

コンクリートおよび鉄筋コンクリート

正 員 工学博士 国 分 正 胤*

昭和 25 年および昭和 26 年に東大、京大、北大、九大、東北大、国鉄、建設省、通産省、東京都、日産、大成、間、鹿島、西松、清水、等の研究者 25 名が行った文部省試験研究「コンクリート工事現場の实情調査」(主任研究者は吉田博士)によれば、わが国のコンクリート工事現場には施工上改善を必要とするところが非常に多いと報告されている。すなわち、一般に、(i) 用いる骨材の粒度を一定にするための処置を講じていないこと、(ii) コンクリートの配合を慣例によつて定めていること、(iii) 骨材を容積で計量していること、(iv) 骨材の含水量に対する練り混ぜ用水の補正を怠っていること、(v) コンクリートの運搬にシューティングを不適当に用いていること、(vi) 振動機の使用が適切でないこと、(vii) 試験を行う熱意に乏しいこと、等の欠点を有する工事現場が相当に多かつたのである。しかし、その後コンクリートの施工技術は年々向上している。そのいちじるしい例をあげれば、ある工事現場においては、前記の調査によつて、同じ日に造つたコンクリートの 28 日圧縮強度の最大値と最小値との差が平均 140 kg/cm^2 にも達することが明らかになつたので、この大きな差を生ずる原因を探求して施工上の欠点を改めた結果、コンクリートの品質の変動を 10% 程度にもすることができることを実証したのである。

もちろん、いまだに前記のような諸欠点を有する工事現場も相当にあると思われるが、材料および施工方法の研究が進むにつれて、コンクリート技術が進歩しつつあるのは疑いない事実である。これらの諸研究の動向を述べれば次のごとくである。

1. コンクリート

セメントの品質および生産量は終戦直後にはいちじるしく低下していたが、ここ数年間におけるコンクリート工事量はのはなはだしい増加にもない、セメント工業はきわめて活潑となり年産量約 900 万トンにも達し産業界の花形となつた。生産量の増加とともにセメントの強度もいちじるしく大きくなり、現在の普通ポルトランドセメントはあまりにも早期の強度が大であつて、安定性および長期にわたる強度の増加について不安があるようである。コンクリートを打ち込んでか

ら数時間後にコンクリート表面にひびわれを生じた事例も少なくないので、現在のセメントの粉末度および化学成分についての再検討が切望され、日本セメント技術協会が中心となつて研究を進めている。昭和 28 年には中庸熱ポルトランドセメントの日本工業規格が制定せられ、大きなダム工事には例外なくこの中庸熱セメントを用いている。現在一流工場で、生産されている中庸熱セメントは、水和熱が小さいのみならず長期にわたつての強度増加が大きく容積変化も小さいので、今後はダム工事のみならず一般水理構造物、舗装等の工事にも広く活用されると思われる。しかし一般に、まだ進歩の途上にあるので、大きな工事現場では特にその均等性の確保について留意している。

現行のセメント規格については、(i) セメントの規格試験強度からコンクリートの強度を推定することは困難であつて、特に貧配合のカタ練りコンクリートの場合には規格試験値は役に立たないこと、(ii) 規格試験における材令は 28 日までを規定しているに過ぎないからセメント製造者は長期強度をなおざりにしやすいこと、(iii) 規格試験の養生温度は $20 \pm 3^\circ\text{C}$ であるのでセメント製造者はこのほかの温度で強度を発揮するセメントについて無関心となりやすいこと、等の欠点が吉田博士によつて指摘された。このことはセメント界における大きな研究課題である。

AE コンクリートがわが国の工事現場で大量に使用されたのは平岡ダムが最初であると思われるが、多数の研究者によつて研究せられ今日では驚くほどに普及している。今後ますます発達し、あらゆる構造物のコンクリートに利用されるであろう。ダム工事において特に AE コンクリートが用いられるのは、そのウオーカビリチーがすぐれているためであつて、ダムコンクリート 1 m^3 当りのセメント使用量は、従来、200 kg 程度が最小限度と考えられてきたが、AE コンクリートを用いれば 140 kg 程度にまで減らすことが可能である。最近のダム工事では施工機械の進歩によつて大量のコンクリートを短期間に打込むこともできるようになつた。このような場合に、コンクリートに温度ひびが出るおそれを少なくするため、工事現場では例外なく AE コンクリートを採用し、骨材について十分な処置を講じたのち、なるべく少ないセメントペースト量で均等質なよいコンクリート造ることを研究してい

