



コンクリート工学における最近の話題

国 分 正 胤*

コンクリートは代表的な建設材料であるので、わが国におけるコンクリートの年間製造量も 80 000 000 m³ に達している。この量は地球を一周する巾 9m の舗装コンクリートの量に相当するべく大なるものである。コンクリートらしきものの起源はローマの遺跡であると思うが、これは、焼成した石灰と火山灰との粉末を混合して造ったものと想像する。2000 年の昔から似たようなものができていたのに、今のコンクリートはさっぱり進歩していないではないか、とお叱りを受けるかも知れないが、品質のよいコンクリートを、経済的に、迅速に、造れるように進歩したのが、今日のコンクリート技術であると思う。2000 年前のコンクリートがどの位の強度であったかわからないが、セメントが工業的に生産され始めてから工業の発達にともなって、コンクリートの強度は格段の進歩を続けている。例えば、この 50 年間で考えてみても、コンクリート部材の設計において基準とするコンクリートの圧縮強度 σ_{28} は、1910 年頃は 100~140 kg/cm² であったが、現在では、鉄筋コンクリートで 250~300 kg/cm² プレストレスト コンクリートで 350~450 kg/cm²、舗装では 400 kg/cm² 程度である。すなわち 50 年以前にくらべると、3 倍の強度のコンクリートが広く使用されている。

コンクリート技術の進歩を分けると、設計方法の進歩、材料の進歩および施工方法の進歩に分けられると思う。この講演は、材料の進歩を主体としたものである。

コンクリートを造る材料としては、まず第一にセメントがある。前記のように大量なコンクリートの需要に応じて、セメントの生産も増大の一途をたどり、今日では 20 会社の 47 工場 で年間 22 000 000 t 以上が生産せられ、この生産量は、アメリカ・ソ連・西ドイツにつき世界第 4 位のものである。わが国のセメント工場の特徴は、完備した大型設備を持っていることで、1 工場当りの平均年生産能力は 600 000 t である。この値はアメリカの 350 000 t をしのぐものであって、キルン 167 基のうちロングキルンは 30 基であり、わが国のセメントは大型で高能率の設備で製造されているといえる。

この数年間におけるセメント界のきわ立った進歩は、ダム用ポルトランドセメント、道路用ポルトランドセメントおよび混和材料、等に関するものであろう。セメントにおける混和材料は、ポルトランドセメントの欠

* 正員 工博 東京大学教授、工学部土木工学科

点を補うためのものである。すなわち、浸食性溶液に対する抵抗を大きくするため、長期における水密性・耐久性・強度、等を改善するため、ウォーカビリチーを改善するため、等の目的のものである。従って、混合セメントは原則的にはポルトランドセメントより高級なもので、価格も高くして不思議はないのである。先般、フライアッシュセメント・シリカセメント・高炉セメントの 3 種について、それぞれ、A・B・C の 3 種類、合計 9 種の JIS が新たに制定された。しかし、これらの混合セメントの中には、ポルトランドセメントの品質改善というよりは、価格を下げるために造られたと思われるものもあるようである。混合セメントの研究は非常に進んでいるが、製造面で研究成果を全面的に活用しているとは限らない。良いものもあるが、また、検討を要するものもあるという実情である。従って B 種や C 種の混合セメントを用いる場合には特に慎重な考慮が必要であると思う。

中庸熟ポルトランドセメントは、長期強度が優れ安定で水和熱が低く、すでに相当数のダムで使用され、好成績をあげているものも多く、ダム以外の比較的マシブな部材にも適当であることが実証されているので、一般の土木構造物用として広く活用されることを望む。

道路用に適当なセメントといっても特殊なものではなく、普通ポルトランドセメントの化学成分を幾分変えるとともに、微粒子分を少なくすれば、これを用いたコンクリートの収縮は少なくなり、材令 28 日以後の曲げ強度も大きくなることはわかっている。道路ブームの今日、この種の研究成果にそったセメントが市販されないのが、奇妙にすら思われる。発注者側から製造者側に適当な方法で強く要望する必要があると思う。

