

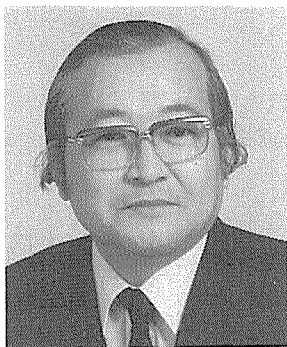
プレストレス圧着工法による純ラーメンPC4階建の設計法と施工 ——ソニー(株)板倉物流センター——

田辺 恵三*

1. はじめに

本建物は、ハイテク産業のNo.1を誇るソニー(株)の関東地区における物流拠点として建設される物流倉庫である。平成2年度に入ってから、物流倉庫の計画は建物の規模が大型化し、延床面積が1.5万 m^2 ~20万 m^2 と拡大してきている。倉庫業を営む場合、通常の積載荷重は床荷重で6t/坪(1820 kg/m^2)程度である。階高も1階が6.0m~7.5m、一般階で5.5m~6.5mと高いことから、31m以内におさえるためには4~5階建として計画されることが殆どである。スパンは8.5m~12mのグリットの範囲で設計される。

このような物流倉庫は、これまでは、殆んど無開口壁を持つ耐震壁構造によるアンボンドフラットスラブ工法、またはSRC構造が多かったが、物流倉庫が大規模化するに従って、建物の全長も100m~200mと大きくなり、場所打ちコンクリート系構造の適用は、施工時の温度変化や硬化収縮によるクラック発生が多くなること、また機能的にも耐震壁フレームで小さく囲まれた倉庫は、自動倉庫のシステム化が難しく、作業効率も悪くなる、さらに現場作業の熟練工の絶対的不足等の理由から、耐震壁を無くした純ラーメンによるプレキャストプレストレスコンクリート構造による組立工法(プレキャストPC工法)が、物流倉庫の構造形式の主流となってきている。



* Keizo TANABE
黒沢建設(株)取締役設計部長

本建物は、スパン25.5m、階高26.75mの吹抜け空間を持つラック倉庫棟を本体倉庫棟と合体させて、同一プレキャストPC工法とし、柱・大梁共にブロック工法で製作し、施工段階において独立柱の高さ26.75mを、日本で初めてプレストレスによる圧着工法を用いて、柱の自立を実現させている。

2. 概要

2.1 建物概要

立体自動倉庫(4000パレット)を含む最新鋭の物流システムが導入される倉庫として使用される。

建設地：群馬県邑楽郡板倉町大字大蔵字太居10-1

敷地面積：156726.79 m^2

建築面積：11755.74 m^2 (倉庫棟)

延床面積：43350.85 m^2

構造規模：地上4階建、軒高GL+26.75m

構造：プレキャストPC工法

定着工法：KTB工法、PC鋼棒方式

柱：PC鋼棒32 ϕ 、245.7t

梁：12本 \times 12.7 ϕ ストランド、394.9t

発注者：ソニー株式会社

設計施工：佐藤工業株式会社

PC部材：ジェーピーシー苫小牧工場製作(海上輸送)

PC施工：黒沢建設株式会社

工期：平成2年4月1日~平成3年5月31日
(14か月)

組立工期：平成2年8月30日~平成3年3月30日
(7か月)

2.2 構造概要

建物平面が85m \times 99mの4階建である。倉庫の積載荷重は床用1.5 t/m^2 、骨組用1.2 t/m^2 、地震用0.9 t/m^2 で、経済的構造スパンとして、柱割は8.5m \times 9mのグリットの構造計画を行っている。床版はスパンクリートの合成床工法を使用することにした。1.5 t/m^2 の積載荷重の条件でこの床工法の場合は、クリアスパン