* 東京大学教授，工学部土木工学教室

る。

わが国で用いられている AE 材は、ビンゾール、プロテックス、ダレックス、スプーマ、ポゾリス、等である。このうちポゾリスはセメント分散材を主成分としたもので、他の AE 材を用いる場合に比べて少ない使用水量を用いて同様なウオーカビリチーのコンクリートを造ることのできるものであるから、この特徴を生かして用いるのが得策であると言われている。各工事現場では、それぞれ、試験を行って用いる AE 材を。これらの AE 材の比較研究には近藤氏、高野氏、長を選定して野氏等の研究がある。AE コンクリート中の空気泡がコンクリートの諸性質に及ぼす影響については、Powers 氏等が基礎研究を実施中であつて、これらの研究の進展につれて AE コンクリートの理論は飛躍するものと思われる。

AE 材以外の混和材で注目されているものにフライアッシュがある。良質のフライアッシュでセメントを置きかえてコンクリートを造ると、コンクリートの水密性、長期強度、硬化熱等がいちじるしく改善されるのであつて、ダム、港灣、下水等の工事に将来活用されるものと思う。これの使用に当つては均等性を確保することが最も重要であろう。須田貝ダム工事（東京電力）には現在これを用いている。フライアッシュについては国際大ダム会議日本国内委員会で研究中であつて、畑野氏、関氏、河原氏、野網氏、等の報告がある。火山灰については篠原氏の研究がある。

塩化カルシウムの利用法については米国で多くの研究が行われている。低温時に施工するコンクリートやプレキャスト製品のコンクリート等に活用すれば所望の性質を有するコンクリートを経済的に造ることできると思われる。わが国ではほとんど研究されていないが近く盛んになるであろう。

よい粒度の均等な骨材を供給するために、主要なダム工事現場ではそれぞれ多くの調査研究を行つている。砕砂の製造および利用についての基礎研究には文部省の試験研究（主任研究者は安藤氏）、建設省の試験研究（主任研究者は山本氏）等がある。均等質なコンクリートを造るためには骨材が均等であることが必要条件である。ダム工事のみならず一般のコンクリート工事においても粒度を均等にし、含水状態を一様に保つた骨材を使用するよう切望される。骨材粒度の不均等性がコンクリートに及ぼす影響については坂本氏の研究がある。氏は現場コンクリートの試験結果から、骨材の粒度が不均等である場合には骨材表面水量の変化に応じてコンクリートの使用水量を補正することはきわめて困難であることを指摘し、骨材の粒度を均等

に保つことと貯蔵法とに留意すれば、きわめて均等なコンクリートを造りうることを工事現場の実績によつて証明している。コンクリートの配合の設計については、主として米国において広範な研究が行われた。その結果、コンクリートの配合を定める際に利用できる便利な表が作られ、試的方法によつて配合を定めることがすこぶる容易となつた。これらの研究がわが国の多くの研究者によつて工事現場に紹介された結果、現場における施工技術はいちじるしく向上した。

コンクリートの練り混ぜについては文部省の試験研究（主任研究者は吉田博士）がある。この研究結果およびその他の研究からミキサの練り混ぜ性能試験方法に関する基礎資料をうることができ、その試験方法の一部は日本工業規格として制定された。材料計量装置およびミキサの実績を調査した報告には、関西電力丸山ダム（芳賀、吉越、山下の3氏）、東京都小河内ダム（佐藤氏）、徳島県長安口ダム（三村、山本両氏）、農林省小阪部川ダム（上滝氏）、建設省の永瀬ダム（山崎氏）磐城国道（比留間氏）および熊谷国道（海保氏）等があつて、貴重な資料となつている。比較的小規模のコンクリート工事現場の施工技術が進歩しない一因として、所定の精度と耐久性とを有する骨材の重量計量装置が高価であることが挙げられている。建設省の試験研究で簡易パッチャープラントの試作研究を行つているから、70万円程度の便利な計量装置が市販されるのも近いと思う。

