

技術展望

コンクリート構造物の早期劣化とセメントの品質

DETERIORATION OF CONCRETE STRUCTURES AND QUALITY CHARACTERISTICS OF CEMENT

小林一輔*

By Kazusuke KOBAYASHI

1. はしがき

最近、アルカリ骨材反応に起因するコンクリート構造物の早期劣化が西日本を中心として集中的に発生していることが明らかになり、その範囲は全国的に拡大する様相を呈している。アルカリ骨材反応が各種のガラス質の火山岩やこれらを含む堆積岩などによって引き起こされることはよく知られているが、その引金になっているセメント中のアルカリ分の増大とこれがセメント製造上またはコンクリートの品質に大きい影響を与えている点についてはそれほど注意が払われていない。

現在、コンクリートの研究者や技術者のほとんどは、“わが国のセメントの品質は全国のいずれの工場から供給されるものもおおむね一様で、むしろ風化による品質変化の方が問題である”と考えているのではないかとと思われる。

しかし、現実には、わが国のセメントの品質は工場によってかなりの相違があり、また、同一の工場で生産されるセメントの品質も、原料や燃料の関係で大幅に変動する可能性をもっているのである。

本文では、セメントの品質が工場によって相違する理由を明らかにするとともに、このことによって使用者はどのような問題を抱え込むことになるかを明らかにした。さらに現在のセメント製造方式の93%¹⁾を占めるサスペンションプレヒーター付きキルン（SPキルン、ここではNSPキルンも含めてSPキルンと総称する）によるセメントの生産は、特にアルカリ分の多い原料を用いる場合数々の問題を発生する可能性があることを示

した。すなわち、ただ単にアルカリ骨材反応を引き起こすような高アルカリのセメントをつくり出すばかりでなく、その全体に占める量は少ないながらも、欠陥セメントを市場に供給する公算が高いことを指摘した。要するに、現在、アルカリ骨材反応によるものではないかと考えられているコンクリート構造物の異常ひびわれの中にはセメントの品質に起因するものが含まれているのではないかとということである。最後に現行のセメントの品質規格に問題が多いことを指摘し、規格改正についての私案を示した。

総合工学としての土木工学の立場から、社会基盤の形成にとって最も主要な材料の一つであるセメントの望ましい品質を追求することはきわめて重要な任務である。セメントの製造者と使用者はこの趣旨を認識し、本文の指摘する事項について前向きな検討を頂きたい。

2. 第2次大戦後におけるセメント製造の推移

わが国のセメント工業は第2次大戦によって壊滅的な打撃を受け、昭和21年の年間生産量は100万トンにも満たない状態であったが、以後の工場の復旧・増設が急ピッチで進み、昭和29年には年間1000万トンのセメントを生産するまでに飛躍的な発展を遂げた。その後、セメントの生産は第1次石油危機が到来した昭和48年には8000万トン弱に達し、わが国の戦後の経済復興ならびに奇跡的といわれた経済成長の基盤となった重要港湾の整備、水力発電用のダム建設、交通網の整備、住宅建設などに多大の寄与をなした。

図-1はわが国の普通ポルトランドセメントのJISによる圧縮強さの変遷を示したものである。この図より、わが国のセメントの圧縮強さは昭和21年には現在のセ

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所
(〒106 港区六本木7-22-1)

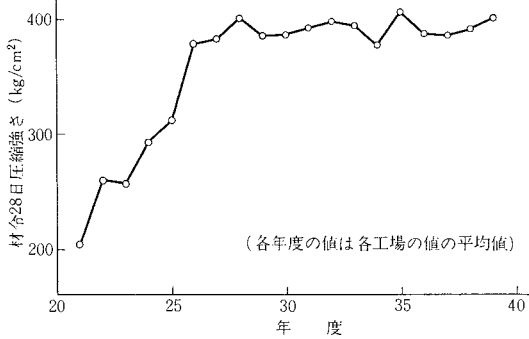


図-1 わが国の普通ポルトランドセメントの圧縮強さの変遷

メントの値の約1/2程度に過ぎなかったが、その5年後の昭和26年にはすでに現在のセメントの水準に達していたことがわかる。この当時、大学や官公庁のコンクリート研究室では使用するセメントの強さ、粉末度、凝結、安定性、比重などの試験を実施してその品質を確認していたのであるが、いつの間にかセメントの品質はセメント工場より送られてくる試験成績表をもって済ませるようになり、材料の試験は骨材のみについて行うようになった。これはおそらく、鋼材の品質試験をミルシートによって代える風潮にならったものと思われるが、前提としてはセメントの品質に対する信頼があったことを無視することはできない。事実、昭和32年頃まではセメントの焼成は安定した品質のものが得られる湿式法が主流を占めていたのであるが、32年のエアプレンドリング装置の開発を契機として、セメントの焼成はしだいに乾式法に移行するようになった。特に昭和38年にSPキルンが導入されるに及び、セメントの製造方式は昭和55年頃までにはほとんどこの乾式キルン方式に置き換えられることになった。図-2はSPキルンによるセ

ントの製造工程を示したものである。SPキルンによるセメントの製造方法の特徴を端的に表現するならば、それは徹底した省エネルギーとクリンカー生産量の大幅な増大であろう。SPキルンのセメント1t当たりの燃料消費量はC重油換算で平均81l程度であるが、この値がいかにか低い値であるかは湿式キルンの燃料消費量である140lと比較するとよくわかる。一方、プレヒーターにおける脱炭酸反応 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) を通じてキルンの単位容積当たりのクリンカー生産量を50%も増大させることを可能にしたのである。しかし、一方においてセメントの品質の変動は湿式キルンを用いて焼成した場合に比べて増大する結果を招くことになった。

3. セメントの品質変動と派生する諸問題

(1) 工場間におけるセメント品質の差について

現在、わが国で稼働中のセメント工場は50工場²⁾であって、北は北海道から南は沖縄にまで分布している。さて、セメント協会は昭和21年から全国のセメント工場を対象として毎年、ある一定の時期に試料を採取して、JISに定められている物理試験ならびに化学試験²¹⁾を実施している。図-3は昭和39年から昭和58年までの20年間における圧縮強さの試験結果を各工場より採取した

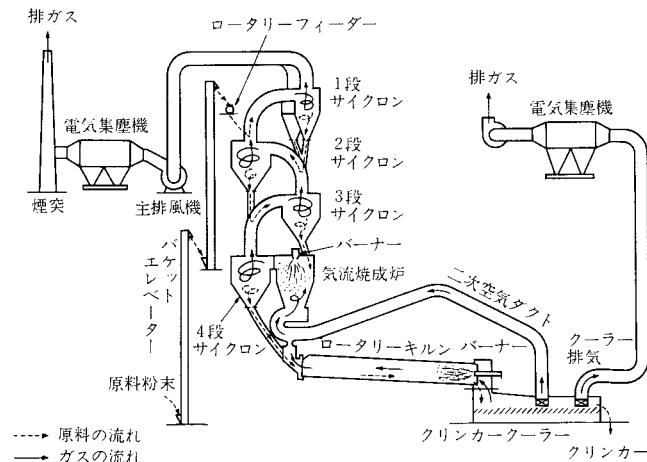


図-2 SPキルンによるセメントの製造設備の一例
(秩父セメント熊谷工場案内資料より転載)

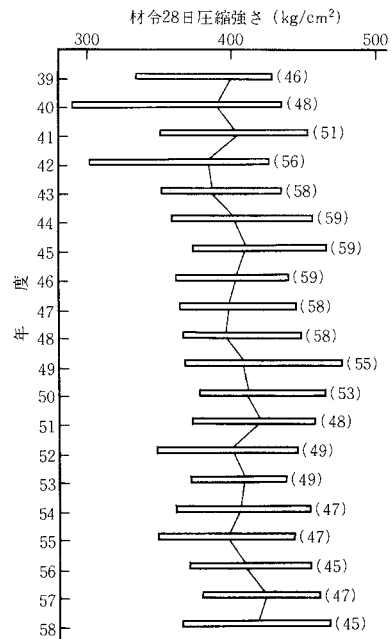


図-3 各年度におけるセメントの圧縮強さの工場ごとの差

- 1. () は試料数、すなわち工場数を示す
- 2. 実線は平均値の推移を示す

注1) 昭和56年よりアルカリ量の試験も実施している。

試料の試験値の最大のものと最小のもの幅を示している。たとえば、昭和58年度の結果は工場によって材令28日における圧縮強さは約100 kg/cm²の差があることを表わしている。

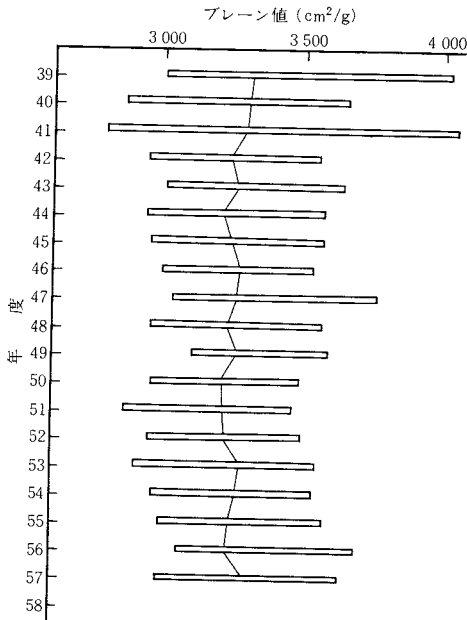


図-4 各年度におけるセメントの粉末度の工場ごとの差 (実線は平均値の推移を示す)