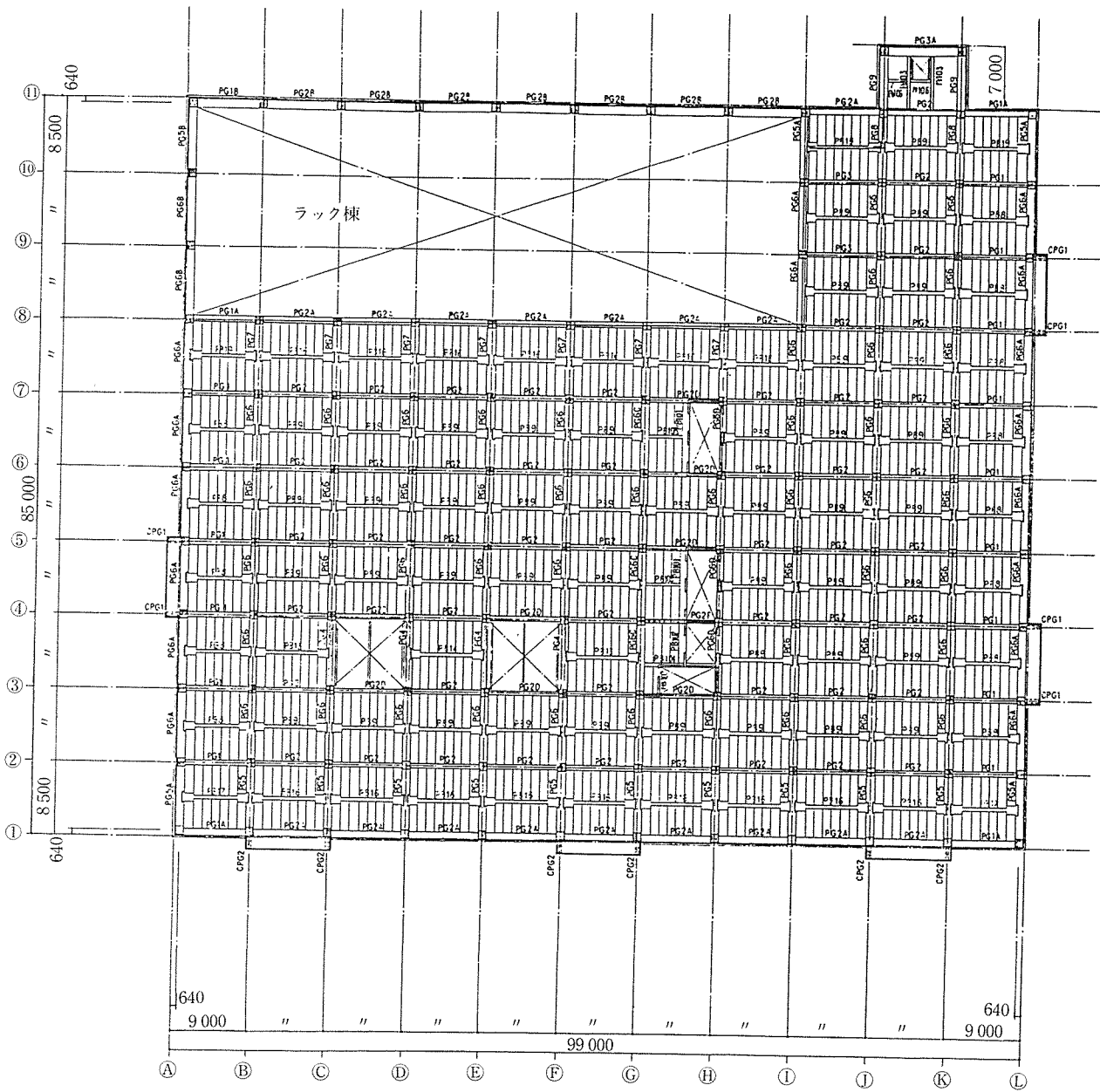


図-1 基準階床伏図

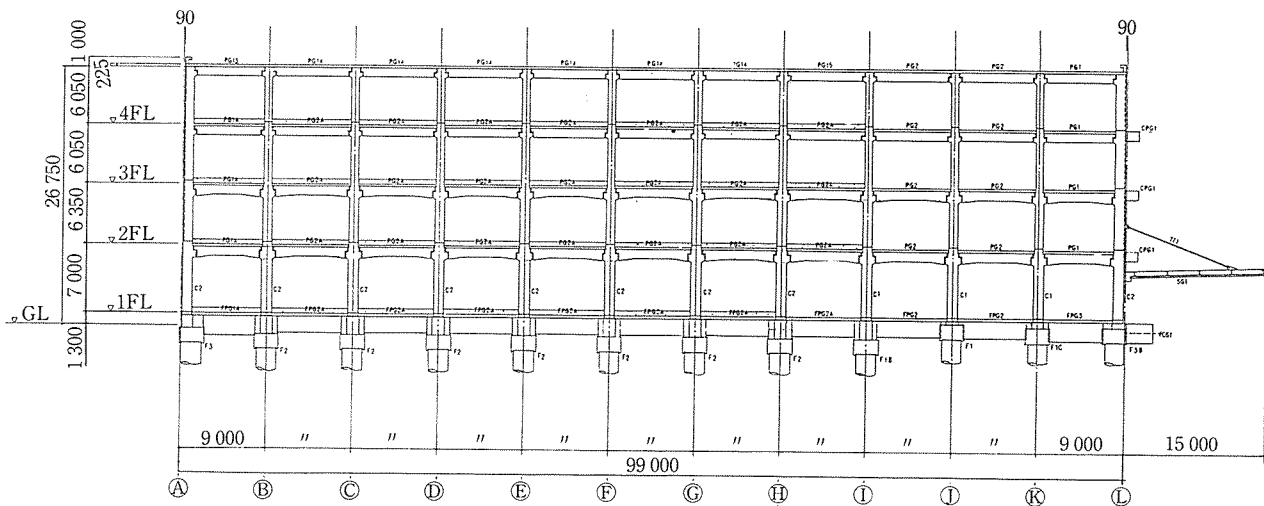


図-2 軸組図

を4 m以下としなければ断面が大幅アップとなることから、小梁割は8.5 mを2つ割に設計している。構造形式はプレキャストプレストレストコンクリート構造によるラーメン組立工法（プレキャストPCラーメン工法）の純ラーメン構造として構造計画を行った。プレキャストPCラーメンPC工法の接合形式は、柱・大梁部材共にプレストレスによる圧着接合工法を適用している。

設計法は均等スパンの純ラーメン構造であることから、終局強度設計法で設計している。

基準階床伏図を図-1、軸組図を図-2に示す。

3. 大規模倉庫の設計システム条件と構法の選択

地価および人件費の高騰の結果、倉庫業も単なる商品を入れておく建物の時代は終わった。現在、建設段階に入っている殆どどの倉庫、配送センター等の物流施設は、できるだけ建物の内部においては人間に頼らず、短時間に自動的に仕分けられて搬入・搬出ができる機能を持たせたハイテク自動倉庫にすることが経営戦略上、重要な条件となってきている。これら搬送システムを導入するための経済メリットを生む建物の性能と経済コストに対する条件は次のようになる。

- 1) 1棟の延床面積を1万坪～3万坪にする大規模化。
- 2) 積載荷重は1階10 t/坪、2階より上階6 t/坪(1820 kg/m²)。
- 3) 柱割は9 m～10 mスパンのグリッドプラン。
- 4) 作業効率、積載ボリュームを上げるため、梁下有効高さは4.5 m以上とする。
- 5) 空調設備をとり入れたオフィス化倉庫に対応できるようにするため、できるだけ耐震壁の無い純ラーメン構造とする。
- 6) 建設工期短縮を可能とする工法である。
- 7) トータル建設コストが安くできる。

これらの条件を満たす建物の構造として、鉄筋コンクリート造(RC造)のラーメン構造およびフラットスラブ構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造(SRC造)、プレストレストコンクリート構造(PC造)等があげられる。

