

◆ 特 集 ◆

建 築 特 集

京都大学におけるプレストレストコンクリート構造の研究

西山 峰広*

1. はじめに

京都大学建築系のコンクリート系構造研究室は、現在3つある。建築学専攻建築構法学講座、都市環境工学専攻環境材料学講座、それに、防災研究所地震災害研究部門構造物震害研究分野である。いずれの講座名、分野名にも「コンクリート」という言葉は出てはこないが、所属する教員の専門がコンクリート系構造あるいは材料であるため、コンクリート系構造研究室としてよばれることが多い。これらコンクリート系研究室を併せると、大学院生と学部生をあわせた学生数は、30を超える。

京都大学建築教室のコンクリート系構造の研究は、坂静雄先生に始まり、六車 熙先生により引き継がれ、現在、渡邊史夫先生を中心に行われている。写真-1は、坂記念館（実験室）の南面の写真である。坂記念館の壁面には、写真-2のように坂先生のレリーフが埋め込まれている。プレストレストコンクリート（以下PCと略記）は、京都大学のコンクリート系研究室の看板であり、建築分野にお



写真-2 坂記念館壁面に埋め込まれた坂 静雄先生レリーフ

ける世界のPCの牽引役を担っているものと自負している。

本小文では、京都大学建築系コンクリート系構造研究室でのPCに関する最近の研究概要と学生活動を報告する。

2. PC 柱梁接合部に関する研究^{1), 2)}

PC柱梁接合部のせん断強度に関する研究は、1987年より実施されている。研究が始まった当時は、PC柱梁接合部のせん断強度に関する研究はほとんどなく、ニュージーランドのカンタベリー大学で1970年代に実施された実験と、それに基づいて標準化されたNZS 3101を参考にした。NZS 3101の設計法を参考にして試験体を製作し、載荷実験を行ったところ、試験体は、接合部に大きな損傷を受けたものの、接合部せん断破壊とはいきれない結果となった。したがって、NZS 3101に記されているような接合部せん断強度にプレストレス力が寄与するのかどうかは明確にはならなかった。

この研究の過程で、適度なプレストレスが柱梁骨組の履歴復元力特性を改善することが明らかとなった。しかし、プレストレスが大きすぎるとコンクリートの圧壊が早期に起こり、最大耐力以後の耐荷性能が低下することも示された。

その後、「プレストレストコンクリート高層建物の耐震設計指針に関する共同研究」（いわゆるPC共研）において、千葉大学で柱梁接合部に関する研究が分担され、実験的、解析的研究が行われ、データが徐々に蓄積されてきた。現在までのところ、接合部せん断強度へのプレストレス力の寄与はほとんどないと認識されつつある。ただし、接合部



写真-1 坂記念館（旧館は昭和35年に建築され、南側の増築部分は昭和60年に竣工した）



* Minehiro NISHIYAMA

京都大学 工学研究科
都市環境工学専攻

の剛性を高める効果は認められる。

柱梁接合部に PC 鋼材定着部を置くことに対する危惧について何らかの指針を示すべきであるとの考えから、「プレストレストコンクリート造柱梁接合部に関する共同研究委員会」が、プレストレストコンクリート技術協会内に 2001 年設置された。その実験的研究の一部として、京都大学において外部柱梁ト型接合部（写真 - 3、図 - 1）と最上階梁柱を想定した L 型柱梁接合部（写真 - 4）の実験が行われた。ト型接合部では、定着部の位置、コンクリート強度、および、梁曲げ強度に対する PC 鋼材の寄与率を実験パラメータとした。実験の結果、定着部を接合部コア内に



