

コンクリート界における 設計および材料に関する話題

総括執筆者 国 分 正 脩*
 話題提供者 尾 坂 芳 夫**
 同 岡 村 甫***
 同 山 崎 寛 司****

コンクリート・鉄筋コンクリートおよびプレストレスコンクリートは、各種建設材料のうちで最も広く普及しているものであり、わが国におけるコンクリートの年間生産量は昭和 46 年度には 1 億 3 000 万 m³ を越えている。このコンクリートで幅員 13 m の国道を舗装したとすると、その長さは地球を一周するのであって、膨大な量に改めて感慨深い。

コンクリートの歴史は古く、その設計施工の技術も時代とともに着実な進歩をとげてきたが、社会経済の著しい伸張に伴う要望によって、現在大きな転換期にさしかかっている。その要望はコンクリート工事の合理化・ひいては経済化への要望であり、これに対処するためには第一に設計方法の合理化が必要となってきた。第二にはいっそう高度な強度、とくに引張強度・耐久性・耐食性などを持ったコンクリートを開発するため、コンクリートの複合機構に立ち帰って再検討を行なう必要がある。そこで、① PC 部材の限界状態設計方法の評価、② 複合材料としてのコンクリートの特性、の 2 題の研究討論会を、昭和 46 年 10 月 2 日 16 時から東北工業大学 1 号館 14 番教室で開催した。この主題は、前記のように重要な問題であるので大きな関心を呼び、多数の人が参集した。話題提供者は、① については尾坂芳夫、② については山崎寛司および岡村甫の 3 氏であった。

話題提供者がそれぞれ約 15 分演述したのち、自由討論に移り活発な論議が行なわれ、話題提供者との間に応酬もあったが、終始明るい雰囲気に包まれ、予定時間を 20 分以上も超過するほどで、十分に所期の成果をあげ、17 時 55 分に閉会したのであって、まことに有意義な集会であった。

1. PC 部材の限界状態設計方法の評価

(1) 限界状態設計方法の発達経過

コンクリート構造の設計にあたって、特別な場合には塑性理論による終局強度設計方法を用いて、部材が破壊に対して適当な安全度を持つように、その断面を算定したり、あるいは部材の破壊に対する安全度を検討したりしている。しかし、一般の場合には、今日でもコンクリートおよび鋼材の許容応力度を規定し、設計荷重の作用時に部材各部におけるコンクリートおよび鋼材の応力度が許容応力度を越えないように、部材の断面および鋼材の配置を定める弹性設計方法を用いている。各材料の強度と許容応力度との比は、一応、安全率のように思えるが、部材が破壊荷重に近い荷重を受ける場合の応力分布は、弾性理論によるものと相当に異なってくるので、この安全率が、破壊に対する部材の真の安全度と一致しないのは当然である。

“構造物の破壊”であるが、よく考えると、この意味を厳密に定義することはむずかしい。構造物の全部または一部が載荷・疲労・等によって破壊したり、過大な変形のために使用に耐えなくなったりすることを意味すると思われるが、破壊しなくとも構造物が使用に耐えなくなることもある。たとえば、コンクリートに過大なひびわれが発生し、鋼材が腐食するおそれが生じてくれば使用上の限界に達したのであって、最近のように大気汚染がはげしくなると、鋼材の腐食は大きな問題となってくる。また、過大な振動や変位によって使用の限界に達することも考えられる。したがって、設計にあたっては、終局限界状態だけでなく使用限界状態についても検討を重ねる必要がある。

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 日本国有鉄道大阪工事局 次長

*** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

**** 正会員 工博 日本セメント(株) 研究所 主任研究員

従来の設計方法においても、この種の検討を忘れていたわけではないのであって、鉄筋の許容応力度を規定する場合には、コンクリートに生ずるひびわれの幅による制限、きびしい露出条件による制限・荷重の繰返しによる制限・等を設けている。しかし、これらの制限だけでは不十分であるし、コンクリートの応力分布を、相當なひびわれを生じたのちにも直線状と仮定する弾性理論計算式が、不合理であることは明らかである。

部材の設計を合理化するためには、それぞれの使用限界状態ならびに、終局限界状態に対して適当な安全度が与えられるように設計方法を改める必要があり、また、これが経済的設計に進む道となることも考えられる。しかし、部材を構成しているコンクリート・鋼材・等には、ある程度の品質のばらつきがあり、プレストレスの量および分布、部材の寸法および形状・鉄筋の配置・等には若干の誤差を生ずることは免かれない。また、荷重の種類は多く、設計で考慮した荷重が実際の荷重と同じであるとは限らないし、これらが変動する可能性も相当にある。したがって、各部材の強さには複雑な変動要因が含まれており、これを合理的に算定するのは容易なことではない。そこで、上記の変動の影響を確率論的に処理して計算に用いる材料強度・荷重・等に対して、特性値^{a)}ならびに設計用値を定め、これらに基づいた限界状態設計方法(Limit-state design method)が、ヨーロッパコンクリート委員会^{b)}とプレストレスコンクリート国際機構^{c)}とから国際的な設計施工指針として提示され^{d)}、にわかに脚光を浴びてきた。