セメントの JIS についていうと、他の工業製品と比較して非常に異なっている点は、JIS の規格値をはるかにオーバーした製品が造られていることであろう。例えば、普通ポルトランドセメントの 28 日圧縮強度は、規格値は 220 kg/cm² であるのに 35 年度の全国製品の平均値は 405 kg/cm² にもなっている。セメントが風化する製品であることを考えれば、ある程度まではやむを得ないことだが、あまりにも強度特に短期強度が強過ぎるのである。あまりに短期強度の強いものには、ひびわれを生じたり 28 日以後における強度の増加が少なくなったりする傾向がある。セメントの選定に当たっては、現状では、強度よりもむしろ安定性および均等性を重視して

いただきたいと思う。この現状に関連して、“どんな場合にも合格する JIS では意味がない。JIS の強度規格値を上げよう”と主張するグループがある。これは慎重を要することで、規格値を上げれば製品の短期強度はさらに上り、前記の悪影響は一そう著しくなると予想される。現行の規格値よりさらに高めることは望ましくない。

JIS に規定するセメントの試験方法を大中に改正すべき時期が来ている。現行の方法は、水セメント比が 65% であり、ブリージングも著しく、土木工事を対象とする場合には適当でない。改正の案は日本セメント技術協会が研究されているが、皆様方にも、この改正に関心を持っていただき御研究願ひ、良い新しい JIS が出現するように念じている。

近年フライアッシュが、ダムその他の水理構造物のコンクリートに広く用いられている。フライアッシュは良いポゾランであって、セメントの適当量、例えば 20~25% をフライアッシュで置きかえれば、養生状態の良い場合には、経済的であるばかりでなく、長期における強度・水密性・耐久性等を改善し、硬化熱を緩和する利点がある。写真-1 に示すようにフライアッシュの特徴は、粒形が円いことであり、これは他のポゾランには見られないことである。しかし、セメントと同様に粒は凝集する傾向がある。写真-2 は、セメントとフライアッシュの混合物にポゾリスを混入した溶液を加えた場合の写真であって、セメントおよびポゾリスが分散されることが示されており面白いものである。

写真-3 は日本セメント K K 研究所の山崎寛司氏の研究であり、フライアッシュを混合したセメントペーストの材令 28 日における破断面の電子顕微鏡写真（レプリカ法）である。フライアッシュの表面は平滑であってポゾラン反応がまだほとんど起っていないことが示されている。しかし、コンクリートの強度にはフライアッシュの影響が現われるのである。山崎氏は研究の結果、ポゾラン反応が起らなくても、強度増進が至当であることを明快に説明している³⁾。

コンクリートの養生温度が高い場合には、フライアッシュの使用は、長期における強度特に引張強度が増進して有利になる。従って蒸気養生を行なう工場製品のコンクリートでは、フライアッシュの使用が有利になる場合が多い。関西電力 K K の新黒部川第三発電所建設工事においては 100°C の岩盤に取水トンネルを掘削している。このトンネルにおけるコンクリートライニングの施工方法について、東京大学と日本セメント研究所と協同で研究しているが、現在までにフライアッシュを用いるのが有利であることが実証されている。