写真 - 4 接合部補強法をパラメータとした L 形接合部載荷実験

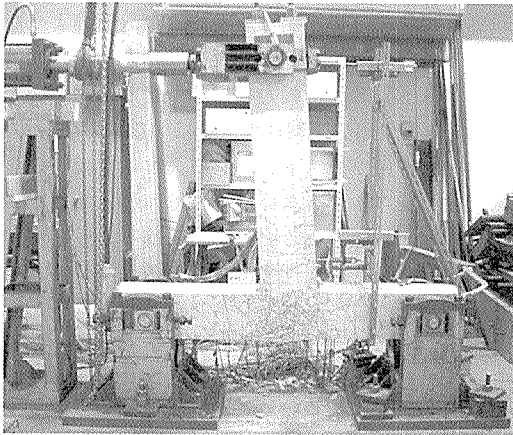


写真 - 3 PC 鋼材定着位置をパラメータとした外柱梁接合部載荷実験

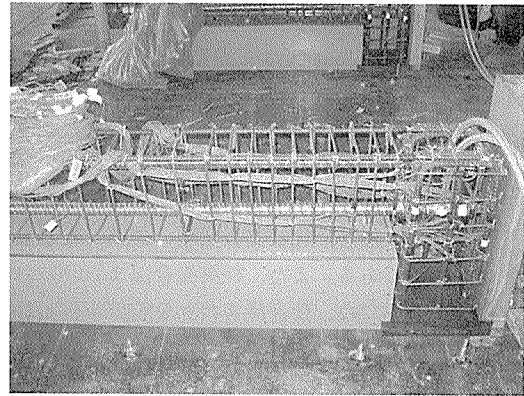


写真 - 5 L 形接合部補強の様子

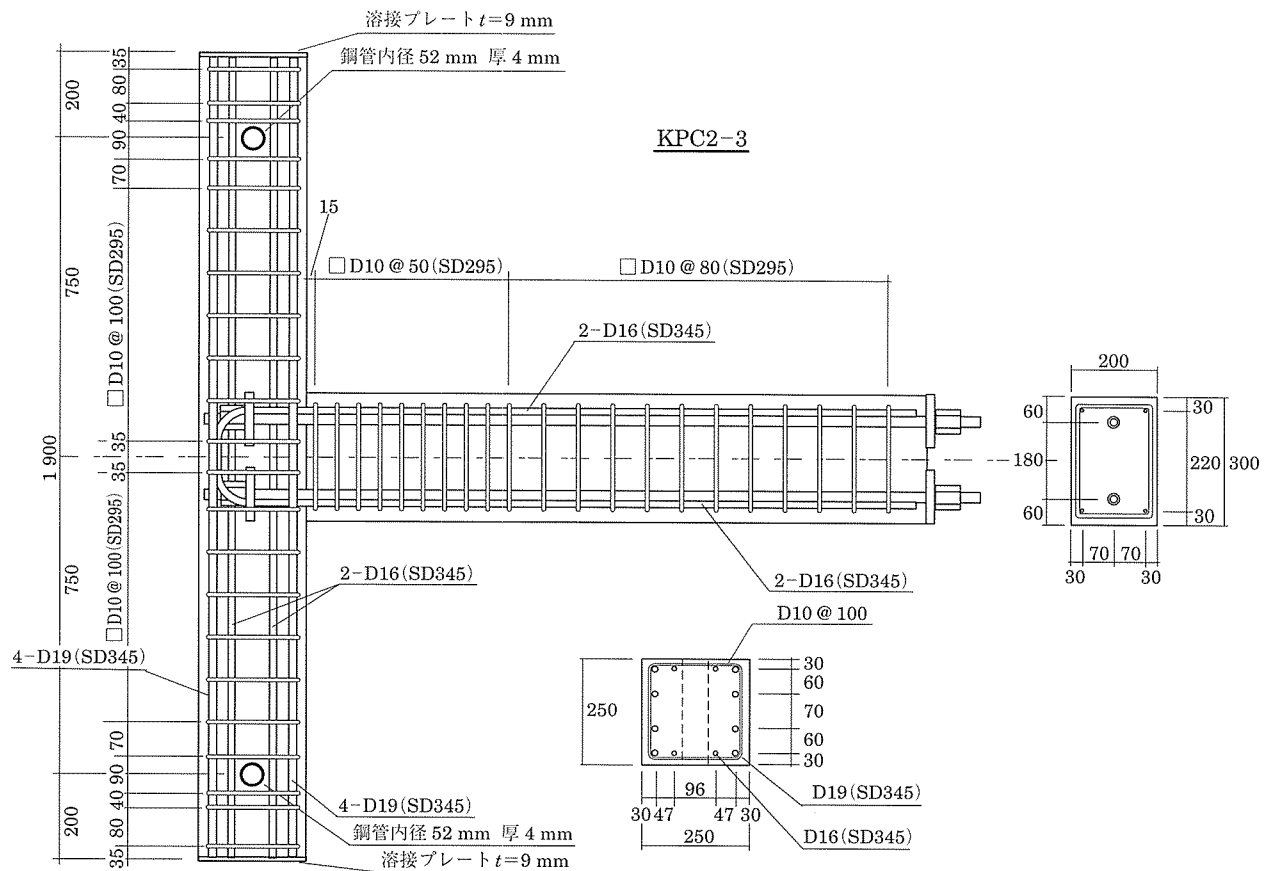


図 - 1 PC 鋼材定着端を接合部内に配置した柱梁接合部試験体

置くと、接合部せん断強度は低下するが、接合部内への定着長さを柱せいの60%以上とれば、その低下はさほど大きくなく、これまでの設計式により評価できるだけのせん断強度をもつことが明らかとなった。また、L型接合部では、プレストレスの影響よりも主に接合部補強法が検討され、柱筋をU字型定着することにより、接合部耐力が上昇することが示された(写真-5)。

3. 自己圧着による耐震補強ブレースの開発³⁾

常時荷重をキャンセルするという本来の目的以外へのプレストレスの利用として、枠を設けない耐震補強ブレースにプレストレスと皿ばねを利用することにより、補強される柱梁骨組中に圧着し固定されるという特徴をもつ圧着ブレースが開発された。あと施工アンカーが必要なく、これに伴う騒音、振動、塵埃などから解放される。ブレースが伸び変形を受けても、皿ばねによりブレースが圧着され、脱落することがない。すでに、大学校舎における施工例もある(写真-6)。京都大学では、このブレースにより補強された約1/2スケールの柱梁骨組の載荷実験を行った(写真-7)。試験体は2体で、ブレースの座屈を先行させるように設計されたものと、柱梁接合部での破壊となるように設計されたものである。また、柱梁接合部まわりにおける破壊性状を調べるため、接合部まわりをモデル化した試験