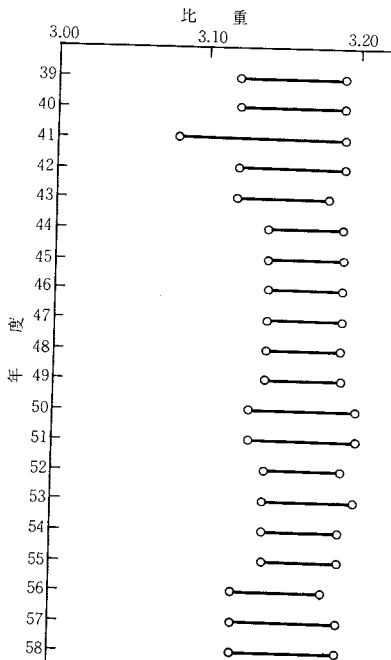


図-5 各年度におけるセメントの比重の工場ごとの差

JISモルタルによるセメント強度を考慮して所要のコンクリートの圧縮強度を得るための水セメント比を求める日本建築学会の式がある。この式を用いて、セメントの圧縮強さが100 kg/cm²だけ変化したときのコンクリートの圧縮強度がどの程度変化するかを求めてみると、水セメント比の値が40%、50%および60%の場合でそれぞれ約120 kg/cm²、90 kg/cm²および70 kg/cm²だけ変化することになる。

一方、図-4は同じく粉末度に関する結果を示したものであって、昭和58年度の試験結果をみると工場によってブレイン値に900 cm²/gの差があることを表わしている。

同様に図-5~6はそれぞれ比重および凝結時間の結果を示したものである。さて、図-7は昭和58年度に実施された化学試験中のアルカリ量に関する試験結果の工場による差を示したものである。

この図によれば、セメント中のアルカリ量は工場によって大幅に相違し、ASTM C-150に規定されたアルカリ量の許容値である0.6%を下回る値となった工場が全体の約20%を占め、その1.5倍の0.9%以上の値となった工場が同じく20%に達している。さて、以上のようなセメントメーカーが実施しているセメントの品質試験結果はこれまで公表されたことがなかったのであるか？ 結論を先にいえば、各工場のセメントの試験結果の平均値は公表されているのである^{1),3)}。しかし、

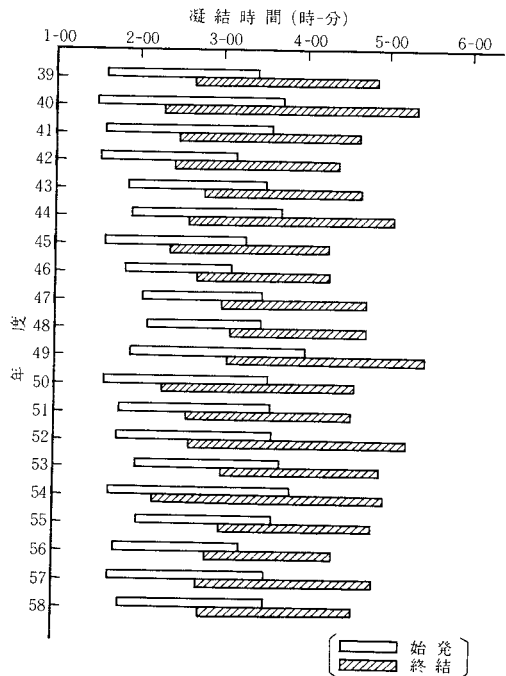
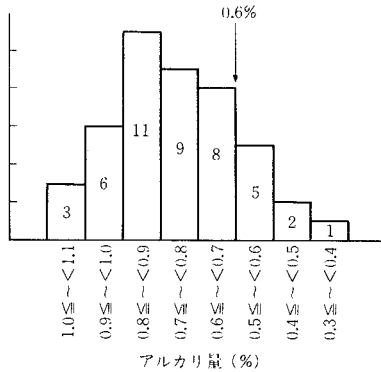


図-6 各年度におけるセメントの凝結時間の工場ごとの差



図一7 工場ごとのアルカリ量の変動

図一3～7に示したような工場ごとの品質変動がある場合、各工場の品質試験結果の平均値の年間変動が比較的小さいことを示して、たとえば“最近11年間のセメントの品質は安定した状態にある”と結論することは著しく説得力を欠くものである。

ともあれ、“図一3～7の結果はどちらかといえば控えめの結果であって極端な値はオミットされている。実態はこの程度のものではなく、これらを上回る変動がある”と指摘する人も多い。セメントの品質試験成績表なるものがセメントメーカーから出されているが、これをどのように評価すればよいのか、改めて考えてみる必要がある。

(2) セメントの品質が工場によって相違することによって生ずる諸問題

さて、セメントの品質が製造工場によって相当の差があることはユーザーに対してどのような結果をもたらすのか？ 現在、土木学会のコンクリートおよび鉄筋コンクリート標準示方書では所要の強度のコンクリートの配合を定める場合、工事に使用する材料を用いて試験練りを行い、その結果に基づいて水セメント比を決めることになっている。この場合、“工事に使用する材料”と同じものを用いるのはせいぜい骨材であって、セメントは同じ種類であれば銘柄のいかんにかかわらず利用できるものを使用することが多い。まして、実際の工事に使用されるセメントの製造工場を確認し、この工場のセメントを入手して配合試験を行うようなことは、たとえ意図してもできない相談である。問題は、“セメントは同じ普通ポルトランドセメントであれば、いずれの銘柄・工場のもでも品質が大きく異なることはない”ということが、現在の土木学会の「コンクリートおよび鉄筋コンクリート標準示方書」の大前提になっている点にある。これは、セメントの品質の銘柄・工場によるバラツキのデータがこれまで公表されたことがなかったので致し方

のないことである。

この問題に関して、“配合試験に用いたセメントと、工事に用いたセメントが異なるものであっても、工事開始直後に配合の修正を行えばそれで一件落着ということではないか……何も大騒ぎすることもなかろう”と考える向きもあろうが、それはあくまでもその工事に使用されるセメントが終始同一の工場から供給されるものと決めてかかった場合の話である。このようなケースはダムとか原子力発電所のような特殊な構造物か、ごく小規模の工事を除いてはあり得ないと考えるべきである。その理由はセメントの物流体系の特殊性にある。全国の各工場で製造されたセメントの約70%は全国600余か所に散在する中継基地^(注2)に送り込まれ、ここを通じてトラックなどにより工事現場のプラントまたは生コンプラントなどに供給される。セメント工場から中継基地への輸送手段は両者の立地条件や距離により海上輸送の場合もあれば鉄道輸送の場合もあり、さらにある中継基地を經由して他の中継基地に運ばれる場合もある。また、中継基地そのものは各社が専有しているが、自社工場の地域的偏りによる交錯輸送を排除するため、お互いに他社の工場で製造されたセメントを自社の中継基地を通じて自社製品として供給することが行われている^(注3)。

このことは、ある規模の構造物に施工されるコンクリート中のセメントはその工事期間中のいずれの時点でいずれの工場のものが使用されたのか全くわからない状態になっていることを意味する。以上の交換出荷はこれまで非公式に行われていたのであるが、昨年9月に告示されたセメント業界の「構造改善基本計画」を受けてセメントの共同販売等を内容とする共同事業会社が発足するに及び、オープンに行われる情勢になったのである。新しく発足した共同事業会社は表一1に示す5社であって、それぞれ母体となっているセメントメーカーで生産されたセメントの共同販売を実施しようということであるから、交換出荷が晴天白日の下に行われることになっただけでなく、銘柄を統一しようという動きもでてきたのである^(注4)。

さて、セメントの品質が工場によって相違することにより派生してくる問題は何か強度に関係したものだけではない。たとえば、図一7に示した工場によるアルカリ分の差は当然のことながら各種の混和剤の効果にも影響を及ぼすことになる。McCoy^(注5)は水溶性アルカリ分の多いセメントを用いた場合には減水剤の効果が低下することがあり、その使用量を増す必要のあることを指摘している。

注2) サービスステーション(SS)、セメントセンターまたは包装工場などよばれている。

注3) 交換出荷とよばれている。

表一 セメント共同事業5社の概要

会社名	中央セメント	大日本セメント共同事業	不二セメント共同事業	アンダスセメント共同事業	ユニオンセメント
資本金 (100万円)	300	300	300	120	400
出資会社 (出資比率%)	小野田セメント(30) 新日鉄化学 (17.5) 東洋曹達工業 (17.5) 日立セメント (17.5) 三井鉱山 (17.5)	日本セメント (40) 大阪セメント (40) 第一セメント (10) 明星セメント (10)	三菱鉱業セメント (50) 徳山曹達 (50)	住友セメント (20) 麻生セメント (20) 電気化学工業 (25) 日鉄セメント (25) 八戸セメント (2.5) 荻田セメント (5)	宇部興産 (45) 秩父セメント (40) 敦賀セメント (10) 琉球セメント (5)
従業員 (人)	約 550	約 400	約 460	約 500	約 480
シェア (%)	19.3	21.4	16.7	20.3	20.3

(「コンクリート工学」Vol.22, No.12, 1984による)

高性能減水剤や吹付けコンクリートに用いられている急結剤の使用にあたってはしばしばセメントの銘柄による相性が問題になるが、以上のようなセメントの工場ごとの、化学成分を含めたクリンカーの状態変動に基づいた品質の変動を考慮すれば十分に納得できることである。

