

プレストレス技術の応用とその動向

— 建築構造における今後の応用動向 —

奥田 幸男*1・石井 正良*2・榊原 修*3・藤村 博*4

1. はじめに

わが国で初めてプレストレスの技術が応用された構造物は、1951年、石川県七尾市に建設されたプレストレストコンクリート（以下、PCと略記）造の道路橋である。この橋梁は、建設後50年を経過した現在も健在で、PC構造物の耐久性に対する優れた指標を示している。また、この50年間における橋梁上部構造に対するPC技術の発展は著しく、現在、わが国で建設される橋梁の約半数にPCが適用されている。

一方、建築構造においては1953年頃より徐々に屋根版および床版等にプレキャストPCが採用されはじめ、1957年に初めてプレキャストPCの大梁を用いた3階建ての建築構造が兵庫県淡路島（南淡町）に建設された。その後は、主にPCの特長を活かした大スパン架構あるいは大荷重に耐え得る梁材およびプレキャストPC造の圧着施工を中心に発展してきた。

しかし、この40数年間におけるPC建築構造は、設計法による制約および他工法に比して技術革新が停滞したことから、土木構造物に比べ、比較的低調な発展に終始してきた。あらかじめ構造あるいは部材に圧縮応力を与えるという Prestressing 技術（以下、プレストレス技術と略記）は、元来、圧縮強度に比べて著しく引張強度の小さいコンクリート部材を、より効果的に補強することを目的に考案・開発された工法である。このため、過去50年におけるプレストレスの適用対象は、圧倒的にコンクリート部材あるいは構造が多く、今後もこの適用傾向が続くと考えられる。

そこで、SEEE協会技術委員会/建築分科会ではPC構造物を含め、プレストレスをうまく応用していると考えられる構造物を、建築・土木の構造分野を問わず、さらに海外物件も含めて調査し、将来発展するであろうと考えられるプレストレスの利用動向を探ることとした。

現在、利用されているプレストレスを大別すると、

- ① 曲げ荷重を受ける構造あるいは部材（主に梁、桁など）
- ② 引張荷重を直接負担する構造あるいは部材（stay cable, トラス下弦材, earth anchor, 張弦梁, タンクなど）
- ③ 主に引張力をライズ（rise）により揚力（荷重キャンセル力）に変えて利用する構造あるいは部材（suspension cable, unbond slabなど）

④ 直圧による摩擦力を利用した圧着接合など、おおむね4種類に分けることができる。

建築・土木の各分野から調査・収集した構造物あるいは工法が約31件に上り、建築構造の中には鉄骨造屋根梁の張弦材としてPC鋼材を直接利用しているなど、一般のPC梁とは異なる用途でプレストレスを応用した例も含まれている。また、プレストレスを与える手段として、一般にはPC鋼材が用いられるが、CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）ケーブルを利用した例も見られる。さらに、空気圧を用いてビニールシートに張力を与え、球殻を保持させることによりコンクリートドーム屋根の型枠として利用するなど、特異な応用例も見られた。

プレストレスを応用した構造物の調査から、その応用形態はおおむね上述した4つの範囲に類するものであったが、中には極めて特異な応用例も含まれていた。これは、将来多様化するであろうプレストレスの応用例を示したものと考えられる。

調査・収集したプレストレスの応用例の概要および開発途上も含め、建築構造における今後のプレストレスの応用動向について報告する。

2. プレストレス技術の応用例

プレストレスの特殊な応用例として調査・収集した構造物の総数は31件で、このうち、国内物件が26件および海外の応用例が5件であった。建築および土木構造の用途別分野では、建築構造における応用例が19件で、土木構造物の例が12件となった。ただし、タンクおよびサイロの容器構造物は土木構造物に分類した。

前項で述べた応用形態別では、①主に曲げ荷重に対応する応用例が5件、②主に引張荷重を直接負担する応用例が13件、③主に引張力をライズで揚力（荷重キャンセル力）に変えた応用例が6件、および④主に直圧による摩擦力を利用した圧着接合例が7件であった。ただし、空気圧を利用したビニールシートの球殻保持のための応用例1件を、主に引張荷重を直接負担する分類の応用例とした。プレストレスの特殊な利用例として調査・収集した31物件を、プレストレスの応用分類別に、表-1に示す。

