

講座 プレストレストコンクリート 構造計算入門 (1)

概 説

本 岡 順 二 郎*

1. 建物に用いられる種々の構造

わが国では延面積で2億5000万 m^2 をこえる建物が毎年建設されている。このような大量の建物を造るための構造材料は、大量に供給できるものでなければならない。木材、コンクリート（石灰石、粘土、砂利、砂）、鋼材などが大量供給可能な材料であり、プラスチックやアルミニウムなどはすぐれた性質をもっているが主材料とはなり得ない。

わが国の建物は、そのほとんどが上記の材料による木造、鉄筋コンクリート造、鉄骨造および鉄骨鉄筋コンクリート造となっている。図-1は構造別の分類、図-2は、年度別分類であるが、木造が減少し、鉄骨鉄筋コンクリートが増加する傾向を示している。本講座が対象と

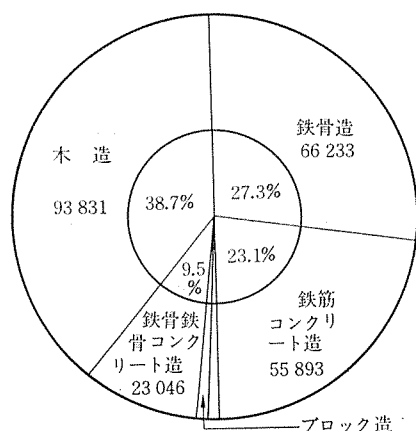


図-1 72年度着工建築物構造別延面積 (1000 m^2)

* 日本大学理工学部 建築学科

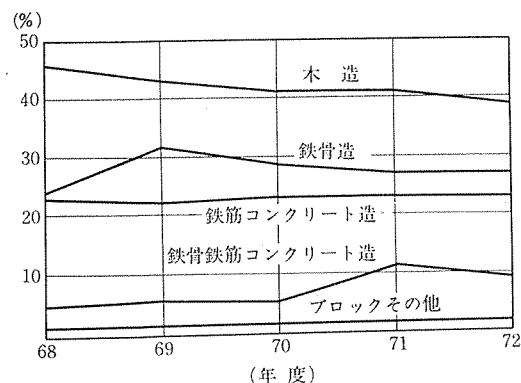


図-2 着工年度別構造別延面積割合 (%)

するプレストレストコンクリート造は鉄筋コンクリート造に分類されるが、建築物ではまだきわめて少ない。

各構造はそれぞれ固有の特長と欠点をもっており、概要は表-1のようである。プレストレストコンクリート(PC)は鉄筋コンクリート(RC)の欠点の一部を解消し、その利用範囲を広げようとする構造である。

鉄筋コンクリートが使用されだしたのは1850年頃からであるが、その欠点の改良を目的として1886年にはPC構造の特許(アメリカ, Jackson, PCスラブ)がとられており、以来多くの実験研究がなされてきた。

PC工法が実用化されたのは、フレシネー工法(Freysinnet, フランス)の特許(昭7)以後であり、わが国の建築物では昭和28年の東京駅6, 7番ホーム上屋に始まり、昭和35年頃から本格的な利用が行われてきた。

2. 鉄筋コンクリートの欠点を補う種々の工夫

鉄筋コンクリートの欠点を表-1に示したが、詳細に

表-1 各種構造の特長

	利 点	欠 点
木 造	建設費が安い 工事が容易で短期 軽量である 建替えが容易	耐火, 耐久性が低い 高層, 大スパンがで きない 音, 熱の遮蔽性が悪い
鉄筋コン クリート造	建設費が安い 耐火, 耐久性が高い 一体性, 剛性が高い 遮蔽性がよい 自由な造形が可能	重量が大きい 大スパンが困難 ひびわれが生ずる 材料の再使用がで きない
鉄 骨 造	高層大スパン可能 工期が短い 材料の再使用可能 重量が小さい	耐火, 耐久性が低い 剛性が小さい 遮蔽性が悪い
鉄骨鉄筋 コンクリート 造	高層大スパン可能 一体性, 剛性が高い 遮蔽性がよい 耐火, 耐久性が高い	工期が長い 工費が高い

述べれば次のようである。

コンクリートが硬化するためには、セメント重量の 30 % 程度の水を必要とし、それ以上の水はそのままコンクリートに残る。この水が徐々に蒸発するとコンクリートは縮み（乾燥収縮）、コンクリートの硬化にともなう縮み（硬化収縮）とあわせて長期間には $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 程度の収縮が生じる。

