

術

技

中華人民共和国

土木工事用各種セメントの耐水耐鹹性に 關する調査及び比較試験(二)

福島彌六
川畑健雄

[IV] San Francisco-Oakland 潘大橋及び Golden Gate 大橋築造に關する California 道路局の研
究(米國)

[1] 水質化學試驗
桑港金門灣の大橋梁架設箇所の水質に就ては當局にて化學試驗を行ひ、其水質試驗成績は次表の如くである。

鹽類含有量	Mg/L
鹽類含有量	‰ 潮
硫酸	33304
氯化物	33774
重炭酸	110°C
硫酸鹽	0.06
氯化物	0.03
硫酸鹽	0.37
氯化物	0.34
硫酸鹽	0.00
氯化物	0.00
硫酸鹽	142
氯化物	142
硫酸鹽	16300(26873)
氯化物	16500(27202)
硫酸鹽	2403(2002)
氯化物	2477(2033)
硫酸鹽	14
氯化物	7
硫酸鹽	8
氯化物	7
硫酸鹽	474(664)
氯化物	509(713)
硫酸鹽	1149(1902)
氯化物	1138(1887.0)
硫酸鹽	9063(24431)
氯化物	9308(25090)
硫酸鹽	5896
氯化物	5937
總硬度	
碳酸鈣	

1. 此結果に依ると蒸発殘渣(固形物總量)は、33300～33800Mg/L であり其内海水としての主要鹽類である鹽化物及び硫酸鹽は、Cl 16300～16500Mg/L 即ち食鹽(NaCl) 26800～27000Mg/L; 硫酸鹽は SO₃ として 2000Mg/L の程度を含有して居るものである。

其他に海水の成分として石灰、苦土、アルカリ及び小量の重炭酸鹽を含有して居る。
従つて此れを海水の一般成分の分析表(第1回試験報告 V, 3, a.)と比較して見ても全く類似の成分を示して居り此水

質は全く純然たる海水の水質である事が解る。

2. 此試験結果を又鐵倉、葉山、横濱及び羽田に於ける海水の鹽化物分析表(第1回試験報告 V. 表-5)と比較するに、固形物總量 33300~27000Mg/L; 鹽化物 Cl 1800~15000 Mg/L, NaCl + MgCl₂ 33300~27000Mg/Lにして食鹽を凡そ 3.3~2.7%を含有する湘南地方の沿岸海水と全く類似したものである事が解る。

特に鹽分含度は羽田海岸の海水の 2.7%と良く類似したものである。

3. 従つて桑港金門灣の大橋梁架橋工事は純然たる沿岸海水中に橋脚コンクリートを築造するものであり、又新京濱國道の多摩川橋梁架橋工事の如きは河水に沿岸海水の一部が混合せる河水中に築造するものたる相違があるに過いものである。

〔2〕 金門灣橋脚に使用したセメント

此工事に使用したセメントは低熱、耐水耐鹹性の特殊なセメントで其種類は次記の2種である。

ポルトランド・セメント・ペッヅラン混合セメント (Portland-Puzzolan Cement)

特殊低鹹土耐鹹性セメント (Special Low-C₃A Sea Water Cement)

(1) ペッヅラン混合セメント

此れは標準ポルトランド・セメント・クリンカー 85 分に特殊の煅燒混合材 15 分を混合した高珪酸型の混合セメントである。此場合に混合材には頁岩及び石灰を煅燒したものであり又セメント・クリンカーは其成分が蒙土酸三石灰 (3CaO·Al₂O₃) 9.5%以下、平均 7%のものと限定したものである。

即ち 85—15 ポルトランド・セメント・アッシュラン混合セメントである。

同様に、上記のセメント・クリンカー 70 分に複合混合材（頁岩 86 分と石灰岩 14 分との混合物を 800~900°C に煅焼したもので珪酸と石灰が 80:20 の割合になつた混合物）30 分を混合した高珪酸型混合セメントをも使用した。

即ち此高珪酸型混合セメント製品の成分は、

セメント・クリンカー	67.2%
石膏	2.8%
混合材	
頁岩	24.0%
石灰	6.0% }
	30.0%
	100.0%

である。

此製品の内にはサンタ・クルズ・高珪酸型セメントも含まれその一般強度は普通のポルトランド・セメントに大差なく、特に耐水耐鹹性の點に於ては珪土酸三石灰 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_5$) 8.0 %以上を含有せるポルトランド・セメントに對して秀れたる耐久性を有するものである事が研究試験の結果確かめられたものである。

(2) 特殊低珪土ポルトランド・セメント

此セメントの性質はすべて米國標準規格 (A. S. T. M.) に合格せるもので然もクリンカーの珪土酸三石灰 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_5$) 8.0 %以下のものと規定したもので、低珪土のポルトランド・セメントである。