限界状態と名づけられているのは、構造物の破壊、各部の変形、コンクリートのひびわれ等の各種限界状態を考え、それぞれの限界に対して検討するからである。この提案の一つの特徴は、プレストレスの有無によって、プレストレスコンクリートと鉄筋コンクリートとを区分することを改め、コンクリートのひびわれに関する考慮によって、コンクリート部材を分類していることである。すなわち、鉄筋コンクリートからプレストレスコンクリートにわたる全領域をカバーしているのである。また、従来の設計方法によると、コンクリート構造の場合と鋼構造の場合との安全度の概念が相違していて、不都合をきたすことも少なくなかった。しかし、前記の設計様式における一般原則や特性値は、鋼構造・合成構造・木構造・等にも適用できるので、設計の合理化を一步進めたものもあるといわれている。

a) 統計分布から推定される実用上の最小値(強度の場合)または最大値(荷重の場合)とする。

b) CEB (Comite Europeen du beton)

c) FIP (Federation internationale de la precontrainte)

d) 翻訳書が“コンクリート構造物設計施工国際指針”として鹿島出版会から発行されている。

(2) 話題提供者の演述要旨

a) 限界状態設計方法の特徴

コンクリートが本質的に非弾性的でひびわれが生じやすい材料であるために、鉄筋コンクリートおよびプレストレスコンクリートの諸性状を理論的に取り扱うことはきわめて繁雑である。部材および構造物は、普通の使用状態における荷重作用に対して、ある程度の余裕をもつ強さを有するように設計されるのであるが、この余裕は限界状態設計方法においては、コンクリート・鋼材・等の材料の品質の変動、構造物の形状寸法の施工誤差、荷重の変動、設計計算の近似性と誤差、等を考慮して導入されている。

CEB-FIP の設計基準によると、限界状態は、これを大別して、終局限界状態と使用限界状態とすることができる。構造物が限界状態に達する状態には、次のようなものがある。

終局限界状態

① 剛体と考えた構造物の全体または一部分の安定が失われる状態

② 構造物の限界断面の破壊

③ 構造物のメカニズムへの移行

④ 変形による不安定

⑤ 疲労の影響による劣化

⑥ 構造物の取かえが必要となるような形状寸法の変化を生ずる塑性変形、クリープ、またはひびわれ

⑦ 火災、暴風、その他による終局状態

使用限界状態

① 構造物の通常の使用に対して過大な変形

② 早期にすぎるひびわれ、過大なひびわれ

③ 望ましくない損傷(風化)

④ 平衡を失うに至らない過大な変位

⑤ 過度な振動

ひびわれの検討の条件は、次の4つに大別できる。

① クラスーI：最も不利な荷重の組合せの状態でも引張応力が生じないこと。

② クラスーII：最も不利な荷重の組合せの状態で、引張応力は生ずるが、ひびわれは発生しないこと。また、変動荷重のx倍と永久荷重のもとで引張応力が生じないこと。

③ クラスーIII：最も不利な荷重の組合せの状態で、ひびわれ幅の限界状態が維持されること。さらに、変動荷重その他のx倍が作用するときに、ひびわれ発生の限界状態または引張応力が生じない状態になること。

④ クラスーIV：ひびわれ幅の限界状態が維持されること。

限界状態と検討条件のクラスとの関係は表一1のよ

うである。

コンクリート構造物が安全かつ経済的に使用の目的を達するためには、表一1の検討を行なう必要があるとするのが、限界状態設計の基本的な理念であるが、従来から用いられてきたいわゆる弾性設計方法によっては、これら検討を行なうことができないのである。

b) 限界状態設計方法における問題点

① 記号・用語：限界状態設計方法における設計計算の体系は、荷重作用、材料強度、施工誤差、等の変動、設計計算方法の近似性、等を考えて、今日の段階で、可能なかぎり合理的なものとする意図によって構成されており、したがって、従来の設計方法では慣用されていない記号・用語を用いなければ、その新しい諸概念を表現することが困難なものが少なくない。記号については、文字の使用方法が、なるべく単純なルールにしたがっており、かつ、普遍性のあるものであることが必要である。用語は概念を正確に表現するものでなければならない。これらの記号・用語は十分に検討のうえ、一般に受け入れられるものを採用すべきであろう。

