

論文

[1118] 超低発熱セメントを用いたコンクリートの耐久性について

正会員○落合光雄 (住友セメント技術開発センター)  
 正会員 原田修輔 ( 同 上 )  
 正会員 内田美生 ( 同 上 )  
 片山哲哉 ( 同 上 )

1. まえがき

コンクリート構造物の耐久性が社会的な問題となって久しい。コンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、計画、設計、材料、施工、維持・管理等の各段階において適切な措置を講じることが肝要である。特にマスコンクリート構造物においては、温度ひびわれを適切に制御することが重要であり、超低発熱セメントは温度ひびわれの積極的な抑制を目的として使用されている。その温度ひびわれ低減効果については今日、既に衆目の一致するところとなっているが、超低発熱セメントコンクリートの耐久性、すなわち、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、中性化速度および耐海水性に関しては、いまだ不明点も残されているものと考えられる [1], [2], [5], [6]。

本研究は、超低発熱セメントコンクリートが有する耐久性を定量的に把握することを目的として、その乾燥収縮、凍結融解抵抗性、中性化速度および耐海水性について、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いたコンクリートと比較・検討したものである。

2. 試験方法

2. 1 使用材料

本実験に使用した超低発熱セメントは、普通ポルトランドセメントあるいは中庸熱ポルトランドセメントに、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和した三成分系のものである。超低発熱セメントの化学分析試験結果ならびに物理的性質を、表-1 および表-2 に示す。ここで、水中不分離性コンクリートには水中用の超低発熱セメント(超低発熱セメントタイプIと称す)を、気中コンクリートには超低発熱セメント(超低発熱セメントタイプIIと称す)を、それぞれ使用した。

表-1 超低発熱セメントの化学成分

項目 セメント	化 学 成 分 (%)								
	ig. loss	Insol.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O
超低発熱セメントタイプ I	0.5	22.6	23.8	11.2	1.1	34.8	3.5	1.6	0.46
超低発熱セメントタイプ II	0.9	14.5	26.2	11.4	1.3	38.7	3.8	2.2	0.53
普通ポルトランドセメント	1.0	0.1	22.2	5.9	2.7	62.6	1.9	1.9	0.69
高炉セメントB種	0.5	0.1	25.8	8.9	1.9	55.7	2.9	2.0	0.57

表-2 超低発熱セメントの物理的性質

項目 種類	比重	ブレン (cm <sup>2</sup> /g)	凝 結		圧縮強さ (kgf/cm <sup>2</sup> )				水和熱 (cal/g)			水和熱 圧縮強さ (材令91日)
			始 発	終 結	3 日	7 日	28日	91日	3 日	7 日	91日	
超低発熱セメントタイプ I	2.70	4780	5-10	7-20	76	159	301	392	41	49	54	0.14
超低発熱セメントタイプ II	2.78	4740	6-50	8-45	66	152	292	368	38	50	52	0.14
普通ポルトランドセメント	3.17	3510	2-14	3-15	159	257	412	515	71	84	92	0.18
高炉セメントB種	3.05	3880	3-12	4-20	124	205	398	503	68	82	87	0.17

表-2に示したように超低発熱セメントの圧縮強さは他のセメントと比較して70~80%と若干小さな値となっているが、水和熱量と圧縮強さの比は超低発熱セメントが0.14であるのに対し、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種では0.18および0.17である。したがって、超低発熱セメントは水和熱が少ない割りに圧縮強度が大きいという特性を有しているといえる。

コンクリートの配合は表-3に示すとおりで、比較用の普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種を用いたコンクリートでは、水結合材比およびスランプ、スランプフローを超低発熱セメントの場合と同様とした。今回使用した配合の超低発熱セメントの断熱温度上昇量は、図-1に示すように、水中不分離性コンクリートが約30℃、気中コンクリートが約23℃であった。粗骨材の最大寸法は気中コンクリートの場合40mm、水中不分離性コンクリートの場合20mmとした。コンクリートの練り混ぜには、容量が100ℓのパン型強制練りミキサを用い、練り混ぜ量は70ℓ、練り混ぜ時間は2分間とした。コンクリートの練り混ぜと打ち込みは、室温が20±3℃の恒温室内において行なった。なお、水中不分離性コンクリートの水中作製供試体は、「水中不分離性コンクリート・マニュアル」に準拠して作製した。強度試験に用いた供試体は、所定の材令まで、また、耐久性試験に用いた供試体は、材令28日まで水中養生を行なった。