之は各セメント製造會社に依頼して上記に規定した性質のセメントを造らしたもので其製品はすべてセメント・クリン

カーナのセメント灰 8%以下にして平均は 5%程度のものである。

次に香港金門灣大橋梁工事に使用した上述 2 種別のセメントの化學成分を次に表示する。

セメント種別	セメント	セメント・カルブ・高珪酸セメント			アーリングカーナ
		70-30	85-15	サンタ・カルブ・高珪酸セメント	
カーナ特殊セメント	金門橋標準セメント	63.65	65.80	50.65	55.52
CaO	63.37	63.65	59.60	55.52	64.99
MgO	2.39	1.87	2.23	1.68	1.93
Al ₂ O ₃	4.78	5.28	4.26	6.29	2.18
Fe ₂ O ₃	4.97	4.99	2.08	4.16	5.84
SiO ₂	22.12	20.92	35.53	32.42	28.49
SO ₃	1.32	1.58	1.16	1.41	1.55
灼熱減量	1.60	1.23	0.93	3.06	1.64
不溶物	100.55	99.52	99.93	99.67	99.93
	0.21	0.16	0.23	15.76	0.08
〔水和化合物成分〕					
C ₃ A	4.25	5.56	7.76	6.87*	6.71*
C ₄ AF	15.10	15.18	6.33		* カーナのみ
C ₂ S	53.89	53.92	55.75		
C ₂ F	19.99	18.78	24.80		
CaSO ₄	2.25	2.67	1.97		
總計	95.48	96.11	96.61		
3CaO·Al ₂ O ₃ 含有量 セメントカルブ・高珪酸セメント (%) の範囲					
最高					
最低					
平均					

カ ラ ベ ラ	9.20	1.56	4.25
金 門 灘	7.02	3.37	5.56
サンタ・タルズ	70~30	7.95	5.57
サンタ・タルズ	85~15	0	6.87 タリシカーのみ
		5.20	6.71

(3) セメント・モルタルの海水及び硫酸銅溶液に対する耐久性試験

上記の混合セメント及び低礫土ポルトランド・セメントに就ては、其モルタル供試體を造り、金門灘の海水及び硫酸銅(Na₂SO₄)並に硫酸マグネシウム ($MgSO_4$) の溶液(10%及び20%)中に浸漬して其侵蝕に耐へる耐久性の強弱を凡そ2ヶ月に亘つて比較試験を行つた。

此試験の方法、經過及び結論に就て大略を次に述べる。
先ずセメントは次の表に示せる如き AS~ES の 12 種類を使用した。

此内で記號 S は普通ポルトランド・セメント、記號 SW は特殊低礫土ポルトランド・セメント及び記號 L1~L3 は高珪酸型混合セメントを夫々示したものである。然して混合セメントの L1~L3 の内、L1 は高礫土酸三石灰 (C_3A) のタリンカーを含む 70—30 混合セメントであり、L2~L1 は夫々低礫土酸石灰の 85—15 及び 70—30 混合セメントを表したものである。

成 分 及 び 比 率	セ	ア	シ	ト	種	類
AS	ASW	BS	BSW1	BSW2	CS	DS
3CaO·Al ₂ O ₃	10.8	2.3	11.6	3.9	6.7	7.1
4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	8.3	15.5	7.8	15.8	14.3	15.4

3CaO·SiO ₂	46.6	51.1	39.5	48.9	56.0	41.9	45.0	49.8	45.0	50.8	50.8	52.0
2CaO·SiO ₂	28.4	18.4	34.1	25.5	17.2	30.6	28.3	20.7	28.3	20.7	20.7	26.0
CaSO ₄	2.2	2.0	2.9	2.7	2.8	2.6	2.7	2.8	2.4	2.5	2.7	2.4

- (註) 1. 普通ポルトラン F・セメント CAS, BS, CS, DS, ES) C₃A=7.1~12.8%
 2. 低繊土特殊ポルトラン F・セメント (CASSW, BSWL, BSW2, DSW) C₃A=2.8~8.5%
 3. 高珪酸製混合セメント (DL1, DL2, DL3) C₃A=7.0~12.8%

A 海水に対する耐久性試験

此に使用したセメントは上記の各種のセメントである。此を淡水混捏及び淡水養生、淡水混捏及び海水養生、海水混捏及び淡水養生海水混捏及び海水養生の夫々4種の混捏及び養生法によりセメント・モルタル供試體(1:2及び1:3モルタル、オッタワ又はロシヤ河砂使用、2×4寸)を製作して之を2ヶ月間海水中に浸漬してその間海水の食蝕に依つて生ずる重量の減少並に圧縮強さ (1b/in²) の變化を夫々測定して耐久性に關する比較試験を行つた。