② 荷重、部材強度、等の調査・研究：限界状態にたいする安全度の概念を明らかにするため、設計計算に確率論が導入されているが、この設計計算に用いるための荷重、部材強度、等に関する統計資料が十分ではない。たとえば、荷重の特性値を統計資料をもととして定めることは、今日のところきわめて困難である。また、コンクリートの強度に関しては、円柱供試体の強度と構造物におけるコンクリートの強度との関係は、必ずしも明らかでない。現場における施工の良否に関する調査はあまり行なわれていない。これらの設計計算における諸要素の変動の実態が明らかにされ、その確率分布が理論的に取り扱われる所以なければ、限界状態にたいする安全度は概念にとどまり、その導入による実設計の改善は期待できない。

③ 設計計算：構造物の設計計算にあたって、すべての限界状態について安全度の検討を行なうことは、実用上かなり繁雑である。実際の構造物については、荷重の性質、自然環境の条件等に応じて、検討すべき限界状態がおのずと定まつてくるものと思われるが、各種の構造物についてこれらの検討を行なって、設計計算を簡略化することができるまでには、なお多少の日時を要する。

④ 安全度の値：材料の設計用強度は、材料強度の特

表一1 限界状態と、ひびわれ検討条件の関係

検討すべき限界状態		ひびわれ発生をゆるさない		ひびわれ発生をゆるす	
ひびわれ検討の種別		I	II	III	IV
終局限界状態 (耐荷能力)	最大または最小荷重による終局限界状態(施工時を含む) ⁽¹⁾	●	●	●	●
	座屈の限界状態	必要な場合		必要な場合	
使用限界状態 (一般に弾性理論による設計計算)	耐久力の限界状態(疲労)	必要な場合		必要な場合	
	引張の起らない限界状態	全荷重	0< x <1 ⁽²⁾		
	ひびわれ発生の限界状態	引張	全荷重	0< x <1 ⁽²⁾	
ひびわれ幅の限界状態	圧縮	●	●	0 ⁽³⁾	
				全荷重	0< x <1 ⁽²⁾
	変形の限界状態	設計基準のR 44.0による		設計基準のR 44.0による	

注：(1) 圧縮ひびわれ発生の限界状態の検討により終局限界状態の計算を省略することがある。

(2) x は変動荷重の一部で1年以上に長期作用するもの。

(3) プレストレッジングのときおよび施工中の大きな圧縮を受けるときに生ずる初期の微細なひびわれを避けるためである。

性値を低減係数で除した値とし、設計用の荷重は荷重の特性値に割増係数を乗じた値とするものとすると、これらの係数は限界状態、構造物の重要度に応じて、これを定めなければならない。表二2は材料強度の低減係数の例である。

荷重の割増係数 r_s は

$$r_s = f(r_{s1}, r_{s2}, r_{s3})$$

r_{s1} ：作用がその特性値以上の不利な値となる確率を考慮する係数

r_{s2} ：特性値以上のいくつかの作用が同時に作用する確率を考慮する係数

r_{s3} ：設計計算の近似性、実構造物の形状寸法の誤差等を考慮する係数

のような形であらわされる。この r_s には、構造物の重要度を考えて r_c を乗ずる場合もある。

これらの各係数の値は、理論的・経験的にこれを定める必要があり、この方法によって設計施工された部材または構造物の妥当性を実験的に確認しておかなければならぬ。とくに公共の構造物の設計においては、この点が重要である。

⑤ 施工基準との関係：設計計算に用いるプレストレ

表二2 低減係数 (r_a, r_b) の例

	普通鋼材またはPC鋼材	コンクリート
終局限界状態	$r_a=1.15$	十分注意して製造し管理した場合 $r_b=1.4$ (工場製品のプレキャスト部材)
使用限界状態		現場打ちまたは工場で製造したコンクリートで、この指針にしたがって管理した場合 $r_b=1.5$

$r_a=1$ $r_b=1$

すなわち、構造物の挙動を評価するためにコンクリートおよび鋼材の機械的性質から特性値に対応した設計用強度を決めることがある。

ッシング力の特性値を求めるために、プレストレッシング力の変動と分布状態について調査を行なうことが必要である。プレストレッシングの管理方法も、これに適応する方法でなければならない。

(3) 討論の概要

話題提供者は、前刷を参照しながら前記のように、限界状態設計方法の特徴を弹性設計方法と対比して述べるとともに、この方法をわが国へ導入する場合の問題点について論じたのである。