構造部材ではコンクリートの自由収縮が拘束されるので、このような収縮が生ずる代りに引張応力が生じ、コンクリートは引張強度が低いから図-3 のようにひびわれを生ずることになる。

ひびわれがない場合でも、わずかな引張応力が作用すれば、容易にひびわれが生ずるので、鉄筋コンクリート部材はもともとひびわれが発生したものと考えて設計するのが合理的である。

そこで、引張力は鉄筋が引受け、圧縮部分はコンクリートが引受ける図-4 のような分業が考えられる。これが鉄筋コンクリートの原理であるが、このため次の欠点が生ずる。

部材の引張応力が生じた部分にはひびわれを予想せざるを得ないから、この部分のコンクリートは力学的には存在しないのと同じであるが、重量は存在するのでいわばぜい肉であり、部材の載荷能力を低下させることになる。また、引張部分の鉄筋が有効であるためには、鉄筋に引

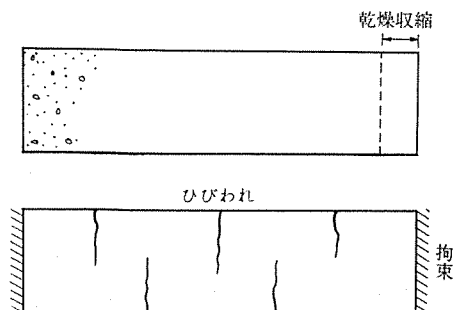


図-3 乾燥収縮によるひびわれ

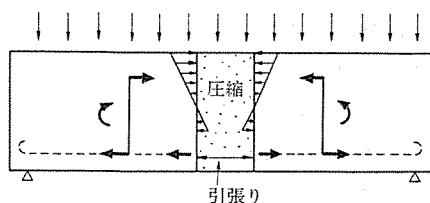


図-4 鉄筋コンクリートはり断面の応力度分布

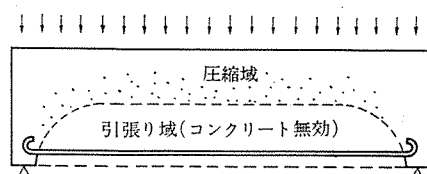


図-5 鉄筋コンクリートはりの欠点

張力が生ずること、すなわち、鉄筋が伸びることが必要である。鉄筋と同位置にあるコンクリートは鉄筋と同じ伸びをすることになるが、通常用いられる鉄筋を安全な限度まで引張ったときに生ずるコンクリートのひびわれは耐久性や剛性の限度(使用限界)をこえるものとなる。そこで、大きな載荷能力がある場合でも、通常の使用に差し支えないように考えたときの載荷能力はかなり低いものとなる。すなわち、鉄筋コンクリート部材は最大耐力に比べて使用限界が低い—不経済—な場合が多いことになる。

以上の二つの欠点、自重が大きいことと使用限界が低いことのため、鉄筋コンクリートばりはスパン 8 m 程度までが無理のない限度となる。

鉄筋コンクリートの欠点を改良するために、従来から表-2 のような種々の工夫がなされている。

表-2 コンクリートの改良

比重が大きい	発泡コンクリート 天然または人工軽量骨材の使用
乾燥収縮	低スランプでの打設→振動打ち 使用水量小で施工練度を上げる→A E 剤など混和剤の使用 打設後余剰水の除去→真空コンクリート工法 無収縮または膨張コンクリート
引張強度が小さい	養生法改良による高強度化→電熱または蒸気養生、高温高圧養生(オートクレーブ)、加圧、振動、遠心力などによる締固め

PC工法はコンクリートの改良法の一つと考えられる一面をもっており、表-2 でいえば引張強度増大に相当する。

3. PC 工法の原理

コンクリートはわずかの引張りでひびわれを生ずるので、あらかじめ圧縮応力（縮み）を与えておけば、外力によって引張りを受けても普通のコンクリートのようにすぐひびわれを生ずることはない。あらかじめ与えられる圧縮応力（プレストレス）が適当に制御できれば、前項に述べた部材の使用限度が制御できることになり、経済的な設計や大スパンが可能となる。

コンクリートを一方向に圧縮または引張ったときの単位面積あたりの力（応力度）とその方向の単位あたりの伸縮（ひずみ度）との関係（応力度ひずみ度曲線）は図-6 の原点Oに対する曲線で与えられる。このコンクリートをあらかじめ σ_p だけ圧縮しておけば、その後の応力に対しては原点が O' にあるコンクリートと考えてよいことになる。すなわち、圧縮に対しては $\sigma_B - \sigma_p$ の強度、引張りに対しては $\sigma_p + \sigma_t$ の強度をもつコンクリートとみなしてよいことになる。