次に此試験の一部である1:3—セメント・モルタルに依る耐壓試験 1b/in² 成績を示すと次の表の通りである。

セメント種別	淡水混捏及び養生			海水混捏及び養生			
	28日	6月	1年	28日	3月	6月	1年
AS	4000	5810	4840	3270	4040	4490	4170
ASW	3340	5450	5040	3650	3990	3920	4460
BS	4220	5350	5410	3490	4220	4100	4370
BSWL	3520	5730	5740	3270	4090	3930	4620

供試體の名前	燃え火						
BSW2	3550	4740	4780	3680	4180	4270	4140
CS	4130	5520	4750	3660	4360	4480	4350
DS	3740	4650	4750	3280	3790	4130	4040
DSW	4060	4620	4770	4100	4490	4300	4370
DL1	3500	4570	4690	3260	4000	4660	4330
DL2	4250	5970	6630	4440	4940	5100	5140
DL3	4830	6800	6830	5410	5900	5820	5880
ES	4880	6180	6770	4030	5000	5770	5500

此等の 2 ケ年以上に亘る耐久性比較試験より得たる結論を要約すれば次の如くである。

1. 一般に淡水混和及び養生並に海水混和及び淡水養生の供試體は 34 ヶ月後も何らの侵食による崩壊の徵候を認めないが唯海水養生の供試體の或者に著しい侵食或は崩壊が認められた。

2. 海水養生の供試體に現れた比較的短日にして起つた崩壊現象は鈣土酸三石灰 ($C_3A \geq 8\%$) を多量に含む普通ポルトランド・セメントの市販品に限られて居た。但し此の内底礫土のもの ($C_3A \leq 8\%$) は相當の耐久性を有して居る。

3. 高珪酸型混合セメント及び低礫土ポルトランド・セメントは之に比して遙に優秀なる耐久性を有して居る。

B 硫酸鹽の溶液に対する耐久性試験

此試験に使用した溶液は硫酸曹操 (Na_2SO_4) 及び硫酸マグネシヤ ($MgSO_4$) の 2% 及び 10% 溶液である。供試體は 1:2 及び 1:3—モルタルにして淡水混和及び淡水養生 (28 日) により製作し、28 日後に各溶液中に浸漬し 2 年間に亘つ

て圧縮強さ (lb/in^2) の変化を比較し、同時に供試體の重量の減少による侵蝕並に崩壊の程度を試験したものである。次に此試験成績の一端を表示すれば次の如くである。

硫酸銅溶液の侵蝕に対する耐久試験成績

圧縮強さ (lb/in^2)

MgSO_4 溶液 Mg_2SiO_4 溶液

セメント C ₃ A	MgSO ₄ 溶液						Mg_2SiO_4 溶液					
	10%			2%			10%			2%		
	3月	6月	1年	6月	1年	2年	3月	6月	1年	6月	1年	2年
AS	10.8	5180	崩壊	230	崩壊	"	崩壊	"	"	"	"	"
OASW	2.8	5050	4950	4350	5070	5230	4890	5120	4750	3170	5320	4980
BS	11.6	5150	崩壊	"	310	200	崩壊	3140	崩壊	"	"	"
OBSW1	3.9	5450	5030	5780	5620	5860	5730	5660	5390	5200	5670	5400
OBSW2	6.7	4790	4560	3820	4680	4380	3840	4520	2590	1510	4780	4390
CS	15.4	4650	崩壊	"	"	"	"	"	"	"	"	"
DS	12.8	4400	崩壊	"	"	"	3040	崩壊	"	"	"	"
ODSW	8.5	4720	4260	3580	3880	2120	2160	4540	1320	730	4120	1950
ODL1	12.8	4790	4080	2930	4690	4190	4130	4680	4390	4970	4690	4720
ODL2	7.2	5990	6080	5290	6010	5310	4580	4870	6030	5550	6260	5660
ODL3	7.6	6220	5370	5620	5110	5280	6520	6300	6550	6790	6630	6630
OES	8.2	6190	6060	4900	6460	4920	3640	6080	2280	崩壊	6200	3420

(註) (1) 崩壊は供試體が侵蝕により全く崩壊し强度試験を行ひ得ざるもの。

(2) 記述Oは低礫土質セメント及び混合セメントにして耐久性の優良なもの。

尙高珪酸質混合セメント及び普通ポルトランド・セメントのモルタル供試體の10%硫酸鹽溶液中に於て侵蝕作用の爲め生じた重量の減少を測定して耐久性の比較試験を行つた。

此等の硫酸鹽中に於ては海水中に於けるよりも侵蝕作用が最も顯著に現れるもので從つて比較的短期間に供試體の重量及び強度の減少並に侵蝕、龜裂、崩壊の變化を知る事が出来る。