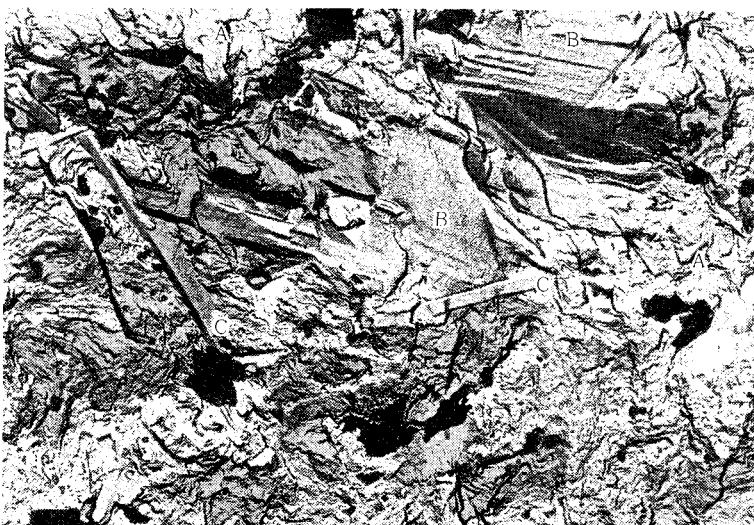
これに引き続き 6 名の会員が所信を表明したが、いずれも原則的には限界状態設計方法を高く評価していた。しかし、この種の設計方法を土木学会のプレストレストコンクリート標準示方書に導入するのは尚早であって、各種の調査研究を実施するとともに、設計理念を土木技術者に広く普及させたのちに行なうのが至当であるとの意見が支配的であった。

早急に進めるべき調査研究としては、材料強度や荷重の特性値・設計用値・その他についての検討があげられたが、従来の方法との比較検討も指摘され、わが国独自の諸調査の必要性が強調された。なお、日本建築学会との協調も要望された。

2. 複合材料としてのコンクリートの特性

(1) 複合材料の現状

最近、工学の各分野では、“複合材料”が一つの流行語のようになっている。それは、社会・経済の著しい進



A・けい酸石灰水和物および未水和セメント、B・水酸化石灰（層状結晶）
C・エトリンガイド（針状結晶）

写真-1 セメントペースト硬化体破面の電子顕微鏡写真（日本セメント（株）提供）

歩発達に伴い、各種の装置・構造体・施設等の構成材料には一段と高い性能が要求されるようになり、単種材料では、これらのきびしい要求に応じきれなくなったからである。無機質・高分子質・金属質等の適当な各種素材を複合し、主素材の特徴を生かしながら、その短所を補強すれば、主素材よりも格段にすぐれた強度・強じん性・耐久性・耐熱性・耐食性等が付与されることがあり、また、軽量化が可能となる場合もある。そこで構造用のものに限っても、各種車両・車輪・船舶・航空機・ロケット・エンジン・各種圧力容器・化学プラント用構造材・建材・その他に広く活用されはじめたのである。

しかし元来、複合構造の起源は新しいものではない。動物や植物の各部分の構造にも見事な複合構造が見出される。たとえば、木材はいずれも纖維状多管構造で補強されており、とくに竹材では表皮付近に纖維が密に分布され高度なじん性が保たれている。なお、動物の血管は纖維が縦方向と円周方向とに配置され、この補強によって適度な強じん性が保持されている。また、頭がい骨の組織は、衝撃に強くするために、サンドイッチ構造となっているのであって、造化の妙に感嘆させられる。

人工材料でも、微視的にいえば、鋼材や合金はいずれも複合材料であり、セメントペーストも、けい酸石灰水和物・水酸化石灰・エトリンガイド^{e)}・未水和セメント・空隙等から成る複合構造を呈している（写真-1 参照）。

古い歴史を誇るポルトランドセメントコンクリートもまさに複合材料であり、骨格を形成している骨材粒を、複合結合材であるセメントペーストで連結したものである。骨材の役目が、強度・耐久性などを付与するため、体積変化を軽減するため、また経済化のためなどであることは、いうまでもない。さらに、鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートは、コンクリートと鋼材とを外的に複合したものであって、現在各分野で重要視されている纖維強化のアイディアを 100 年以上も前に実用化した業績は特筆に値するものであろう。

このように、複合材料のバイオニアであるコンクリートにも多くの問題点が解決されないで残っている。その第一は引張強度の弱いことであり、第二は硬化に日数を必要とすることであり、そのほか

e) カルシウム サルファアルミニート ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaSO}_4\cdot32\text{H}_2\text{O}$) といわれるセメントバチルスである。

に乾燥収縮によってひびわれが生じやすいうこと、重量が過大であること、などがあげられる。また、他の複合材料ではマトリックスが樹脂・ゴム・金属・カーボン・ガラス・粘土などであるので問題は少ないが、コンクリートの場合には、まだ固まらないセメントペーストの粘性が低いので、施工中、材料の分離を最少にするよう留意しなければならず、その悪影響の程度を常に念頭に置いておく必要もある。

これらの問題点を解明し、コンクリートに飛躍的な進歩を促すためには、主として経験の累積に頼ってきた在来のコンクリート工学の域を脱し、コンクリート・鉄筋コンクリート・プレストレストコンクリートなどの組織構造を再検討して新しい研究方向を打ち出すとともに、在来の隔壁を打破して、樹脂・アスファルト・ガラス・その他の材料との混用も積極的に考慮する必要もある。

いずれにしても、“セメントペーストはセメント工学分野における微視的研究　コンクリートは建設工学分野の巨視的研究”という研究体制は早急に打破することが望ましいのであって、これら両分野の緊密な連係が解明の第一歩であるともいえる。