RC造の純ラーメン構造では、柱断面が1階で1.5 m、大梁断面は1 m×1.5 mと大きくなり、有効空間が小さくなることから中規模倉庫に適用されてきたが、大規模倉庫には適用することは難しい。また、耐震壁を多く有するRC造のラーメン構法やフラットスラブ工法は、規模拡大による空間配置計画の自由性、自動システムの導入とオフィス化した空間が併用する多様空間の必要性から、耐震壁の無い倉庫が主流となってきており、

トータル建設コストにおいてもデメリットとなっている。

場所打ち工法は、1か所の現場で、400人～500人の現場作業員を必要とし、労働力供給の点から物理的に不可能となってきたこと、現場作業の多い構法のため、建設工期の大幅な遅延が余儀なくされ、建設経営はなりたない環境となってきたため、この場所打ちRC造による構法は適用されなくなってきている。また、RC造をプレキャスト化して工業化構法で計画されても鉄筋(D29, D35)数が12本以上となり、過大な梁断面となって、柱・梁仕口パネル部の施工性が悪く、実験でも既知のように、仕口パネル部が先行破壊するタイプとなり、高層化が難しいことは明白である。

次に、SRC造はRC造の不可能な設計領域を越えて設計できるメリットがあるので高層化には対応できるが、鉄骨量に比して、溶接工数と、鉄骨加工手間が高く、ファブリケーターの効率が悪くなるので、受注されないケースが多くなってきたこと、また鉄骨の供給が受注生産から6か月以上かかることが難点とされている。

このSRC造の倉庫は、鉄骨造という組立工法の利点を持っているにもかかわらず、場所打ち鉄筋コンクリート造で包む構法であるので、RC造と同様に現場作業を多く必要とし、建設工期、コスト面で、RC造の3割アップとなることから、設計はされても受注できずに実現化が難しくなっているのが現状である。

PC構造は、柱をRC造とした場所打ちPC造と本建物の構法と同様、プレストレスによる圧着接合を適用したプレキャストPCラーメン構法に分けられるが、建物が大規模化して、全長が70 mを超える場合、プレストレストポストテンション工法により導入した時、前者の場合建物の梁間方向の軸変形が大きく、この強制変形によって生ずる柱の不静定曲げモーメントが大きくなり、建物全体のプレストレスは難しく、段階施工やエキスパンション等の配慮が無ければ設計は不可能となる難点がある。また、この場所打ちPC構造は、前述した建物の性能と経済コストに対する7つの条件の中で1～5の条件は満たすことができるが、場所打ち構法なるがゆえに、RC造と同様に多くの現場作業員を必要とし、6、7の条件の点で採用することは難しい。

