

# コンクリート研究室から見た プレストレスト コンクリート

岡 田 清

## 1. 研究室から現場技術者への注文

本誌の表題が第5巻から従来のもので変わって、“prestressing”という語が縦にそう入されている。このデザインはどういう理由で採用されたかについては、筆者は知らないが、プレストレッシングという言葉は私には好きである。このアイデアが構造物の設計に多くの夢と可能性を与えてくれたからである。とりわけコンクリートの構造物に応用されたプレストレスト コンクリートは、現在すばらしい発展をとげつつある。それと同時に、プレストレスト コンクリートという新技術、新工法は、従来のコンクリートについて、われわれの有していた知識や技術の未開拓分野が、どんなものであったかを如実にわれわれに曝露してくれた。夢の実現にはより深い研究、新技術の獲得がなされねばならない。もちろん、このためにはわれわれは多くの失敗を重ねるであろうことは疑いない。一般に失敗のない成功はほとんど考えられないのであるが、残念ながらわが国ではプレストレスト コンクリートに関する各種工事や研究報告でも、失敗例を記したものが見当たらない。これは本当に失敗がなかったのかもしれないし、あるいは失敗があってもその発表にあたっては、種々複雑な事情があって、外国のように万事すまされないためかもしれない。もし失敗があったとすれば、少数の人達のその貴重な経験が、後に続く多くの人達のために語られずにおくのは惜しいことである。とくにプレストレスト コンクリートのように新しい技術については、秘密は秘密と厳守されたうえで、失敗の事例とその原因、とられた事後の対策、等の純工学的なデータが、どこかで整理保管され、以後の有用な資料として広く活用されたら……と思うのは、別に筆者一人の希望のみではないであろう。ここでいう失敗の中には種々の原因によるものがあるが、われわれ研究室にいるものにとって最も重要なことは、現在において設計、施工にあたり考慮していない因子の影響によると思われる失敗例である。同時にそのとき関係者が描いた夢とか、抱いた疑問とか、あるいは希望の告白である。それらこそ研究室で研究すべき残された問題であ

り、その解決が将来への発展を約束するものであるからである。

もちろん可能な限りの知識を動員して設計、施工され成功した場合、その事実は十分高く評価されるべきであるが、万事が単なる工事関係者の満足感にふけることで終わってしまってよいものかどうか、改めて反省するところもあろう。そしてその反省は成功におとらず高い評価をうけることも確かであろう。現場技術者と研究室にいるものとの、相互のもっと密な知識の交換が望ましいようだ。

## 2. コンクリートは均質材料ではない

プレストレスト コンクリートにおいて新しく登場した高強度のPC鋼材に関することはいま別としても、コンクリートないし鉄筋コンクリートに関して過去において得られた知識と経験は豊富であって、これらの駆使によって実際上の目的からは十分安全なプレストレスト コンクリート構造物が設計されている。そして若い技術者がプレストレスト コンクリートに対して魅力を感じるのは、その理論が鉄筋コンクリートのそれに比して、より“構造力学的”というか、弾性論的な取扱いをしうるところが多いという点であろう。設計計算書に示されるような大項の設計は、きわめて整然とした形で行なわれ、理想化された構造物モデルについての理論解が適用され、かくて設計者はひそかな自己満足にひたるとともに、これを簡単な現場試験で検照して安心するといった傾向が多いのではないだろうか。ここで筆者は上記の設計計算方法とか、理論解の適用を低く評価しているのではない。ただこれが、すべてであると誤解してもらっては困ると思うのである。

理論解の適用はあくまで手段であって、そのものの真の挙動を示すものでないことは、十分承知しておりながら、これを忘れてしまうのをおそれているのである。なるほどプレストレスト コンクリートに使用されるコンクリートは、厳重な管理のもとで良質のものが造られ、プレストレッシングの際や、設計荷重作用時においてはきわめて純弾性体に近い挙動を示すことは確かである。