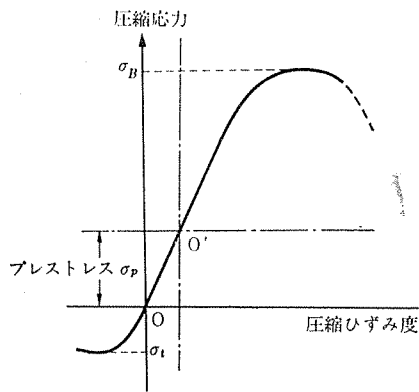


図-6 プレストレスによるみかけの引張強度の増大

この σ_p がプレストレスであり、その値は必要に応じて任意に定めることができる。

建物の寿命はほぼ永久と考えるから、図-6 における σ_p の値はなるべく一定値を保ち、永久時間後においても必要な値を保つ必要があるのは当然である。しかし、プレストレスを長時間保つことは 5. に述べる理由で容易ではなく、初期の PC 工法が実用化しなかった理由の一つもこのプレストレス保持の困難さにあったようである。

また、プレストレスの与え方にも種々の方法が考えられており、現在では 100 種類をこえる工法がある。

4. プレストレスの与え方

プレストレスを与える多くの方法を分類すればおおよ次のようである。

ケミカルプレストレス：鉄筋コンクリートに膨張セメントを用い、コンクリートの膨張を鉄筋(PC鋼材)で拘束することによりプレストレスを生ぜしめる。建築部材には利用されず、ヒューム管で用いられている。

プレテンション法：強固な反力台(アバット)の間に PC 鋼材を緊張し、打設したコンクリートが硬化したのちに PC 鋼材をゆるめると、PC 鋼材は付着力によってコンクリートとともに縮むことによりプレストレスが生じる。アバットが必要であるため、工場製品(杭、枕木、桁、板類など)に利用される。

ポストテンション法：硬化したコンクリート部材中に PC 鋼材を付着のない状態で配置しておき(部材に設けた穴にそう入してもよい)外側からジャッキで緊張した後に端部をくさび、ねじなどで止めれば(定着)部材両端を集中圧縮したことになり、プレストレスが与えられる。場所打ち建物はすべてこの方法によって施工される。

巻付け工法：水槽やサイロなど円筒状の構造物では、周囲に PC 鋼線を緊張しながら巻き付け、外側か

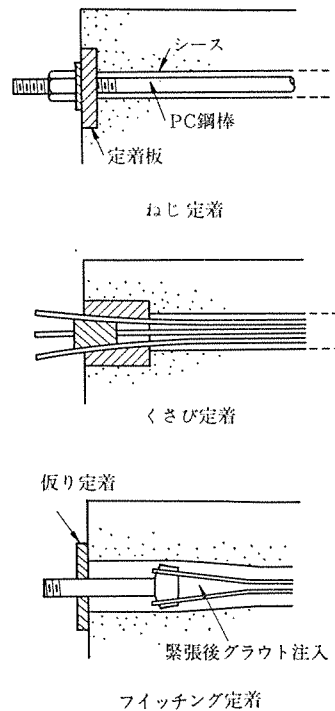


図-7 PC 鋼材の定着

らコンクリートを吹付ける工法。

その他：部材の間に薄いジャッキ(フラット ジャッキ)を配置して押し開き、そのまますき間をコンクリートで充填する。ポストテンション法で PC 鋼材に通電して発熱させた後定着する。

建築物で利用されるのはポストテンション法であり、スラブ、小はりなどにはプレテンション法による工場製品が用いられる場合もある。

ポストテンション法には、使用する鋼材(PC鋼線、PC鋼より線、PC鋼棒)とその止め方(定着方式)に多くの方法があるが、大別すれば図-7 のようである。

ねじ定着：PC 鋼棒の端部のねじをナットで止める。鋼線の端部を製釘して鋼棒に止め、鋼棒の他端のねじで定着したり、より線を鋼管中に圧着したのちねじ定着する場合もある。