(2) 外的複合の現状

外的複合に関し話題提供者は次のように演述した。

複合材料を構成するには、金属・非金属無機質・有機高分子物質などを、かなり自由に組み合わせることができ、したがって、複合材料の種類は非常に多くなる。複合材料をその構成形態で分類すると、おおむね次の3種になる。

① ある物質（マトリックス）中に他物質の微粒が分散したタイプ

② ある物質の粒を他物質（マトリックス）で結合したタイプ

③ ある物質（マトリックス）の中に他の物質を纖維の形にして配置したタイプ

一般には③のタイプが広く用いられているが、これは力学的特性がすぐれているからである。たとえば、金属マトリックスの場合、粒子分散強化によってその強さは5~15倍向上するが、纖維分散強化によれば30~50倍程度の強さに達することも多いといわれている。

コンクリートはこの3種のタイプのいずれをも含む複合材料である。無筋コンクリートは②のタイプに属しマトリックスはセメントペーストである。鉄筋コンクリートは③のタイプであって、この場合のマトリックスはコンクリートとなる。①のタイプの例としては、コンクリート中に樹脂モノマーを含浸させ適当に処理して重合させたものがあげられる。

①および②の場合には、コンクリートにおいても微

視的スケールの相互作用や、2物質の接触面の界面現象も重要である。③の場合には、一般に複合材料を構成物質（素材）の機械的集合体として取り扱えばよいが、異形鉄筋とコンクリートとの付着や、はりのせん断性状などを解明するためには、マトリックスであるコンクリート自体を、さらに②のタイプの複合材料として取り扱う必要もある。

コンクリート自体をマトリックスとした複合材料をコンクリートの外的複合材料と呼ぶことにすれば、樹脂コンクリート・鉄筋コンクリート・プレストレストコンクリートなどが、この種の複合材料であろう。複合材料としてのコンクリートの特徴の一つは、それを構成しているマトリックスであるコンクリートが、すでに複合材料であることであって、単に2種類の单一材料からなる複合材料としては取り扱えない場合のあることである。さらに著しい特徴は、他の複合材料に比べてマクロなことであって、分散強化に相当する粒子が粗大であり、纖維強化に相当する鋼材は著しく太いが使用量が少ないとある。すなわち、他の材料では、目的によって種々異なるが、粒子の直径は0.01~0.1μ程度であり、纖維の直径は1~30μ、含有率は30~50%であって、荷重の大半を纖維で負担されるように設計されるのが普通である。

上記のような大差はあるが、纖維による強化機構については、纖維の強さ、纖維とマトリックス界面の接着強さ、マトリックスのせん断強さ、などに分けて論じており、力学的解析は鉄筋コンクリートと同様な理念によっている。また、一方向強化材・直交異方性板などの理念や、線巻き（filament winding）技術にも、鉄筋コンクリートとの共通性が認められて面白い。

従来、相互の情報交換がほとんど行なわれていなかつた分野であるが、セメント・コンクリートとプラスチックや、金属などの数分野が緊密に連係して研究を進めれば、思いがけない進展も可能になると思われる。他分野の研究者と懇談した機会に、コンクリートにおける骨材の粒度について説明し、われわれが慣用している粒度管理方法が、先方の粒子分散強化手法に有効であると感謝され、意外に感じたこともある。プラスチックその他の分野における短纖維による強化の理論や、積層板・サンディッシュ材などの理論には、鉄筋コンクリートに対する貴重な示唆となるものも見受けられる。

(3) 内的複合の現状

内的複合に関し話題提供者は次のように演述した。

コンクリートは、巨視的にみれば骨格素材である骨材を結合素材であるセメントペーストで結合した複合材料とみることができる。別の見方をすれば、cmオーダーの

粗骨材粒子から Å オーダーのセメント水和物粒子までを含む各種寸法の粒子の集合体であり、その間に水および空気が介在し、各粒子も水も詳細にみれば、それぞれの特性が化学的・物理的に著しく相違するものによって構成されている。

したがって、コンクリートの諸性状を解明するには、これらを構成している諸成分のそれぞれの性状を明らかにするとともに、成分相互の複合機構を解明して、総合的に検討する必要がある。しかし、現在までのところでは、セメントペーストにおける微細構造と、その化学的・物理的性質との関係がやや詳細に解明されつつある段階で、結合素材であるペーストの分野でも、まだ解明すべき多くの問題が残されているほか、各成分の複合機構や、複合材料としてのコンクリートの特性や挙動に関する研究などは、ほとんどその緒についたばかりと考えられる。そのために、高分子材料の利用など他材料との高度の複合を考える場合、いつまでも経験を主体とする試行錯誤的な研究が進められているようにも思われる。コンクリート工学の進歩とコンクリートの利用面の拡大のためには、コンクリートの基礎的な面の研究をいっそう推進することが、ぜひとも必要であると考えられる。

a) セメントペーストの構成

① 水和および水和物：ポルトランドセメントの水和は、ほぼ図-1のように説明されている。練り混ぜた直後のセメントペーストは、薄い水和物の被膜におおわれたクリンカ粒子が相互に接合して図-2のように羽毛状構造をなしている。水和はクリンカの成分により solid state reaction と through solution reaction とが併行して進行する。クリンカ成分の主体をなす、けい酸石灰の水和は前者であるとみられ、水和物の多くはセメント粒子周辺に漸次析出する。羽毛状構造の間隙にあるかなり大きな水隙には、through solution reaction によってできた水酸化石灰や、エトリンガイトの結晶が析出す