最近制定されたコンクリート用化学混和剤のJISでは、コンクリート試験用のセメントは銘柄の異なる3種類を混合したものをを使用することを規定している。このような配慮は、以上の事実を照らしてみた場合、いかに重要なことであるかが明らかになってくる。

(3) セメントの品質が工場によって相違する理由

セメントの品質が工場によって大きく相違する状態をつくり出した元凶は現行のJISのセメント規格にあると考えられるが、この点に関しては改めてあとの方で論ずることにしたい。ここではセメントの品質が工場によって相違する、より直接的な要因である原料の品質とクリンカーの焼成条件について取り上げることにする。

まず原料の品質の問題であるが、たとえばセメント中のアルカリ分が工場によって相違する最大の原因はシリカやアルミナの供給源として使用される粘土の品質の相違によるのである。

1年間に200万トンのクリンカーを生産する工場はわが国ではそれほど大きい工場ではないが(図-8参照)、消費する粘土^{注4)}は45万トンに達する。このような大量の粘土を毎年採掘し続ければ工場によっては十分に風化されてアルカリ分の少なくなった良質の粘土は消費しつくされ、アルカリ分の多いものも使用せざるを得ない。量が少なければ良質のものを遠方より運んでくることも可能であろうが、燃料に用いる石炭の2倍にも相当する量の粘土を遠方から輸送することは大変なコスト増になる。一方、工場の近辺に製鉄所がある場合には粘土質材料として高炉スラグを使用することができるがこの場合にはアルカリ分の非常に少ないセメントを製造すること

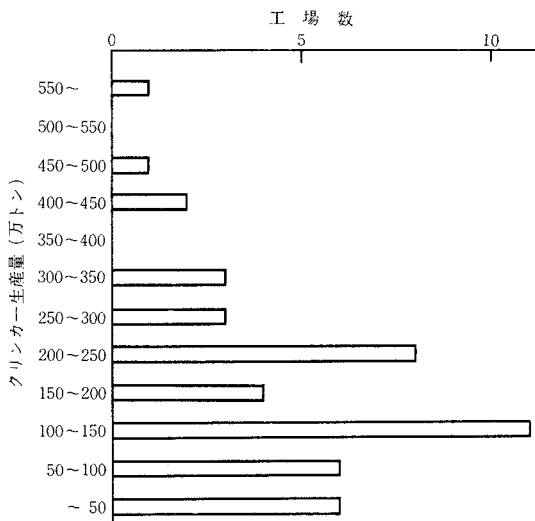


図-8 昭和58年におけるわが国のセメント工場のクリンカー生産高²⁾

ができる。以上のような原料中のアルカリ分の多少がセメント中のアルカリ分に反映する程度は、図-2にその一例を示したように、SPキルンを用いる乾式法を採用した場合、プロセス中での濃縮と平衡状態のずれに伴う変動により極度に増幅されることになる。

さて、セメントの品質、特に強度の工場間による差は主としてクリンカーの焼成条件の相違によって生ずるといわれている。表-2および表-3はそれぞれ、昭和37年11月から38年3月にかけての冬期および昭和38年5月から8月にかけての夏期に入手した市販の23工場のセメントについての品質試験結果である。これらの表をみて注目されるのは、材令28日における圧縮強さの工場による差が表-2では約160 kg/cm²、表-3では約140 kg/cm²もある点である。化学成分の指標となる水硬率 (Hydraulic Modulus, H. M.)^{注5)}や粉末度の値は

注5) 次式で表わされる。

$$H. M. = \frac{CaO - 0.7 SO_3}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

注4) セメント工場で使用されている粘土質材料は粘土そのものではなく、頁岩が多い。

表—2 昭和37年下期 市販セメント試験成績⁶⁾

試料 記号	比重	粉末度 比表面積 (cm ² /g)	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)			化学成分 (%)						HM	F. CaO	入 手 年月日	
			3日	7日	28日	3日	7日	28日	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO				SO ₃
7a-2	3.15	3430	37.3	51.9	84.5	146	250	455	0.6	21.4	5.1	2.9	64.9	1.4	1.8	2.16	0.8	38. 1.30
7c-11	3.15	3260	35.9	49.5	71.8	145	256	451	1.1	22.4	5.2	3.3	64.2	1.2	1.7	2.04	0.5	38. 1.17
7a-4	3.15	3550	31.8	49.8	78.7	121	230	450	1.2	22.0	5.1	3.1	64.8	1.3	1.7	2.11	0.6	37.11.26
7c-12	3.16	3140	32.2	49.6	77.3	111	211	448	0.6	21.9	4.9	3.3	64.2	1.4	1.7	2.09	0.2	37.12. 8
7b-1	3.15	3460	34.1	53.8	80.0	127	235	443	0.9	22.3	5.3	2.9	64.0	1.8	1.8	2.06	0.8	38. 2.28
7b-21	3.17	3060	30.3	38.0	70.0	116	213	444	0.5	22.7	5.3	2.9	64.8	0.9	1.9	2.05	0.7	38. 2.22
7g-1	3.15	3190	28.8	40.9	71.1	119	227	419	1.0	21.8	5.2	3.0	65.1	1.6	1.6	2.13	0.5	38. 2. 3
7b-6	3.17	3090	26.6	43.1	70.1	101	192	411	0.9	22.5	5.6	3.1	64.1	1.1	1.7	2.02	0.7	37.12.24
7a-71	3.16	3220	35.4	52.3	79.1	125	228	404	0.9	21.9	5.2	3.1	64.9	1.9	1.9	2.11	0.8	38. 2. 4
7a-6	3.17	3310	31.0	50.7	76.2	124	227	401	0.8	21.7	5.5	3.1	65.0	1.6	1.6	2.11	0.7	38. 2. 4
7b-22	3.16	3010	29.0	45.7	69.6	117	209	397	0.8	22.6	5.2	3.0	64.7	1.0	2.0	2.06	0.6	—
7b-4	3.13	3200	36.2	43.1	72.2	128	233	390	1.3	22.4	5.1	3.2	64.0	1.0	2.0	2.04	0.6	38. 1.24
7a-72	3.16	3320	34.9	50.0	71.2	124	216	385	1.1	22.2	5.0	3.3	64.3	1.2	2.1	2.06	0.8	37.12. 7
7a-3	3.17	3250	34.7	53.1	78.1	123	227	384	1.2	21.6	5.6	3.1	64.8	1.6	1.6	2.10	0.3	38. 1.19
7b-23	3.16	3160	26.6	36.8	67.3	129	188	366	0.7	22.5	5.0	3.0	64.8	1.0	2.0	2.08	0.7	38. 3. 6
7b-24	3.15	3100	29.9	44.2	77.8	111	202	365	0.6	22.4	5.1	2.9	64.3	1.3	1.9	2.07	0.6	37.11. 8
7j-1	3.16	3150	27.6	42.5	66.0	98	165	358	0.8	21.5	4.6	3.2	64.3	2.6	1.5	2.16	1.1	37.12.22
7d-1	3.14	3160	27.1	44.3	66.5	109	190	356	0.9	22.4	5.4	3.0	63.4	1.4	1.8	2.02	0.8	37.11.26
7i-1	3.15	3220	29.3	46.0	68.9	109	210	354	0.7	21.7	5.1	2.8	64.9	1.4	1.8	2.15	0.8	38. 1.29
7h-1	3.15	3320	27.7	44.8	69.6	97	187	346	1.3	21.6	5.3	3.0	64.4	1.3	1.8	2.11	1.1	37.12.10
7k-1	3.15	3300	25.9	40.6	62.6	119	192	340	1.1	22.0	5.2	3.2	64.3	1.5	1.9	2.07	0.8	38. 3.19
7c-4	3.18	3120	31.3	45.9	69.2	122	195	310	0.9	22.9	5.3	3.2	64.0	1.4	1.7	2.00	1.0	38. 1.30
7c-3	3.17	3190	27.9	38.0	55.7	106	169	298	0.8	21.7	5.6	3.1	63.6	1.9	1.5	2.06	2.0	38. 2.22