国産のコンクリートポンプが実用に供されるようになったのは昭和23年頃からであるが、東京の池袋一御茶の水間地下鉄工事および神戸港第七突堤工事で研究せられ長足の進歩をとげた。コンクリートポンプの使用法については肥後氏の研究が発表されている。

レデーミクストコンクリートの工場がわが国に設立されたのは昭和24年であるが、東京の地下鉄工事その他で使用され相当な好成绩を収めるに及んで急速に発達し、現在では東京に6工場、大阪に1工場、名古屋に1工場がある。レデーミクストコンクリートの品質その他については高坂氏（地下鉄工事）、山田氏（舗装工事）等の研究がある。このコンクリート企業は大都市ではますます発展するであろう。レデーミクストコンクリートの日本工業規格は昭和28年に制定された。

コンクリート振動機はダムおよび舗装工事の増加とともに急速に進歩しつつある。振動機についての研究には建設省の試験研究（主任研究者は安藤氏）がある。

近来の新工法にスライディングフォーム（スリップフォーム）を用いる工法がある。これは、コンクリート

を打ち込む場合、型枠を除々に上方へ滑らせながら行うものであつて、サイロ、橋脚等高さの高い構造物にこれを用いると、足場、支保工等がきわめて簡単になること、コンクリートの打込みが頗る迅速に行われること、等の利点がある。わが国では、昭和 29 年 8 月に大阪市港湾局が吉田博士指導のもとにこの工法を用いて、高さ 33.3m、外径 6.2m の 20 本の円形ピン群のコンクリート打ちをわずか 1 週間に完了して好成績を収めた。

打ち込んだのちに起るコンクリートの洗下については、吉田(彌)氏が Terzaghi 氏の研究を参考として数理論的考察を行つている。新旧コンクリートの打継目については杉木氏、吉村氏、筆者、等の研究がある。

プレキャストコンクリートは米国でいちじるしく発達している工法であつて、通常のコンクリート打ちが非常に困難である場合にも容易に施工しうること、また乾燥収縮が少いこと、等の特徴を有している。わが国では未だ数箇所であつて実用されただけであるが、将来はダム、橋脚、護岸等の水際コンクリート構造物やトンネル覆工等の補修および新設工事にいちじるしく活用されるものと思われる。これについては三浦氏、樋口氏等が基礎研究を行つている。

ダムコンクリートの人工冷却については藤田氏の研究があるが、各工事現場でも盛んに研究している。ブリーキングをわが国で最初に実施したのは丸山ダムであつて、その実績も発表されている。コンクリートを打込むときの温度がダムコンクリートの強度に及ぼす影響については高野氏の研究があり近く発表される。

寒中コンクリートには吉田博士の研究*がある。博士は、きわめて多くの供試体について凍結融解を繰り返して実験した結果、寒中コンクリートの施工における重要な資料を提供した。コンクリートの電気養生については、文部省の試験研究(主任研究者は大坪氏)があり、板倉、一木、関、河原、山田、伊藤、大浜の 7 氏等の研究もある。板倉氏は北海道における寒中コンクリートの施工にこれを実用して好結果が得られた例を詳細に発表している。土木学会では昭和 23 年に電気養生施工方法指針を学会誌に発表した。吉田博士は十分に硬化したコンクリートの低温度における強度について研究し、 -25°C ~ -40°C の低温時におけるコンクリートの強度は、コンクリートが乾燥しているときは常温における強度の 1.05~1.3 倍であり、コンクリートが水で飽和しているときは 5~6 倍であり、

* これらの研究内容は土木学会編、土木工学の概観(1940~1945)に紹介されている。

また、コンクリートは低温度においてももろくならないことを立証し、寒冷地方におけるコンクリート構造物の破壊作業についての資料を提供した。

コンクリートの蒸気養生については山崎氏等の研究があり、コンクリートの癒着については村田氏の研究がある。防水材については、市販品 40 種について試験した杉木氏の報告がある。水中コンクリートの施工には宇部岸壁工事で行つた北川氏の研究がある。