フライアッシュの欠点は、火力発電所の副産物であるために、炭素含有量や粉末度が変動しやすいことであろう。そのためよほど良質のものでないと、AE コンクリ

写真-1 フライアッシュ

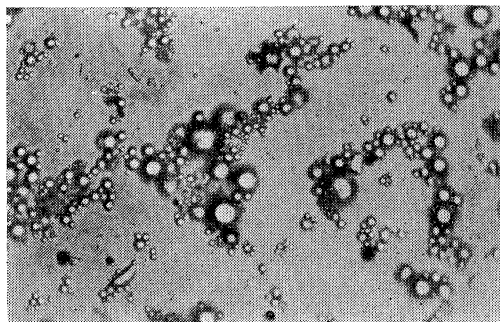


写真-2 セメント 70%、フライアッシュ 30% の混合物、ポゾリスを混入した水に溶したもの

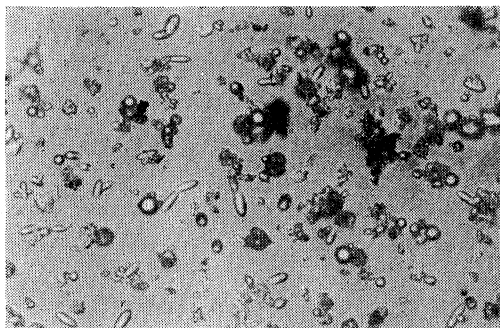
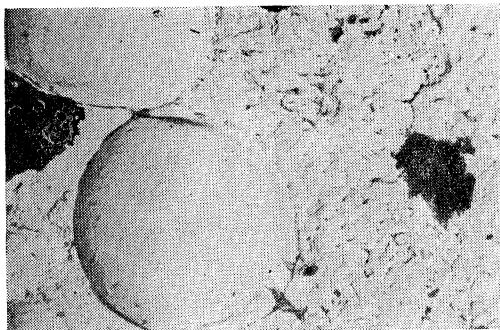
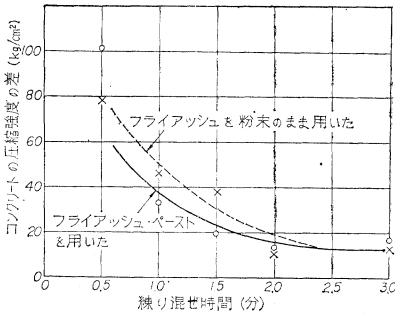


写真-3 フライアッシュセメントのペーストの材令 28 日における破断面の電子顕微鏡写真（フライアッシュ粒がぬけ出した凹面が見えている）



ートの場合に、炭素に吸着される AE 剤の量が変動し、従って空気量の管理が容易でなくなるのである。これを解決するための最も実用的な方法は、粉末のまま使用せず、あらかじめ水に溶し、ペーストとして大量に貯蔵して用いることにあると思う。このアイディアをどこかの工事現場に生かしたいと念願していたが、電源開発 K K の奥只見ダムで実用され現場試験を行なうことができた。図-1 は奥只見ダムの 3 m³ (112 切) ミキサで粗骨材の最大寸法 150 mm・単位セメントフライアッシュ量 160 kg/m³・フライアッシュによるセメントの置き換え率 30%・スランプ 2 cm のコンクリートを練り混ぜた試験結果の一例であって、ペーストとして用いれば、コンクリートのウォーカービッチが改善され、練り混ぜ時

図一 練り混ぜ時間が、ミキサ中におけるコンクリートの強度の差におよぼす影響



間も短縮できることが示されている。なお、ペーストとして用いれば空気量の管理が容易になることが実証されたばかりでなく、固まる傾向のあるフライアッシュでも容易に使用することができるようになり、ペーストとするための設備費は低額ですむことも明らかにされた²⁾。

AE剤がわが国で使用され始めてから、まだ12年にしかならない。大工事に用いられたのは中部電力の平岡ダムが最初で、当時は藤本 得所長の英断に感服したもので、以来実によく普及したものである。これは、いちじらしい利点があるからであって、その利点としては耐久性が良くなることとウォーカーピリチーが良くなることがあげられる。従って2つの利点のいずれを利用するかに

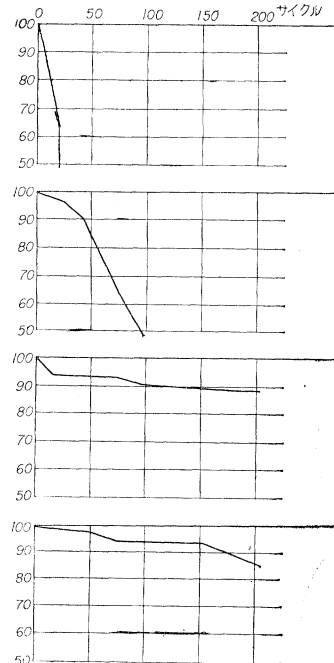
よって所要の空気量が定まる。ウォーカーピリチーを利用する場合には、所望のウォーカーピリチーが得られる範囲内で、少ない空気量とするのが得策であると思う。図一2は粗骨材の最大寸法を25mmとし空気量を相違させて同じウォーカーピリチーのコンクリートを造り、凍結融解試験を行なって比較した一例であって、試験を開始する時期における強度を同一としたものである。図一2には、エントレインドエアを1~1.5%増加しただけで凍結融解に対する耐久性が、いちじるしく改善されることが明瞭に示されている。この試験における供試体は寸法が小さく四周から急激な凍結を受けていること、凍結融解がきわめて急速であること、等を考慮すれば、わが国では気象作用に対する耐久性を必要とする場合にも一般に空気量をそれほど大きくする必要はないと思われる。また、良好なAE剤を用いたAEコンクリートの耐久性試験方法としては、表面剝離試験の方が適当であることを示唆するものと思われる。