今回使用したコンクリートの強度試験結果は、表-4に示すとおりで、セメントの強さ試験の傾向とほぼ一致していた。

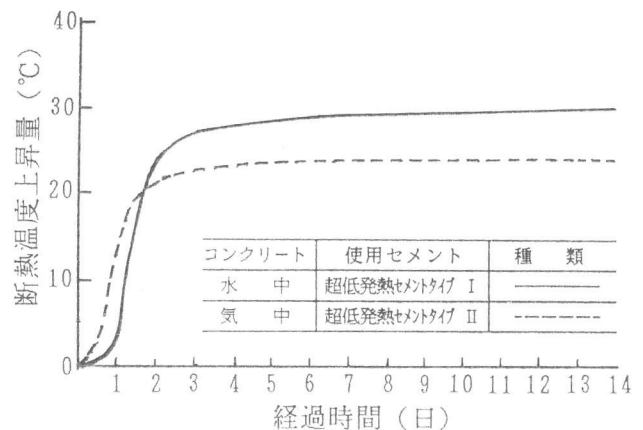


図-1 超低発熱セメントの断熱温度上昇量試験

表-3 コンクリートの示方配合

コンクリート種類	項目 セメント種類	W C (%)	s a (%)	単 位 量 (kg/m³)					混 和 剤					
				W	C	石粉	S	G	A E 減水剤		流 動 化 剤		水中コンクリート用混和剤	
									(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
水中不分離性コンクリート	普通ポルトランドセメント	65.0	40	213	328	—	653	1026	1.40	—	1.00	—	—	2.3
	高炉セメントB種	65.0	40	215	331	—	647	1016	1.40	—	1.00	—	—	2.3
	超低発熱セメントタイプ I	65.0	40	208	320	—	644	1012	1.40	—	1.00	—	—	2.3
気中コンクリート	普通ポルトランドセメント	52.7	40	146	277	74	738	1159	1.00	0	—	34.1	0.45	—
	高炉セメントB種	52.7	40	144	273	74	738	1159	1.00	11.2	—	23.1	0.45	—
	超低発熱セメントタイプ II	52.7	40	137	260	74	741	1164	1.00	31.1	—	51.4	0.45	—

①: 気中コンクリート スランプ 11±2.5cm 空気量 4±1% 凍結融解抵抗性試験は空気量5.5%で試験

②: 水中不分離性コンクリート スランプフロー 52.5 ±2.5cm 空気量 4±1%

(1) リグニンスルホン酸系AE減水剤 (Cx%) (2) アルキルアリルスルホン酸系AE補助剤 (cc/m³) (3) メラミン系流動化剤 (Cx%)

(4) 変性アルキルカルボン酸系AE補助剤 (cc/m³) (5) 高縮合トリアジン系流動化剤 (Cx%) (6) セルロース系水中不分離性混和剤 (kg/m³)

表-4 試験に使用したコンクリートの圧縮強度試験結果

セメント種類	項目	セメント種類	水 中 養 生					
			3日	7日	14日	28日	3ヵ月	1年
水中不分離性コンクリート	圧縮強度 (kgf/cm²)	普通ポルトランドセメント	90	141	183	226	272	281
		高炉セメントB種	59	114	173	244	311	350
		超低発熱セメントタイプ I	36	111	166	208	272	331
気中コンクリート	圧縮強度 (kgf/cm²)	普通ポルトランドセメント	218	275	313	366	397	471
		高炉セメントB種	152	241	313	349	411	466
		超低発熱セメントタイプ II	173	226	269	311	359	387