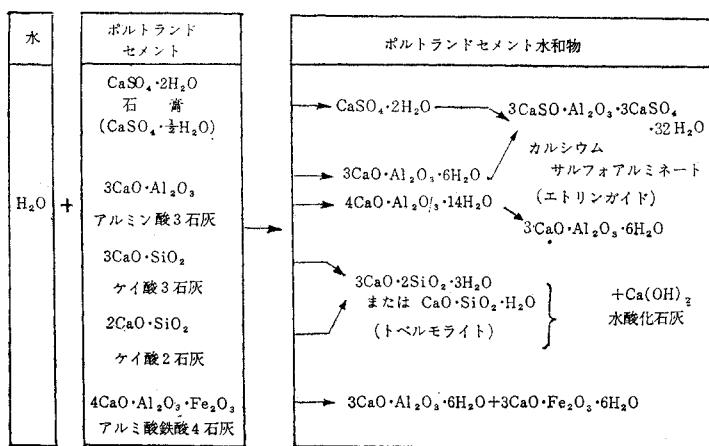
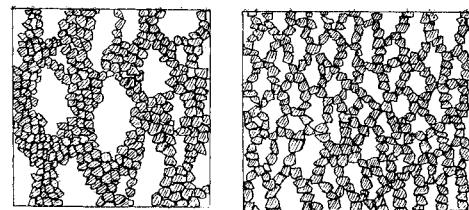


図-1 ポルトランドセメントの水和の説明図



(1) 練り混ぜ不十分な場合 (2) よく練り混ぜられた場合

図-2 ペースト中のセメント粒子の状態

るが、水隙は完全に水和物で埋められず、毛細管として残るもののがかなりある。

セメント水和物は、 $10\text{ }\mu$ 以下程度の水酸化石灰の板状結晶、エトリンガイトの針状結晶から、 $100\sim 1000\text{ }\text{\AA}$ 程度のきわめて微細なトベルモライト^{f)}を主体とする粒子（ゲル）からなる。ゲル部分の構成は、その成分により、はく状・葉巻状・板状・針状など、多様な形状と化学的特性とをもつ微細粒子の集合である。

② ゲル水：セメント水和物は、きわめて多様な形状および寸法をもつ微細なゲル粒子の集合体であるが、微細であるために非常に大きな表面積を持ち、そのオーダーは $(2\sim 3)\times 10^6\text{ cm}^2/\text{g}$ に及ぶ。

微細なゲル粒子は、その表面に水分子を強く吸着し、吸着された水分子は、自由に流動する水とは全く別のはとんど固体に近い性状を示す。これをゲル水と呼んでいる。セメント水和物の硬化は、ゲル粒子の発達に起因するもので、結晶またはゲル粒子相互の化学的結合、粒子相互のからみ合いなどによる機械的結合も相当な寄与をしているのであるが、現在のところ、硬化力の主体はゲル水の吸着であって、ゲル水を媒介として粒子相互が付着しあうことによるものと考えられている。

③ 自由水(毛細管水)：ゲル水以外のもので、硬化ペースト内部の毛細管を埋め、内部において比較的自由に流動する水が自由水である。自由水は外力に対してはほとんど抵抗を示さないが、乾燥過程において毛細管張力を管壁に及ぼし、乾燥収縮の生ずる原因をつくると考えられている。

④ ポア(空隙)：自由水によって満たされている硬化ペースト内部のポアの寸法・分布が、硬化ペーストの性状ときわめて密接な関係をもつことが指摘され、水銀圧入・蜜素吸着・水蒸気吸着・シクロヘキサン吸着などによる測定方法の進歩とあいまって、活発な研究が展開されている。水銀圧入方法によるポアの寸法分布試験の一