現場コンクリートの品質管理についてはきわめて活潑な研究が行われている。丸安、水野両氏は現場における品質管理の方法、試験の回数、試験個数、試験結果の判定方法、等について統計学を応用して綿密に研究している。なお、篠原氏、伊藤氏等の研究も発表されている。これらの研究が端緒となつて、各工事現場ともコンクリートの管理試験が活発となつてきたのは特筆すべき進歩であつてまことに喜ばしいことである。コンクリートの管理が良好の場合には安全率を小さくして工費の節減を図ることができるのである。現在、コンクリートの強度の偏差率が 12% 程度にまで管理されている工事現場もあるようである。工事現場における品質管理の実績として公表されたものに、芳賀、吉越、山下の 3 氏(ダム工事)、肥後氏(港湾工事)、坂本氏(水路トンネル工事)、住友氏(国道トンネル工事)、佐藤氏(舗装工事)等のものがある。

構造物におけるコンクリートの強度を求めることについての研究も相当に行われている。吉田博士はコンクリートを打ち終つた直後に普通の釘をコンクリート中に埋め込み、コンクリートが硬化したのちにその釘を引抜くに要する力を試験してコンクリートの強度を推定する方法を考案した。これは現場試験の方法としてきわめて便利である。丸安氏も現場における試験方法の一案を提示している。また、吉田博士は構造物からコンクリートを切り採る方法についての研究を行い、通常の大さのコアの場合には切採り技術がよほど優秀でないと信頼できる結果をうる事が困難であることを示した。コンクリートの非破壊試験については最近非常に多くの研究が行われている。高林氏はこの先鞭をつけたのであつて、共鳴振動法によつてコンクリートの動弾性係数を測定するための独自の試験方法を考案した*。共鳴振動法による非破壊試験方法は引続き樋口、近藤、明石の 3 氏等によつて研究された。樋口氏はコンクリートの強度と動弾性係数との関係にはその粘性的性質も関与するものと推定し、強度と弾性係数と振動減衰率との間の関係を実験した結果、3 者の間に 20% 以内の誤差で配合、養生条件、乾燥状態のいかんにかかわらず適用しうる関係を探い

た。また、超音波を用いて弾性波伝播速度を求める非破壊試験方法は近藤、明石両氏等によつて研究されている。これらの方法を現場コンクリートの品質試験に応用することについては、日本材料試験協会が委員会を組織して研究している。

赤沢氏によつて提案されたコンクリートの引張強度試験方法* は実用上きわめて便利で信頼度も高い方法であるので、多くの研究者が活用している。先年日本工業規格にも制定された。この方法が赤沢氏の提案とほとんど期を同じくしてブラジル、スエーデン、フィンランド (Splitting test と称している) 等で独自に研究されていたことは面白いことである。コンクリートの剪断強度試験については畑野氏、関氏等の研究がある。カタ練りコンクリートについては内山氏の研究がある。氏はカタ練りコンクリートの本質について理論的および実験的研究を行い、カタ練りコンクリートの適正な締固め仕事量を実験的に定めて仕事量と使用水量との関係を明らかにし、その結果、カタ練りコンクリート圧縮強度試験標準方法を提示したのであつて、この方法は土木学会の標準試験方法として採用されている。コンクリートの凍結融解試験は最近盛んになつてきて、畑野氏、高野氏、野網氏、等が研究している。コンクリートの透水試験には吉越氏の研究がある。氏は供試体を製造するときに供試体の中央に適当な直径を有する鉛直の孔をあけておき、コンクリートの硬化後に供試体の側面から水圧を加えて中央の孔にしみ出た水量を測定してコンクリートの透水性を試験する新方法を考案した。この方法はすでに実用されている。ダム工事の活発化にともなつてコンクリートの硬化熱試験が盛んとなつてきた。畑野氏、西沢氏、等が研究している。コンクリートのクリープについては久保氏、岡田氏等の研究がある。久保氏は塑性材料の研究の一環として研究したのであつて、モルタルによるクリープの実験を行つた結果、クリープ量がクリープを生ぜしめる応力と比例関係にあるのは応力が小さい間だけに限られること、その他を明らかにした。