しかしこれはあくまで二次的な要素の影響を無視しての結果であり、その要素の影響は少ないものであっても、あくまで存在するものである。とくにコンクリートのような Heterogeneous な材料を取扱う場合、このような事実を忘却してはならない。試みに最近 X 線を用いてコンクリートの内部構造の微小组織を調べた F.O. Slate, S.O. Olsefski 氏らの結果をみると (Journ. ACI, May 1963), 20 cm  $\phi$  10 cm のコンクリート小型供試体を十分注意して製作した場合でも、セメント分離の傾向が明瞭に認められ、相対湿度 50% で平衡させた無載荷供試体の内部構造にも、収縮によるひびわれが骨材とセメントペーストとの境界に生じていることを示している。もちろん、このひびわれが強度、弾性等のコンクリートの機械的性質におよぼす影響はわずかであろう。しかし同じような載荷供試体では肉眼で見える若干の縦方向ひびわれの入ったときに、内部構造中には数多くのひびわれが骨材・セメントペースト間、セメントペースト中に入っている事実を考えるならば、わずかのひびわれであっても、これを有するコンクリートを理論的な Homogeneous な弾性材料と仮定することによって得られる解の精度には、限界のあることが明白である。

### 3. コンクリートの収縮、クリープの推定はむずかしい

プレストレスの減退に直接的な影響をもつコンクリートの収縮、クリープについては、その生成機構は明白にわかっていない。セメントの水和機構の全ぼうがまだ明瞭でないごとく、コンクリートの収縮の本質について本当は何もわかっていない。収縮はペースト中の水分の移動と関係があることは確かであろう。例えば乾燥の進行とともに、セメントペースト内の吸収水（遊離水ではない）が除去され始めれば、ペーストは全ゲル粒子の表面から水分子の厚さの水層が失われたとほぼ等しい容積変化を示すと仮定すれば、水分子の厚さはゲル粒子（大きさ $\sim 100 \text{ \AA}$ ）のほぼ 1% に当るから、無拘束の完全乾燥のセメントペーストは  $1\% = 100 \times 10^{-4}$  オーダーの長さ変化を示すことになるわけで、実験的には  $40 \times 10^{-4}$  の収縮も観測されている。また水和生成物粒子の大きさも収縮に影響をおよぼすようであり、これら収縮の基本的な原因に対する研究は、ようやく始められつつある状態といえよう。

コンクリートの収縮にはさらに上記セメントペーストのほかに、骨材による複雑な影響が入ってくる。この場合、コンクリート中に占める骨材の容積、その弾性性質、等がとくに大きな要因をしめることになる。実際

構造物としては、部材断面の寸法の影響を無視できないはずである。これは表面と内部の収縮差による応力の発生等を考慮すれば明らかである。

クリープについても未解明の点は収縮におとらない。その発生機構はしばらくおくとしても、二方向にプレストレッシングされた床版のように、二方向の持続応力をうけるときのクリープは、一方向のみのクリープから簡単に推定できるか、クリープひずみに対するポアソン効果のようなものはどうなるか等、工学的に単純な問題についても実は明白でない。これは根本的には現在われわれの考えているコンクリートのクリープが金属のそれと同一に論じることができず、ときには収縮とクリープとの分離ができないとさえ考えられる特殊な性質をもっていることに起因する。

収縮とクリープは造られるコンクリートの品質の多様性以外に、湿度、部材断面の寸法効果というコンクリート構造に付随した独自の要因の影響をうけることが、簡易化された理論推定値と実際との相違を大きくする。またこの相違を知るとは実際のプレストレストコンクリートの設計上、重要な参考となる。

要するに収縮もクリープもその真値を知ることはきわめて困難である。

### 4. P C 鋼材についての研究

P C 鋼材についてわれわれはレラクセーション、疲労強度についてもっと多くの資料がほしい。レラクセーションのように長時間にわたる期間を必要とする試験では、現在では P C 鋼材メーカーからは試験機専用時間に制限されて本格的な研究資料の提出が少ないし、学校や研究所でもほとんど実験結果の発表もない。高価なレラクセーション試験機を多く設置できないとすれば、実際にその P C 鋼材を用いたプレストレストコンクリート試験体で、長期間にわたる導入プレストレスの損失をはかり、レラクセーションをもふくめた各種因子のプレストレス損失におよぼす影響を推定するほかはないが、わが国ではこの種の実験資料もはなはだ少ない。第 4 回 FIP 大会では後者の方法によってレラクセーションの影響を推定したフランスの実験結果が発表されていたが、さすがにと感心する。

つぎに疲労強度については、P C 鋼材がコンクリートに付着されている場合、実際荷重の作用によってうける P C 鋼のうける応力変動は大きいものではないから、一般にはさして心配する必要はない。しかし P C 鋼とコンクリートとの付着が、ここでは大きな影響をもつ。AASHO による道路試験の 5 年間の中間報告でも

