

# プレストレスト コンクリート最近の話題

猪 股 俊 司\*

プレストレスト コンクリート (以下PCと呼ぶ) は国内でもすでに 10 年以上の歴史を有し、ひろく土木技術者の間には知れているようになった。この新しい技術はその後さらに進歩し、単に橋梁、建築、水槽といった部分ばかりではなく、さらにひろくあらゆる構造物に利用されるようになってきている。ここでは最近急激に注目をあびている原子力発電における PC 圧力炉の現状およびその将来性について特に述べたいと考えている。また片持ばり施工にあたってプレキャスト コンクリート ブロックおよび合成樹脂を用いて工期を非常に短縮した例、最近の長大 PC 橋についても簡単に紹介することとする。

## PC 圧力炉

原子力発電の問題が最近ヨーロッパ各国、特にイギリス、フランスで真剣に取り上げられますます出力の大きい原子力発電所を建設しようとしている。この結果、鋼製圧力炉に代って PC 圧力炉が重要な課題となっている。すなわち発電原価を引き下げるためには鋼製圧力炉ではあまりにもその建設費が高いものとなるからである。

最初の PC 圧力炉はフランスの Marcoule 原子力センターに建設された  $G_2$  および  $G_3$  圧力炉である。 $G_2$  炉の研究は 1955 年のなかばに開始され、4 年後の 1959 年 9 月に  $G_3$  炉も建設されたものであって現在も利用されている。

これらの炉のおもなる目的はプルトニウム製造のためであって、電力としては 50 mW の発電に利用されているだけである。

この Marcoule において  $G_2$ ,  $G_3$  炉を PC で建設するという決定は非常に大きい意味を持っている。PC を用いるばかりではなく従来の鋼製炉に比して内圧を 2 倍以上に増加させる設計であった。現在ではより以上の性能が要求されている。すなわちガス圧力のみならず内壁に対するガス温度に対しても十分な機能が必要である。

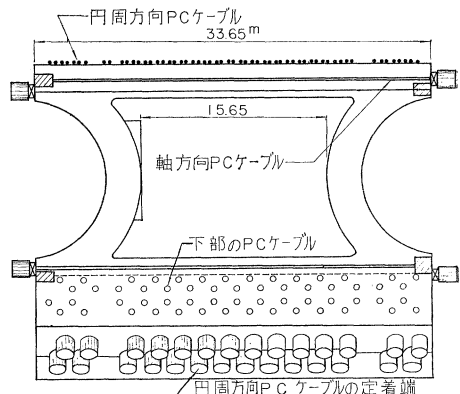
圧力炉におけるコンクリートについて要求されている作用を考えると、

第一は他の原子炉の場合と同様に生体遮蔽用であり、

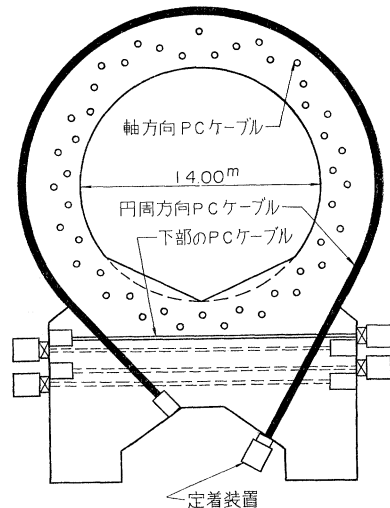
第二は力学的に内圧に抵抗することである。

この第二の作用としてコンクリートだけではその引張強度が小さいので全く不適当であるが、これに PC 鋼材を用いてプレストレスを与え、PC とすれば内圧に十分抵抗できるようになる。しかし炉の寸法が大きくなるとプレストレスに必要な力は非常に大きいものとな

図-1  $G_2, G_3$  炉の概要  
横 面 図



断 面 図



\* 正員 工博 KK日本構造橋梁研究所取締役

り、P C鋼材重量も大となる。

例えば、G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub> 炉のプレストレッシングの全引張力は、150 000 t 程度でP C鋼材重量は 750 t である。