くさび定着：PC 鋼線やより線をモルタル製や鋼製のくさびで定着する。

フィッチング定着：緊張材端の拡大部分の後方にモルタルを充填して定着する。

具体的な工法については後章に述べるが、工法ごとに緊張力の大きさ、鋼材位置の制限、定着部のデテールが異なるので、実際設計の場合には各工法の知識が必要となる。

5. 材料に必要な性質

図-6 においてプレストレスは永久保証されなければならないが、そのためには種々の材料的性質が要求され

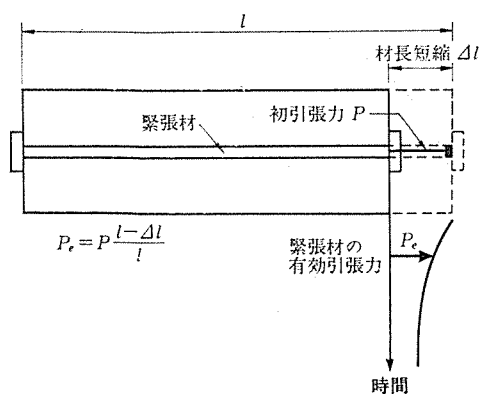


図-8 コンクリートのクリープと乾燥収縮による緊張材引張力の減退

ることになる。

コンクリートは前に述べたように時間とともに乾燥収縮するほか、長期間荷重を与え続けると、時間とともに縮む性質（クリープ）をもっている。

このため図-8に示すように、緊張材の両端は時間とともに近づくゆりみを生じ、最初の緊張力したがってプレストレスは時間とともに減少することになる。

また、緊張した鋼材の両端を固定するとき、緊張材の引張力は時間とともに減少する性質（レラクセーション）があり、この現象もプレストレスを減らすことになる。

乾燥収縮、クリープおよびレラクセーションによるプレストレスの減少が大きいとPC工法は利用できなくなるので、その対策を考える必要がある。

プレストレスの減少を止めるには二つの対策がある。一つは乾燥収縮やクリープが小さいコンクリートを用いることで、具体的には密実で水量の少ないコンクリートすなわち高強度コンクリートを使用することである。

次は多少部材が短縮して緊張材がゆるんでも、そのゆるみをカバーできる程度に緊張材の伸びを大きくしてお

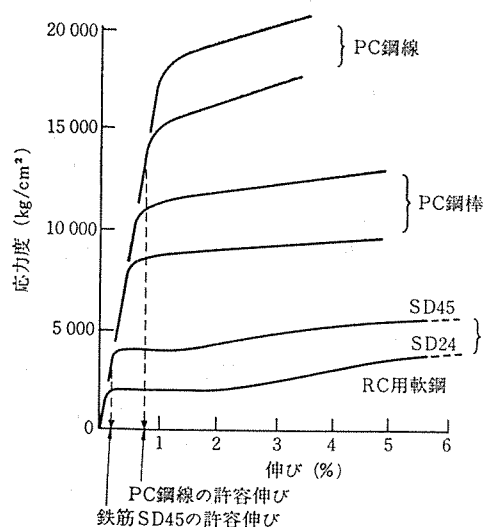


図-9 各種鋼材の応力度ひずみ度関係と許容伸び

くことである。鋼材は品質にかかわらずヤング係数がほぼ等しいので、十分大きな伸びを与えるためには図-9のように高強度の鋼材を使用することになる。また、レラクセーションを小さくするための加工を施した鋼材が望ましいことになる。このような性質をもった鋼材がPC鋼材である。

結局、PC工法では高強度のコンクリートと高強度の鋼材を用いることになるが、これは「プレストレスを保持するために高強度材料を用いる」のであって、「部材の強度を高めるために高強度材料を用いる」のではない。

高強度コンクリートは水セメント比が小さく、ワーカビリティが悪いので、建築構造物のように部材寸法が小さい場合にはコンクリートの打設が困難となりやすい。

また、高強度鋼材は加熱や腐食に対して敏感であり、建築物では特に火災に対する配慮が必要となる。

6. PC ばりの応力

以上述べたPCの特長は、RCと比較すれば理解しやすい。

図-10は同じ材料、寸法のはりで、PC ばりには鋼材にあらかじめ緊張力が与えられている点だけが異なっているものとする。

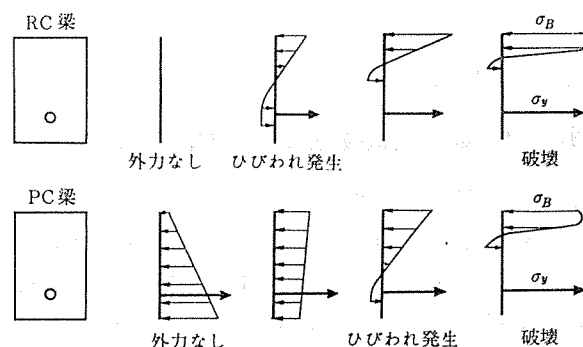


図-10 RC および PC ばりの曲げ破壊に至る経過

外力のモーメントが増加するとともに応力度分布は変化するが、曲げ破壊するときの両断面の分布は等しく、同じ破壊抵抗モーメントとなる。異なるのはひびわれ発生の時期であり、PC ばりは大きな使用限度をもつことになる。この使用限度をプレストレスの大きさに制御できることがPC工法の大きな特長である。