2. 鉄筋コンクリート

鉄筋コンクリート構造物の設計に関する基礎的事項は、川口、深谷、田村の3氏等によつて、研究されている。鉄筋コンクリート版については成岡、米沢、両氏の研究がある。両氏は鉄筋コンクリート版の設計に際して考慮すべき輪荷重の分布および曲げモーメントについて理論的研究を行い、現行の鋼道路橋設計示方書 (1939) の規定には改善すべき点のあることを主張

している。鉄筋コンクリート連続バリについての研究には深谷氏のものがある。氏は活荷重を等分布荷重と仮定して多くの設計計算を行つた結果、三径間連続バリ橋の経済的設計に関する資料を提供している。後藤氏は適当な仮定のもとに多数の鉄筋コンクリート版型門形ラーメン橋を設計し、その結果から、動荷重、スパン、高さ、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度と、門形ラーメン橋の経済的な設計、との関係を明らかにし、さらに、実用上に便利な図表を考案作製し経済的な設計をきわめて容易にした。鉄筋コンクリートアーチの設計計算に関する研究には川上氏および水野氏のものがある。岡田氏は鉄筋コンクリート不静定構造におけるコンクリートのクリープの影響について理論的研究を行つている。

鉄筋コンクリートバリの実験的研究は山田、加賀見、神山の3氏等が行つている。山田氏は鉄筋コンクリートバリについて実験した結果、鉄筋コンクリートの破壊時におけるコンクリートのひずみの実用式を提示するとともに限界鉄筋比を求める式を提案し、ハリの鉄筋比がこれより小さい場合と大きい場合とについて、破壊荷重を求める合理的な実用式を示している。現行の鉄筋コンクリート部材の設計方法を改めて、塑性理論にもとづく設計方法を採用することについては、なお考慮の余地があるが、この種の研究が盛んであることは喜ばしいことである。異形丸鋼は普通丸鋼にくらべてコンクリートとの附着強度がきわめて大きく、これを用いる場合には鉄筋の定着や継手の施工が簡単となり、また、鉄筋コンクリートバリのひびわれが分布されるので部材の安全性が増す、等の利点を有している。すでに日本工業規格も制定せられこれらの製造工場も準備が完了している状態であるから工事現場における使用が望まれる。異形丸鋼については、山田氏、三浦氏、等が研究中である。

五味氏はハリと柱とから成る構造にくらべて壁式構造が有利となる場合の多いことに着目し、壁式鉄道鉄筋コンクリート構造物の設計について研究している。鉄筋コンクリート構造物の載荷試験は、ワイヤストレーンゲージの実用によつて活発となつてきた。この試験は主として国鉄および建設省において実施されており、これらの試験の成果によつて構造物の設計方法が進歩することは明瞭であつて、大いに期待される。また、鉄筋コンクリート道路橋の耐荷力を実測したものには文部省の試験研究 (主任研究者は岡本氏) がある。鉄筋コンクリート構造物の維持および修繕は重要な問題であるので各所で研究されているが、研究結果で公表されたものはきわめて少ない。二松氏のセメン

* 研究内容は土木学会編、土木工学の概観 (1940～1945) に紹介されている

トガン吹付工（大阪駅戦災高架橋），田中氏の大阪地下鉄における侵食対策，丸安氏の薬液注入による漏水防止（トンネル），星野氏の高架橋電食対策，等があるのみである。終戦直後には戦災コンクリート構造物の安全性についての研究が文部省の試験研究（主任研究者は岡本氏）として行われ，成果が公表されている。