表—3 昭和38年上期 市販セメント試験成績⁶⁾

試料 記号	比重	粉末度 比表面積 (cm ² /g)	曲げ強さ (kg/cm ²)			圧縮強さ (kg/cm ²)			化学成分 (%)						HM	F. CaO	入 手 年月日	
			3日	7日	28日	3日	7日	28日	ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO				SO ₃
8c-1	3.16	3260	35.6	49.3	73.3	134	239	433	0.9	22.5	5.3	3.2	64.2	0.9	1.7	2.03	0.3	38.5.22
8a-11	3.16	3310	35.3	49.1	72.9	134	222	434	0.7	22.8	5.0	3.1	64.9	1.2	1.7	2.06	0.9	9. 5
8c-5	3.14	3220	29.4	46.7	74.3	99	197	423	0.3	23.0	5.3	2.5	65.5	1.0	1.4	2.09	0.5	7.13
8a-5	3.14	3220	34.2	53.6	76.1	138	253	414	0.8	21.8	5.7	3.1	64.6	1.7	1.6	2.07	0.7	6.30
8a-4	3.13	3330	26.6	44.7	68.8	112	212	414	1.5	22.0	5.1	3.0	64.0	1.7	1.6	2.09	0.5	5.18
8b-7	3.15	3350	27.8	44.4	72.9	114	204	416	1.2	22.5	4.7	3.2	64.4	1.0	1.8	2.08	0.7	7. 3
8d-1	3.14	3160	29.6	49.5	73.7	110	225	404	0.9	22.2	5.0	3.1	64.4	1.2	1.6	2.09	0.6	7. 4
8a-12	3.17	3420	31.6	43.0	65.2	120	210	396	0.8	22.6	5.2	3.0	64.8	1.2	1.8	2.06	0.6	6.29
8a-6	3.15	3190	25.3	46.1	67.5	105	207	394	0.7	22.1	5.6	3.1	64.4	1.7	1.6	2.05	0.7	6.27
8a-2	3.16	3220	37.5	54.1	65.6	148	232	389	1.1	22.0	5.3	3.1	64.8	1.3	1.7	2.09	1.0	6.24
8c-6	3.16	3290	24.0	40.1	64.1	96	202	390	1.1	21.7	5.3	3.1	63.9	1.4	1.7	2.08	0.9	7.31
8a-31	3.15	3280	29.4	46.0	65.2	115	202	386	1.2	22.3	4.9	3.4	64.4	1.7	1.7	2.07	0.3	6.25
8b-6	3.16	3060	25.3	40.2	70.3	94	182	380	0.8	22.3	5.3	3.1	64.2	1.2	1.6	2.05	0.9	6. 6
8b-21	3.17	3050	29.0	45.0	72.0	114	188	377	0.8	22.1	5.0	3.0	64.2	1.3	2.1	2.08	0.5	5.30
8b-22	3.15	3140	28.1	44.2	69.2	107	182	372	0.6	22.6	5.3	2.8	64.0	1.0	2.0	2.04	0.8	8.30
8c-2	3.13	3120	31.4	48.8	66.9	124	221	371	1.0	21.4	5.7	3.1	63.8	1.3	1.7	2.07	0.9	7.10
8b-3	3.16	3370	29.3	39.5	66.3	106	173	367	1.0	22.4	5.0	3.2	63.5	1.5	2.0	2.03	0.7	8. 5
8a-32	3.16	3400	32.5	44.9	66.7	122	193	359	1.0	22.1	5.0	3.2	63.7	1.9	2.1	2.05	0.2	7.24
8b-5	3.12	3410	30.5	39.5	69.1	107	180	347	1.5	22.3	4.6	2.9	63.5	1.3	1.8	2.09	0.4	6.29
8d-2	3.12	3280	28.1	40.2	59.9	100	181	343	1.0	21.6	5.2	3.3	63.5	1.6	1.9	2.07	0.8	5.14
8e-1	3.13	3610	22.5	35.5	66.5	74	164	343	0.6	22.3	5.4	2.6	64.7	1.8	1.3	2.11	0.8	6. 1
8i-1	3.13	3100	31.2	49.8	66.7	118	198	337	0.8	21.3	4.9	2.7	64.8	1.4	1.5	2.21	1.0	8. 1
8f-1	3.14	3210	27.8	37.1	61.0	107	166	298	1.4	21.7	5.4	3.2	63.9	1.4	2.0	2.06	0.4	6.18

セメントの強度に影響を与えるほどの差がないのである。

水硬率の差が少ないということは、クリンカー-鉱物であるアリット相 (C₃S) やベリット相 (C₂S) として知

られる水硬性成分としての生成量の差も少ないことを意味する。従来のセメントコンクリートに関する成書には“C₃S や C₂S の量の多少がポルトランドセメントの強度発現を支配する”と記されているものが多いが、これ

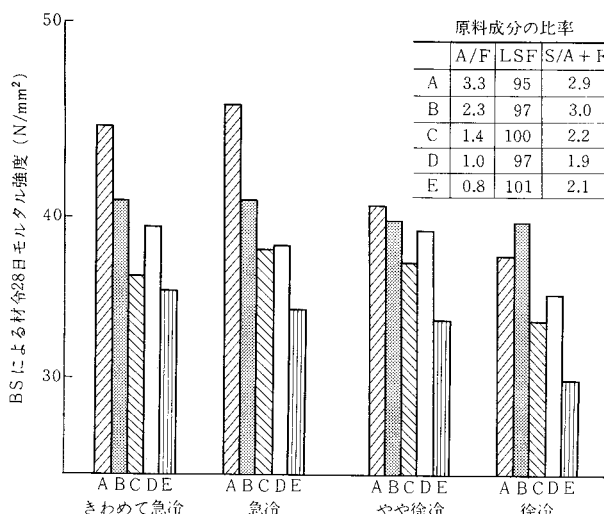


図-9 クリンカーの冷却速度が圧縮強度に及ぼす影響⁷⁾

$$\left[\begin{array}{l} A/F = Al_2O_3/Fe_2O_3, \\ \frac{S}{A+F} = \frac{SiO_2}{Al_2O_3+Fe_2O_3}, \\ LSF = \frac{CaO - 0.7 SO_3}{2.8 SiO_2 + 1.2 Al_2O_3 + 0.65 Fe_2O_3} \end{array} \right]$$

らの量や粉末度がほぼ一定の場合にセメントの強度を大きく変化させる要因があることに触れているものは皆無といってよい。小野らはクリンカーの焼成条件によって結晶化学的に異なる性状のC₃SやC₂Sが生成すること、これらの水和活性がそれぞれ異なることを明らかにし、表-2および表-3における強度差が各工場における焼成条件の相違によるものであることを指摘している。すなわち、焼成温度、焼成時間、クリンカーの冷却速度などのキルンの運転状態いかんによって、セメントの強度が支配されるということである。図-9はクリンカーの冷却速度が強度に及ぼす影響を示したものである。問題は、キルンの温度管理がわれわれ部外者が考えているほど自由にコントロールすることができないということであろう。“キルンの運転操作において管理はオペレーターのK&D、すなわち勘と度胸に頼る部分が多い”⁸⁾といわれているが、この辺の実情を象徴的に表わ

表-4 ポルトランドセメントの分析値と計算上の鉱物組成 (%)

		1	2	3
酸化物	SiO ₂	20.0	22.0	20.0
	Al ₂ O ₃	7.0	7.7	5.5
	Fe ₂ O ₃	3.0	3.3	4.5
	CaO	66.0	63.0	66.0
	残り	4.0	4.0	4.0
鉱物	C ₃ S	65	33	73
	C ₂ S	8	38	2
	C ₃ A	14	15	7
	C ₄ AF	9	10	14

しているものと思われる。

(4) 工場内におけるセメントの品質変動

ポルトランドセメントの製造にあたっては、原料中に含まれるCaO, SiO₂, Al₂O₃およびFe₂O₃などの化学成分がある一定の比率を保つよう管理される。問題はこの管理をどの程度の精度で実施し得るかである。表-4はW. チェルニンの「建設技術者のためのセメント・コンクリート化学」に示されているものであるが、以上のような化学成分の変化が比較的少なくてもクリンカーの鉱物組成にはいかに大きい影響を及ぼすものであるかの例として与えられている。

第1欄はセメントの主成分の分析値であり、その下欄の数値はこれから計算した鉱物組成である。第2欄は第1欄の成分中のCaOを3%だけ少なくし、それに応じて他の成分を高めたものである。両者を比較してよくわかることは、3%のCaOの変化によってC₃Sの量は1/2に減じ、C₂Sの量は数倍にも多くなったことである。最後の第3欄は原セメントのCaOとSiO₂の量をそのままにして、Al₂O₃の一部をFe₂O₃で置き換えた場合である。ここでもまた第1欄に比較してC₃Sの増加はもとより、C₃SとC₂Sの比は著しく変化している。C₃SとC₂Sの量およびその比率はセメントの強度発現を支配する。表-4に示す第1欄と第2欄に示すセメントの組成の差はおそらく早強ポルトランドセメントと特別に試作された低熱セメントくらいの差に匹敵しよう。C₃SやC₂Sの量が変化する範囲をできる限り小さくしようとするれば、原料中のCaOやSiO₂の量の変動は少なくともパーセント標示で小数点以下1桁の範囲にとどめる必要があろう。これは、おそらく昭和30年代に全盛を極めた湿式方法によってセメントを製造する場合には可能であったかもしれない。湿式方法における湿式粉碎とスラリーベースンにおける成分調整はこのような品質の一定したセメントの生産に対する要求に答え得る製造方式であったと思われる。ところが、現在のSPキルンを用いる乾式方法では以上のようなきめの細かい原料成分の管理を行うこと自体が困難であるのみならず、キルングストの原料への添加ならびに燃料として使用される石炭に由来する石炭灰の成分がそのままクリンカー中に導入されるので、C₃SやC₂Sの量や比率を一定に保つことはますます難しくなるのである。石炭灰は、低品質の石炭の場合その20%程度が灰分となり、これがクリンカー重量の4~5%程度を占める⁵⁾。灰分はシリカ分などを多く含んでいるので当然、C₃S, C₂SやC₃A生成量に影響を与える。原料中の化学成分の管理はあるレベルで実施することができても、燃料から導

入される灰分中の成分とそのクリンカー中への混入量まで管理することは困難である。たとえば灰分からシリカ分が1%導入された場合、 C_3S 量は7%減少するといわれており、同様にアルミナ分が1%導入された場合には C_3S 量が6%減少し、 C_2A 量が2%程度増大するといわれている⁵⁾。