即ち硫酸鹽溶液中の浸漬試験はセメント・モルタル或はコンクリートの有害鹽水に對する侵蝕を短期日に比較試験する一種の人工促進試験と見做し得るものである。

次に、此耐久試験結果より得たる結論を要約すれば次の如くである。

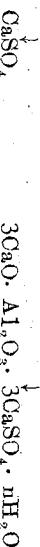
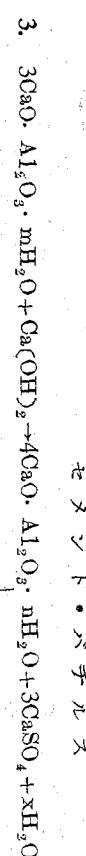
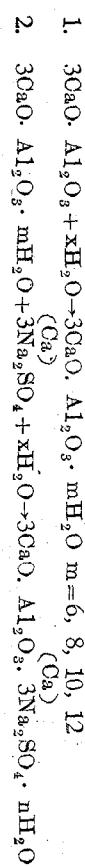
(1) 耐久性はセメント・クリンカー中の礫土酸三石灰 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) の含有量の少い程強い。

(2) 試験の總ての場合に於て、低礫土ポルトランド・セメント (ASW, BSW) 及び混合セメント (DL) は一般市販のポルトランド・セメントに比し海水及び鹽類溶液に對する抵抗性が遙に強い。但し市販ポルトランド・セメント (ES) だけは低礫土にして例外的に抵抗性が強い。

(3) 硫酸鹽中に於ても硫酸曹達 (Na_2SO_4) と硫酸苦土 (MgSO_4) とはセメントに對する侵蝕の状態が少しく異なるを認めた。

a. 即ち硫酸曹達溶液の場合は、短期日に供試體が著しく膨張し容積の増加をなす。此現象は次の化學作用に依るセメ

セメント・パチルスの生成に起因するものと考へられるものである。



結晶性石膏
セメント・パチルス含水結晶

(コンクリート・崩壊) (コンクリートの膨脹、龜裂、崩壊)

即ち此場合に、セメント・モルタル或はコンクリートに海水或は硫酸溶液が作用して最後に生成する結晶性石膏及びセ

メント・パチルス含水結晶が龜裂、膨脹、崩壊の起因をするもので一般に硫酸鹽は直接に礫土酸三石灰($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)に作用するも酸珪三石灰($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_3$)及び珪酸二石灰($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)の珪酸鹽には作用しないものと考へられて居る。

b. 硫酸苦土の場合は、比較的に長期間で亘りセメント・モルタル或はコンクリートに作用する。此場合には著しい膨脹或は容積の變化を示さずして崩壊をなすと云ふ。

此れは硫酸苦土 ($MgSO_4$) は直接にセメントの水和作用により生じた遊離の石灰 ($Ca(OH)_2$) と結合して不溶性の水酸化苦土 $Mg(OH)_2$ を生じセメントのアルカリ性度を減少せしめ、其結果一定のアルカリ性を有する溶液中のみ安定であるセメントの主成分なる珪酸三石灰 ($3CaO \cdot SiO_2$) 及び珪酸二石灰 ($2CaO \cdot SiO_2$) の水和物を分解せしめるに依ると云ふ。



(4) 高礦土濃型混合セメントは硫酸曹達の溶液に對する抵抗性は強大であるが硫酸苦土溶液に就てはそれ程でない。後者の場合には供試體の表層のみ侵蝕しその内部へは及ばない。

(5) 普通ポルトランド・セメント及び上記の混合セメントの硫酸鹽溶液による侵蝕の速さを供試體の重量の減少より試験した。結果によると一般に普通ポルトランド・セメント (DS) は混合セメントに比して早く侵蝕されるが混合セメント (DL) の場合は反対に遅い。又普通ポルトランド・セメントは硫酸曹達溶液には極めて早く短日目に侵蝕されるが硫酸苦土の場合は少し遅い。反対に混合セメントは硫酸苦土に徐々に侵蝕されるが、硫酸曹達には殆んど侵蝕されないと云ふ。

[4] 桑港金門灣大橋梁建築當局に於ては上記の各試験の他に更にセメント・モルタルのアルカリ性土壤に對する耐久力比較試験及びセメントの水和作用に伴ふ發熱によるコンクリートの發熱量測定試験等の研究試験を行い、結局上述のブラン混合セメント及び低礦土特殊ポルトランド・セメントを舗砌用コンクリートに使用することにした。