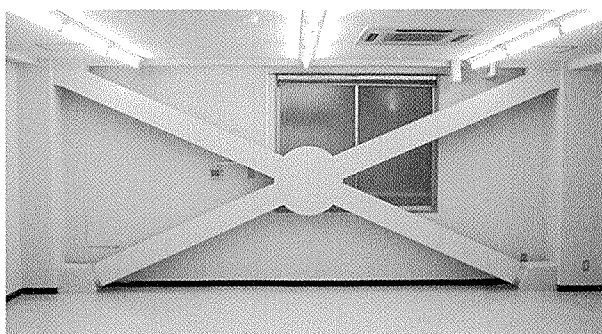


写真-6 圧着型耐震補強ブレースの実施工例

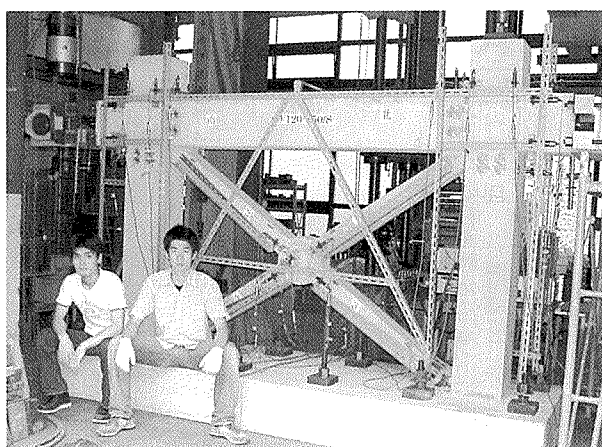


写真-7 圧着型耐震補強ブレースの載荷実験

体に対する載荷実験も実施された。

4. PCaPC 圧着柱に関する研究⁴⁾

プレストレスは、鉛直荷重による曲げモーメントを相殺するために梁部材に導入されるのが通常であるが、柱に生じる引張軸力をキャンセルする目的、あるいは、施工の観点から、柱に導入されることもある。土木の橋脚のように軸力比が0.1に満たないような小さな軸力しか作用しない場合には、プレストレスを導入することにより、先に示した柱梁接合部骨組と同様に荷重-変形関係を改善することが可能となる。しかし、軸力が大きくなる建築構造物の柱では、プレストレス導入が両刃の剣となり得る。すなわち、引張軸力を相殺することが可能となるが、そのような軸力変動の大きな柱は、圧縮側でも大きな軸力を受けるはずなので、プレストレスは、軸力を増加させる方向に働くことになる。これは、耐力、靱性の低下につながる場合がある。建築物の柱部材にプレストレスを導入するには、とくに高層建物で軸力レベルが大きい場合には、導入するプレストレスの大きさ、許容される引張軸力レベル、圧縮軸力レベルなどの設定に関して注意すべきである。一般に、引張軸力を相殺するためにプレストレスを導入した場合、長期荷重による圧縮軸力とプレストレス力をあわせた柱軸力がコンクリートの長期許容応度以内となるように柱断面の大きさとコンクリート圧縮強度を設定し、地震時においても圧縮軸力が過大にならないようにする必要がある。

京都大学では、比較的高軸力を受けるPCaPC柱の載荷実験を行い、履歴復元力特性を規定する各種パラメータを抽出しようとしている(写真-8)。とくに、曲げ耐力算定と変形能力評価に重点を置いている。曲げ耐力算定では、圧縮側のPC鋼材の扱い方と、アンボンドPC鋼材を用いた場合について、また、変形能力評価では、評価式の提案を目

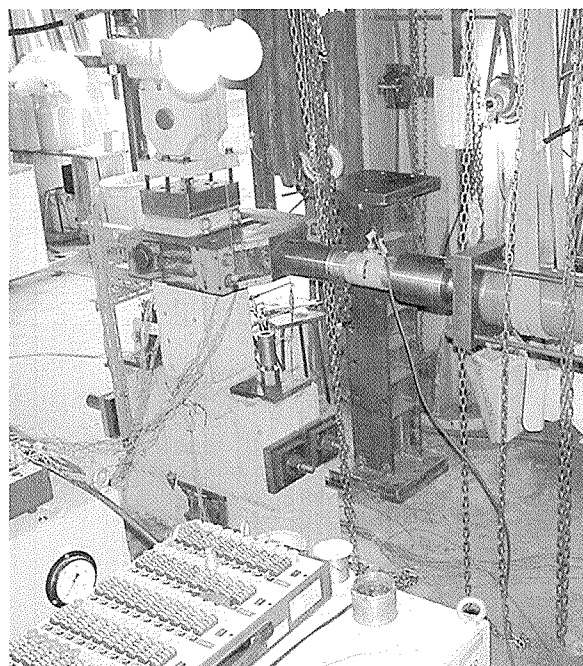


写真-8 PCaPC 柱の載荷実験

指している。

5. PC 柱梁骨組の地震応答性状に関する研究^{5), 6)}

PC 部材は、RC 部材に比較して、非線形弾性的な荷重－変形関係を示し、残留変形は小さいが、履歴エネルギー消費が小さくなる。したがって、PC 部材の特性により建物全体の挙動が支配されるような建物の場合、地震に対する変位応答が大きくなる。梁部材といった部材要素を取り出して議論した場合にはそのようになるが、柱梁接合部を含む部分架構レベルで見た場合、接合部の性状が架構の荷重－変位挙動を支配する場合もあり、PC 架構の履歴吸収エネルギーが、RC 架構と比べて、小さくなるとはいえない場合もある。さらには、直下型地震による地震動の場合には、海洋型による地震動と比べて、PC 架構と RC 架構の変位応答の差は大きくないなど、地震動の特徴にも左右されることがある。