2.1 特徴的な応用例

わが国におけるプレストレス応用の歴史は約50年で、当初は橋梁、建物の大梁、および版構造（屋根版・床版）など、主に曲げ対応材を中心にプレキャスト技術とともに発

*1 Yukio OKUDA：(株)大林組

*2 Masayoshi ISHII：新構造技術(株)

*3 Tamotsu SAKAKIBARA：飛鳥建設(株)

*4 Hiroshi FUJIMURA：鹿島建設(株)

表-1 調査対象の分類

応用例分類	調査物件	適用概要, 工法など
① 曲げ対応型 5件	総合競技場 研究所試験センター 梱包配送センター 高層煙突 空港エブリンPC舗装	PCa PC屋根梁 CFRP活用木造屋根梁 PCa PC組立て架構 PC煙突 リフトアップ工法
② 引張り対応型 13件	格納庫鉄骨屋根 屋内馬場鉄骨屋根 大規模展示場 サッカースタジアム アリーナ 高層住宅 引張り対応場所打ち杭 大型石炭サイロ プレキャストPCタンク 地上式LNGタンク エチレンタンク 高架水槽 ドーム屋根	スーパーウイング工法 ストラーチ工法 張弦屋根梁 吊り屋根用ステイ 吊り屋根用PCステイ 耐震用PC引張柱 OMR/P 工法 シリンダーサイロ PCa PC組立て工法 PC低温タンク PC低温タンク 円錐タンク エアドーム工法
③ 荷重キャンセル型 6件	屋内レジャー施設 多目的ホール鉄骨屋根 大型物流倉庫 マットスラブ 吊床版橋 屋内プール	張弦トラス梁 張弦トラス梁 アンボンドスラブ PCベースマット サスペンションケーブル シェル屋根のタイケーブル
④ 圧着接合型 7件	多目的ホール屋根 コミュニティセンター 海釣り施設 トラス橋 ブレース圧着耐震補強 PCa PC耐震壁 レンガ造免震レトロフィット	PCa屋根ブロックの圧着 PCa版圧着組立てドーム PCaブロック圧着柱桁 PCa床版圧着 アウトブレース工法 PCa壁圧着耐震補強 基礎梁の拡幅圧着補強

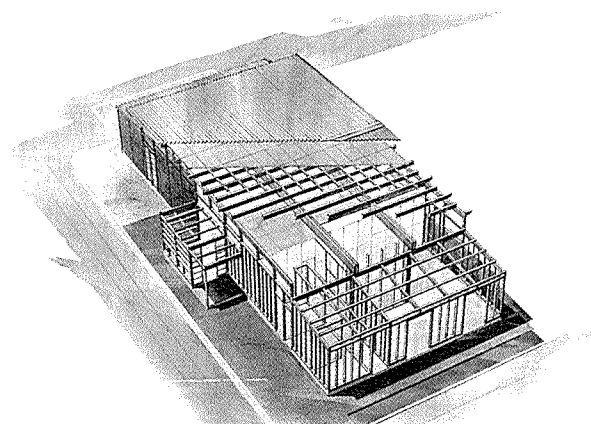


図-1 LVL梁構造

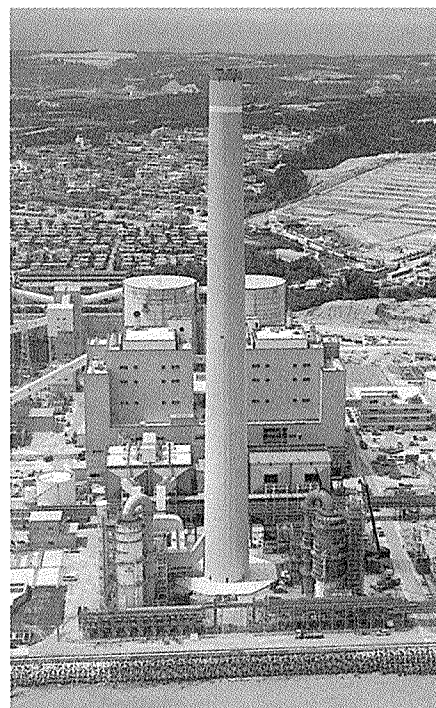


写真-1 PC煙突

展してきた。これらの応用は、いずれも大スパン架構あるいは大荷重に耐え得る梁材を目的にしており、コンクリート構造物の適用範囲を広げるうえで大いに貢献したと考えられる。各応用分類の特徴および調査した中から特徴的な応用例を次に示す。