これらの炉の寸法の概要はつぎのとおりである。

内 径	.....14.00 m
外 径	.....20.00 m
全 長	.....33.65 m
内 容 積	.....3 000 m <sup>3</sup>

図一1 に示すような水平円筒の両端に半球を取り付けた構造で、円筒の円周方向および母線方向にP Cケーブルを配置してプレストレスを与えている。円筒の下側はコンクリート台と結合されており、全高は 36.50 m となっている。

設計内圧は 15 kg/cm<sup>2</sup> であり試験圧力は 30 kg/cm<sup>2</sup> とされた。この試験圧力に対しても何らのひびわれも認められなかった。模型試験結果および計算によると 60 kg/cm<sup>2</sup> 以上の圧力すなわち設計圧力の4倍で破壊するであろうことがわかった。

G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub> 炉では上記のように非常に大きなプレストレッシング力を必要としたのでP C鋼材として集中ケーブル方式を用いた。すなわち1本のケーブルで1 200 t の引張力が与えられるようなものである。ケーブル端はコンクリートのアンカー ブロック中に埋込まれている。

プレストレッシング用ケーブルの配置は3つの組に分けられている。

(1) 円筒の軸方向ケーブル、(2) 円筒の円周方向に250°の角変化にわたって配置されたケーブルは、炉の支持台となっているコンクリート中に定着する、(3) 炉の底部に配置された短い直線状のケーブルで、これは(2)のケーブルと協同して円周方向プレストレッシングに役立てられている。

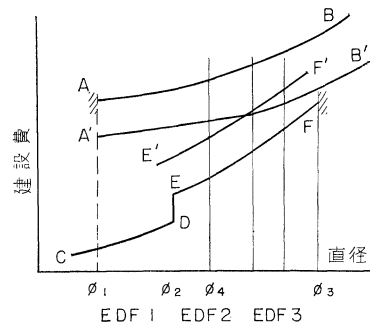
圧力炉では大きい直径の燃料棒のそう入口、ガスパイプその他の開口部がコンクリート壁体に設けられるため、ケーブルの配置はなかなか容易ではない。

以上の Marcoule における G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub> 炉の貴重な経験を基礎としてフランスはさらに本格的発電用炉の建設にのり出した。

フランス電力は Chinon に天然ウラン、グラファイト、CO<sub>2</sub> ガスの組み合わせによる発電所を建設中である。この際検討された構造としては鋼製炉とP C炉であった。

これらの検討結果を示すのに 図一2 は非常に有意義なものである。ある与えられた設計圧力に対して縦軸に建設費を横軸に炉の寸法を、例えば球形ならばその直径を用いて表わす。P C炉の建設費を EDF 1 炉の設計に際して従来の既存の例 (G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub> 炉) から求めると図の AB 曲線のようになることがわかった。ある直径  $\phi_1$  以下で

図一2 炉の直径と建設費



はP C炉は建設不可能となり曲線はA点で止まり、直径の大きいほうに対しては制限がない。それはある直径以下ではコンクリート施工自身が不可能となるからである。

鋼製炉についての曲線は CDEF のようになって直径はどれほど小さくてもよいがある直径  $\phi_2$  において不連続が生じた。これは工場で作ったものを運搬することが不可能となるので、現場で建設する必要がおり、自然建設費が増大することとなるのである。直径について上限界Fがあって、これ以上の直径の炉の建設が不可能となる。鋼板厚さが炉の寸法とともに増大し、重量の増加は取り扱いを不便とし、このため形成が困難となる。また鋼板厚さの増大は溶接を不可能とする。以上のような諸理由で鋼製炉の上限がある。

最初の炉 EDF 1 の予備設計では同筒型を用いその直径も約十数メートルのもので 図一2 の直径  $\phi_4$  に相当するものであったから、鋼製炉が有利であることが明らかであった。この鋼材としてクローム モリブデン鋼とマンガン モリブデン鋼とのいずれにするか検討した結果フランス電力はマンガン モリブデン鋼が有利であると判断し、鋼材“AMMO”を用いることとした。