高品質、高強度のコンクリートを使用したプレストレストコンクリート造の柱・梁部材をプレキャスト化し工場生産部材とし、常時の設計応力に対応したプレストレス量の殆どを工場生産時にプレストレス導入を完了させておく設計の場合は、建物全体に悪影響を与える軸変形による二次応力をPC鋼材の配置システム、建物の建方および施工技術によって無視できるくらいまで小さくすることができ、プレストレストコンクリートの設計法が

より明解で簡便な設計システムをとることが可能となり、建物の全長が100 m～200 m ぐらいまでエキスパンションをとることなく設計できる利点を持つ構法となった。

柱・梁のプレキャスト PC 化を図ったプレキャスト PC ラーメン構法は、現場作業員を1/5に省力化し、建設工期を大幅に短縮できる。したがって、PC 構造の構造的特質を最大限に生かした高品質・高強度の PC 組立構法は、上記の条件をすべてクリアした構法として、数多くの大規模倉庫に採用されてきている。

4. 柱コーベル式プレストレス圧着接合の設計法

プレストレスを適用した柱と梁の圧着接合は種々考えられ、これらは施工法から次のように分類される。

- a) 端部のみ鉄骨仕口にした SPC 構造の圧着接合
- b) 柱より仮設ブラケット方式で施工する圧着接合
- c) 柱コーベル（柱アゴ）式圧着接合

また、PC 鋼材（ストランドケーブル、PC 鋼棒）と太径鉄筋との混合で合成された圧着接合も分けて考える必要がある。a) の場合は、比較的高層ラーメン構造において建物の高さが45 m～60 m ぐらいの PC 組立工法に適しており、高靱性と鉄骨仕口のジョイント方法が、タワークレーン使用時の建方の施工性、安全性の点で良くなるが、45 m 以下の建物には、鉄骨を入れなく

ても耐震設計ができ、a) の場合はコスト的に高くなる。b) の場合、仮設ブラケット方式は、施工段階において、大梁・小梁・合成床版等の自重や作業荷重を受けるが、アンカーボルトを柱に埋め込みせん断伝達させる方式を用いる。この方式は、施工時の安全策のため、架設手間が多くかかり、このブラケットの撤去が大変であることや、プレストレス圧着接合後はブラケットの撤去時に全自重と積載荷重の全せん断力が目地部にかかり、さらに地震時の大変形時には最大曲げモーメントによる目地の開いた状態でせん断力が加算されるので目地部に割裂が入った後の剛性低下が著しいことからせん断キーを設ける必要があるが、c) の場合はコーベルがあるのでせん断キーの必要がない。

柱と梁の圧着接合には、比較的伸びの少ない PC 鋼棒の使用と過緊張のプレストレス導入は、PC 鋼材の破断の危険があり、耐震設計の基本となる高靱性が期待できない。PC 鋼材と太径鉄筋との混合で柱貫通させた圧着接合は、地震時の大変形時には、RC 造の仕口パネル破壊と同様に、鉄筋のボンド定着が柱仕口部、目地部にぜい性亀裂を多発させ、柱仕口パネル破壊が避けられないことはこれまでの実験で明らかになっている。そこで梁先行崩壊形となるよう、大梁の変形能力を大きくする高靱性の耐震設計には、梁に使用する PC 鋼材の降伏伸び量の大きいストランドケーブルを仕口パネル中心部内に配置させ、この降伏強度の50%～60%のプレストレス