(1) 曲げ荷重に対応する応用例

プレストレス技術の曲げ材への適用に対する調査では、大部分がコンクリート部材に適用するもので、特殊な応用を条件に選定した調査件数は5件であった。

この5件の中から特徴的な応用例として2件を選んだ。このうち1件は、木造平屋建ての研究所試験センターである。スパン18 mの屋根梁（梁成：50cm）に構造用単板積層材（LVL：Laminated Veneer Lumber）を用いており、CFRP ケーブルでプレストレスを与えることにより曲げ耐力の向上を図っている。他の物件は、1980年代半ばに完成した火力発電所のPC煙突である。PC構造としては極めてまれである、高さが170 mの円筒形構造（下部径：16 m、先端径：10 m）で、縦方向にPC鋼材を効率よく配置して必要な曲げ耐力が確保されている。図-1にLVL梁材を用いた試験センターの構造骨組を示し、PC煙突の全景を写真-1に示す。

(2) 引張荷重を直接負担する応用例

引張力対応の応用例として適用された構造物にタンクなどの容器構造物がある。わが国では1959年に3基の円筒型水槽が完成しており、比較的早期に引張荷重（Ring tension）を直接負担するプレストレスの応用例が出現していた。その後、容器構造物は卵形消化槽、大型の石炭サイロ、原子炉格納容器（PCCV）および低温液化ガスタンク（LPG、

LNG）等に発展することになる。

しかし、引張荷重をより直接的に負担する斜張橋のステイケーブル等への適用は、容器構造物の出現に比べ、約10年後の1970年代初頭であり、さらに1980年代に大規模な鉄骨トラス梁などに適用されてきた。また、新たな応用としては、引張り対応の場所打ち杭への適用も行われている。

これらの代表例として調査13件の中から2件を選んだ。そのうち1件は屋内馬場に適用されたストラーチ工法である。これは、鉄骨屋根をプレストレスによる引張力で建て起こし、さらに屋根形状（Rise）を保持する構築工法である。

他の代表例は、サッカースタジアムの観客席屋根で、屋根全体に適正な間隔で建てられた鉄骨支柱にステイケーブルで観客席を覆う屋根を吊り支持している。写真-2に屋内馬場の屋根トラス全景を示し、サッカースタジアムのステイケーブルおよび全景を写真-3に示す。