PC 柱梁接合部の実験より、適度なプレストレスは架構の性状を改善することが示されたが、これを定量化するまでには至っていない。このため、通常想定される非線形弾性的な履歴復元力特性モデルを PC 部材に、履歴エネルギー吸収の大きな履歴復元力特性モデルを RC 部材に、さらには、その中間的なモデルを PPC 部材にそれぞれ設定し、簡単な架構の地震応答解析を行った。その結果は、ほぼ予想どおりに、最大応答層間変形角は、大略、PC で最大、RC で最小となった。ただし、必ずしもそうとはいえない場合もあり、地震波の特性にも影響される。

また、もっと基礎的な研究として、1 自由度系の地震応答解析を行い、地震動の入力エネルギーが、振動系におい

てどのような割合で、運動エネルギー、減衰エネルギー、履歴エネルギーとなっているのかを、PC と RC の履歴復元力特性をもつ系で比較してみると図 - 2 のようになる。この図より、PC の履歴吸収エネルギーは RC と比べて小さいが、その代わり、減衰エネルギーや運動エネルギーが大きくなっていることがわかる。

6. アンボンド PC に関する研究⁷⁾

アンボンド PC の研究は、坂・六車先生による「付着のない PC 梁の曲げ破壊耐力」⁸⁾ に始まり、現在までのところ、解析原理としてはこれを超えるものはない。すなわち、PC 鋼材全長にわたる伸び量が、PC 鋼材配置位置のコンクリートの伸び量に等しいという部材全長にわたる変形の適合条件を用いるものである。その後、アンボンド PC に関する研究は、PC 構造に関する研究のひとつとして、ずっと続けられてきた。当時の着眼点は、アンボンド PC 部材を耐震部材として利用するために、鋼材の応力変動を把握し、曲げ耐力を精度よく予測することにあつた。このため、曲げ耐力時における鋼材の張力を与える式を提案したり、直接、曲げ耐力を推定する式を作成したりすることに重点が置かれていた。しかしながら、プレストレスを導入することにより、梁柱骨組の荷重－変形関係が改善される場合もあることがわかり、これを積極的に利用する方向に研究が向けられるようになった。

国土交通省の PC に関する告示の改正により、アンボンド PC 鋼材を耐震部材に利用できるようになることがほぼ確実となった現在、必要なのは、剛性、耐力、変形能力およびエネルギー吸収能力などの力学性状を的確に把握し、設計に反映させるとともに、付着がないことを有効に利用する方法を考案することである。アンボンド PC の技術を用いた構造システムは、最終的には、被災を受けた部材の交換にとどまらず、部材の解体・再利用にもつながり、環境へ配慮できる構造形式となり得る。

上記のように、京都大学では、坂先生の時代からアンボンド PC の実験的・解析的研究が行われてきた。梁部材の耐力や変形能力の研究に始まり、門型フレームの実験も行われた。最近では、PCaPC 架構への利用を目指して、柱部材の研究も行われている。

7. 今後の研究活動

プレストレスは、元来、鉛直荷重に対する支持能力を向上させるために導入されてきた。しかし、今後は、このような利用法だけではなく、他にさまざまな利用法が考えられる。建築分野でのプレストレス利用は少ない。逆にいえば、大きな可能性があるということである。京都大学では、これからもプレストレストコンクリート分野において世界をリードしていきたいと考えている。

今年 4 月より国立大学法人としての京都大学が発足した。また、9 月には建築学専攻が桂キャンパスに移転する。研究のアクティビティが上がるにしたがい、坂記念館では手狭になっていたところ、桂キャンパスには約 1 100 m² の床面積をもつ新実験棟が建設され、建築学専攻の移転とも