7. PC 工法の特長

前項に述べた応力度制御のほかにもPC工法は大きな特長をもっている。過荷重でいったんひびわれが生じて、外力が通常の状態にもどれば、ひびわれは閉じること、ブロックを連ねてプレストレスで圧着すれば一体化することなどである。このような特長を列記すれば表一

表-3 PC工法の特長とその利用

応力度 制 御	使用限度向上	大スパンラーメン、シェル、折板、トラス、スラブ等
	ひびわれの阻止	水槽、水路、ヒューム管、海中構造物等
	ひびわれの復元力	耐震用すじかい、PC耐震壁等
圧 着 法	プレキャスト部材の結合	ラーメン、プレハブ、壁式プレキャスト、巨大部材の分割製作等
	小部材のあと取付け	ブラケット、PC階段等

3 のようである。

以上のほか、高強度材料使用による資源の節約、耐久性が大きいことなども特長となろう。

欠点としては、固練りコンクリートによる打込みが困難であること、単価が高くなりがちであること、工数が増すことなどがあげられよう。

8. PC工法利用の現状

図-11 は PC 工法の年度ごと受注額であるが、わが国では圧倒的に橋に利用されており、建築物にはあまり利用されていない。しかし、アメリカでは 図-12 のように建築物で多く用いられているので、わが国でも条件がととのえば増加していくものと考えられる。

なお、プレテンションとポストテンションは 3 : 7 の割合（全 PC 工事）で用いられている。

9. PC 建築構造物設計の規制、規準

建築物は建築基準法、施行令などの法令に規制される。PC 構造は、施行令の追加に相当する建設省告示第 949 号（昭 48.4.23）が適用される。この告示には材料の許容応力度、安全度検査のための荷重の組合わせなど設計の原則が示されている。

実際の設計は日本建築学会制定のプレストレストコンクリート設計施工規準（昭 50.2 改）によって行われる。

また、各種 PC 工法はその方式のために作られたデザインマニュアルや施工規準を準備しているので、これらも設計の参考となる。

10. 建築物特有の問題

PC 工法を建物に利用する場合には、PC 建物であるための種々の制約を受けることになる。PC 建築物特有の問題を列挙すれば次のようである。

（1）不静定構造物

建築物は多くの場合高次の不静定構造物であるため、一部の部材にプレストレスを導入すると、その部材が縮むための他の材の拘束を受けて不静定力や不静定モーメン

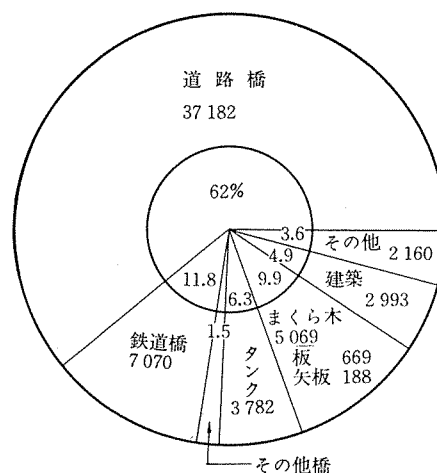


図-11 70, 71, 72 年度 3 ヶ年平均受注額内訳
(単位 100 万円)

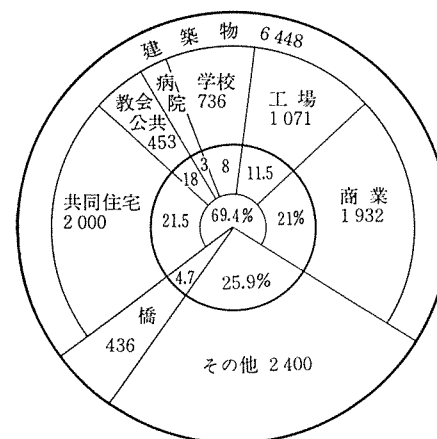


図-12 71 年度全米 PC 工事金額内訳
(単位 100 万ドル)

トを生ずる。ラーメン構造ではこのことを利用して、設計に都合のよいモーメント分布をとる場合が多い。また、一体打ち建物のはりにプレストレスを与える場合には、スラブや壁に拡がるプレストレスを計算することが困難なことが多い。