## 2. 2 耐久性試験方法

耐久性試験は、超低発熱セメントの用途および強度発現性を勘案し、材令28日から開始したが、試験方法は以下のとおりとした。

乾燥収縮試験は、気中コンクリート3種について実施した。供試体の形状は、15cm×15cm×53cmとし、20℃、RH60%の環境下における長さ変化率を測定した。

凍結融解抵抗性試験も、気中コンクリートについて実施し、試験方法は、ASTM C 666 A法（水中凍結融解試験）に準じた。供試体は10cm×10cm×40cmとし、所定サイクル数経過後における動弾性係数を測定した。

中性化試験は、表-3に示した6配合のコンクリートについて、CO<sub>2</sub> ガス濃度5%、RH60%および30℃の雰囲気中において促進試験を、また、千葉県船橋市の屋外において曝露試験を行った。供試体形状は、気中コンクリートがφ15cm×30cm、水中不分離性コンクリートがφ10cm×20cmとし、所定期間経過後の中性化深さをフェノールフタレイン1%溶液の変色域により測定すると共に、水銀圧入式ポロシメータを用いて中性化前後における細孔量を測定した。

海水曝露試験は、超低発熱セメントタイプIおよび普通ポルトランドセメントを用いた水中不分離性コンクリートについて実施した。供試体の形状は15cm×15cm×25cmとした。供試体は、千葉県館山沖約500m（水深11~12m）に曝露し、6ヵ月および1年経過時において、細孔量、塩素イオンの定量分析およびX線回折を行った。

## 3. 耐久性試験結果

### 3. 1 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験結果を図-2に示す。図より、超低発熱セメントの乾燥収縮ひずみは他のセメントの場合と比較して最も小さくなっていた。これは、超低発熱セメントに使用されている良質なフライアッシュの減水作用によるものと考えられる。すなわち、表-3の示方配合に示したように超低発熱セメントでは、同一コンシステンシーを得るための単位水量を普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種と比較して7~9kg/m<sup>3</sup>程度少なくすることが可能であった。したがって、超低発熱セメントを使用したコンクリートの乾燥収縮ひずみは、他のセメントの場合に比べ80%程度の値となったものと考えられる[3]。

### 3. 2 凍結融解抵抗性試験

凍結融解抵抗性試験結果を相対動弾性係数と凍結融解サイクル数との関係で、図-3に示す。図より、超低発熱セメントの空気量が3.4%と少ない場合、180サイクル経過後において相対動弾性係数は、60%以下に低下し

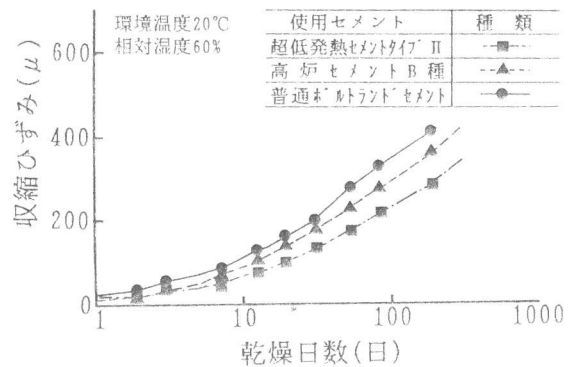


図-2 乾燥収縮試験結果

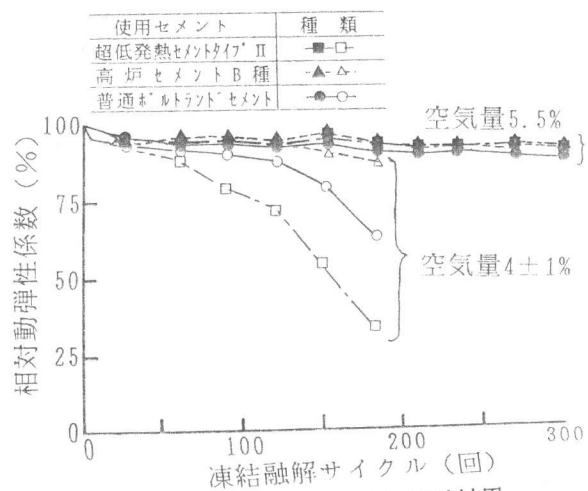


図-3 凍結融解抵抗性試験結果

た。しかしながら、超低発熱セメントを使用したコンクリートにおいても空気量を5.5%程度とすれば、耐凍害性は向上し、他のセメントの場合と同等とすることが可能である。