金属学的研究もなされ施工に取りかかったのであるが、炉の大部分を形成する壁体の溶接部分に十数メートルのひびわれが発見された。この事故の原因について十分な検討がなされ、施工法を全く新しいものに変えた。この際の鋼板厚は 107 mm であった。

EDF 2 炉の建設は上記 EDF 1 炉の溶接部にひびわれが発生する前に決定されたものであった。この炉は球形であって鋼板厚さを増加しないでもよいようにした。EDF 1 炉に事故があったために、施工方法を当初のものと変えることとなった。

以上のことから鋼製炉は当初考えられた建設費より増加する結果となり 図一2 の E/F' 曲線のようになった。これに反してP Cでは当初 Marcoule の G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub> 炉に用いたような集中ケーブルをコンクリート部材の外周に沿って配置することは非常に不経済な解決法であること

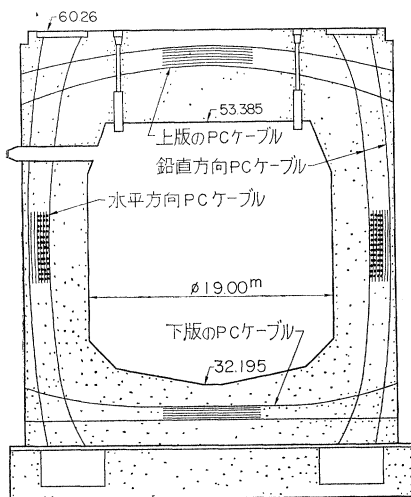
が判明した。すなわちこのような大きなケーブルはその製造に多額の費用を要するばかりでなく取り扱いも不便であり、またプレストレッシング時の摩擦損失を減少させるために配置したサドル装置が工費を増大させた。これらを解決するためには従来他の構造物に利用されていた P C 鋼材および定着装置を利用すれば、炉の建設費は相当低下させることができることとなり、図-2 の A/B' 曲線になる。

結局 P C では建設費は当初の考えより減少し、鋼製では増大したのである。

EDF 3 炉 (375 MWE) の寸法を考えると (これは 図-2 に EDF 3 と示してある)、P C としたほうが有利であるという結論が得られたのである。以上の結果 EDF 3 炉は P C によって現在建設中である。

この EDF 3 炉の概要はつぎのようである (図-3)。

図-3 EDF 3 の概要



内側はシリンダーの形をしており、直径 19 m、高さ 21.19 m 上面は水平で、下側は載頭円錐形をしている。

内側壁には 25 mm 厚さの鋼板からなる気密壁がコンクリートに取り付けられている。これはコンクリート打ちのときの内型わくとして役立っている。

外形は 27.45 m の正方形底を有する角柱であって高さは 22.06 m である。

側壁および底板の厚さは変化しているが、最小で 5 m あり上板は 5.90 m ある。

圧力炉と基礎コンクリートとの間にはネオ プレーンゴム板がそう入されており、その厚さは中央で 2 cm、端では 1 cm である。これはプレストレッシングのときおよび内圧を受けたときに圧力炉が基礎上で移動できるようにするためのものである。

側壁は鉛直および水平方向にプレストレッシングされている。鉛直方向ケーブルは上板と底板部とにその両端

が定着され鉛直方向引張応力に抵抗できるようにしてある。水平方向プレストレッシングは炉の側壁に定着された水平面で彎曲したケーブルによって実施されている。これはシリンダーのフープテンションに抵抗するプレストレスを与えるためのものである。

炉の上下両面の壁中には 120° の角で交差する P C ケーブルが配置してあり、その端は炉の側壁に定着されている。

ケーブルは高強度の鋼より線からなっており最初に与える引張力は 1 本あたり 115 t であるが、緊張時摩擦コンクリートの乾燥収縮、クリープなどの原因による引張力の減少がおわったあとでは 95 t となる。プレストレッシングを与えたのちはシースと P C 鋼線との間にグラウチングを実施している。P C 鋼材の全重量は 1686 t である。こただけの重量の P C 鋼材を一工事に用いることはいかほどその工事量が大いものであるかわかる。比較のため日本の道路橋の例をとると、スパン 40 m、幅 7.0 m の場合で使用 P C 鋼材重量は 8.5 t 程度のものである。これを考えると P C 工事としての規模のほどがわかる。