耐久性の研究は非常に盛んであるが、あまりにも凍結融解促進試験にとらわれているのではないかと思う。この種の試験よりも現場における調査研究の方が重要であることは論をまたないと思う。国際大ダム会議のコンクリート国際委員会の研究題目の1つは“Resistance of concrete to freezing”であるが、本年のローマでの会議には、長期にわたる現場での調査研究に力を入れるよ

図一2 コンクリートの空気量が耐久性におよぼす影響

単セメント位置 (kg)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	800μ以下の気泡		28日圧縮強度 (kg/cm²)	試験を開始した材令 (日)
			全量 (%)	気泡の平均径 (μ)		
289	54	2.23 (AE剤を用いない)	1.30	232	346	14
284	53	2.85 (ビンジールを用いた)	1.73	197	338	14
292	50	3.89 (ビンジールを用いた)	2.44	177	347	14
292	47	3.83 (國産ボゾリスを用いた)	2.61	176	385	9

凍結融解にともなう動弾性係数の変化 (%)



う、わが国からも提唱する予定である。

AE剤の一種ともいえるがwater-reducing agentsが方々で使用されている。このagentは所要のウォーカーピリチーをうるに必要な水量を減ずるためのものであって、retarderとあわせて世界の話題となっている感じがする。アメリカでは年間20,000,000m³のコンクリートにこれらのagentsが用いられており、大ダム会議のコンクリート国際委員会でも研究題

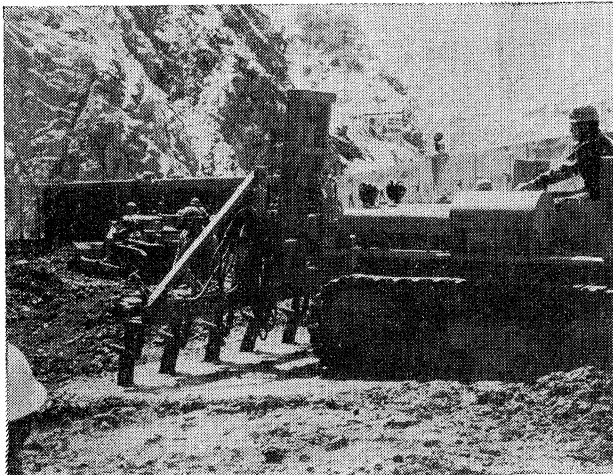
目に取り上げている。セメント分散剤はその一種であるが、最近、その優秀な国産品が出現したのは喜ばしいことに思う。アメリカの材料試験協会（ASTM）では、water-reducing agents および retarders に関するシンポジウムを一昨年暮に開いているが、その論文で、この種の混和材料の効果は、セメントの化学成分特にアルミン酸三石灰の量とアルカリ量とによって相違する、と論じているのがあるが、わが国のセメントでは、これらの含有量はいずれも少なく、また、ほぼ近似した量であるので、前記の国産品は、どのセメントの場合にも、相当有効に働くものと思う。

表一 ダム コンクリートの配合

	黒部川 第四ダム	奥只見ダム	
		内 部 コ ン ク リ ー ト	表 面 部 コ ン ク リ ー ト
粗骨材の最大寸法	180 mm	150 mm	
細骨材	川砂	砕砂	
中 庸 熟			
ボルトランドセメント	200 kg/m ³	98 kg/m ³	147 kg/m ³
フライアッシュ	—	42 kg/m ³	63 kg/m ³
単 位 水 量	89 kg/m ³	96 kg/m ³	102 kg/m ³
水 セ メ ン ト 比	45%	69%	49%
空 気 量	3% (ボゾリスを用いた)	4% (ビソゾールを用いた)	
ス ラ ン プ	3 cm	3 cm	
圧 縮 強 度	28 日	397 kg/cm ²	
	3 月	146 kg/cm ²	314 kg/cm ²
	6 月	192 kg/cm ²	369 kg/cm ²