既往の研究によれば、フライアッシュを混和したコンクリートでは、AE剤により導入された気泡の分散性が低く、耐凍害性向上に対しては有効に作用しないとされている[4]。今回の試験結果においても、超低発熱セメントの場合、所定の耐凍害性を得るために必要な空気量が増加した。これは、超低発熱セメントの場合においても、フライアッシュの影響により分散性のある気泡が導入されにくくなっているためと考えられる。

### 3. 3 中性化試験

促進試験および曝露環境試験により得られた各セメント間における中性化深さの違いの一例を示したものが、図-4である。超低発熱セメントの中性化深さが、他のセメントと比較して大きいことが認められる。一連の中性化試験結果を $\sqrt{t}$ 則に基づいて整理すると表-5となる。これらの結果より、超低発熱セメントを用いたコンクリートの中性化は、普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いた場合の2~3倍の速度となることが認められる。

一般に、普通ポルトランドセメントのようにコンクリート内部に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が十分に生成していれば、炭酸化が生じることによりコンクリートの空隙部分は $\text{CaCO}_3$ の結晶で埋められ緻密化する。しかしながら、超低発熱セメントでは、スラグおよびフライアッシュの混合比率が高くコンクリート中の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が大量に消費され、中性化速度が大きくなったものと考えられる。

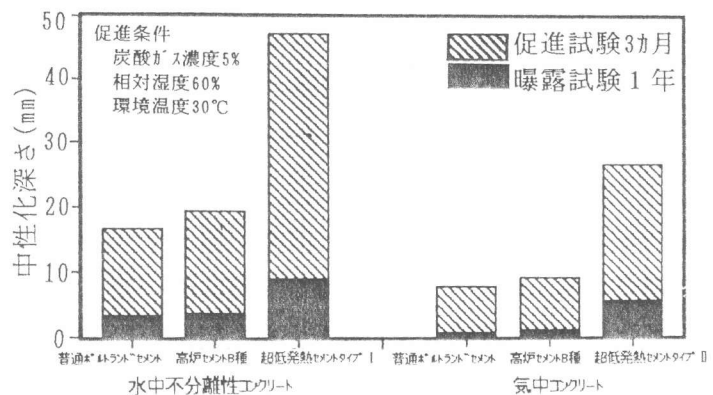


図-4 各種コンクリートの中性化試験結果

表-6には中性化試験前後の、細

表-5 中性化試験結果 ( $\sqrt{t}$ 則による整理)

コンクリート種類	セメント種類	促進試験		曝露試験	
		A	相関係数 $r$	A	相関係数
水中不分離性コンクリート	普通ポルトランドセメント	0.1751	0.9958	0.0180	0.9324
	高炉セメントB種	0.2089	0.9964	0.0203	0.9532
	超低発熱セメントタイプI	0.5185	0.9840	0.0480	0.9948
気中コンクリート	普通ポルトランドセメント	0.0785	0.9772	0.0040	0.8610
	高炉セメントB種	0.0864	0.9186	0.0066	0.8277
	超低発熱セメントタイプII	0.2938	0.9956	0.0317	0.9462

$C = A\sqrt{t}$  C: 中性化深さ (cm) t: 材令 (日)

表-6 中性化試験前後の細孔量測定結果 (促進期間3ヵ月)

コンクリート種類	セメント種類	細孔容積 (cc/g)		
		試験前	試験後	
			中性化部	未中性化部
水中不分離性コンクリート	普通ポルトランドセメント	0.1448	0.1194	0.1330
	高炉セメントB種	0.1331	0.1121	0.1141
	超低発熱セメントタイプI	0.1652	0.1720	0.1520
気中コンクリート	普通ポルトランドセメント	0.0849	0.0744	0.0798
	高炉セメントB種	0.0949	0.0701	0.0763
	超低発熱セメントタイプII	0.0962	0.0973	0.0966

孔量の測定結果を示す。表-6より、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種では炭酸化により全細孔量が減少しているのに対し、超低発熱セメントでは、全細孔量が増加している。このことから、特にフライアッシュの存在および各材料の混合比率が超低発熱セメントの中性化速度に対し、大きな影響を及ぼしているものと思われる。