[V] 本邦産セメントに關する耐鹹性試験

セメントの耐水耐鹹性に就て

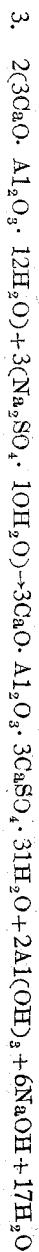
(土木工事用セメントに關する最近の傾向に就て、永井彰一郎 水道協会雑誌 52~55 昭和 12 年)
一般にセメントは其の水硬性化合物 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, Fe_2O_3 より水和に際して種々の水和物及び多量 (25~35%) の水酸化石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を生ず。此等は最初に糊狀に出来之が更に進んで微結晶化する時に砂利、骨材、鐵筋を接合膠着しめて物理的に強固なものとなす。

斯の如くセメントは物理的には強固なものを作る性質があるが化學的には安定強固なものとは云へない。それはセメントが水和作用によつて成生した水和生成物の珪酸石灰鹽水和物 $m\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $n\text{H}_2\text{O}$, 殊に鑿土酸石灰鹽水和物 $m'\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n'\text{H}_2\text{O}$ 及び水酸化石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 等が最も水に溶け易く且つ加水分解し易いからである。

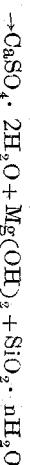
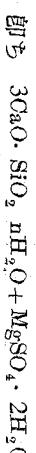
此等の水和生成物は一般にアルカリ性であり又アルカリ性中に於てのみ安定なものである。故にセメントはアルカリ溶液では安定であるが反對の酸には頗る不安定にして容易に溶出され又鹽類溶液にしては硫酸鹽に對し特に不安定である。

此れはセメント水和生成物の水酸化石灰及び鑿土酸石灰鹽水和物と硫酸根が作用して石膏 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ グラウベライト $\text{Ca}_3\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 及び石灰スルホ・アルミニート即ちセメント・パチルス $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ を生成するに依るものである。此等の反應の内で代表的なものを示すと、

A 硫酸鈉 (Na_2SO_4) の場合



B 硫酸苦土 (MgSiO_4) は硫酸鹽中最強の作用を呈し礫土酸石灰及び水酸化石灰に作用し上記の 1~3 の反應をする他の
 $(\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2, 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ にも作用して速に石膏の結晶を生ずる。



A. 酸液によるセメント・モルタル供試體の侵蝕試験

1:3 モルタル供試體を比較的稀薄なる酸液例へば 1% H_2SO_4 , 1% HCl 及び 1% HNO_3 液中に浸漬して 180 日間
 に於ける抗張及び耐壓強度を測定してその強弱を比較した結果によると普通ポルトランド・セメントより遙にアルミニナ・セ
 メントが抵抗性が強大である事が認められた。

次に有機酸の場合として 1.8% 酢酸 (CH_3COOH) 及び 1.8% 乳酸 ($\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$) 液に就て普通セメント、シリヂチットセ
 メント及び高爐セメントを使用して同様な試験をした結果によると、醋酸の場合は強度の低下が普通セメントが最も著し
 くシリヂチット之に次ぎ高爐セメントが最も強い事が認められた。

然るに一般に酸液液に於ては逆に強度の増加が認められた。これは水に不溶である乳酸石灰が生成し此のものが試験
 片の表面を密に被覆して内部への作用を防ぐ結果であると解釋されるからである。

一般にセメントはそれ自身がアルカリ性のものである故に一般の稀釋無機酸及び硫酸以外の有機酸には著しく侵蝕されるものである。

B. アルカリ液によるセメント・モルタル供試體の侵蝕試験

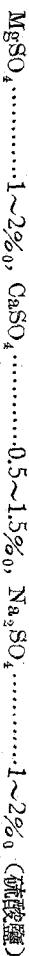
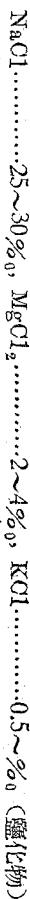
1%苛性鈉達 NaOH 液と石灰乳 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の飽和液中にセメント及び普通セメントの供試體を浸漬して同様に試験した結果、少しも強度の低下が無く石灰乳中では却つて増加するを認められた。

一般にアルカリ液に對してはセメントの耐久性が良く侵蝕の心配が少いものであると考へられて居る。

C. 鹽類液によるセメント・モルタル供試體の侵蝕試験

1. 海水の場合

一般に海水中に含有せられる鹽類の割合は、



其他少量の臭化物、沃化物を含み鹽類の總量は 30~35% である。

此等の鹽類の内で多量にある鹽化物は有害性が非常に少く寧ろ少量ではあるが常に之に併つて存在する硫酸鹽の方が遙に恐ろしい有害性を持つて居るものである。

此れが試験として濃厚なる溶液即ち 10% NaCl , 10% CaCl_2 , 32% MgCl_2 溶液を使用し普通セメント及びセメントを使用した供試體に就て上記と同様の浸漬試験(180日間)をした結果、兩者殆んど強度の低下を認められ無い。