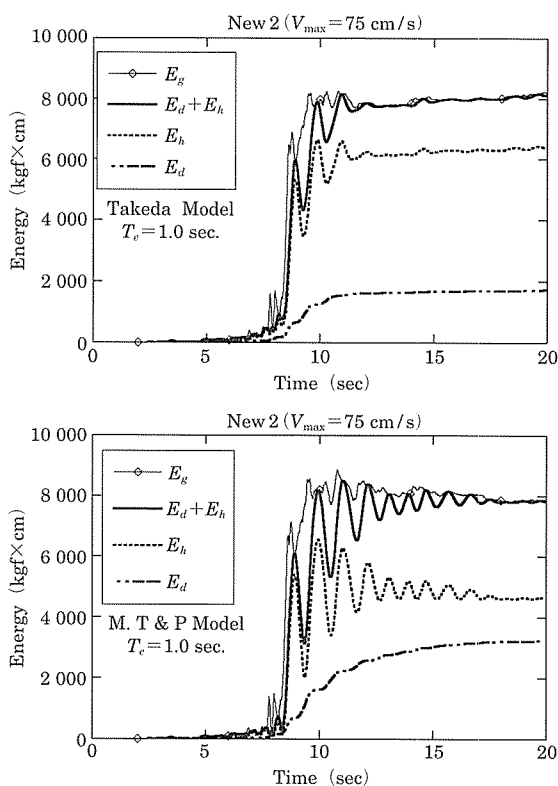


図 - 2 PC と RC のエネルギー履歴

に利用できるようになる（写真 - 9）。また、桂キャンパスにはインテックセンターと呼ばれる多目的・多用途の実験施設が建設され、すでに稼働している。これらの実験施設の整備によりこれまでは不可能であった実物大に近い構造物の載荷実験も行えるようになる。

大学外との共同研究により研究資金を導入することも重要となっている。施設としては整備されたので、次は、大学外からの研究資金導入も積極的に行い、さらに研究のアクティビティを高めていきたい。また、博士課程の学生募集も広く学外に行っている。とくに、会社に勤めながら学ぶ社会人博士に対して門戸を開いている。ある程度の研究業績があれば、在学期間の短縮も可能である。

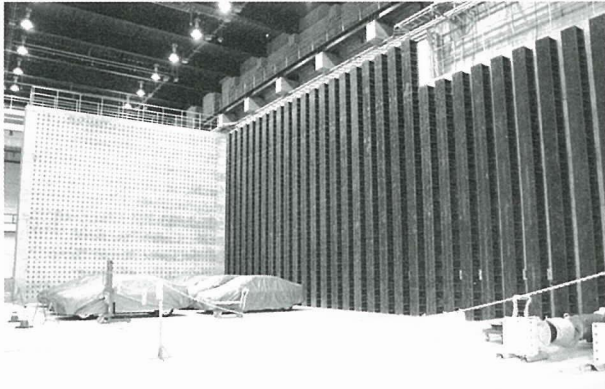


写真 - 9 桂キャンパスの新実験棟内部

8. 学生活動

ここまでは、かための研究紹介であったが、以後は学生活動を中心にして書いていく。というとコンパやゼミ旅行のことなどが思い浮かぶが、ここでは、学外での活動に関して書いてみる。

3つの研究室のひとつ、都市環境工学専攻環境材料学講座では、学外における研究以外の活動にも重点を置いている。今年度は、日本建築学会近畿支部と大阪府建築士会青年部会が主催する「親と子の都市と建築教室 一家をつくらう」の企画段階から参加している。これは、大阪市住まい情報センターで開催される、小学生を対象に建築とは何かを楽しく学んでもらう催しである。最終日には、大きな段ボールを使い、実際に子どもたちと親が協力して「家」作りまで行う。また、11月には、大阪大学の中塚 信先生と協力して、中学生を対象に建築を学んでもらう催しを、同じく大阪市住まい情報センターで行う予定である。この催しでは、対象が中学生となるので、講義や実験を通して建築構造を学んでもらうべく準備している。写真 - 10のように紙、竹籤、それに発泡スチロールの球を使って家の模型を作ってもらい、台車を揺すってどのように壊れるのかを見る予定である。

また、今年度は阪神淡路大震災後10年という節目の年を迎える。日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会では、構造設計に携わっておられる方々にアンケートによ