### 3. 4 耐海水性試験

海中曝露供試体の塩素イオンの定量分析結果を、図-5に示す。図より、曝露期間が6ヵ月の場合、超低発熱セメントと普通ポルトランドセメントとの塩素イオンの濃度差は比較的小さいが、曝露期間が1年となると両者の差は拡大し、表層部の塩素イオンで比較すると超低発熱セメントは、普通ポルトランドセメントの場合の1/2程度の値を示していた。

海中曝露供試体の、X線回折結果を図-6および図-7に示す。これらの図より、普通ポルトランドセメントの表層付近(0~10mm)では、フリーデル氏塩のピークのみが、また、コンクリート内部(45~70mm)においてはフリーデル氏塩とモノサルフェートのピークが認められた。これは、海水中の塩素イオンがコンクリート内部まで浸透し、水和物の変質が生じたためと考えられる。一方、超低発熱セメントを使用した場合、表層部分では普通ポルトランドセメントの場合と同様であるが、内部ではこれらのピークは現れておらず、安定した状態であると考えられる。

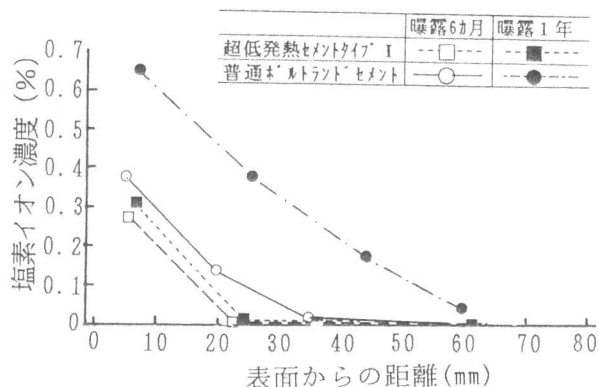


図-5 コンクリート表面からの塩素イオン定量分析結果

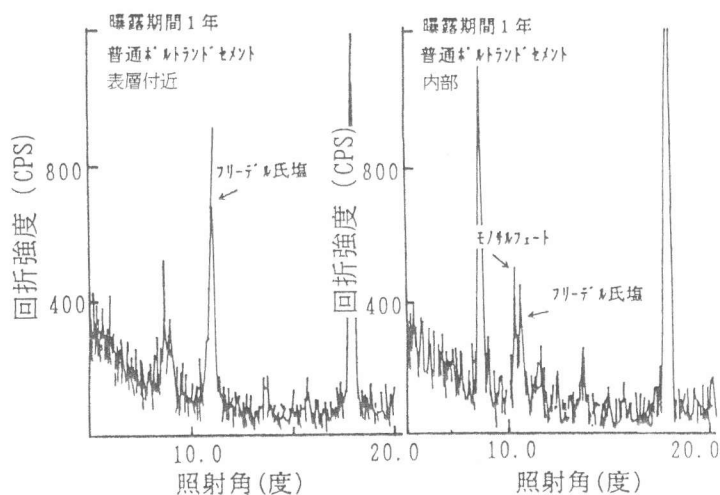


図-6 普通ポルトランドセメントのX線回折結果

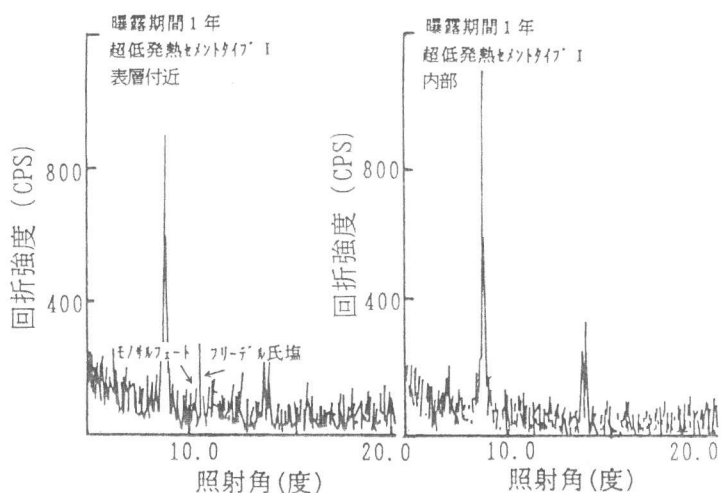


図-7 超低発熱セメントのX線回折結果

表-7 海中曝露供試体の全細孔量の測定結果 (曝露材令1年)