4. セメント中のアルカリ問題

(1) クリンカー中のアルカリ分とその発生機構

セメントの原料には表-5に示すようにアルカリ分が含まれているが^{注6)}、これらの約50%はキルンで焼成中(800°C~1000°C)に揮発して排ガスのアルカリ濃度を高める⁹⁾。一方、石炭や重油などの燃料中の硫黄分はキルン中で燃焼とともに酸化されて三酸化硫黄(SO_3)となり、調合原料中に残存しているアルカリ分と結合してアルカリ硫酸塩(K_2SO_4 , $Na_2SO_4 \cdot 3K_2SO_4$, $2CaSO_4 \cdot K_2SO_4$ など)を形成する。燃料や原料中の硫黄分の半分以上はこのような形でクリンカーに導入され、水溶性アルカリの主体となる。さて、ロータリーキルン中では排ガスとともにセメントダストが発生する。これは調合原料や半焼成原料の混合物から成る微粉であるが、 SO_3 はまた排ガス中のアルカリ分とも結合してアルカリ硫酸塩を生成し、ダストに集まるのでセメントダストのアルカリ分量も多くなる。SPキルンによるセメントの製造方式では、アルカリ濃度の高い排ガスは熱経済と大気汚染防止のためそのまま系外には排出されず、原料プレヒーターに導かれて原料粉末の乾燥・予熱に利用される。また、以前にはその大半が捨てられていたセメントダストは現在、そのほとんどが原料に戻されている。以上のサイクルは原料中のアルカリ分を周期的に増大させる。このようなセメントクリンカーの製造系内にあるアルカリ濃度の増大は、一定の品質のセメントを製造するうえで数々の問題を引き起こす。

セメント中のアルカリ分の異常な増大はただ単にアルカリ骨材反応の危険性を増すばかりでなく、強度の低下を招いたり^{10),12)}、凝結時間の調節を困難にしたり¹¹⁾、乾燥収縮を増大させたり⁹⁾、硬化後に異常膨張を起こす⁹⁾などの好ましくない結果を生ずるからである⁹⁾。

(2) アルカリ分の増大とセメント製造上の諸問題

クリンカーの品質に及ぼすアルカリ分の影響を左右する要因は、主として原料に含まれているアルカリの量と主に燃料から供給される SO_3 の量のバランスであるといわれている。たとえば、 SO_3 量に対してアルカリ分が相当に多い場合、 SO_3 がアルカリ分と結合してアルカリ硫酸塩となり、消費されたあと、過剰のアルカリ分はクリンカー化合物中の C_3A や C_2S と結合して $Na_2O \cdot$

注6) 燃料として用いられる石炭中にも含まれている。

表-5 クリンカー原料中のアルカリ分の一例⁹⁾

アルカリ分 (%)	石灰石原料		粘土質原料		
	石灰石	チョーク	粘土	頁石	高炉スラグ
K_2O	0.26	0.04	2.61	4.56	0.28
Na_2O	0.11	0.09	0.74	0.82	0.15

$8CaO \cdot 3Al_2O_3(NC_3A_3)$ や $K_2O \cdot 23CaO \cdot 12SiO_2(KC_{23}S_{12})$ などの化合物を形成する^{13),14)}。 NC_3A_3 は C_3A 中における Na_2O の固溶体であって、3モルの C_3A 中において1モルの CaO が Na_2O で置き換えられたものであると考えられており、同じように、 $KC_{23}S_{12}$ は C_2S 中における K_2O の固溶体であって、12モルの C_2S 中において1モルの CaO を K_2O によって置き換えたものと考えられている¹³⁾。さて、問題は SO_3 分が存在しないとき、 Na_2O や Na_2O などのアルカリ分が比較的少量でも存在すると生成する実際のクリンカー化合物の組成を大きく変化させることである。たとえば、 K_2O を1%付加すると20%の $KC_{23}S_{12}$ が生成し、その分だけ C_2S による強度発現性が減少する。同様に Na_2O を1%付加すると10%の NC_3A_3 が生成し、その分だけ CaO 量が減少する¹²⁾。

いずれの場合にもアルカリ分による CaO の置き換えが実質的に C_3S 量を増加させると同時に遊離石灰分を高めることになる。アルカリ分が増加すると遊離石灰が増加することは小野らと竹本らがそれぞれ別個に報告している^{15),16)}。以上のようにアルカリ分の増大は特に材令28日強度とそれ以降の長期強度の低下をもたらすと同時に、セメントの安定性を害し、硬化後のコンクリートの異状膨張を生ずる危険性を増すことになる。さて、アルカリ分の多い原料の使用によって明らかに材令28日強度の低下が予想される場合、どのような対策が講じられたであろうか？ あとで述べるようにせつこうの入手が容易であれば、これを原料として用い、セメント中の SO_3 分を増す方法があるが、これが困難な場合にはセメントの粉末度を高める方法が採用されたと考えられる。粉末度の高いセメントを使用するとコンクリートの乾燥収縮の増大をもたらすことは自明の理である。近年、鉄筋コンクリート床版に乾燥収縮ひびわれの多発している原因がはたして、ポンプ施工などに伴う使用水量の増加や養生の不備だけによるものなのか……よく検討する必要がある。なお、クリンカーを粉砕する際にはこれを容易にするために粉砕助剤¹⁷⁾が用いられているが、これはセメントの凝結時間を遅くするように作用し、またセメントに空気連行性を与えるのである⁵⁾。さて、アルカリ分の増大による以上のような悪影響は、クリンカー中における SO_3 の濃度が高いレベルで保持されていればかなり回避することができる。しかし、クリンカー

注7) 有機質のものが多い。

中に十分な SO_3 分が含まれていると、強度の低下や遊離石灰の増大による異状膨張の可能性は少なくなるが、アルカリ硫酸塩の量が増大するのでアルカリ骨材反応を起こす危険性が高くなっていく。しかし、それ以前に、セメント製造に大変厄介な問題が起こってくるのである。それはセメントの凝結を調節するためのせっこうの添加問題である。セメント中のアルカリ分は一般に凝結を促進させ、場合によっては異常凝結を引き起こすことがあるので、アルカリ分が増大するとせっこうの添加量を増さなければならない。すなわち、所要の凝結調節が行われる範囲で材令 28 日強度が最も高く、乾燥収縮が最も小さくなるようなせっこうの添加量は一般にせっこうの最適添加量とよばれているが、この値は C_3A 量とアルカリ量によって決まり、その中でもアルカリ量の影響が決定的である⁹⁾。さて、セメント中の SO_3 量が多くなるとエトリンジャイトの生成によって硬化コンクリートに硫酸塩膨張を引き起こすので、各国のセメントの品質規格はこの値の上限値を規定している。たとえば、JIS では普通ポルトランドセメントに対して SO_3 量の上限値を 3% と規定している。しかし、クリンカー中にすでに相当量の SO_3 が含まれている場合には、このために凝結調節の目的で添加するせっこう量が制限され、以上の制限値を超過することなしに所要量のせっこう（すなわち、最適せっこう量）の添加が不可能となる¹⁷⁾。この事情はクリンカー中のアルカリ分が多くなると最適せっこう量も増大することによりますます厳しくなるのである。あえて、上記の制限値を無視して最適せっこう量を添加すると、長期的には硫酸塩膨張などの異状膨張を引き起こす可能性を、短期的には偽凝結を起こしやすくなる。

(3) アルカリ分の増大とセメント業界の対応

アルカリ分の増大に伴う上記のようなセメント製造上の諸問題に対して内外のセメントメーカーはどのような対応をとったであろうか？ この点について触れている文献は海外のものに多く、国内ではほとんどゼロに等しい。したがって、ある部分は国外の対応から国内の対応を類推するような記述にならざるを得なかったことをお断りしておきたい。

さて、図-10 は過去 30 年間におけるクリンカー中における SO_3 量とアルカリ量の推移とセメントの製造との関係を示したものである。この図でクリンカー中の SO_3 量およびアルカリ量の推移はいずれもわが国における全般的な傾向を推測した schematic なものであり、個々の工場の状況とは直接の関係がない。この図をみると、セメント業界は昭和 44 年 11 月に JIS 改正を通じてポルトランドセメントおよび 3 種の混合セメントのせっこうの許容量の引上げを行っている。たとえば、普

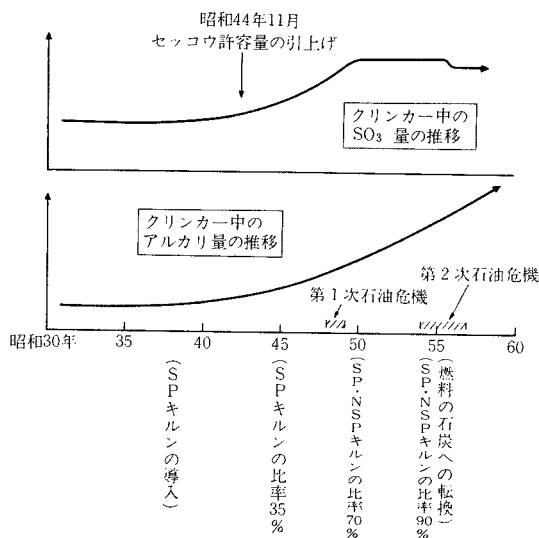


図-10 クリンカー中の SO_3 量ならびにアルカリ量の推移の概念図

通ポルトランドセメントの場合には 2.5% から 3.0% に引き上げられている。これは 4. (2) において述べた事情によるものである。すなわち、燃料中の C 重油から供給されるキルン中の SO_3 濃度は SP キルンへの本格的な転換を控えて大幅に増大し、そのまま推移すれば許容量をこえることなく必要量のせっこう添加が不可能となる事態が予測されたためである。一方、SP キルンへの転換はキルン中のアルカリ濃度も高めることになる。この場合はキルン中に十分な SO_3 量が存在する限り特に問題はないが、相対的にアルカリ分が多くなると強度低下などを引き起こす可能性があることはすでに 4. (2) において述べたとおりである。