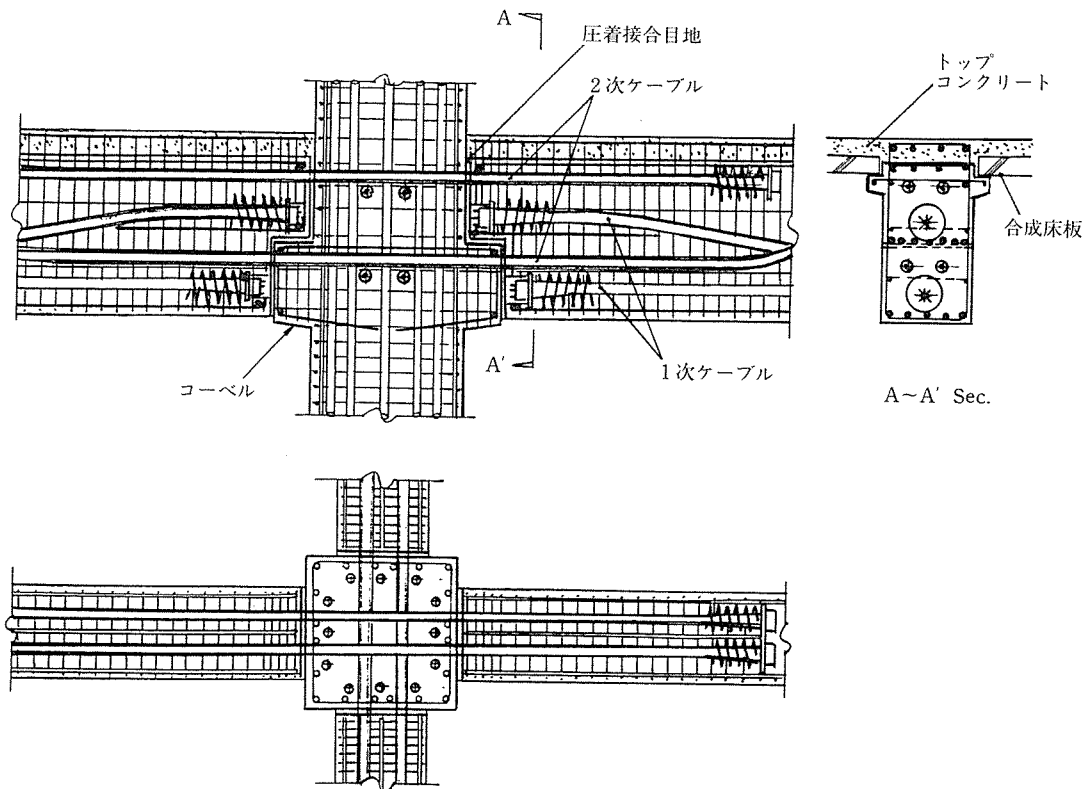


図-3 柱・梁圧着接合詳細図

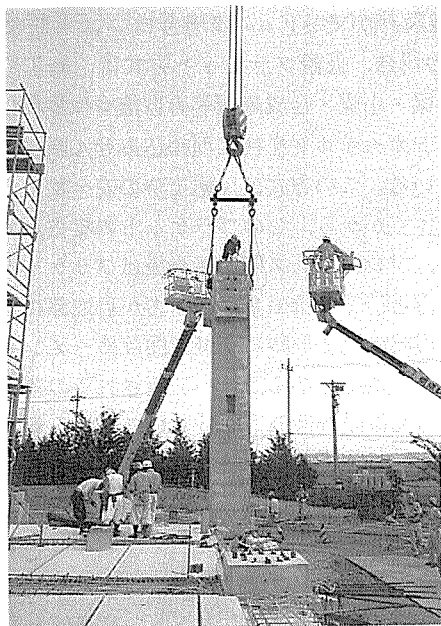


写真-1 プレストレスによる柱の自立

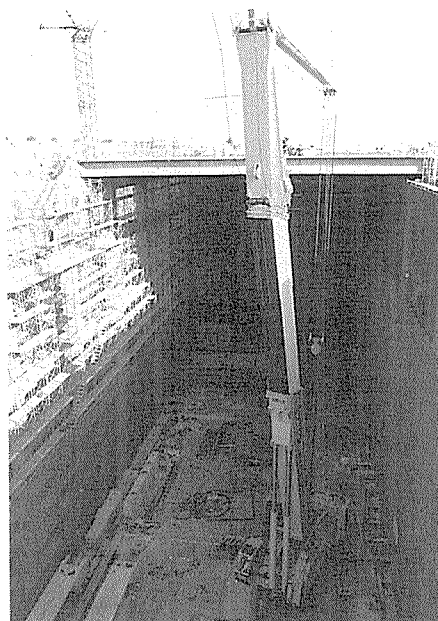


写真-4 ラック棟のST床版架設



写真-2 施工中の全景



写真-5 ラック棟柱高さ 26.75 m の柱の自立



写真-3 柱コーベル式圧着接合による純ラーメンPC構造

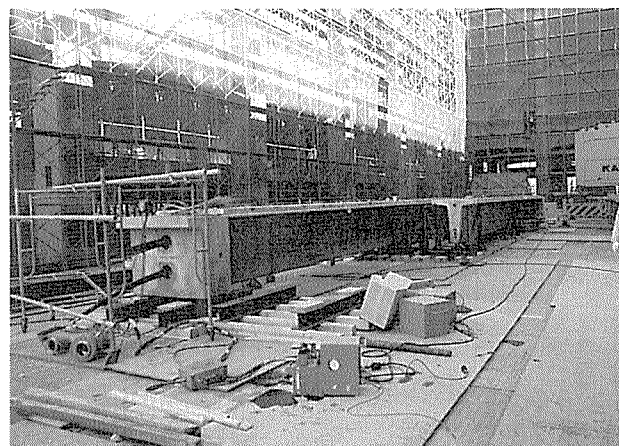


写真-6 ST床版 ($l=24.5$ m) の3分割ブロック工法

を与える設計法でなければならない。常時せん断力の大きい柱・梁圧着接合は、この設計法を可能とする工法で、柱コーベル（柱アゴ）を鉄筋コンクリート造とした安全設計にすることにより、大変形を許容できる復元力特性が得られる PC 部材の設計法が実験によって解明されたので、今後の高層プレキャストラーメン構造は RC 造でなく、プレストレス圧着接合を適用した PC 造が主流となるであろう（図-3）。

●台座ブロック式柱圧着接合設計法の特長

- 1) 場所打ち柱脚内に埋設された柱 PC 鋼棒用アンカーフレームと台座ブロック方式によって、柱 PC 部材をセットする前にこの小さな台座ブロックで X, Y, Z 方向の精度をとることにより、上部 PC 柱の建方精度を簡便に上げられる（写真-1 参照）。
- 2) 建方スピードをあげる（1日8本の柱自立）。
- 3) プレストレスによる柱自立方式なので、架設時フレーム形成中の安全性、耐震性が保証できる。
- 4) PC 柱は鉄骨と同様に2層分の柱自立の設計ができる。
- 5) 高強度コンクリート ($F_c=500 \text{ kg/cm}^2$) を使用した工場製品で、PC 鋼棒の降伏強度の 50%~60% の導入荷重でプレストレスが与えられるので、高い建物 (31 m~45 m) でも十分に耐えられる高靱性柱の設計ができる。

●柱コーベル式圧着接合設計法の特長