表面からの深さ (mm)	細 孔 容 積 (cc/g)				試 験 前	細孔量の差
	0~10	15~25	30~40	45~70		
普通ポルトランドセメント	0.1803	0.1593	0.1666	0.1551	0.1543	0.0260
超低発熱セメントタイプI	0.1805	0.1840	0.1761	0.1665	0.1760	0.0045

硬化体内部部の細孔量の測定結果を表-7に示す。表より、曝露開始時からの全細孔量の増加量は、超低発熱セメントの場合、0.0045cc/gであるのに対し、普通ポルトランドセメントでは0.0260cc/gであった。一般に、ポルトランド系セメントに比較して、高炉スラグ、フライアッシュ等を使用した混合セメントは、十分な養生を行えば組織が緻密化し海水中の各種イオンが浸透しにくくなる。さらに、コンクリート中に生成されるCa(OH)<sub>2</sub>が少ないため、海水中に曝露した状態でのCa(OH)<sub>2</sub>の溶出による組織の多孔化がおきにくい。したがって、混合セメントは耐海水性に優れていると考えられている[7]。今回の試験結果からも超低発熱セメントは、普通ポルトランドセメントよりも優れた遮塩性能を有していることが確認された。

#### 4. 結論

マスコンクリート構造物の温度ひびわれの積極的抑制を目的として使われている超低発熱セメントコンクリートの耐久性状のうち、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、中性化速度、耐海水性の4項目について、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメントB種と比較検討した。その結果、以下のことが明かとなった。

- 1) 超低発熱セメントの耐久性能のうち、中性化速度は他のセメントと比較して大きいものの、乾燥収縮、凍結融解抵抗性、遮塩性能では他のセメントと、同等もしくはそれ以上の性能を有している。
- 2) 超低発熱セメントの温度ひびわれ抑制効果と本試験結果を勘案すれば、超低発熱セメントの利用は、コンクリート構造物の耐久性向上を図るうえで非常に有効であると考えられる。
- 3) 超低発熱セメントでは中性化速度が大きいので、これを気中コンクリートとして使用する場合には、構造物の設計段階から中性化速度の影響について考慮することが必要と思われる。
- 4) 水中不分離性コンクリートに超低発熱セメントを使用する場合、塩素浸透性は普通ポルトランドセメントと比較して非常に低く、組織の多孔化も生じにくいので、水中不分離性コンクリート用のセメントとして超低発熱セメントを使用することは、特に有効であると思われる。

#### 参考文献

- 1) E.E.Berry : STRENGTH DEVELOPMENT OF SOME BLENDED-CEMENT MORTARS, CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol.10 pp.1-11 1980
- 2) 伊藤秀敏・藤木洋一：フライアッシュおよび高炉微粉末を併用混入したコンクリートの初期硬化と耐久性，セメント技術年報 41，pp.138-141 1987
- 3) 重松俊一・石井光裕・山本和夫・東邦和：分級した微粉末フライアッシュを混入したコンクリートの性質，セメント技術年報 42，pp.128-131 1988
- 4) 長瀧重義・大賀宏行・嶋田久俊：フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価，セメント技術年報 41；pp.371-374 1987
- 5) 魚本健人・小林一輔：高炉水砕スラグ・排煙脱硫珪砂系セメントを用いたコンクリートの圧縮強度，土木学会論文報告集，Vol.302，pp125-138，1980.10
- 6) A.M.Paillere, M.Raverdy, and G.Grimaldi : Carbonation of Granulated Blast Furnance Slag Cement Concrete During Twenty Years of Field Exposure, Proceedings Second International Conference Vol.1 pp.541-562,1968
- 7) 尾野・永嶋・大塚・伊藤：セメント硬化体に与える海水の化学的侵食のメカニズム，セメント技術年報 32，pp.100-103, 1978