従つて此れより淡い海水 ($\text{NaCl} 3\%$ 位) では何等直接的に鹽化物の作用は無いと考へられ又膨脹收縮試験の結果よりも同様なことが認められるのである。

2. (海水)、鐵水、地下水、工場水の場合

此等の水中には數々多量の硫酸鹽類が含有され此れがセメント或はコンクリート構造物の侵蝕龐裂或は崩壊の原因をなす場合が多い。勿論海水中にも上述の如く鹽化物の他に少量の硫酸鹽を含み之によつて侵蝕される場合もある。

次に、 10% Na_2SO_4 液、 7.5% 或は 10% MgSO_4 液及び飽和 CaSO_4 液を用ひ普通セメント、早強セメント、礫土セメント、高爐セメント及び多珪酸型混合セメントの各種のセメントを使用して作った $1:3$ —セメント・モルタル供試體及び $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ の軟練モルタル梁形試驗體に就て同様の侵蝕比較試験を行つた結果を述べると次の通りである。

一般に多珪酸型混合セメント、高爐セメント及び礫土セメントは抵抗性が強く、普通ポルトランド・セメント及び早強ポルトランド・セメントは弱い。

此内特に多珪酸混合セメントの内で可溶白土、溶珪白土の様な可溶性珪酸を $70\sim80\%$ 以上も含有して居る良質の混合材を適當量(即ちクリンカー 60 分、混合材 40 分)に配合し微粉砕して合理的に製造された多珪酸型混合セメント (SiO_2 46~56%、 CaO 36~43%) が著しく耐水耐鹹性に優れて居る事實が認められて居る。

此に次ぎ、高酸化鐵ポルトランド・セメントの様に酸化鐵の含量が多量なるセメントも耐水、耐鹹性が優れて居る事が認められて居る。此は普通ポルトランド・セメントに比して礫土が非常に少く酸化鐵が多くその結果鐵率が普通セメントの鐵率 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$) = $1.5\sim2.5$ なるに對し鐵率 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$) = $0.3\sim0.7$ の數値のものである。

此は主に獨逸に於て (Michaelis) 発達し、獨逸、オランダの海岸工事及びペナマ運河のコンクリート工事に於て主に使用されたものとして名高い。

此等の鐵ボルトランド・セメント及び高珪酸型混合セメントは發熱測定試験の結果、低發熱性のセメントなる事も確められ又膨脹收縮測定試験の結果よりも之に安定なる事も確められて居るものである。

第二部 土木試験所に於ける各種市販ボルトランド・セメントに關する耐鹹性試験

〔1〕 試料及び試験條件

試料は本邦市販ボルトランド・セメントにして、即ち中庸熱セメント (MH, MKA, MN) 3 個、普通セメント (AH, DC, YC, GC, NC, IO, AO, AN, AK) 9 個、及び早強セメント (THC, VO IHC, VN, VH) 5 個計 17 個である。尙其他に、

高珪酸質混合セメント (IS, TS YS) 3 個、高爐セメント (KYY KA) 2 個及びアルミナ・セメント (YA) 計 6 個を追加して行つて居るが此等の特殊セメントに就ては目下試験實行中なるを以つて茲では述べない。

供試體は軟練モルタル試験用のもので寸法 $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ 、配合はセメント、丸味浦砂、相馬標準砂 1:1:2 のモルタルであり、水セメント比は 60% 及びフロー約 200 である。

供試體は 4 週間水中養生をなし、其後 10% 硫酸鈉 (Na_2SO_4) 溶液中に浸漬し、之を 4 週、 9 週、 13 週、 17 週……以下續行中の各時期に取出し侵蝕の程度を外觀觀察により記録し、又壓縮強さ及び曲げ強さの強度試験を行ひ、此強度と

同村齡の水中養生のものの強度との百分比を求めて、より侵食による強度の変化を比較し、耐久性の良否を較べた。

〔2〕各セメントの化學分析

各セメント試料は J. E. S 規格に據り化學分析を行ひ各酸化物を定量し、次に R. H. Bogue 法により各構成化合物の割合を算出した。此の構成化合物の割合は次の表に表はした。

此の結果より見ると、セメントの優缺性に最も悪影響ありと考へられている $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_5$ 含量は中滑熱セメントが最も多く平均 4% であり、普通セメント及び早強セメントは之より遙に多く 8.5~10.0% 程度であり、稀に 10% を超へるものもある。