コンクリートを造る場合には、所望のウォーカーピリチーが得られる範囲内で、できるだけ単位水量を少なくするのが原則である。それで、施工機械の進歩と相まって非常に硬練りのコンクリートが用いられ始めた。その一例をあげれば表一のようにあって、特に黒部川第四ダムのコンクリートの単位水量は僅かに 89 kg/m³ である。この傾向は喜ばしいことではあるが、あまりに硬過ぎて内部振動機を引抜いた孔がコンクリート中に残るようでは欠点を残すことになり、かえって悪いことになる。

写真一 黒部川第四ダムにおけるコンクリートの締固め



このおそれを解消するには振動機の操作を機械的に行なう必要がある。それで、有峰・黒部川第四・奥只見、等のダムでは、写真一に見られるように、振動機を6台取りつけたビームをフォークリフト状に上下に操作して、硬練りコンクリートを締固めている。6台の振動機が同時に働くので締固め効果は甚大で、しかも一定の間隔に振動機を押し込むことが可能となる。この種の締固め装置の活用によって、コンクリートの単位ペースト量は一そう節約されるものと思う。

国際大ダム会議は3年ごとに大会を開くが、本年は第7回の大会がローマで開催される。今回の論題の一つは“大ダム用コンクリートの骨材の選別、処理および示方書”であって、わが国からこれに対して4編の論文が提出されたが、特に注目すべきものは奥只見の研究である。奥只見は適当な川砂がないので、細骨材はカコウ岩をロッドミルで砕いて造っている。ロッドミルで造った砕砂の粒度分布について実験研究を重ねた結果、均等で良質の細骨材を経済的に造ることに成功した³⁾。奥只見ダムの内部コンクリートの単位セメント量は 140 kg/m³ (セメント 98 kg/m³, フライアッシュ 42 kg/m³) 程度に過ぎないが、その品質のばらつきは、材令6月における圧縮強度の変動係数で 15~17% 程度に管理されている。これは砕砂の製造方法の研究に負うところ多大であると思う。

昨日から今日にかけて、講演会で皆様方の貴重な研究の発表があるが、何かの都合で今回発表されないものうち、特に優秀な研究を、次に御紹介したいと思う。電力中央研究所の西沢紀昭氏は、互いに直交する方向に引張応力と圧縮応力が作用する場合におけるコンクリートの強度について研究し、実験値を整理して、次に示す簡単な関係式を導いている⁴⁾。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_t} + \frac{\sigma_3}{\sigma_c} = 1$$

ここに

- σ_1 : 組合せ応力によって破壊する場合の、コンクリートの引張応力度
- σ_3 : 組合せ応力によって破壊する場合の、コンクリートの圧縮応力度
- σ_t : 単純引張りを受ける場合の、コンクリートの引張強度
- σ_c : 単純圧縮を受ける場合の、コンクリートの圧縮強度

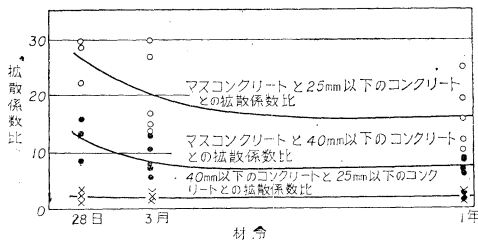
ダムのコンクリートには直交する二方向から圧縮と引張りとが作用する部分があるので、コンクリートの配合を定めるような場合、単純圧縮を基準とするのが合理的でないことは明らかである。この研究は、このような問題を解決する場合の示唆を与えているものと思う。