- 1) スラブ、梁の躯体自重を単純梁（1次ケーブル）で柱コーベルに伝達させ、建物全長にわたる連続ケーブルを無くして、プレストレスによる軸変形を小さくできるので、建物の全長を拡大し、エキスパンションを無くすことができる。
- 2) 柱コーベルの設計は、常時の積載荷重を含む全荷重を受ける鉄筋コンクリート造として、曲げ補強筋、せん断補強筋、横拘束筋によってコンファインドコーベルとして設計されるので、層間変形角が 1/10 ぐらいに至る崩壊時まで PC 大梁を絶対に落下させない構造となる。それゆえ、高層 PC ラーメン構造に最適である。
- 3) 柱コーベル式圧着接合の設計法は、圧着目地部のヒンジデバイス効果の性能が十分に発揮されるので、層間変形角が 1/100~1/12.5 に至るまで、圧着目地の接触するかぶりの範囲内で下端および側面の割裂が生じるくらい軽微なダメージですみ、大梁全体の損壊を無くすことができる。
- 4) 大梁丈が柱丈より大きい場合の RC 造の実験で明らかとなっているような柱仕口パネルゾーンのぜい性破壊を完全に無くすことができる。

梁の PC 鋼材は、PC 鋼棒でなくストランドケー

ブルを使用していることから、伸びに対する靱性効果が大きく、かつまた初期導入力を小さくする設計法なので、梁の靱性が確保され、X, Y, Z の 3 軸圧縮された仕口パネルゾーン内の亀裂発生を生じさせない剛体化を自在に設計でき、かりに短柱であっても、梁先行崩壊型とする接合法である。

- 5) RC 構造の場合、層間変形角が 1/100~1/67 に至ると残留変形が大きく、復元力が減じ、もとの状態にもどらない。したがって、交番繰返し実験でのダクティリティーの評価がフレームの倒壊を保证するものではない。なぜなら、実験の設計レベルの層間変形角が 1/100 ぐらいの範囲内では建物の倒壊に対する安全保証が確立できるが、1/67 ぐらいになると、いくら部材レベルで靱性設計がなされても残留変形が 1/200 を超え、再使用は難しい。

この柱コーベル式圧着接合の場合は、アゴ部にヒンジが形成されて、圧縮から引張の領域までのバネ化によって、元に復帰させようとするプレストレスエネルギーが残留変形を小さくさせ、倒壊を防止できる構造となる。