炉の内外面、シリンダー部と床板との結合部、パイプ配置部、などの局部応力が生ずる場所には鉄筋を十分に配置している。

P C 圧力炉を建設にあたって最も重要な問題点はコンクリート温度および内張鋼板温度をできるだけ低くおさえて、熱応力度を小さくすることである。コンクリート温度は 70°C をこえてはならないので、内張鋼板に溶接した鋼パイプをコンクリート壁側に設け、これを冷却用に用いている。

この EDF 3 炉の設計条件はつぎのようである。

a) 運転休止時および運転時 (内圧 27 kg/cm<sup>2</sup>) において熱応力をも考慮して、コンクリート圧縮応力度およびせん断応力度がその許容値内にあること。

b) 試験圧力 (40.5 kg/cm<sup>2</sup>、すなわち運転圧力の 1.5 倍) において引張応力を生じてよいが、万一、生じたひびわれは運転圧力では完全に閉ざされる必要がある。

c) 破壊圧力 (90 kg/cm<sup>2</sup>、運転圧力の 3 倍以上) を受けてもガスもれがあってはならない。すなわち構造物として内張鋼板の気密性が保てるような作用をする必要がある。

1/6 の模型を造って水圧を加えて試験をしている。第一の供試体は内張りとして補強ゴム板を用いてコンクリートのもれを防いだ。この補強ゴム板はひびわれ幅 5~10 mm まで耐えられるものである。第二の供試体は 5 mm 厚さの鋼板によって内張りされている。試験の結果はつぎのようであった。

a) 両供試体ともにつぎの圧力に達するまでは弾性

的に作用した。

第1 供試体……………27~35 kg/cm<sup>2</sup>

第2 供試体……………35~40.5 kg/cm<sup>2</sup>

b) 第1 および 第2 供試体についてそれぞれ 48 kg/cm<sup>2</sup> および 60 kg/cm<sup>2</sup> の圧力に達するまで何の変状もおこらない。

c) 第1 および 第2 供試体についてそれぞれ 93 kg/cm<sup>2</sup> および 110 kg/cm<sup>2</sup> の圧力まで水のろう水はおこっていない。

これらの結果から炉の内側に鋼板を張ることは炉の安全性を高めるに非常に有利であることがわかった。

現在引き続いて EDF 4 炉がプレストレスト コンクリートによって建設することが決定している。これは炉の内部に反応炉ばかりではなく熱交換機、プロアーパイプ類、などをすべて収容するものであって非常に大きいものとなる予定である。

従来の圧力炉は単に反応炉だけを収容して熱交換機、プロアー、配管関係は圧力炉の外に配置していた。このため各種機械類、配管類を高圧に耐えられるようにするためこれらの設備費がかさみ、結局は発電原価を高いものとしていた。

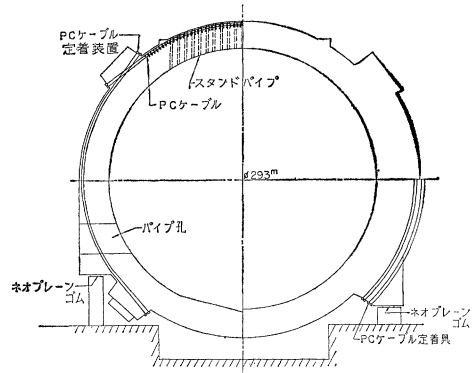
しかし、これらの設備を圧力炉の中に収容することができるのであれば、特別な耐圧に関する考慮も必要とならずこれらの設備費が従来のものに比して安価となり、発電原価も低下できる。このような理由から次第にこの種構造、すなわち反応炉、熱交換機、プロアー、配管類、などをすべて一つの圧力炉中に収容しようとする傾向がある。この種構造の炉を《intégréés》と呼んでいる。この種圧力炉は当然その寸法も大きくなり鋼製では全く不可能か、もしできるとしても非常に建設費が高いものとなる(図-2 参照)。ここにおいて P C 圧力炉がこれらの問題を解決するチャンピオンとして活躍することとなる。