更に鐵素 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$) を見ると中庸セメントは 1 以下で最も少であり、普通セメント及早強セメントは 1.5 前後或は其以上である。苦土 (MgO) 及石膏 (CaSO_4) の含量は各セメントを通じ夫々 1.5% 及び 2% 前後である。

本邦産市販ポルトランド・セメントの構成化合物割合

		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	CaSO ₄	I. R.
テクニカル型	(3CaO·SiO ₂)	(2CaO·SiO ₂)	(3CaO·Al ₂ O ₃)	(4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃)				
No 1 MH	35.2	45.1	1.70	13.9	2.02	1.7	0.73	
中セメント 3 MN	2 MKA	27.2	49.6	6.90	12.0	1.33	2.2	1.30
平均値		27.2	51.7	3.1	13.4	1.08	2.4	0.90
		29.9	48.8	3.9	13.1	1.48	2.1	0.72

No 4	AH	45.6	31.6	9.1	9.0	1.89	1.8	1.80
5	DC	57.6	20.1	7.4	10.5	1.76	1.5	1.44
6	YC	55.8	18.4	9.1	11.1	1.24	2.2	1.57
7	GC	40.3	35.6	10.7	9.2	0.90	2.3	1.97
8	NC	53.4	20.8	8.9	11.7	1.70	2.3	1.51
9	IC	45.2	29.2	9.1	10.8	1.55	2.0	1.59
13	AO	50.4	25.4	9.5	10.5	1.00	2.4	1.68
14	AN	45.5	28.8	11.3	9.9	0.93	1.9	1.95
15	AK	56.0	21.4	8.2	9.7	1.37	2.3	1.61
平均値		50.0	25.7	9.3	10.3	1.38	2.1	1.68
No 17	THC	64.0	13.0	10.1	7.1	1.34	2.8	2.27
18	VO	63.5	14.4	8.0	9.2	1.02	3.0	1.63
19	IHC	49.6	26.2	9.1	9.9	1.50	2.2	1.70
21	VN	64.9	12.6	7.3	10.0	1.01	2.8	1.43
23	VH	60.9	16.3	9.4	8.4	1.76	2.7	1.89
平均値		60.6	16.5	8.8	8.9	1.33	2.7	1.79

尚ほ此種各セメントの物理的諸性質及びモルタル並にコンクリートの諸強度に關する試験結果詳細は土木試験所報告第41號(昭和13年5月)に詳述して置いた。

〔3〕 ボルトランド・セメントの強率と耐鹹性

此試験より求めた關係は圖-Aに圖示した此圖に於て縦軸に各材齡に

圖-A

於ける硫酸曹達溶液浸漬の供試試體の壓縮強さ(a)が同材齡の清水浸漬供試體の壓縮強さ(b)に對する強度百分比($a/b \times 100$)を採り横軸に鐵率を

採つて耐鹹性の強弱を比較した。一般に硫酸曹達溶液中に浸漬した供試

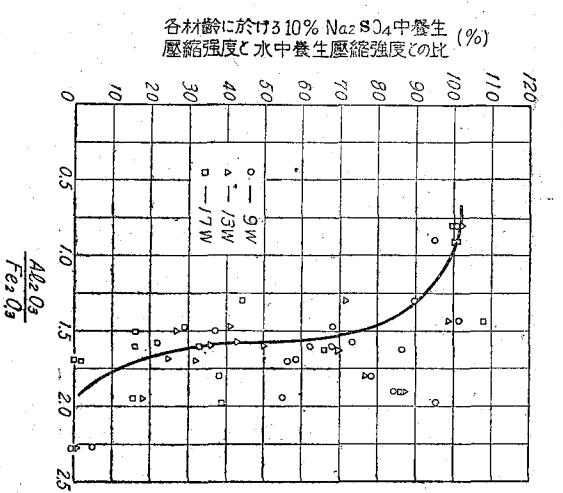
體は材齡の進に従ひ侵蝕作用を受け或るものは其期間中に侵蝕され著しく強度を失ふものもある。又或るものは殆ど侵蝕され強度を失はざるもの、又此等の中間に位するものもあつた。然して侵蝕による強度減少の傾向は圖に表した1曲線にて表はされる。

此の強度試験結果より見ると鐵率 ≤ 1.0 のものが最も強く此に反して鐵率 ≥ 2.0 のものは最も弱く、最も普通なる鐵率1.5前後のものは略其

中間に位している。(但し、多少の例外もある)

次に此關係を Haegermann 氏 (Zement 14, 1937) が試製ポルトランドセメントに就き硫酸苦土($MgSO_4$)溶液による略同様なる耐鹹性比較試験を行ひ結論として (1) $Al_2O_3/Fe_{2}O_3 = 1.0 \sim 7\%$ (2) $Al_2O_3/Fe_{2}O_3 = 1.0 \sim 1.3\%$ (3) $CaO/SiO_2 = 2.6 \sim 2.3$ (4) MgO 少量