f) けい酸石灰水和物の総称である。

例は図-3のようである。エントレインドエアーまたはエントラップドエアーの大きさは毛細管より上のオーダー(5~500 μ程度)で、その寸法分布はペースト性状と

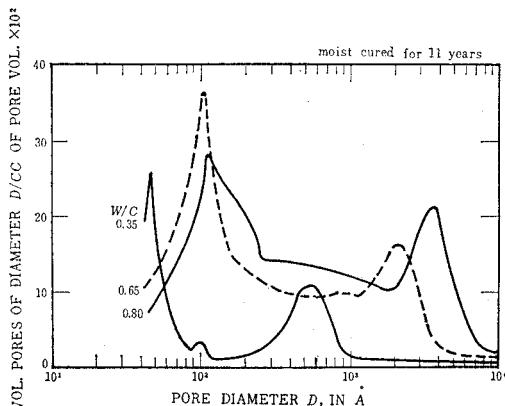
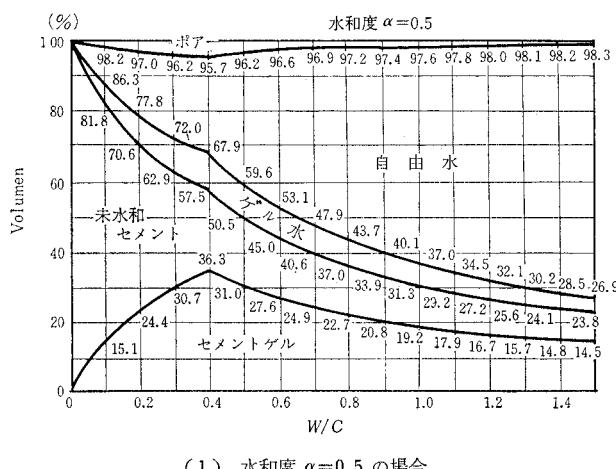
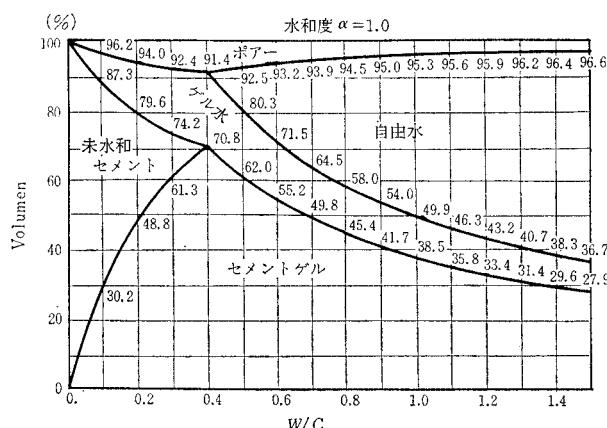


図-3 水銀圧入ボロシメーターによるセメントペースト内部のポアの寸法分布試験の例



(1) 水和度 $\alpha=0.5$ の場合



(2) 水和度 $\alpha=1.0$ の場合

図-4 種々の W/C によるセメント硬化体中の個々の成分の容積百分率 (%)

密接な関係をもつ。

⑤ 材令および外的条件によるペーストの内部変化：以上に述べた構成は、セメントペーストの水セメント比および材令によって変化する。その状態を Rüsch は図-4のような形で示している。

また、セメントペーストは、空気中に放置されると炭酸ガスと接触して炭酸化し、水酸化石灰が炭酸石灰に変化するばかりでなく、他の水和物も化学変化を起こすことが明らかにされ、したがって、力学的性状のみでなく乾燥収縮その他の体積変化、耐久性などの面でも、炭酸化のまえと異なった状況を示すことが認められている。そのほか、乾湿による挙動・外力により生ずる内部微細ひびわれ・微細ひびわれの自癒など、経過条件による内部構造変化と、それが各種性状に及ぼす影響については多くの研究もあるが、さらに研究を進める必要のある問題がかなり多い。

b) 混和材料とその作用

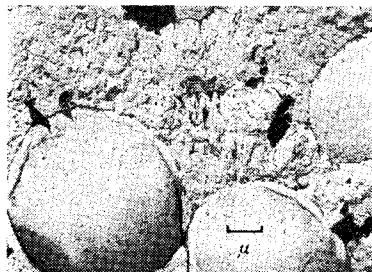
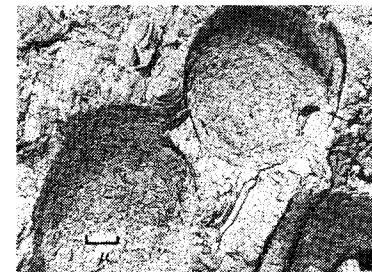
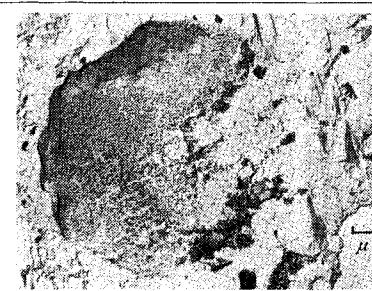
コンクリートにはAE剤・減水剤・促進剤・遮延剤などの多くの種類の混和剤およびポゾランなどの混和材が使用される。これらの作用および効果については、それぞれの分野で研究がなされ、ある程度まで問題点が解明されつつある。しかし、たとえば、AE剤においては気泡の寸法分布と耐久性との関係は、かなりの程度明らかにされたが、気泡がペーストと骨材との付着に及ぼす影響とか、外力を受けた場合の気泡周辺の応力集中などは、今後の研究にまたねばならないと考えられる。また、フライアッシュ粒の界面における物理化学的複合作用については、相当な水準まで研究が進められた。表一3はその一例である。高炉スラグその他の鉱物質粉末についても、さらに研究を進めることが必要である。