(The AASHO Road Test Report No. 4, Bridge Research, HRB Pub. 953, 1962), 10φ5mm (平滑線) ケーブルでポストテンションされ、グラウチングを行なった PC 桁と、φ9.3mm 7本よりストランドでプレテンションされた PC 桁との疲労試験結果では、前者はひびわれ発生にともなう付着破壊がおこり、PC 線が切断されたことを述べ、付着の重要性を強調している。

ここで付着という性質は、また、解明の非常にむずかしい問題であって、現在ではもっぱら工学的な見地からのみ考察されている。例えば現用のストランドについては、普通の条件下でその定着長は  $(25\sim 50)D$  [ $D$ : ストランドの公称直径] であるとか、断面がその終局強度を発揮するためには、ストランドはその該断面より少なくとも  $(\sigma_{su} - 2/3 \sigma_{se}) \cdot D$  (in) [ $\sigma_{su}$ ,  $\sigma_{se}$  はそれぞれストランドの破壊荷重時の応力, 有効応力を kips/in<sup>2</sup> で示し,  $D$  は inch で示す] だけコンクリートと付着していなければならない (Correspondence from ACI, Amendments to Building Code, Journ. ACI, Feb. 1962), 等と考えることである。このような付着の性質は PC 鋼材の表面状態によっていちじるしく変化し、さびの影響が大きい。

適当なさびは上記付着に好影響を与えることは確かであるが、その程度についての厳密な規定ははなはだ困難で、われわれも実験資料の整理上、頭をなやます問題である。

### 5. コンクリートの破壊条件

プレストレスト コンクリートが出現してから、いままでのコンクリートに関する知識の中で、最も痛烈にその不足を感じるのが、コンクリートの破壊強度に関する問題であろう。プレストレスト コンクリート構造では、これを構成する各部材、あるいは全構造の破壊について、常にいかほど安全に設計されているかを検討する必要のあることは周知のとおりである。従来までの鉄筋コンクリート構造においては、部材は 3~5 という高い安全率をもって造られているという漠とした安堵感の上にならって常用の設計がなされ、それで事足りていたのである。しかしもはやコンクリートの単軸強度の資料のみですべてが処理される時代は過ぎようとしている。プレストレスト コンクリートの出現により、明らかに一軸あるいは二軸方向に応力が導入された構造部材ないし構造に、三軸方向からの応力が加わる機会は増加した。そして従来のような簡単な破壊条件式を用いて設計された構造に、当初設計では予想されなかったひびわれ事故が発生する率は増加した。すなわち、いまやコンクリート

破壊を支配する法則に対して改めて考え直す必要が生じていると思われる。第 4 回 FIP 大会でもハンガリーの Goschy 氏がプレストレスト コンクリートはりの終局強度を Tresca が拡張した Mohr の法則を用いて理論的に求めているが、これもその一つの努力のあらわれである。

コンクリートのような塑性をもった材料の破壊法則に対しては、いままでかなりの人々がそれぞれ断片的な実験結果より、種々の説を提案している。しかしいずれも十分とは言いがたいようである。これらの研究には相当高価な実験設備と高度の技術を必要とし、かなりの困難がともなう。しかし、ぜひとももっと深く研究すべき問題である。鉄筋コンクリート、プレストレスト コンクリートで、せん断破壊に対する究明がおこなわれているのも、これが最大の原因といえよう。世界大ダム会議でもコンクリートの三軸強度の問題が討議の対象とされていると聞いているが、むべなるかなと思われる。

以上の完全な究明が早急になされるとは思われぬし、また将来その結果をそのまま設計式の中にもち込むことは、いたづらに計算式を複雑とするから、図表の利用がなされると思うが、現在では、とおてい、その段階にはないようである。しかし現在の常用設計を行なったときも、常に後から、このような破壊の問題に対し十分の考慮を払っておくべきである。

以上はコンクリート研究室から、コンクリートの機械的性質を主対象としてプレストレスト コンクリートをながめてみた。コンクリートほど広く用いられ、実際に取扱いやすく、また厳密な意味では把握しがたい構築材料はない。

人体の胸の病巣を医者が指先のラッセル音によってのみ判断した時代が過ぎて、レントゲンや各種生化学的検出方法が採用されているように、コンクリートも近代科学の粋を集めた方法で、その真の性質が究明されねばならない。そのときは、現在の健全であるというコンクリートが、全く見るに耐えない病巣をもっていると知っても、われわれはコンクリートを見かぎることはないであろうし、またプレストレスト コンクリートも病巣の多い、そのコンクリートを用いて、すばらしい近代構造美を創造していることであろう。

(筆者: 工博 京都大学教授 工学部) 1963. 6. 15・受付