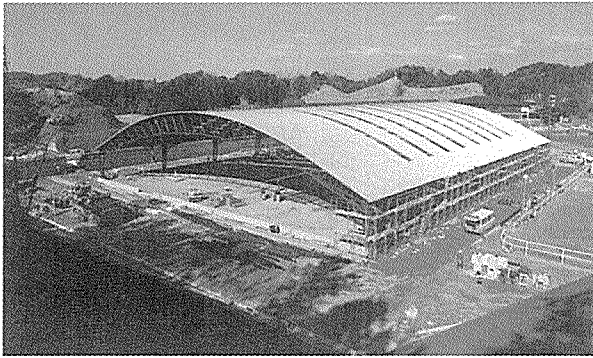


写真-2 屋内馬場

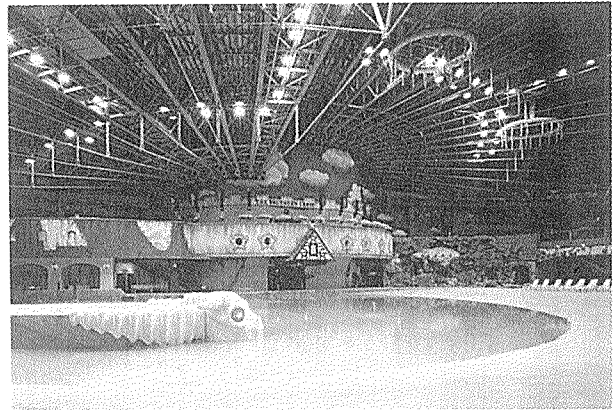


写真-4 総合レジャー施設

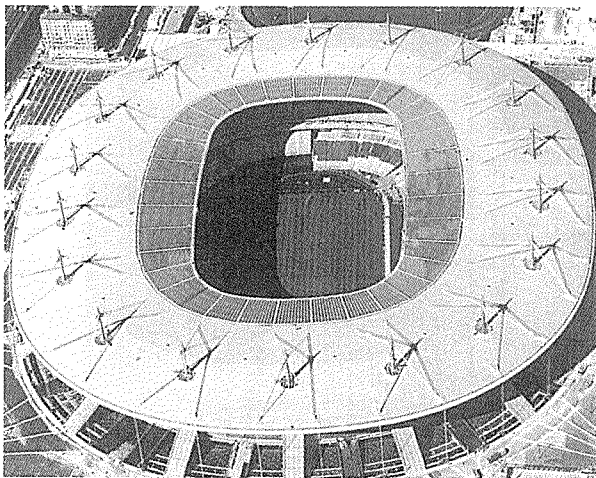


写真-3 サッカースタジアム

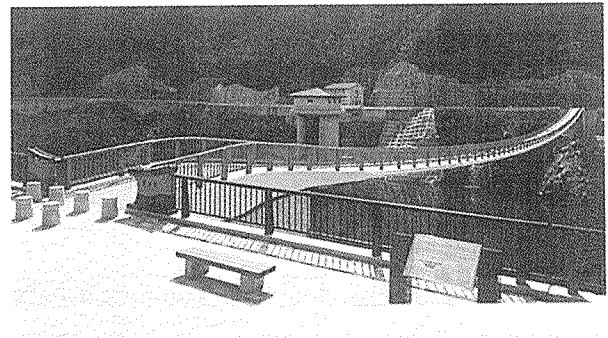


写真-5 吊床版橋

(3) 引張力をライズで揚力に変えた応用例

引張力をライズ (Rise) により揚力に変えて荷重をキャンセルする方法は、太古の時代より応用されている。一定荷重をキャンセルする場合の揚力はライズあるいはサグ (Sag) に比例するが、このことを今に伝える代表的な応用例としては谷間に架かる鳶の吊橋であろう。現在の応用は、アンボンドスラブ、吊床版橋、耐圧マットスラブ等の直接的な利用例に加えて、張力も同時に利用する施工システムなどにも応用されている。

代表例として、調査7物件から屋内レジャー施設の鉄骨張弦梁および吊床版橋の2件を選んだ。

屋内レジャー施設の屋根構造は、スパン50m超のライズの小さい山形の鉄骨梁が放射状に配置されており、その中央部下端にトラス型の支柱を設け、一定の屋根荷重をキャンセルできる張弦用PC鋼材のライズを確保している。吊床版橋は、橋長が約150mで橋台部をグラウンドアンカーにしてサグの比較的小さい(3.5m)スレンダーな橋体を示している。写真-4にレジャー施設の張弦梁の全景を示し、吊床版橋の全景を写真-5に示す。

(4) 直圧による摩擦力を利用した圧着接合例

直圧に対する摩擦力を利用した圧着接合は、わが国ではPCブロック桁およびPC組立て架構など、プレストレス技術の応用当初よりプレキャスト部材の施工技術として発展してきた。このため、プレストレスによる圧着接合は、単に部材の接合のみを目的とする例は少なく、曲げせん断およ

び軸荷重を負担するプレキャスト部材自体のブロック接合(たとえば、柱および梁のブロック加工)および柱と梁の組立て仕口接合等、架構の組立て工法としても広く利用されている。応用例としては、複雑な形状あるいは海洋架構のブロック接合、耐震部材のあと施工圧着による耐震補強、および基礎梁をあと施工圧着により拡幅補強した免震レトロフィットなどにも利用されている。

代表例として、7件の調査物件から海洋構造物の海釣り施設の下部構造およびレンガ造建物の免震レトロフィットで行われた基礎梁の拡幅圧着補強の2件を選んだ。海釣り施設はPBS工法と呼ばれ、水深の深い海底に打ち込まれた杭群に、プレキャストコンクリートのブロック化した柱および梁を、各杭に沿わせて据え付けた後、PC鋼材を緊張して杭間を多層のラーメン構造にすることにより釣り台の動揺を防止している。また、免震レトロフィットは、レンガ造建物の地震対策用として既存の基礎梁の両面に補強用の添え梁を打設、梁幅方向にPC鋼材で圧着して基礎梁の拡幅補強を行っている。免震装置は、基礎梁下に新たな基礎を設けて基礎梁との間に入れ、建物全体を免震化している。写真-6に海釣り施設の概要を示し、免震レトロフィットで行われた基礎梁の拡幅補強の概要を図-2に示す。