- 6) 終局強度設計法における地震時の安全度の検討において、本工法の場合は大変形時に梁端がヒンジデバイス機構となり、容易に梁降伏・曲げ先行系に設計できるので、柱・梁ともに曲げ・せん断設計用の安全度の倍率は 1.5 倍としてよい。これまでの過去に数多くの実施設計において保有耐力設計法による安全確認を検証した結果、現行の終局強度設計法におけるせん断設計用安全倍率は過剰設計となる。
- 7) 梁の許容応力度設計はプレキャスト部材断面で検討し、終局設計時はトップコンクリート床と合成された T 形梁として設計してよい。
- 8) 柱コーベルが梁支点となるので、梁端拘束モーメントは応力再分配によって 1 次ケーブルに負担させることができる（通常は 20% 程度）。
- 9) 1 次ケーブルのプレストレス有効率は 0.85, 2 次ケーブルは乾燥収縮およびクリープが数か月進行してからプレストレス導入されることから、初期導入力の低減によるリラクゼーション等のプレストレスロスは少なく、有効率を 0.9 としてよい。

5. フレーム変形能力に対する評価に対する提案

これまでの耐震性能は、地震時の大変形に対して許容できるような安全ファクターとして、靱性能をもとに耐震設計の安全保証の評価がなされてきた。変形能の確認では、正負交番繰返し実験結果をもとにしたダクティリティーの大きさ（靱性率）と地震時のエネルギー吸収能

力等の靱性能の評価において、フレームの残留変形は重要視されていない。そのため、RC 構造と PC 構造の靱性評価に対し、PC 研究者は「PC 構造は原点指向型の履歴曲線を持ち、ダクティリティーも RC 構造と比べて小さいので、高層建物の耐震設計は難しい」との論文が多く、最近のプレキャスト PC 工法の設計技術を理解したモデル実験は全くなかった。また、残留変形を大きく許容させた靱性設計は、層間変形角が大きくなると、転倒モーメントによる軸力加算によって、フレームの崩壊を加速させる危険があることを重要視せねばならない。

これまでのプレキャスト RC 十字型フレームの実験結果は、正負交番繰返し実験であるので残留層間変形角が 1/200 を超え、1/50 に大きくなっても強制的に正から負方向に復元させている。しかしながら、地震時の挙動は必ずしも正負交番とはなりえない点を重要視しなければならない。地震時の水平荷重によって生ずるフレームの残留変形は 1/200 が限界である。これまでのプレキャスト高層建物の RC 十字型実験結果からも明らかなように、梁降伏時の層間変形角は 1/150~1/125 であり、また、限界残留変形角を 1/200 とした時の許容層間変形角は 1/67 ぐらいであり、このダクティリティー率は 2 値となる。同様に、PC 造の梁降伏時の層間変形角は 1/100 ぐらいで、許容層間変形角は 1/33 ぐらいまで許容できるので、ダクティリティー率は 3 値となり、本設計法による PC 構造は RC 構造よりも靱性能は優れていることがわかる (図-4)。また、PC 構造フレームの梁部材レベルで、局部的に限界残留変形角を 1/100 まで許容させた時、最大変形角は 1/25 まで許容でき、ダクティリティー率 4 値を確保できる。この時のフレーム状況は柱仕口パネルゾーンの亀裂は全くない状態であって、単に目地部下端のかぶり部の割裂が生じる程度である。しかし、RC 構造フレームでは 1/25 変形角になると

柱仕口パネルゾーンの損壊がひどく、ダクティリティー率 4 値を保証することはできない。

柱の平均せん断応力レベルで比較すると、RC 構造柱は 15 kg/cm²、PC 構造柱は 20 kg/cm² 程度で断面設計されるので、許容層間変形角内の範囲では柱断面が小さくなりフレームの剛性は必然的に柔構造となって、建物の固有周期が長くなり、地震エネルギーの入力は小さくなる。

通常設計される地震時の層間変形角は 1/150~1/200 の弾性範囲内で設計されているので、RC 構造と PC 構造のコンクリート系においては地震時のエネルギー吸収能力による差は殆どなく、それよりも RC 構造は大地震時に生ずる残留変形が局部的に生じやすく、建物の再使用を不可能とし、柱コーベル式圧着接合の PC 構造は、靱性設計に優れていることが実証できた。

6. おわりに

柱コーベル式のプレストレス圧着接合を適用した組立工法の設計法によって、現在 25 棟、延床面積 60 万 m² の実績をあげている。この設計法を検証するため、5 階建純ラーメン倉庫の最下階フレームの外フレームをト形、内フレームを十字形のスラブつき試験体とし、柱・梁断面の 1/3 モデル実験を行った。結果によると、この工法の設計法で予知したとおりに、柱アゴ端の圧着目地部にヒンジデバイスが形成され、層間変形角が 1/12.5 に至ってもストランドケーブルの破断は無かった。また、圧着目地アゴ部を支点とする回転バネ化によって柱・大梁の全体のダメージも無かった。すなわち、目地部のコンファインド鉄筋のかぶり表面層の割裂と目地下端の脱落等の軽微なダメージはあるが、柱および仕口部のパネルゾーンの損傷は全く無かった。これらにより、鉄筋コンクリート構造では不可能に近い残留変形の少ない靱性設計が簡便にできることが実証されたことをこの紙