そこで、図-10 をもう一度眺めて頂きたい。クリンカー中のアルカリ量は増大する一方であるが、 SO_3 量は第二次石油危機の最中に業界をあげて燃料を C 重油から石炭へ転換したため、やや減少に転じており相対的にはアルカリ分の増大の影響が増幅される結果となった。

3. (1) において述べたように、クリンカー中のアルカリ分は使用原料の関係で工場により大幅に異なり、 SO_3 量も使用燃料の種類や組合せによって工場間で差を生ずる。

たとえば、アルカリ分の少ない粘土を使用している工場や、粘土質原料として高炉スラグを使用している工場とはアルカリ問題は一体どこの国の話かということになるが、アルカリ分の多い粘土を原料とせざるを得ない工場では大変厄介な事態にさらされることになる。このような工場では一体どのようなことが起こるか？ 次節において述べることにする。

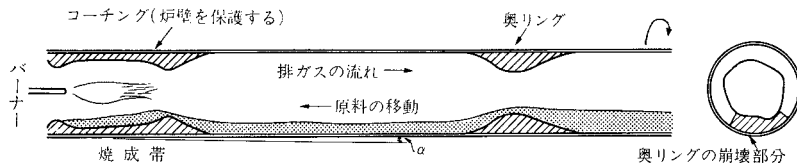


図-11 ロータリーキルンによるリングの形成とその崩壊

(4) アルカリ分ならびに SO_3 分の増大と欠陥セメント生成の可能性

すでに述べたように調合原料中のアルカリ分の約50%はキルン中において $800^\circ\text{C}\sim 1000^\circ\text{C}$ で揮発する。この酸化したアルカリ分は燃焼ガスとともにプレヒーターに導かれるが、その過程で一部は調合原料の表面に凝縮し、原料の融点を低下させ、ライニング部分にいわゆる“奥リング”⁴⁾を形成する⁹⁾(図-11)。このリングの高さは場合によっては40cmにも達することがある。ロータリーキルンは直径が3.5~6m、長さが55~100m程度であって、これが3~4.5%の傾斜で横たわり、毎分2~3回で回転して上端から送入された原料を移動させる。下端から燃料をバーナーで吹き込んで燃焼させ、焼成帯で原料を半熔融状態になるまで加熱してクリンカーを生成する。

さて、リングのような障壁が存在するとき調合原料の流れはどのようになるであろうか？これを示したものが図-11である。すなわち、原料の一部は常時リングの箇所停滞し、残りが障壁を越流して移動していることが想定される。さて、この状態が定期的に続くのであれば問題は無いが、このような奥リングは不安定であり絶えず成長してある段階になると停滞している原料の側圧などによりその一部が崩壊する。土手が切れた状態になるのでキルンの焼成帯へは通常操作の場合に比べてはるかに多くの原料と崩壊したリング片と一緒に送り込まれる。もし、残留しているリングが引き続き何回かに分けて崩壊したとすれば、キルンの断面を通過する原料の量はこの間断的に変化することになる。このような状態が発生したとき焼成帯に送り込まれた原料はどのようになるか？一般に原料中のアルカリ分が増大すると焼成温度が低下するが、それにも増して供給される原料が急増するので、おそらくかなりの部分が焼成不十分のままキルンより排出されることとなろう。焼成不十分ということは C_3S 等の水硬性化合物の生成が不完全であると同時に、遊離石灰を多く含んでいる状態であって、こ

注8) リングはアルカリ分の凝縮のみならず、アルカリ分と炉材との反応によっても生成する。またアルカリと結合した残りの SO_3 もキルン中で珪酸塩やアルミン酸塩と結合して $2(\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)_2\cdot\text{CaSO}_4$ または $4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3$ などの化合物をつくりリングを形成させる。

のようなものをセメントとして使用すると強度は十分に発現せず、あとで異常膨張を起こす可能性がある。さて、このような不良品は発見次第製造ラインから除去することができるのであろうか？現在のセメント製造設備は量産思考を先行させるため、以上のような偶発的に発生した不良品を除去するようなバイパス装置を設けているケースが少ないのである。キルンから排出されたものはそのまま冷却されたのち、クリンカーサイロに収納され、粉碎されて最終的にはセメントサイロに送り込まれるのである。さて、このような一連のリングの崩壊などに起因する原料のフラッシュ現象を含め¹⁰⁾、発生する不良品の量であるが、種々の条件によって相違することが考えられるので詳細な推定を行っても意味が少ない。そこで、一連のリングの崩壊などに起因する焼成不良品の焼出しが1時間にわたって発生したと仮定すると、これは1時間の間にキルンから排出される量を大略の目安とすればよい。キルンの規模にもよるがこの量は150~200t程度と考えられる。これだけの量が容量6000tのセメントサイロ¹¹⁾に収納されたとすれば、その中の約3%を、この不良品が占めることになる。

さて、このようなリングの形成と崩壊はどのようなサイクルで発生するのであろうか？おそらくはキルンの運転技術と使用原料によって大きく異なるものと思われるが、1週間に1回くらいのペースから年に1~2回のペースまでさまざまである。問題はたとえ回数が少なく、比較的少量ではあってもある種のセメント工場はある周期で必然的に欠陥セメントを市場に出さざるを得ない仕組になっている事実であろう。

5. 石油危機時代のセメントの品質

第1次石油危機が訪れた昭和48年からその翌年の49年にかけての2年間は多くの分野において異常な事態が発生した時代であった。大量の重油を使用するセメント産業はまさに直撃を受けたような状態であったと思われる

注9) リングのような原料の付着は、キルンのライニング部分にとどまらず、シュートや3,4段サイクロンなどにまで及び、これらが時折、大量に落下してキルンによるクリンカーの焼成条件を大きく変えることがしばしばあり、SPキルンによるセメント製造上の問題点として指摘されている。

注10) セメントサイロには全体を均一に混合する装置は設けられていない。

る。

当然のことながら、セメントの生産は停滞気味となり、大量の工事を受注していた建設会社は一時的なセメント不足に見舞われた。セメントの供給が追いつかないために、工事の中断という事態に追い込まれるケースも続出した。このような急場をしのぐために海外のセメントがまとめて輸入されたが、この中には品質不良のものがかなり含まれていたといわれている。

さて、第1次石油危機から第2次石油危機にかけての数年間に2回ほどセメントの品質が原因でコンクリートの硬化が著しく阻害されるという事故が発生し、マスコミにも欠陥生コンまたは欠陥セメントとして大きく取り上げられたことがあった。著者はこの事故を通じて、フライアッシュや高炉スラグがセメント工場ではなく、生コンプラントにおいてセメントに添加され、これが“普通ポルトランドセメント”として使用されている事実を知ったのである。しかし、McCoy⁵⁾によれば米国では高炉スラグを10～15%混入したセメントがI型セメント（わが国の普通ポルトランドセメントに相当する）として市販され、購入者はこのことをほとんど知らないということであるから、案外このようなことは各国で行われているのかもしれない。もう1つの事故は原因が公表されなかったが、一説によれば凝結調節用のせっこうが入手しにくくなったためその代替品を開発中のところ、何かの手違いによってこの代替品を大量に添加してしまったことによるといわれているが、真偽のほどは定かではない。セメントの凝結調節剤としてはせっこうのほかに塩化カルシウムや珪弗化ソーダ・珪弗化マグなどが考えられるが、後二者の添加量はせっこうに比べてはるかに

少量で済む。特に珪弗化ソーダはせっこうの1/100くらいのオーダーの量を添加しても十分にその用を果たすといわれるほど強力な水和遅延効果を有するが、一つ使用方法を誤ると“固まらないセメント”になるおそれがある。

この2,3年来、山陽新幹線の高架橋（新神戸―岡山間）の塩害およびアルカリ骨材反応による劣化問題が取り上げられ、テレビの画面などにも劣化部分が登場するケースが多くなってきた。すでに気付かれた向きもあるが、この区間の構造物を観察してまず目につくことはコンクリートの肌の異常な汚さである。一般にセメント中のアルカリ分が多いとアルカリ骨材反応や強度発現などに対する影響のほかにコンクリート表面の汚れまたは変色をもたらすことが指摘されている^{11),20)}。山陽新幹線は第1次石油危機の直後完成したが、同様な時期につくられたコンクリート構造物には前述のような汚れた肌をもつものが多い。

6. わが国におけるセメントの品質規格の問題点と規格改正の私案について

(1) わが国におけるセメントの品質規格の問題点

わが国ではポルトランドセメントの品質規格としてJIS R 5210がある。この内容は表一6に示すようなものである。この表を本文を3.の記述を思い出しつつよく凝視して頂きたいのである。物理的性質として比表面積、凝結、強度、安定性、水和熱の5つが規定されているが、問題は特に前3者の規定の仕方である。普通ポルトランドセメントの場合についてみると、たとえば比表面積であるが2500 cm²/g以上となっている。このことは粉末

表一6 ポルトランドセメントの品質規定 (JIS R 5210)