（2）併用構造

建物のすべてを PC 部材とする必要はなく、たとえばラーメン造では大スパンのはりを PC、柱と桁方向のはりは RC とすることが多い。

このような併用構造ではそれぞれの部材の安全度を統一して（同じ思想で）設計する必要がある。

また、PC 部材の曲げモーメントは RC 部材に比べて一桁程度も大きいので、前（1）項の他材への影響には注意する必要がある。ラーメンの同じ層で PC ばかりと RC ばかりが連続する場合には、PC ばかりにプレストレスを導入したのち、一層遅れで RC 部分を施工する場合もある。

（3）組立て構造

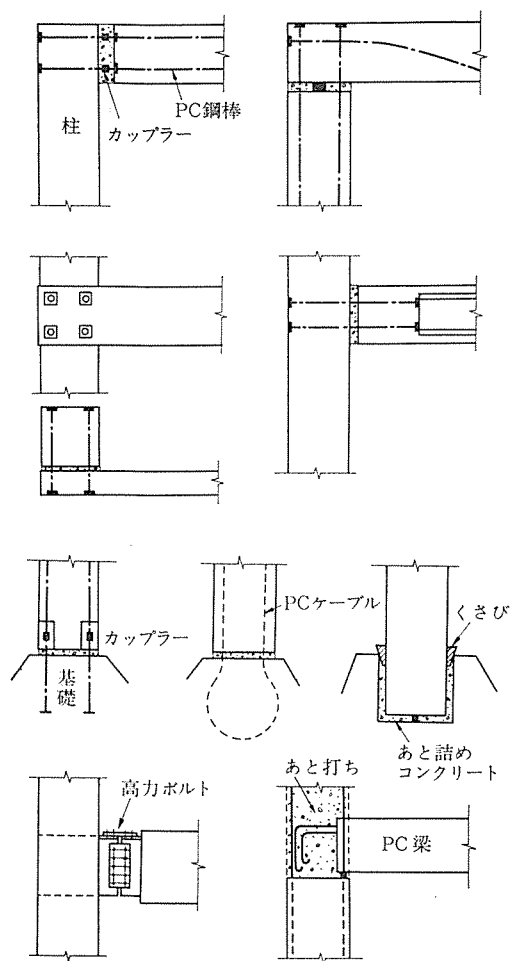


図-13 ラーメン材の接合例

建物のプレハブ化が年々進んでおり、共同住宅用の壁式プレキャストでは壁パネルのたて締めにより構造の一体化が行われている。ラーメン造のプレキャスト化の場合には、各材をプレストレスによって圧着接合することが多い。ラーメンでは、はり柱の仕口部分に大きな応力が作用するので、仕口部で接合する場合には定着装置の存在による仕口耐力の低下や定着部のデザイン上の配慮に注意する必要がある。接合方法には圧着工法のほか、埋込み金物相互の溶接かボルト接合、接合部を場所打ちとする方法などが行われている。

(4) 耐火性

建築物の耐火性は年々重視されてきている。厚さの薄い高強度コンクリートは急激に熱すると爆烈する場合があるので、PC板を用いるときは耐火上の配慮をする必要がある。また、はり柱などの部材でもPC鋼材のかぶり厚さは大きくとる必要がある（規準では5 cm）。