イギリスにおいては Oldbury に P C 圧力炉が建設されている。これは内側は 23.5 m 直径、18.3 m 長さのシリンダーであって、その出力は 280 MWE である。

現在建設中のものは前記の《intégréés》方式のもので 500 MWE の容量がある。この発電所は Wylfa に建設され CEGB によって認められた。これは天然ウランウム、ガス、グラファイト系の反応炉を用いている。この Wylfa の圧力炉は直径 29.3 m の球であって、設計圧力は 30 kg/cm<sup>2</sup>、コンクリートの最少厚さは 2.6 m である。

その形状は 図-4 に示すようなものであって外側に設けられたリブの間でプレストレッシング用 P C ケーブルが配置されている。圧力炉はその下部でリング状の支持壁にネオプレン ゴム をかいして支承され自由な変形が

図-4 Wylfa の圧力炉



可能となっている。

以上のように原子力発電において圧力炉に P C を利用することによって原子炉の大きさを増大することが経済的に可能となったのである。

イギリスでは 2000 mW 程度の発電所の建設可能であると考えられており、電力費は 0.5 ペンス/kWh 程度となるであろうといわれている。

これらの経済性はまず第一に圧力を受ける各種設備、パイプ類などをすべて圧力炉に収容することによって得られ、このため圧力炉は寸法が大となり自然 P C 以外にその解がないのである。

フランス、イギリスでは火力発電のための燃料開発が電力需用においつけないことを知って熱心に原子力発電開発を実施している。この発電原価を低くするための一方法として P C 圧力炉の問題が実に熱心に検討され、コンクリート、P C 鋼材、プレストレッシング工法などの各種の問題について研究が実施され、次第にその成果をあげ、問題を着実に一つ一つ解決していることは実に敬服すべきことである。

### プレキャスト部材を用いた片持ばり施工、長大 P C 橋

片持ばり施工法による P C 橋の例は日本にもその数が多く、すでに多くの技術者に良く知られている。しかしこれらはすべて各ブロックを現場打ちコンクリートで施工しているので、一ブロック長さ 3.0~3.5 m を施工するのに非常に好調の場合でも約 1 週間以上を有するものである。

したがって工期の短い場合には困難な点があり、また工期を短縮しようとするれば、施工設備に多額の費用を要するという欠点がおこる。片持ばり施工法においてプレキャスト部材を用いて工期の短縮をはかることは考えられてきたがいまだその実例がなかった。

38 年にフランスにおいて全長 130 m の橋梁を片持ばり施工するにあたって、プレキャスト ブロック を用い

工期を短縮しているのです、この例について紹介しよう。

この橋はセヌ川に架設されたもので、橋名は *Choisyle-Roi* と呼ばれている。

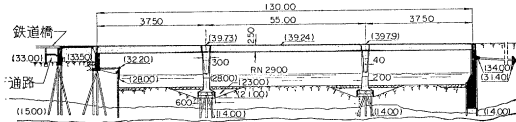
全長 130 m で 37.50 m—55.00 m—37.50 m の 3 径間連続桁で全幅 27.0 m である。

架設方法——全幅 27.00 m を一度に架設するのではなくて、橋幅の 1/2 ずつを施工することになっている。最初の 1/2 幅部分が完成したらこれを使用しながら隣の 1/2 部分を架設するのである。

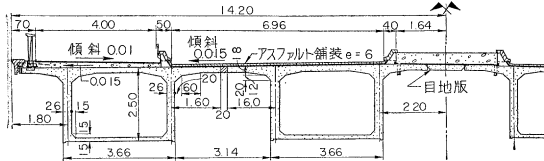
セヌ川の舟行を許容する必要から片持ばり施工が用いられ、中間の橋脚から左右に対称に張り出させることとした。この際、工期の短縮をはかる目的でプレキャストブロックを PC ケーブルによってプレストレスングしながら工事を進めた。中央径間中央部分は現場打ちコンクリートで結合し、連続ケーブルを配置し、これをプレストレスングすることによって連続桁を形成するものである。

