
- 11) 上野薫:酸性硫酸塩土壌における土壌酸性化の機構, 生物機能開発研究所紀要, Vol.4, pp.25-33, 2004
- 12) 尾野幹也,永嶋正久,大塚邦夫,伊藤隆明:セメン ト硬化体に与える海水の化学的浸食のメカニズム, セメント技術年報, Vol.32, pp.100-103, 1978
- 13) 平尾宙ほか:モルタル中に生成したソーマサイトの 分析方法とコンクリートへの適用,セメント・コン クリート論文集, No.58, pp.225-232, 2004
- 14) Longworth, T.I.: Proceedings of the First International Conference on Thaumasite in Cementitious Materials, paper no 14, 2002
- 15) Thomas Schmidt, Barbara Lothenbach, Michel Romer, Karen Scrivener, Daniel Rentsch and Renato Figi: A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation, Cem. Concr. Res., Vol.38, No.3, 337-349, Mar.2008
- 16) Juel, I. *et al.*: A thermodynamic model for predicting the stability of thaumasite, Cem. Concr. Compos., Vol.25, No.8, pp.867-872, Dec.2003
- 17) Crammond, N.J. *et al.*: The use of ground blast furnace slag to avoid the thaumasite form of sulfate attack: four years results., In Proc. of the conf. on Sustainable Construction into the Next Millennium: Environmentally Friendly and innovative Cement-Based Materials, Brazil, pp.660-670, 2000
- 18) Thaumasite Expert Group: The thaumasite form of sulfate attack: Risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction, Department of the environment, Transport and the Regions, London (1999)