写真 - 10 台車上の模型の家

て、震災前後で設計者の意識がどのように変わったか、あるいは、変わらなかったかを調査する予定である。このような活動にも学生が積極的に参加し、実務者の方々と交流し、学外の空気にも触れてもらうようにしている。

9. おわりに

坂記念館のガラス戸には、直径10mm程度の穴を中心に放射状のひび割れが入っていた。鉄筋コンクリート構造研究室に所属する学生は、六車 照先生からこの穴の由来を必ず聞かされてきた。それは以下のようなものである：

前もって作製されたアンボンド梁と柱を、梁鋼棒をカブラーにより柱外側面にまで延長し、プレストレスで剛接合するというPC不静定架構に対する載荷に伴う応力再配分の実験を行った。その際に、鋼棒接合部で破断が生じ、梁の鋼棒が飛んだ。鋼棒はガラス戸を貫通し、約3mの通路を挟んだ隣の大型計算機センターの鉄筋コンクリートスパンドレルにあたり、深さ数センチの「弾痕」(写真 - 11)を残した。この穴のあいたガラスと大型計算機センター壁面についた弾痕は、PCの実験を行う者に対する警鐘として保存されている。



写真 - 11 大型計算機センターの壁面に穿たれた弾痕

ガラスはすでに取り替えられており、今、その穴を見ることはできないが、大型計算機センターの壁に穿たれた弾痕は今も見る事ができる。

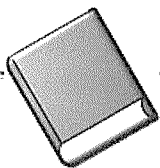
また、「プレストレストコンクリート」2000年1-2月号に、六車 照先生が「プレストレストコンクリート研究裏話」という記事を書いておられる。ここには、「PC鋼棒が消えた一危険と隣合せの開発研究」という節に、PCの技術が日本に導入された当時では、鋼材に傷がよくあり、導入完了後1～2時間してからの鋼材破断が何度も発生したと書かれている。

これまでの筆者の約20年を越えるPC研究生活においても鋼材破断は数えるほどしかない。そのすべてが、鋼材に大きな応力が生じる荷重実験中に生じたものであり、導入時にはない。そうであっても、また、鋼材や定着具の質が格段によくなったとはいっても、プレストレス導入作業と、鋼材が降伏するような破壊実験を行う場合には、やはり緊張し、慎重に作業を行うとともに、学生にも十分に気をつけるように注意している。

参考文献

- 1) 西山, 渡辺, 六車: プレストレストコンクリート梁柱ト型骨組の履歴復元力特性と接合部せん断性状に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集 No.429 1991.11, pp.31-40.
- 2) 西山, 福本, 小田, 渡辺, 六車: プレキャストプレストレストコンクリート圧着梁柱ト型骨組の荷重試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 1993年9月, pp.1057-1060.
- 3) 李日星, 谷昌典, 奥野雄一郎, 渡邊史夫: 自己圧着型コンクリートブレースによる耐震補強に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2002年, C-2分冊, p.773-778.
- 4) 芹澤好徳, 前田博司, 西山峰広: アンボンド圧着接合柱の力学性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2003年, C-2分冊, p.1015-1018.
- 5) 桑野俊司, 三隅哲志, 西山峰広: 地震動に対するコンクリート系構造物の応答予測に関する基礎研究, 1998年, C-2分冊, p.975-978.
- 6) M. Nishiyama: Response Prediction of Prestressed Concrete Buildings against Earthquake Excitations by Capacity Spectrum Method, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, Paper No.2802.
- 7) パネルディスカッション資料: 「アンボンドPC構造の可能性を探るー常識を捨てた先にある新たな発想ー」, 日本建築学会大会構造部門 2002年8月
- 8) 坂, 六車: 付着のないPC梁の曲げ破壊耐力, 日本建築学会論文報告集 1958年, pp.641-644.
- 9) 六車: プレストレストコンクリート研究裏話, プレストレストコンクリート Vol. 42, No.1, January-February 2000, pp. 15-20.

【2004年6月9日受付】



●関連書籍のご案内

●初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム

平成16年3月発行

田辺忠顕編著／技報堂出版刊

B5判・358頁（本体価格6,000円＋税5%）

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233