1 主桁に 196 個のブロックが用いられたが、そのうちの 104 個は同一寸法のものであった。各ブロック間の継目はその間隔が非常に狭く、0.4~0.5 mm としてある。したがって両ブロックを相互に押しつけるだけで、従来のように目地コンクリートまたはモルタルを施工していない。目地にはエポキシを用い、すでに架設されたブロック端面にエポキシを塗り、つぎのブロックをただちに押しつける方法を用いているから、従来のように目地コンクリートまたはモルタルの硬化を持つ必要はない。

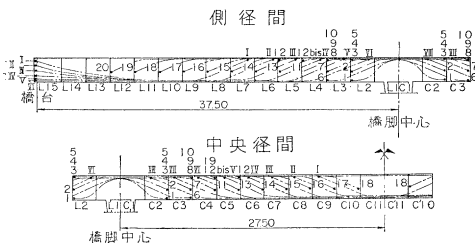
図—5



図—6



図—7 ケーブル配置図



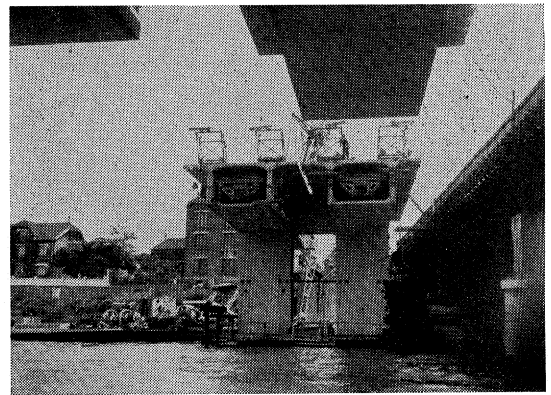
図—5,6 には断面図および一般図が示してある。図—7 にはケーブルの配置図が示してある。橋脚は V 形の壁からなっている。その下端は基礎に固定である。桁のアバット側支承はネオプレンゴムを用いてある。桁高は一定で 2.5 m となっている。

断面は 2 本の箱断面主桁からなっており、これらは架設中は独立しており、完成後の横締めケーブルによってプレストレスングされる。

各主桁間隔は 6.80 m である。下床板は 0.15 m 厚さ、上床板は最少 0.18 m である。

各プレキャストブロックの長さは 2.5 m であり、1 個の重量は約 20 t である。これをポンツーンで運搬しクレーンで引上げ架設した。このときブロックを支持するため、すでに架設された片持ばりの箱断面の内側から I ビームを出して、これに受けさせている (写真—1)。

写真—1 架設中の状況



1 日の進行は調子のよいときで 4 ブロックが架設された。すなわち 1 日 10 m の速度である。上部構造を架設始めたのは 1963 年 7 月 8 日で、完成は 10 月 5 日である。約 3 カ月で幅約 12 m、全長 130 m の連続桁を架設したことになる。

これは非常に速度が早いものであって、急速施工上特に注目すべきことである。

最近完成した PC の長大橋としては Maracaibo 橋がある。全長 8 678 km、幅 17.40 m、舟行区間の水面上高さは 50.00 m である。これらのうち最大スパンは 235 m であって、現在のところ PC としては最大である。

図—8 片持ばり部

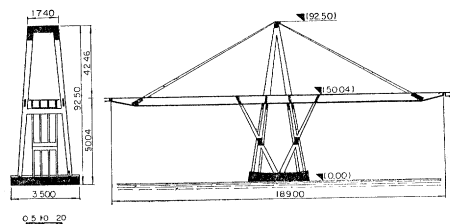
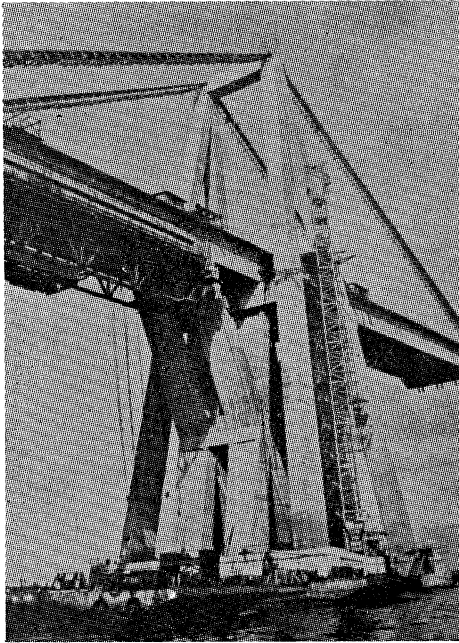