鉄筋コンクリートの分野において特筆すべきことはプレストレストコンクリートのいちじるしい発達である。昭和 16 年に鉄道大臣官房研究所内に鋼弦コンクリート研究委員会（委員長は黒田氏）を設置して研究したのがわが国におけるプレストレストコンクリートの実用研究の最初と思われる。終戦直後には商工省に委員会（委員長は三島博士）が設置されて研究された。仁杉氏は 100 本に近い鋼弦コンクリートバリを造って実験した結果，ハリの製作設備製作方法の要点，初応力および亀裂荷重の計算方法，コンクリートの乾燥収縮およびクリープがハリに及ぼす影響，ピアノ線の付着強度，ハリの破壊機構と破壊荷重の計算方法，等を明らかにしたのであつて，鋼弦コンクリートの実用化に寄与した。猪股氏はポストテンション方式によるプレストレストコンクリートバリをわが国で最初に実験して，ひびわれ荷重，破壊荷重，たわみ，等について調べた。さらに進んでハリの疲労試験を行い，ハリの強度その他の重要な性質と繰返し荷重強度および繰返し回数との関係を求め，なお，コンクリートおよび鋼線のクリープについても実験し，プレストレストコンクリートバリの設計ならびに施工方法についての資料を提供した。これらの研究に引続き国鉄は綿密な試験研究を行つてプレストレストコンクリートの実用化に備えた。昭和 27 年にはプレストレストコンクリート会社が 4 社設立せられ，諸外国の技術の導入とあいまつて設計および施工技術は急速に向上し，各所で工事が行われるに至つたのである。これらの工事は多種多様であるが，橋梁，枕木，杭木，杭，電柱，パイプ，薄板，等が主なものであろう。最近成功したものに，ポストテンション方式によるスパン 30 m の鉄道橋（KS-12 信楽線第一大戸川橋梁）がある。

最近におけるプレストレストコンクリートの研究はすこぶる盛んであつて，文部省の試験研究（主任研究者は吉田博士）にプレストレストコンクリートの応用に関する研究（上村氏）および電柱枕木橋梁用材消費の合理化に関する研究（吉田博士，川口氏）等がある。

その他発表されたものに，仁杉，猪股，川口，田原，近藤，河野，田村，菅原，岡田，久保，洞庭，広長，等の諸氏の研究がある。プレストレストコンクリートは，鋼材の量が通常の鉄筋コンクリートの場合の $1/3 \sim 1/4$ となり，また，従来鋼のハリでなくては実用上不可能と思われてきたような長スパンにも架設することができるのであつて，鋼資源の乏しいわが国にはきわめて適したものである。わが国の技術を欧州の水準にまで向上させるべく努力が続けられている。

3. コンクリートおよび鉄筋コンクリートの標準示方書

標準示方書はコンクリート技術の進歩発達の基礎となるべきものである。土木学会は，昭和 6 年に鉄筋コンクリート標準示方書を制定し，以来同 11 年および 15 年の 2 回にわたつてこれを改訂し，また，昭和 18 年に無筋コンクリート標準示方書を発表した。終戦後これらを全般にわたつて改訂し，昭和 24 年に無筋コンクリート，鉄筋コンクリート，コンクリート道路および重力ダムコンクリート，の標準示方書を制定し，昭和 26 年にこれを一部補正したのである。しかし，制定以来すでに 5 年を経過し，その間の技術の進歩はきわめていちじるしいので，現在これの改訂を準備中である。

また，土木学会コンクリート鉄道構造物委員会（委員長は吉田博士）では無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート構造物の設計基準を審議中で近く制定されると思われる。日本道路協会ではコンクリート舗装設計施工指針（委員長は谷藤氏）を審議中で，国際ダム会議日本国内委員会ではダム設計基準（小委員長は岡本氏）を制定すべく現在審議中である。また，土木学会ではプレストレストコンクリート設計施工指針（委員長は吉田博士，幹事は川口氏）を審議中で明年には制定されるであろう。これらの示方書がコンクリートおよび鉄筋コンクリート技術の向上に貢献するところはきわめて大きいと思われるので，その制定が期待される。

以上に述べたごとくコンクリートおよび鉄筋コンクリートの分野における諸研究はきわめて活況を呈している。これらの諸研究の成果がすべての工事現場に普及して，設計および施工の技術が全面的に向上する日の来ることを切望する次第である。