品 質	種 類	普通ポルトランドセメント	早強ポルトランドセメント	超早強ポルトランドセメント	中熟熱ポルトランドセメント	耐硫酸塩ポルトランドセメント
		比表面積 (cm ² /g)	2500 以上	3300 以上	4000 以上	2500 以上
凝 結	始発 (min)	60 以上	45 以上	45 以上	60 以上	60 以上
	終結 (h)	10 以下	10 以下	10 以下	10 以下	10 以下
安 定 性		良	良	良	良	良
圧 縮 強 さ (kgf/cm ²)	1 d	—	65 以上	130 以上	—	—
	3 d	70 以上	130 以上	200 以上	50 以上	70 以上
	7 d	150 以上	230 以上	280 以上	100 以上	140 以上
	28 d	300 以上	330 以上	350 以上	230 以上	280 以上
水 和 熱 (cal/g)	7 d	—	—	—	70 以下	—
	28 d	—	—	—	83 以下	—
酸化マグネシウム (%)		5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下	5.0 以下
三酸化硫黄 (%)		3.0 以下	3.5 以下	4.5 以下	3.0 以下	3.0 以下
強熱減量 (%)		3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	3.0 以下
けい酸三カルシウム (%)		—	—	—	50 以下	—
アルミン酸三カルシウム (%)		—	—	—	8 以下	4 以下

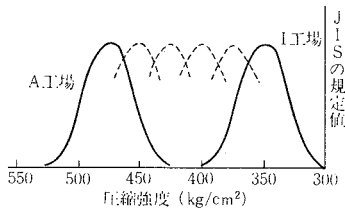


図-12 工場ごとの普通ポルトランドセメントの
圧縮強度分布概念図

度が5000 cm²/gでもこの品質規格を満足しているセメントということになる。一方、この規格には乾燥収縮の規定はないのであるから¹¹⁾、JISに規定されたセメントということでのようなセメントを使用し、乾燥収縮によるひびわれを発生させてもセメントメーカーには何の責任もないことになる。さらに問題となるのは強度である。材令28日の圧縮強さが300 kg/cm²以上と規定されているが、上限値は与えられていない。その結果、実際に生産されているセメントの強度はどのように分布しているかを、図-2などを参考にして描いたものが図-12である。すなわち、JISの規定値を満足する限界の生産を行っているI工場と、JISより50%以上も高い強度を目標として生産を行っているA工場があり、その他の工場はほぼその中間の強度を目標として生産を行っていることになる。この図よりわかることは、I工場で生産されているセメントとA工場で生産されているセメントが同一規格のセメントと考えること自体に無理があるのではないかということである。特にA工場で生産されているような高強度のセメントが普通ポルトランドセメントとして市販されていることはコンクリートの耐久性の面からみて好ましいことではない。なぜならば、所要の強度のコンクリートを得るための水セメント比が大きくなるからである。

水セメント比はコンクリートに対する炭酸ガス、酸素、水分、塩素イオンなどの透過性を支配するので、コンクリートの耐久性に大きい影響を与えることはよく知られている。ここで材令28日強度として270 kg/cm²を得るのに必要な水セメント比の値を、セメントのJISモルタルによる材令28日強度が350 kg/cm²と450 kg/cm²の場合について、日本建築学会のJASS5に示されている式を用いて計算してみると、前者の場合が約55%、後者の場合が約65%となり、セメント強度が100 kg/cm²だけ増したことにより、所要の強度のコンクリートを得るのに必要な水セメント比は10%増大する。水セメント比が55%から65%に増したことにより、各種の腐食因子の透過性がどの程度増大したかを既往の

注11) 化学混和剤の品質規格(JIS A 6204)にはこの規定がある。

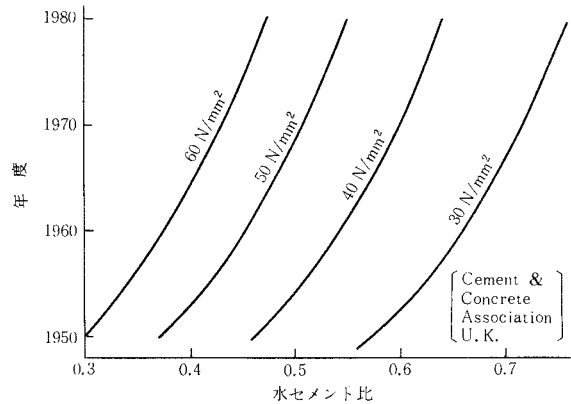


図-13 1950～1980年の間における英国のセメントの圧縮強度
の推移(所要の強度を得るために必要な水セメント比の変化)

データに基づいて調べてみると、透水係数と塩素イオンの拡散係数は約3倍、透気性は1.6倍に増大することがわかる。図-13は昨年6月に英国のセメントおよびコンクリート研究所において同研究所のBeeby博士が示したものである。同博士は英国ではこの20年来、セメントの強度が増加しているため同一の圧縮強度を得るのに要するBS規格モルタルの水セメント比が年を追って増大していることを明らかにし、このことがコンクリートの耐久性を低下させて、英国におけるコンクリート構造物の劣化問題を引き起こす引金の役割を果たしていると指摘していた。

さて、粉末度をことさらに高くしてまで材令28日強度の高いセメントをつくることの責任をセメントメーカーに帰することは酷である。型枠を1日でも早く外して経費の軽減を図るためにセメントメーカーに早強性のセメントを要求した建設会社こそ猛省しなければならない。しかし、このような事態を招いたより根元的なものは建設単価を抑制している工事発注者側にあることを指摘しておきたい。

一方、化学成分に関してはMgO、SO₃および強熱減量などが規定されているが、アルカリ量の規定はない。さて、高炉セメントの品質規格(JIS R 5211)にも問題が多い。その中でも最大の問題点は製造方法の規定にある。すなわち、規定では高炉セメントをポルトランドセメントクリンカーと水砕スラグを混合した状態で粉砕してつくっても、両者を別々に粉砕したものを混合してつくってもよいことになっているがこれらの方法でつくったセメントの品質は著しく相違し、とうてい同じ規格によって得られたセメントとは考えられないようなものが出来上がっているからである。水砕スラグが粉砕しにくいのために、これをクリンカーと混合して粉砕すれば、クリンカーのみが過粉砕され、潜在水硬性を十分に発揮させるために、本来はクリンカーよりも微粉砕することが

必要な水砕スラグが満足に粉碎されない点が混合粉碎の欠点であることはよく知られている。某官庁の研究機関で両者のセメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇を測定したところ、混合粉碎によって製造された高炉セメントの場合にはその曲線が普通ポルトランドセメントのものよりも上回ったと聞いている。現在、本州四国連絡橋の工事では海水に接するコンクリート構造物に対して高炉セメント B 種を用いているが、セメントは公団の支給であるために混合粉碎のものも分離粉碎のものも JIS に規定されているセメントとして区別なく使用されている。しかし現実には混合粉碎のものを使用したときに限って温度応力によるひびわれのトラブルが多く、建設会社の技術者の悩みの種になっている。このような意味で混合粉碎方式によって製造された高炉セメントは欠陥セメントであり、このようなセメントが JIS の品質規格を満足するセメントとして市場に出回っていることは全く理解に苦しむことである。高炉セメントに期待される諸々の特性、たとえば水和熱の低いことや耐海水性などは混合される高炉スラグの使用量に依存するところが大きい。それにもかかわらず現行の規定では高炉スラグの分量が 30% から 60% までの広い範囲のものを高炉 B 種としている。高炉スラグがこのような範囲で変化すれば高炉セメントとしての特性もかなり変わってくるのであって、これを同一種のセメントと規定することは全く不合理な話である。

(2) セメントの品質規格改正の私案について

現行のセメントの品質規格はセメントの製造に都合のよいように出来上がっていることは以上で明らかにしたとおりである。これまで何回も見直す機会もあったと思われるが使用者側の意向で基本的な部分が大幅に変更されたとか、全く新しい考え方が導入されたという話は聞いたことがない。これは何もメーカーの責任のみをうんぬんできる話ではなく、長い間このような前近代的な規格を黙って見過ごしてきた使用者側にも責任があると思われる。

さて、それでは現行のセメントの品質規格をどのように改正すればよいのか？ 表一7はその私案である。まず強度に関しては上限値を設定し、下限値と上限値の幅を 50 kg/cm² とした。一方、粉末度にも上限値を設定し、下限値との幅を 500 cm²/g とした。少なくとも工業製品と銘打って市販するのであれば、この程度の品質規格をもたなければ恥ずかしいのではないかと。私案のもう一つの特徴は乾燥収縮に関する規定値を導入した点である。化学混和剤のように、その添加量がセメント重量のわずか 1% 以下に過ぎないものに対しても、JIS の品質規格は乾燥収縮に関する規定を設けているのである。これまで、母材であるセメントの品質規格に乾燥収縮に関する規定が全く設けられていなかったこと自体、不思議なことといわざるを得ない。化学成分に関してアルカリ分の規定値を導入することはもはや動かしがたい時代の趨

表一7 ポルトランドセメントの規格改正の私案

種類 品質	低熱型	普通ポルト型				早強型	
	C-250	C-300	C-350	C-400	C-450	C-500	
比表面積 (cm ² /g)	2500~3000		3000~3500		3500~4000		
凝結	始発	1 h~4 h		1 h~3 h		1 h~3 h	
	終結	3 h~6 h		3 h~5 h		2 h~4 h	
安定性	良						
圧縮強さ (kg/cm ²)	1 d	—	—	—	—	90~140	120~170
	3 d	45~80	70~150	100~150	130~180	180~250	200~300
	7 d	80~130	130~180	180~250	200~300	300~350	350~400
	28 d	250~300	300~350	350~400	400~450	450~500	500~550
乾燥収縮注1) (×10 ⁻⁴)	1 W	5 以下					
	4 W	12 以下					
	8 W	14 以下					
水和熱 (cal/g)	7 d	70 以下	—	—	—	—	—
	28 d	83 以下	—	—	—	—	—
MgO (%)	5 以下						
SO ₃ (%)	3 以下				3.5 以下		
Ig. loss (%)	1.5 以下						
R ₂ O (%)	0.6 以下						
C ₂ S (%)	50 以下	45~55			60~70		
C ₃ A (%)	4~8	—	—	—	—	—	

注 1) JIS A 1125 「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」による。
1:2 モルタル, W/C=60%, 20°C, 60% R.H.