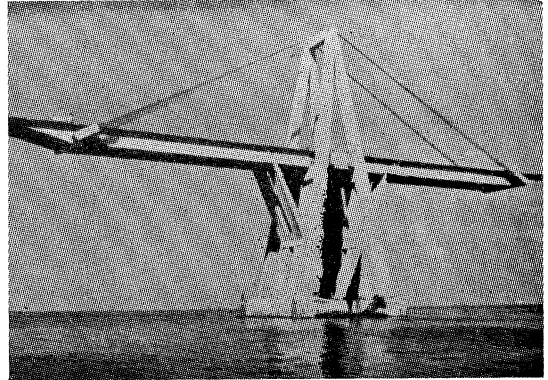
写真-2 工事中の状況



これが5径間ある。

これらの径間は図-8に示すように斜吊橋のような構

写真-3 完成後の状況



造で、橋脚は XX 型の4本の脚と、その外側にある A 型の塔からなっている。これら片持ばりの中間に 46.00 m スパンの単純桁が架設されるのである。

吊材ケーブルの最大および最小引張力は、5970 t および 5460 t である。写真-2 にはこの部分の工事中を写真-3 には完成後の状態を示している。

このほかシドニーの 200 m スパン アーチ橋、ドイツの スパン 200 m の片持ばり架設による橋梁など長大スパンの橋梁がつぎつぎと完成している。

(1963.11.26・受付)

書 評

コンクリート構造急速施工委員会報告  
— プレキャスト方式コンクリート工事についての研究 —

土木学会コンクリート  
構造急速施工委員会編

最近、土木工事量の飛躍的増大にともなって、コンクリート工事の工期を短縮することが切実な問題となり、関心をあつめているようである。急速施工の手段は、ほかにいろいろな方法があるが、プレキャスト方式は工期短縮の目的に適うほかに、確実な施工管理が行ないやすく、部材の標準化を進めることにより設計を簡略にでき、さらに量産による工費の低減を期待できるなどの利点があつて、その応用領域をひろげることはコンクリート工事の合理化に大きな効果をもたらすものと考えられる。

本書は、日本道路公団の研究委託にもとづいて、37年10月、当学会に設置をされたコンクリート構造急速施工委員会において調査されたプレキャスト方式に関する一般の事項、なかんづく、プレキャスト部材継手に関する問題を主に諸資料をあつめ、38年3月までの成果を中間的にとりまとめられたもので、日本におけるプレキャスト方式の現況を概観し、文献調査の結果をまとめた主文(37ページ)に、主として部材継手に関する文献目

録および文献集(和文11編、ロシア語6編、独文5編、英文18編、仏文2編、計42編)377ページが付録としてつけられている。

近來、建築方面では、プレファブ構造が次第に一般化しようとする状勢で、プレキャスト方式の採用はかなり急速に進みつつあるようであるが、土木関係では、標準化の容易な比較的小さい部材にはプレキャスト製品が実用化されているとはいえ、重要構造部材に適用した実績ははなはだ少ないようで、その開発には、多くの解決すべき問題点が残されていると考えられる。本書は、前述のように中間報告の形で出されており、プレキャスト方式の現況と諸問題点についての概括的な分析考察にとどめられているが、付録の文献集とあわせ、貴重な資料として、この方面に関心の深い会員諸氏にご利用頂き度いと考えられるので、ここに紹介する次第である。

体 裁 : 210 mm × 300 mm 本文 37 ページ 付録 377 ページ  
注 : 本書は学会に備付けがあります。

【編 集 部】