樋口芳朗氏は、地盤その他の微細な空隙にグラウト注入を行なう場合の混和材料の研究の中で、

アルミニウム粉末としてはフレーク状のものが有効で、針状・粒状およびアトマイズ状のものは、いずれも効果がないことを示し、その理由を説明している⁹⁾。アルミニウムは各種グラウトに広く用いられるが、そのような場合に、この研究は貴重な資料として役立つものと思う。

コンクリートの水密性を試験する場合、十分に養生したコンクリートでは、水圧を加えても水が反対側に流出して来ないので試験が困難となる。都立大学の村田二郎氏は、このような場合は、コンクリート中における水の浸入深さを測り、その深さと水圧の大きさおよび水圧を加える時間とから拡散係数を求め、これを水密性の尺度

図-3 コンクリートの拡散係数比



とすることを考案した。そしてマス コンクリートの水密性と、マス コンクリートから 25 mm 以上の粗骨材を取り除いたコンクリートの水密性との間には、図-3 に示すように、配合にかかわらず、ほぼ一定の関係があることを示している⁹⁾。この関係を利用すれば、ダム コンクリートの水密性試験が非常に容易になると思う。

強硬な骨材を用いたコンクリートを入念に打込み締固めた場合におけるコンクリートの強度とセメント水比との関係は、ほぼ直線で現わされるが、用いる混和材料が相違したり、養生状態が相違する場合、等にはそれぞれ別の直線となり一本の直線にはならない。山崎寛司氏

は、ペーストの単位容積中の固相*の容積をパラメータに採れば、この単位固相容積と強度との関係は、前記の相違がある場合でも、すべて一つの曲線で現わしうることを明らかにしている¹⁾。これは コンクリートの強度がペーストの緻密さの程度で定まるといふ主張であって、非常に面白い研究と思う。

気のついた研究結果を以上のように紹介したが、このほかにも貴重な研究が数多くあると思う。わが国のコンクリート工学は、トップ レベルのものは昨夜の新会長の話しのように世界の最高水準にあると信ずる。しかし研究の層の厚さは、残念ながら一流国にくらべて薄いと認めざるを得ない。コンクリートの工事量は、前述したように非常なもので、世界第 4 位である。研究が一そう活発となり、研究成果が工事現場でも活用されて、コンクリート技術が日に月に進歩することを念願して講演を終る。

参考文献

- 1) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートにおよぼす効果に関する基礎研究，土木学会論文集に発表予定
- 2) 国分・三村・上野・細谷：ペーストによるフライアッシュの使用に関する研究，土木学会論文集第 71 号・別冊(4-3)，昭和 35 年 12 月
- 3) M. Mimura, I. Ueno et H. Hosoya: "Production des agregate pour la construction du barrage d' Oku-Tadami", 7th Congress of Large Dams, Quest. 24, R 29 (1961)
- 4) 西沢紀昭：引張と圧縮との組合せ 荷重を受けたコンクリートの強度，電力中央研究所 技術研究所報へ投稿中
- 5) 樋口芳朗：微細な 空げきてん充のためのセメント注入における混和材料に関する研究，土木学会論文集に発表予定
- 6) 村田二郎：コンクリートの水密性の研究，土木学会論文集に投稿中

* 固相としては、未水和セメント・水和セメント・結合水とゲル水等の三者を考えている。
(1961 年 5 月 28 日，名工大において講演)

第 4 回 標準化全国大会研究発表講演募集

日本規格協会は、標記の「標準化に関する研究発表会開催について関係者の積極的な応募を求めている。

講演募集要領

日 程：昭和 36 年 9 月 11 日(水)、12 日(木)……特別講演，研究発表会，パネル討論会。13 日(金)工場見学会。

会 場：大阪商工会議所

講演時間：20 分 質疑応答 5 分

内 容：工場事業所等で体験された標準化の実施例，効果，調査結果，研究結果など。

申 込：昭和 36 年 7 月 31 日までに下記事項を記入して申込むこと。

(1) 研究発表者の職氏名，所属会社工場名，同所在地

(2) 研究発表題目

講演要旨：400 字詰原稿用紙 20 枚以内にまとめ昭和 36 年 8 月 31 日までに提出すること。

申 込 先：大阪市東区安土町 2-1 安土町野林ビル内 日本規格協会関西支部大会係