(6) 部材の形状

建築物は人の居住を目的とするから、力学的に有利な断面形状を採用できない場合が多い。たと

えば、はりにはI形が有利であるが、通常は長方形とすることが多い。

11. PC 建物の実施例

(1) ラーメン

PC工法は建物の多くの種類に対して利用されているが圧倒的に多いのは不静定ラーメン造である。

スパンは20~40 m、多くの場合柱と桁ばりはRC部材で、通常のRC造と同様に施工され、1層ごとにプレストレスが導入される。

組立てラーメンの場合は柱もPC部材とし、スラブは場所打ちとしPCばりは合成T形ばりとなる。

各層床を地上で重ねて施工し、先に立上げた柱に順次吊上げて固定するリフトスラブ工法があり、アメリカで

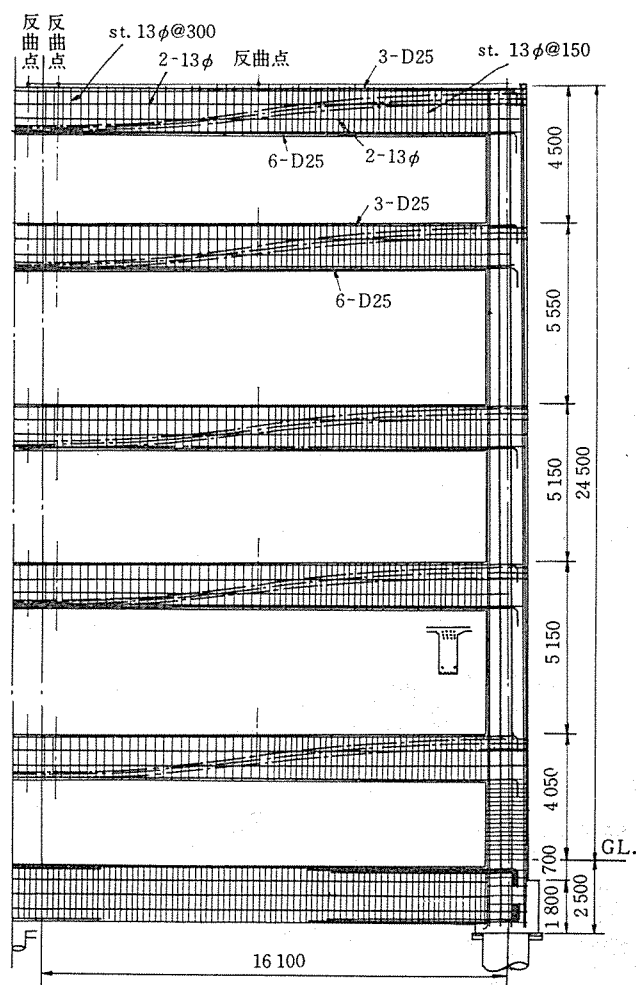


図-14 場所打ち PC ラーメン例

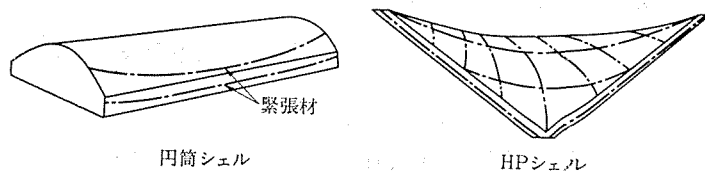


図-15 PC シェルの例

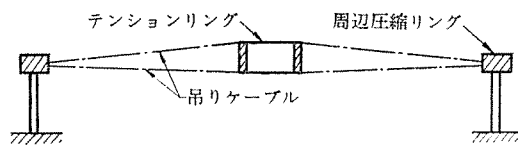


図-16 車輪状吊屋根

は 14 階程度の建物が施工されている。

(2) シェル、折板

シェルや折板構造は本来大スパンを目的とする構造であり、これに PC 工法を利用すればさらに大スパンを可能とすることができる。また、プレキャスト部材をプレストレスで結合して、一体として挙動するシェルをつくることもできる。

(3) 壁式造

壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造は、壁パネルの水平ジョイントを埋込み金物相互の溶接で接合、鉛直ジョイントをコッターと鉄筋で接合する通常の方法で 5 階建てまでが施工されている。