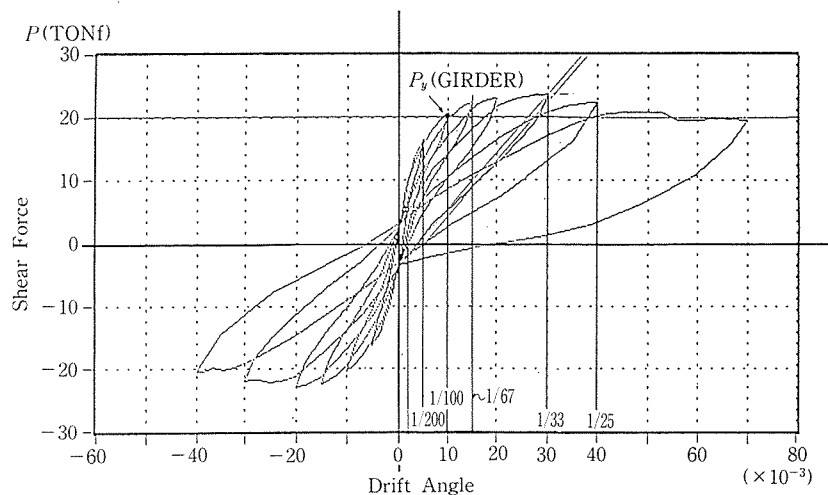


図-4 柱・梁圧着接合 1/3 モデル実験結果

面をかりて報告する。なお、この実験結果は、別の機会に発表し、全く新しいプレストレストコンクリートの概念の進化へと展開させていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規
準・同解説，昭50.1.25
- 2) 日本建築センター：構造計算指針・同解説，昭56.2.1
- 3) 日本建築センター：プレストレストコンクリート造設計
施工指針，昭58.9
- 4) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種
PC）構造設計・施工指針・同解説，昭61.1
- 5) 田辺恵三，中村英一：鉄骨鉄筋プレストレストコンク
リート構造の施工—足立区総合体育館—，コンクリート
工学，Vol. 18, No. 2, 1980.2
- 6) 田辺恵三：プレストレストコンクリート構造ボックスげ
たによる築地中央卸売市場の施工，コンクリート工学，
Vol. 20, No. 6, 1982.6
- 7) 井之上一洋，田辺恵三：プレキャスト SPC 構造によ
る三郷浄水場ポンプ所上家の施工，コンクリート工学，
Vol. 21, No. 2, 1983.2
- 8) 田辺恵三：SPC 合成構造，コンクリート工学，Vol.
21, No. 12, 1983.12
- 9) 岡本 伸：プレストレストコンクリートを用いた「人工
土地」のモデル実験，コンクリート工学，Vol. 21,
No. 2, 1983.2
- 10) 田辺恵三，亀尾 保：国際科学技術博覧会 F ブロック
外国館プレキャスト PC 工事の施工，プレストレスト
コンクリート，Vol. 27, No. 2, 1985.3
- 11) 萩坂 詳，木村政文，田辺恵三：松山市統合コミュニ
ティセンター体育館の設計と施工，プレストレストコン
クリート，Vol. 28, No. 1, 1986.1
- 12) 古沢 功，宮沢 洋，田辺恵三：プレキャスト SPC 工
法による中高層学校建築，建築技術，1986.6
- 13) 田辺恵三：SPC 工法と海洋構造物への利用，橋梁，Vol.
21, No. 7, 1985
- 14) 田辺恵三，建部光利，柏崎 司：大梁を SPC 化した大
スパン多層ラーメン構造，建築技術，1988.10
- 15) 田辺恵三：プレストレスト手法の特長と課題，建築技術
集号「多彩!! 建築とプレストレスト」，1989.2
- 16) 田辺恵三：プレストレスト工事管理のポイント，建築技
術特集号，1989.2
- 17) 田辺恵三：仕口部に鉄骨を用いたプレキャスト PC 構
造，プレストレストコンクリート，Vol. 31, No. 3,
1989.7
- 18) 田辺恵三：解析法の進歩による設計法の変遷—プレ
ストレストコンクリート建物—，コンクリート工学，Vol.
27, No. 7, 1989.7
- 19) 中村博，阿部康二，田辺恵三：プレキャスト PC 化を
図った TG 千住ビルの設計と施工，プレストレストコ
ンクリート，Vol. 32, No. 3, May 1990
- 20) 田辺恵三：急速施工によるプレキャスト PC ラーメン
構法，プレストレストコンクリート，Vol. 32, No. 3,
May 1990

【1991年5月9日受付】