高分子材料をコンクリートと複合させる研究は最近のものではないが、今まで多くの研究がありながら実用化に至らなかったのは、それらの研究の多くが、try and error の繰り返しで、複合材料として各素材の基礎的理解が十分でなかったことによるものと考えられる。これら各種混和材料の有効利用および新しい混和素材の開発のためにも、各素材の基礎性質の研究と、それら相互の複合作用の研究が、ぜひとも必要であると思われる。

c) 骨材とペーストとの複合

骨材とセメントペーストとの複合機構には、化学結合、分子間引力による結合、機械的結合などが考えられるがスラグや石灰石などの特定

表-3 セメントベースト中におけるフライアッシュの複合特性

材 令	セメントベースト中のフライアッシュ粒	フライアッシュ粒と接していた凹面
28 日		
42 日		
140 日		

材令 28 日および 42 日の写真では、フライアッシュの表面は単純であるが、これに接していた凹面のセメント水和物は複雑であって対称性は認められない。140 日のもので初めて対称性が認められる。短期材令ではフライアッシュ粒とセメント水和物との間に境界層があるが、長期材令ではポゾラン反応の進行に伴って境界層が、この反応生成物で埋められてゆく。

の骨材以外は、表面が粗であるほど付着がよいことから主体は機械的結合であると考えられている。微小硬度計・表面粗度計・顕微鏡などを利用した付着の研究も散見されるが、骨材とペーストとの複合機構は、今後の研究にまつところが、はなはだ多いと考えられる。

(4) 討論の概要

前記の論述に引き続き、9名の会員が順次に所信を表明し、それに関連して話題提供者も意見を述べたが、その中で、微視的研究その他によって、コンクリート複合機構の解明を推進することは、ほとんど全員が要望していた問題である。

樹脂に深い関心を持つ人達は、①樹脂で練り混ぜたモルタルおよびコンクリートは短期間に高強度を発現する長所を有するが、温度の影響にとくに敏感である点に注意が必要であること、②樹脂をコンクリートに含浸させて処理する工法は新工法として注目すべきものであ

り、経済的な処理方法の開発が要望されること、③含浸する程度はポアーラーの分布状態によって定まるので、これについての研究が必要であることなどを論じた。

いずれにしても、従来のセメントコンクリートに固執するのはすでに時代遅れであり、積極的に新材料の開発に努力すべきであるとの意見が支配的であった。こうなると、セメントとの相性がよい材料の調査・研究を組織化することが望まれるところである。

またコンクリートの複合特性の研究においては、硬化後の諸性質に関するものが先行しているが、fresh concrete(まだ固まらないコンクリート)のレオロジカルな研究も活発に実施すべきである、との指摘もあった。

コンクリートの強度については、一段と高度なもの、たとえば 1000 kg/cm^2 程度のものも実用化する時期が到来しており、これによって新しい構造形式が開発されるという論議もあったが、これは注目すべき示唆である。

以上に述べたように、この研究討論会では、わが国のコンクリート技術を将来ともいっそう発展させるための建設的な貴重な意見が数多く開陳されたのであって、感銘深い集会であった。

日本学術会議では、材料研究連絡委員会を中心となつてとりまとめた案に基づき、国立の複合材料研究所を新設するよう46年11月に政府に勧告した。この研究所は

各専門分野における各種材料の研究者が共通の基盤にたつて、相互に情報を交換し緊密な連係のもとに有機的な共同研究を行ない、材料の複合機構を明らかにし、複合材料の画期的な進歩・発達をはかるとともに、新複合材料の創造をはかるための基礎研究を行なうことを目的とするものであつて、その設立が待望されるのである。

コンクリート・ライブラリー 31
PC工法小委員会編

VSL工法設計施工指針案

●B5・100ページ 予価1000円 47年5月末刊行予定

コンクリート・ライブラリー 32
終局強度設計方法小委員会編

終局強度設計方法

●B5・130ページ 予価1300円 47年6月末刊行予定

コンクリート・ライブラリー 33
PC工法小委員会編

OSPA工法設計指針案

47年7月末刊行予定

コンクリート・ライブラリー 34
PC工法小委員会編

OBC工法設計指針案

47年8月末刊行予定

総合建設コンサルタント



八千代エンジニアリング株式会社

Yachiyo Engineering Co., Ltd.

取締役社長 石川六郎

本社 東京都目黒区中目黒1丁目10番21号

電話 東京(03) 715-1231(大代)

事務所 大阪・名古屋九州