2.2 応用技術の考察

プレストレスの応用例について、特徴的な利用例を対象にして1998年より2年間にわたり調査を続けた。調査結果ではPC構造が圧倒的に多く、その大半が梁材として利用した構造物であった。

そこで、調査した物件の中から31件の特殊な実施例を



写真-6 海釣り施設

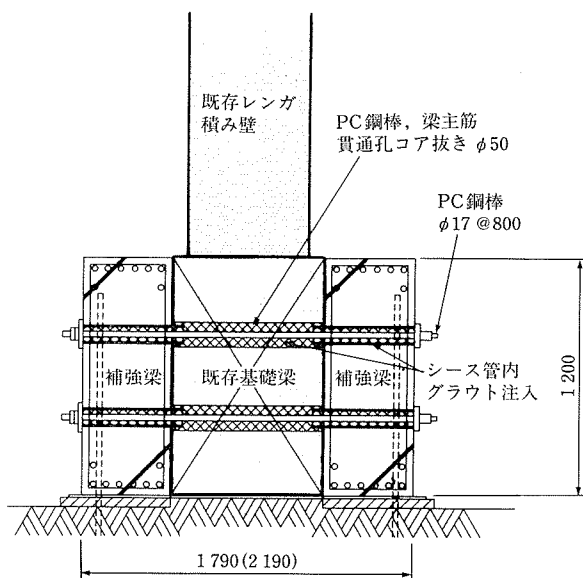


図-2 レンガ造免震レトロフィット

ピックアップし、プレストレスの利用法から、曲げ対応、引張り対応、荷重キャンセルおよび圧着接合の4種類とした。

しかしながら、PC以外の構造物（たとえば、鉄骨造および木造など）に絞った場合、物件数も多く、構造規模の大きかった例は、引張力を負担するトラスの下弦材にプレストレスを利用した鉄骨造の屋根構造であった。これは、トラスの引張下弦材自体をプレストレスの反力部材として利用でき、さらにたわみ量をプレストレスの大小で制御できることから極めて理に適った合理的な利用法と考えられる。したがって、屋根構造に限定されているが、実施例の多さもよく理解できる。また、梁材ではないが同種の利用として、場所打ちコンクリート杭にプレストレスを導入して引張りに抵抗できる杭にするなどの例も見られた。これらの実施例は、いかにプレストレスを効率よく、さらに直接的に利用できるかを研究した結果と考えられ、いずれもプレストレスを利用する一つの工法として確立されているのが特徴である。

また、比較的多く見られた実施例は、直圧による摩擦力を利用した接合（圧着）工法である。むしろ、建築におけるPCa PC組立て架構はほとんどこの工法が採用されているが、特殊な応用例として、鉄骨ブレース、プレキャスト耐

震壁および補強添え梁等を既存躯体に圧着し、地震動に対する構造の抵抗力を増すことを目的としたいくつかの耐震補強工法も見られた。

上述したようにプレストレス技術の応用は、PC構造以外の分野にも大きな広がりを見せていることが分かる。プレストレス技術の応用動向を調査結果より探ると、

- ① プレストレスを効率よく直接的に利用できる構(工)法
 - ② 簡単に急速施工が可能な圧着構(工)法
- などが、今後も考案・開発される可能性が高いと思われる。

3. 建築におけるPC技術の動向

建築構造におけるプレストレス技術は、一般に低層構造で大スパン架構あるいは大荷重に耐え得る梁材に適用されてきた。この理由は、PC部材は他のコンクリート系部材(RCなど)に比べ、極端な長所および短所となる表裏一体の力学的特性を兼ね備えていることにある。

PC部材の長所となる特性は、

- ① 極めて高耐力である（同一断面のRC部材に比べ2倍強の曲げ耐力）
 - ② 高強度・高品質材料で構成され耐久性に富む
 - ③ 静的な荷重-変形関係において復元性に富み、損傷が小さい
 - ④ プレキャスト化による建設工業化が容易
- などである。