しかし、10 階程度の高さになると、前記の方法では設計できなくなるので、壁パネルを鉛直方向にプレストレスで圧着することにより高層の壁式造が建てられている。

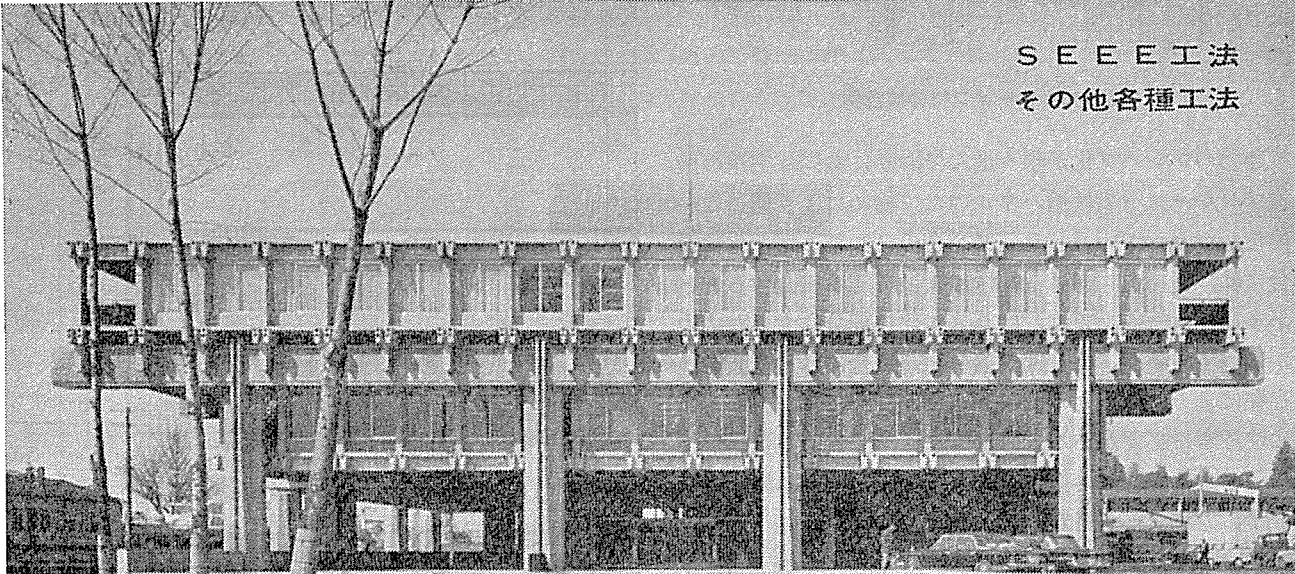
(4) 吊 屋 根

PC 鋼材で屋根面を吊下げる吊屋根構造は、双曲放物 (HP) 面や車輪状の構造で多く建てられている。吊屋根はプレストレスト コンクリートではないが、一般に周辺のリングビームにプレストレスが与えられ、また、屋根面の PC 鋼材の緊張工事は PC 工法と同じである。

(5) そ の 他

トラス、アーチなどに PC 工法が利用されているほか、構造部材としては大スパン小ばり、耐震壁および耐震用すじかいなどに用いられている。また、建築用コンクリート製品としてはダブル T スラブ、各種有孔版、屋根版などが製造されている。

SEE 工法
その他各種工法



プレストレスト・プレキャストコンクリート

栃木県庁議会棟
黒 沢 建 設 株 式 会 社

取締役社長 黒 沢 亮 平

東京都新宿区三光町25番地 三立ビル TEL 03-356-3573(代)

PC工場 神奈川県秦野市三屋字川原135番地 TEL 0463-75-1324

御 寄 稿 の お 願 い

この雑誌は、プレストレストコンクリートのわが国でただ一つの総合技術雑誌です。会員諸兄の技術向上にいささかでも役立つよう日夜苦心して編集に当たっておりますが、多くの問題を広くとりあげるのはこれでなかなか大変なことです。一方的になっても困りますし、とにかく皆様の卒直な声をお聞かせ願えませんでしょうか。自由に気楽に意見を述べて頂く会員欄、疑問点を相談していただきたい質疑応答欄、工事の状況、施工の苦心点を、現場から速報してほしい工事ニュース欄、口絵写真欄、その他報告、質問など、お気軽にどしどし原稿をお寄せ下さい。また、新設してほしい欄とか、もっと充実してほしい欄、雑誌に対する建設的なご意見なども募ります。少しでも多く皆様の声を反映した親しみやすい雑誌に育て上げたいと念じておりますのでご協力願います。以上の原稿、ご意見などはすべて下記へお送り下さい。

〒102 東京都千代田区麹町1の10の5 紀の国やビル

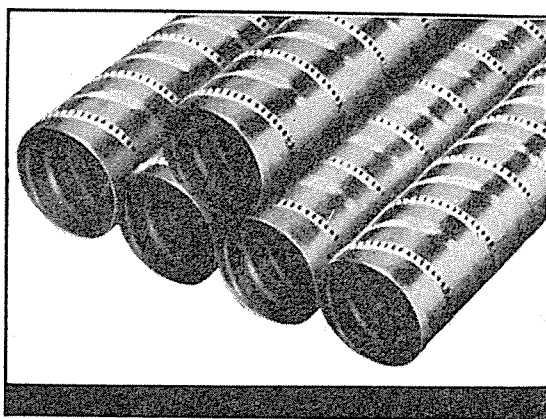
プレストレストコンクリート技術協会 会誌編集委員会宛

TEL (261) 9161

スパイラル・シース®

〈標準型・WS型〉

●PC構造物・
工法に抜群の好
評をいただいで
おります



スパイラル・シースには標準型とWS型の二種類があり、用途、工法などによりご選択いただけます。

●用途
道路橋・鉄道橋、モノレール桁、ダム、水槽、タンク、海洋開発、沈埋トンネル、PCセグメント、舗装、プール、PCパイプ、PCヒューム管、他各種のPC構造物。

■神奈川県工業試験所で製品の優秀性実証！

■国土建設に貢献する一



PC器材の専門メーカー

鋼 弦 器 材 株 式 会 社

取締役社長 平野勝之助

本社工場 〒220 横浜市西区中央2丁目42番6号

電話 横浜045(321) 5851番(代表)

大阪工場 〒570 大阪府守口市大久保町2丁目166番地

電話 大阪06(902) 6473～4番