(5) $CaSO_4 \cdot 1OH_2O$ 必要量なるセメントが優良であるとなし又永井教授 (水道協会雑誌 52~55 昭和 12 年) が本邦販ボルトランドセメントに於ては鐵率 ($Al_2O_3/Fe_{2}O_3$) ≤ 1 なるものが耐鹹性優良なりとなした所說と參照すると略一致



せる事實を肯定し得た。

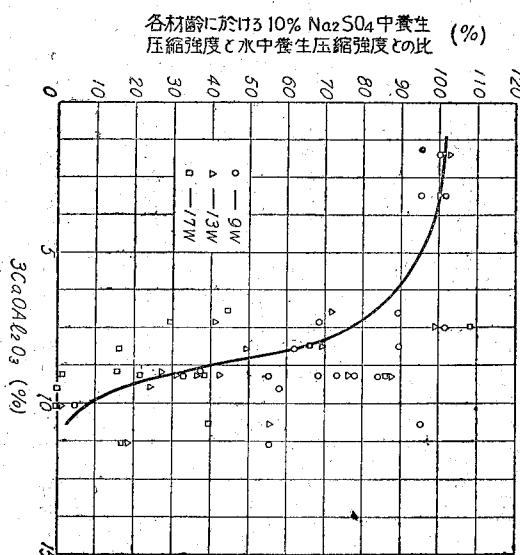
[4] ポルトランドセメントの C_3A 含量と耐鹹性

此は前節に述べた鐵滓の代りに C_3A 含量を採りポルトランドセメントの構成化合物中最も耐鹹性に影響ありと考へら
れている $C_3A(3CaO \cdot Al_2O_3)$ 含量と耐鹹性との關係を求めたものである。然して其の他は前節と全く同様である。此關係は圖一Bに表した。

此の結果より見ると供試體の浸漬による強度の減少は前節に述べたと同様なる傾向を表はし、其は1曲線で表はさる。即ち此結果より見ると、一般に C_3A 含量 $\leq 5.0\%$ 或は $\leq 7\%$ のセメントは耐鹹性最も強く、其以上或は 10% 前後のものは遙に弱いことが認められている。

次に、此關係を米國の耐硫酸鹽抵抗性セメントの聯邦規格に於て特に C_3A 含量(最大) $\leq 5.0\%$ と規定し、又最近竣工した桑港灣大橋梁の橋脚コンクリートに用ひた。耐海水用特殊低礦土ボルトランドセメントの成分に就て C_3A 含量 $\leq 8\%$ と規定し、實際には 6%以下のものを使用した事及び Tuthill 氏 (J. Am. Conc. Inst., 8. 2, 1937) がコロラド河水道工事のコンクリートに

圖一B ポルトランドセメントの熟土三石灰の含有量と耐鹹性との關係



用ふるセメントを試験するため、多數の米國市販セメントに就て同様なる試験を行ひ、其の結果セメントの成分として $C_3A \leq 4\%$, $C_3A + C_4AF \leq 12\%$, $C_2S \leq 30\%$ なるものが優良なりとした事等を參照して見ると本邦市販ポルトランドセメントに就ても略一致した事實が認められた。

即ち一般に C_3A 含量 $\leq 5.0\%$ 或は $\leq 7.0\%$ なる中庸セメントが最も良成績にて普通セメント及び早強セメントが之に次いだ（多少の例外を除く）

最後に高珪酸セメント・高爐セメントの混合セメント類及びアルミナ・セメントに關しては目下試験中なる故に茲に記載するを省略するが現在までの成績では上述の單味ポルトランドセメントに較べて同等のものあり又遙に優良なるものも多數あつた。

[5] 結論

- a. 本邦市販單味ポルトランドセメントに就て、10%硫酸曹達溶液による耐鹹性比較試験を行ひたるに、一般に C_3A 含量 $\leq 5.0\%$ 或は $\leq 7.0\%$ なる中庸熟セメントが最も優良なる成績を示し C_3A 含量が其以上或は 10.0% 前後なる普通セメント及び早強セメントは成績不良であつた。耐鹹性は C_3A 含量 8.~10% なるものに於て急に低下し 10% 以上のものは全く此の性質が失はれ試験中供試験體が崩壊したものが多くあつた。
- b. 高珪酸質シリカ・セメント、高爐セメントの混合セメント及びアルミナセメントに關しては目下試験中であるが混合セメントの或るものには耐鹹性著しく優秀なものがある。
- c. 低熱型セメント及び混合セメントは耐鹹性は優良なるも早期強度（28日以前）が幾分弱い點がある。