一方、短所は、

- ① 高強度材料を必要とする
 - ② 履歴エネルギーの消費が小さく、地震時における応答変形が大きい
- などである。

これらPC部材の力学的特性の短所のみを消し去ることはできない。すなわち、この表裏一体の特性が、地震多発国であるわが国の建築構造において、PC部材の用途を低層構造の大スパン架構あるいは大荷重に耐え得る梁材に限定してきたゆえんと考えられる。

このため、一般的な建築構法としてPCを発展させるには、部材のもつ長所を最大限活かし、さらに短所を補える構造システムを作ることが近道となる。その一例として考えられる構造は、地震動による建物への入力エネルギーを架構以外のシステムで効率よく消費させ、建物の応答変形を確実に低減できる構法（たとえば、免・制震構造）となる。免・制震構造の特徴を含め、最近の実施例および基礎的な検討例を次に示す。

3.1 PC+免震構造

免震構造とは、建物の基部あるいは特定層に免震支承（免震部材）を設置し、それに上部建物全体を支持させる構法である。また、免震支承は、一般に水平剛性が小さく十分に水平変形能力のある積層ゴムなどと、地震動による上部建物構造全体の地震エネルギーを効率よく消費できるダンパーで構成される。免震構造の特長は、大地震動時に免震支承を含めた上部構造全体の固有振動周期を著しく長く

することにより、免震支承の応答変形は大きくなるが、上部建物に対する応答加速度を大幅に低減できることにある。したがって、上部建物の応答層間変形は極めて小さく、PC架構の短所である履歴エネルギー消費の小さいことはとくに問題にはならない。逆に、復元性に富み、常に初期剛性に近い動的挙動を示すPC架構は、免震構造としては好都合となる。最近、建設された中高層PCa PC免震ビルの架構例を写真-7に示す。



写真-7 PCa PC免震架構例

3.2 PC+制震構造

制震構造は、地震時、建物に入力された地震エネルギーを、架構内に設置した制震部材に集中的に消費させることにより架構全体の応答変形を低減させる構法である。このため、制震部材を架構内に効率よく組み入れることにより、地震時に入力される建物の地震エネルギーを架構自体に消費させる必要はとくにない。また、これらの構造には、主に弾塑性ダンパーとしての制震部材を架構に組み入れた制震構造、およびオイルダンパーあるいは粘弾性ダンパーを組み入れた制震構造がある。

将来、PC架構を他構法（たとえば、RC、SおよびSRCなど）と同様に中高層あるいは高層建築に効率よく適用するには、免震あるいは制震（振）システムなどを併用するケースが増えていくであろう。

また、これによってPC架構の短所となる特性を的確に補い、長所となる特性のみを有効に活かせる合理的な架構が実現できることになる。

計画した23層の高層型PCa PC架構を対象に、免・制振装置で地震時における応答変形を制御した解析検討例の軸組を図-3に示し、日本建築センター発行の模擬地震動（BCJ-L2）を用いた応答傾向を図-4に示す。

4. ま と め

SEEE協会技術委員会/建築分科会では、1998年より2000年にわたり、さまざまなプレストレス技術を駆使して完成された最近の構造事例を幅広く選び、プレストレス技術の応用方法で分類した。