表—8 高炉セメントの種類

種類	高炉スラグの分量(重量%)
A 種	30 をこえ 45 以下
B 種	45 をこえ 60 以下
C 種	60 をこえ 70 以下

勢であろう。

さて、もう1つの大きい問題は高炉セメントの品質規格である。何はともあれ、混合粉碎方式による製造はJISから除外すべきである。JISが欠陥セメントのイチジクの葉的な役割を演ずることになっているからである。私案(表—8)では前述した高炉セメントB種のスラグ量は45%から60%までとしてその範囲を小さくし、新たにスラグ量が30%から45%までのものを高炉セメントA種とした。

従来の高炉セメントA種はそのスラグ量の範囲(5~30%)からみてとうてい高炉水砕スラグの特徴が発現されるとはいいがたく、この意味からも“高炉セメント”と名乗ることは羊頭狗肉の感がある。そこで、これを規格外としたのである。粉碎助材にどのようなものを使用するかについての規定も必要であることはいうまでもない。

7. セメント業界に望むこと

著者が昭和29年に大学を卒業してある官庁に就職したときの初任給が8700円であり、その当時のセメントの1t当たりの価格は6500円か7000円程度であったと記憶している。それから約30年を経過した現在、国家公務員の初任給はおそらく15倍になっていると思われるが、セメントの値段は1.5倍程度にしか達していないのである。これはこの30年間、セメントメーカーがセメント生産の合理化を徹底して押し進めてきた成果であり、さらにその生産量も世界で2位か3位を争う規模にまで発展させて、わが国の高度成長の基盤となったエネルギーおよび交通施設などのインフラストラクチャーの急速な整備を可能にした。

このような意味で、今日のわが国の繁栄にセメント産業の果たした役割を無視することはできない。

しかし、問題はセメントの品質が犠牲にされたことであろう。セメント業界は昭和54年10月にJIS改正を通じて普通ポルトランドセメントに高炉水砕スラグ粉末やフライアッシュまたは石灰石粉などを混和材として最大5%まで増量材として添加できるようにした。目的は省資源・省エネルギーということであるが、著者は何故にセメント業界がこのような措置をとったのか理解に苦しむのである。たとえ5%であっても年間を通じた燃料の節減額は無視できない……ということであろうが

結果的にはセメントの単価を据え置く方向に作用し、さらにセメントの品質に対するイメージを低下させることになったのである。もし、省資源・省エネルギーを目的とするならば、フランスのように高炉水砕スラグを15%か20%まで混合したものを普通ポルトランドセメントに含めるくらいの改正をした方がわかりやすく、むしろセメントの品質のイメージアップになったのではないか？ この程度のスラグの混入がセメントの品質を低下させる要素は考えられないのであって、むしろプラスに作用すると考えた方がよい。この点を十分にPRして単価の引上げを図ればよいのである。

もちろん、この5%の増量材を粉碎助剤として用いることにより早期強度の増進に役立つということであれば話は別であるが、ともあれ、このことがセメントの化学分析値の意義を変えてしまったことを指摘しておきたい。

セメントの品質が、製造の合理化の犠牲になった“つけ”は、本文において著者が指摘した問題点をただちに是正したとしても、おそらく今後少く見積っても10年間はついて回ることになる。

セメントはその製造過程からみて、ある程度の品質の変動は避けられないように思われる。もし、そういうことであるならば、その実態を明確にして欲しいのである。

ユーザーはそのような現実を十分に考慮したうえでこれを使用することになるから、あとになって考えてもいなかったような後遺症に悩まされることは回避できるからである。

本文では各方面に及ぼす影響を考慮して具体的な事例にふれることを極力避けたものであるが、思いもかけないコンクリート構造物が次々と“コンクリートの癌”に侵食されてゆく現状をみると、われわれは大変な事態に遭遇していることを痛感すると同時に、もしこの時点で大規模な地震に見舞われたら一体どのような状態になるか？……考えるだに背筋の寒くなる思いである。

アルカリ骨材反応による劣化に関して、“反応性の岩石を使わなければよい”とか、“セメント中のアルカリ分はこの10年間このかたほとんど変化していない”とか、“ドイツのセメントではアルカリ量が1.5%にも達するものがある”とか、“アルカリ量が0.6%以下のセメントを使用しても膨張してひびわれを生じた例がある”といった、目前の火の粉を振り払うような姿勢ではなく、火事そのものを消し止めてしまうくらいの決断を、セメントメーカーに期待したい。

すなわち、“今後セメントメーカーとしては、低アルカリで品質の保証されたセメント以外は、セメントとして一切出荷するつもりはない”くらいの決意を示すことが、わが国の基幹産業の1つであるセメント業界の取る

べき姿勢ではないであろうか？

8. おわりに

写真一は去る昭和39年の新潟地震にも耐え、50数年の星霜を閲してなお健全な姿をみせている万代大橋である。設計者はわが国の橋梁工学と鉄筋コンクリートの分野に多大の業績を残された故福田武雄先生である。コンクリート構造物は設計・材料・施工の三拍子が揃ってはじめて耐久性の優れたものができるのである。大正から昭和にかけて材料・施工の面で巨大な足跡を残された故吉田徳次郎博士が今日のコンクリート構造物の劣化状況をご覧になったとしたら一体どのような感慨を洩らされるであろうか？ このことを考えると、あとに続く者の責任は重く問題が奈辺に存在するかを徹底的に検討して極力その解決を図り、後世に品質の優れた構造物を残すよう最大限の努力を払うことがわれわれに課せられた義務であると考え、セメントに関してはほとんど門外漢に等しい著者があえて標題のようなテーマについて執筆した理由はまさに以上のような趣旨によるものであり、アルカリ骨材反応をはじめとするセメントの品質に起因するコンクリート構造物の劣化問題が、深刻な様相を呈しはじめている現状に鑑み、あえて今の時点で本文をとりまとめたものである。



写真一

参考文献

- 1) セメントの常識, セメント協会, 1983. 11.
- 2) セメント年鑑 (昭和59年版), セメント新聞編集部編.
- 3) 村橋: 最近11年間のわが国セメントの品質の推移, セメントコンクリート, No. 379, 1978. 9.
- 4) たとえば日刊工業新聞9月5-7日付の記事「動きはじめて

た共同会社 セメント構改5社の社長に聞く」

- 5) McCoy, W. J. : Change in Cement Manufacture and Its Effect on the Properties of Cement, Master Builders Symposia, 1976. 1.
- 6) 小野・宗田: 現在わが国で市販されているポルトランドセメント中のアリットおよびベリットの性状と水和強さとの関係, セメント技術年報, 19, 15, 1965.
- 7) 英国のセメント会社の技術資料 (1981) による.
- 8) 高木: Characterization とあと・さき, Gypsum & Lime, No. 190, 1984.
- 9) Jawed, I. and Skalny, J. : Alkalies in Cement: A Review, 1. Forms of Alkalies and Their Effect on Clinker Formation, Cement and Concrete Research, Vol. 7, pp. 719-730, 1977.
- 10) Kriner, R. W. : Preheaters and Product Performance, Mill Session Papers, M-204, Portland Cement Association, 18-21, 1977. 9.
- 11) Frohnsdorff, G., Clifton, J. R. and Brown, P. W. : History and Status of Standards Relating to Alkalies in Hydraulic Cements in Cement Standards—Evolution and Trends, STP 663, ASTM Philadelphia, 1977.
- 12) Hogan, F. J. : The Effect of Alkalies on the Properties of Portland Cement, Task Group Report to ASTM C 01.32 on Alkalies, 1978. 10.
- 13) Lea, F. M. : The Chemistry of Portland Cement and Concrete, 3rd Edition 71, 1971.
- 14) Taylor, H. F. W. : The Chemistry of Cement, Vol. 1, 97-98, 1964.
- 15) Ono, Y. et al. : On the Influence of Na_2O , K_2O and MgO on the Development of Strength of Portland Cement Mortar, Rev. 23rd Gen-Mtg, Cem. Asscn., Japan, 1969.
- 16) Takemoto, K. et al. : The Effects of Na_2O and MgO in Clinker on the Strength of Portland Cement, Rev. 17th Gen. Mtg. Cem. Asscn., Japan, 1962.
- 17) Spellman, L. U. : Some Opportunities to Offset Poor Quality Characteristics of High-Alkali Cement, Cement, Concrete and Aggregate, Vol. 5, No. 1, 1983.
- 18) Moir, G. K. : Improvement in the Early Strength Development of Portland Cement, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 310, 1983.
- 19) Pettifer, K. and Nixon, P. J. : Alkali Metal Sulphate-A Factor Common to both Alkali Aggregate Reaction and Sulphate Attack on Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 10, No. 2, 1982.
- 20) Mindes, S. and Gilley, J. C. : The Staining of Concrete by an Alkali-Aggregate Reaction, Cement & Concrete Research, Vol. 3, No. 6, 1973.

(1984. 12. 18・受付)