また、プレストレス技術の応用状況と今後の利用動向を探るために、いろいろなところに使われている中から、比較的特殊な利用例を調査収集したものである。一方、収集

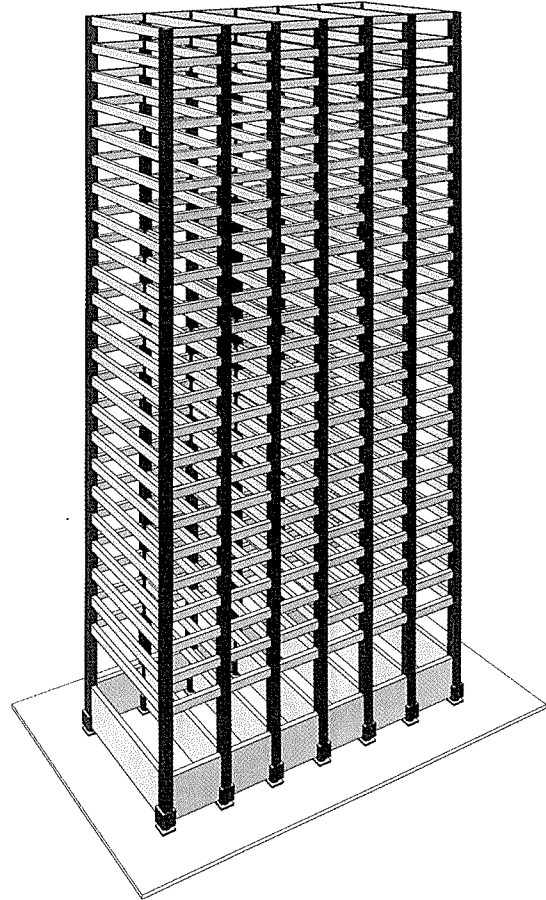


図-3 高層架構例

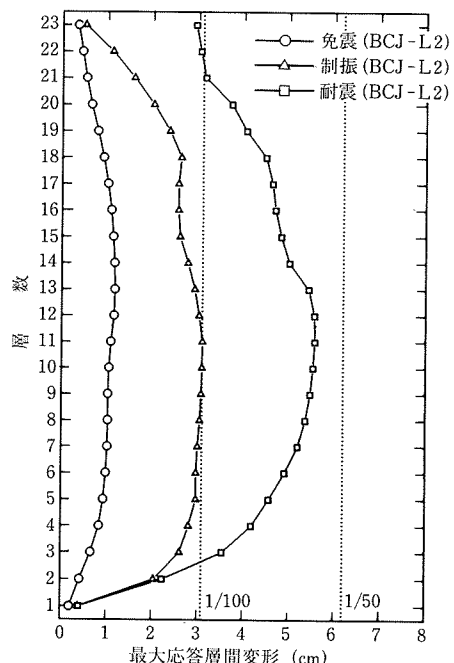


図-4 応答傾向

した応用例を通して、建築構造分野におけるPCの利用がまだまだ十分に浸透していないこともうかがえた。PC建築構造の開発が進まない大きな要因は、PCの建設コストおよび対地震動における表裏一体の長所と短所を併せもつ特性であ

ろうと推察された。これらの調査結果から、21世紀のプレストレス技術の利用動向について、次の事柄を推察することができた。

- ① 材料および部位を問わず、必要に応じてプレストレスを、効率よく直接的に利用できる構工法がより多く開発されるであろう。
- ② 建設業では環境問題を含め施工の合理化がますます求められることから、施工の合理化に繋がるプレキャスト工法がより進展するであろう。
- ③ 建築分野におけるPCは、免震あるいは制震システムを併用することにより、PC架構の短所を補い長所を活かした合理的な架構としてますます発展するであろう。

謝 辞

SEEE協会技術委員会/建築分科会では1998年より2年間にわたりこの調査を続け、関係各位の協力により2000年3月にようやくまとめることができた。最後に、本誌面を借りて、この調査を実施し、まとめた分科会のメンバーを右に記すとともに、この間に交替された分科会委員諸氏なら

びに調査に協力をいただいた関係各位に対し、感謝の意を表する次第である。

SEEE協会技術委員会/建築分科会委員名簿

	分科会委員	所 属 先
分科会長 幹 事 幹 事 幹 事	奥田 幸男	(株)大林組
	石井 正良	新構造技術(株)
	榑原 修	飛鳥建設(株)
	藤村 博	鹿島建設(株)
	青山 隆行	三井建設(株)
	小野 聖二	佐藤工業(株)
	倉持 春夫	ドービー建設工業(株)
	鈴木 義男	(株)日本ビー・エス
	竹下 修	(株)富士ビー・エス
	千葉 道夫	(株)銭高組
	林 啓司	(株)女部工業所
	林 三雄	(株)ビー・エス
	森江 昭則	極東工業(株)
事 務 局	山田 信一	清水建設(株)
	永島 美樹	(株)エスイー

参 考 資 料

- 1) SEEE協会：技術C分科会報告，プレストレスの技術を応用した構造例，2000.3

【2001年3月30日受付】



刊行物案内

PC 定着工法 — 2000年版 —

2000年12月発行

頒布価格：4 000円（送料400円）

体 裁：B5判，220頁（無線綴じ製本）

最新の
「定着工法」を
掲載!!

発行・発売：社団法人 プレストレストコンクリート技術協会