

プレキャストPC圧着接合に関する設計法と実験的研究

田辺 恵三*

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造 (PC 造) を適用した構造物は、ラーメン構造においては場所打ち一体式 PC 造の低層大スパン構造に応用されてきた。この PC 造は、柱を場所打ち鉄筋コンクリート造とする併用構造として発展してきた。

PC 造のプレキャスト化は、まず第一歩として、部分的に使用する 2 次部材の PC 梁、PC 床板 (DT スラブ、ST スラブ、ハーフスラブ、穴あき平板) や PC 杭において、標準化と規格化が進み、これらの PC 製品はほとんど開発が尽くされ一般的になってきている。

高強度コンクリートを使用した PC 造のプレファブリケーション技術を地震国の日本において飛躍的に発展させていくためには、PC ラーメン構造を構成する柱・梁部材を鉄骨造と同様に無足場施工を基本とし、高品質・高強度コンクリートを使用してプレハブ化を実現できるプレキャスト PC 造の構築工法とその設計法の確立を必要とする。本研究においては、構造部材が高強度コンクリート品質管理基準 (参考表-1) による工場製品を原則とし、品質と性能の保証された部材を使用することを条件にしている。そして、低層から高層建物まで高靱性 PC フレームを保証する、終局強度法を基本にした簡便な設計法であって、かつ耐震性に優れた柱・梁圧着接合法の設計法を提案する。また、PC 圧着接合法の実験的研究をもとに、全く新しい提案である「プレスジョイ

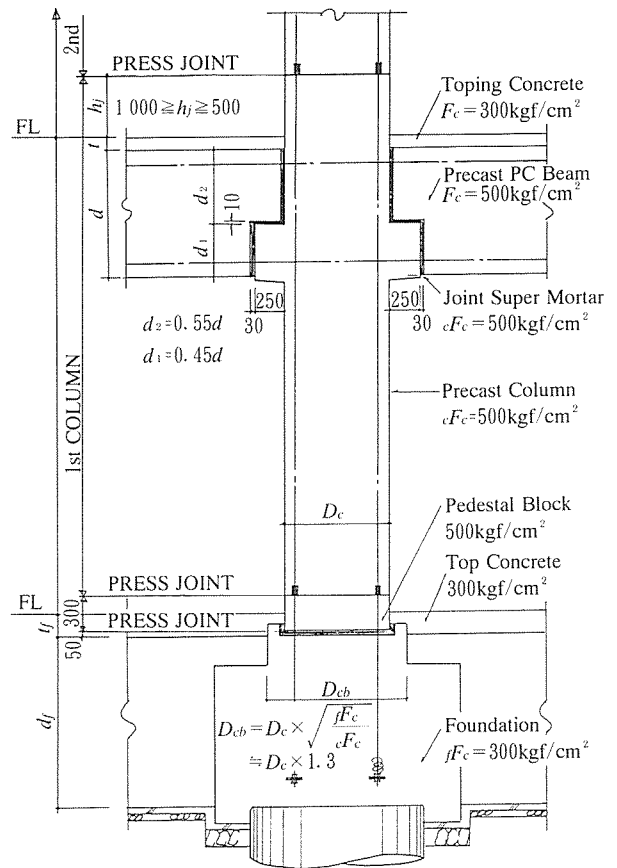


図-1 プレスジョイントインテントシステム

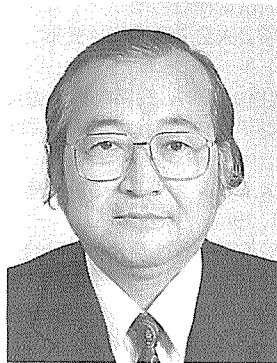
ントインテントシステム」(図-1 参照) のメカニズムを重点に解析し検証することを目的とする。

2. PC 圧着工法

2.1 柱・梁圧着接合方式

PC 圧着工法における柱・梁圧着接合方式は、①ブラケット方式、②シアキー方式、③コーベル方式、④鉄骨仕口方式に分類される。これらの方式を図-2 に示す。

柱・梁圧着接合方式の構築工法は、鉄骨造と同様な架設法 (無支保工架設) が省力化工法の前提条件となることから、施工段階の安全性と耐震性を保証するには、プレキャスト部材 (梁、小梁、PC スラブ) の自重による鉛直反力と水平力 (地震力、風圧力) 等を直接、柱に伝達できる柱の自立工法を条件としている。したがって、



* Keizo TANABE
黒沢建設 (株) 取締役設計部長

部位	方式	設計条件と適用範囲	圧着接合の詳細
柱・梁圧着接合	ブラケット方式	<ol style="list-style-type: none"> 1. PC鋼材は原則としてPCストランドケーブルを使用する。 2. PCストランドケーブルは原則として上段、中段および下端に配置する。 3. 耐震圧着接合にはブラケットは仮設でなく本設とする。 	
	シアキー方式	<ol style="list-style-type: none"> 1. PC鋼材は原則としてPCストランドケーブルを使用する。 2. PCストランドケーブルは原則として上段、中段および下端に配置する。 3. 耐震圧着接合にはブラケットをシアキーの他に本設として設ける。 	
	コーベル方式	<ol style="list-style-type: none"> 1. PC鋼材は原則としてPCストランドケーブルを使用する。 2. PCストランドケーブルは原則として上段と下端に配置する。 3. 梁下位置のコーベルもこれと同等とする。 	
	鉄骨仕口方式	<ol style="list-style-type: none"> 1. PC鋼材は原則としてPCストランドケーブルを使用する。 2. PCストランドケーブルは原則として上段と下端に位置する。 	

注) 柱・梁圧着接合にPC鋼棒を使用する場合は、原則として緊張導入力は降伏耐力の1/2以下とする。

図-2 柱・梁圧着接合方式

施工時における安全性のためには、柱仕口部のブラケット、鉄骨仕口、コーベル等の受けアゴの設計が最も重要な設計要素となる。柱コーベル方式によるPC圧着工法の架構詳細図例を図-3に示す。

柱・梁接合部は、地震時に曲げとせん断の応力を同時に受け、圧着接合目地がモルタルグラウト方式だけではプレストレスが少ない場合、終局段階に鉛直方向のスリップをすることが実験報告されている(文献21参照)。したがって仕口に作用する応力が大きい場合に靱性設計する柱・梁接合は、原則としてモルタルグラウト方式とシアキー、ブラケット、コーベル等と併用して設計することを提案する。ただし、2~3階程度の建物で

耐震壁を使用して地震時の水平力を過大に受けないフレームの場合はこの限りでないものとする。文献21によれば、②のシアキーを設けた場合でもせん断における終局状態においてはスリップが生じるため、鉄骨ブラケットを本設として設計すべきであるとしている。それゆえ、ここでは最も簡便な方法で崩壊時まで絶対にスリップを起こさせない圧着接合方式として、③のコーベル方式を選択することを推奨する。

柱・梁圧着接合のプレストレスによる圧着接合は、原則としてPC鋼材は施工段階から設計段階までに生ずるねじりモーメントに対して抵抗できるよう複数以上のケーブル配線とし、地震時に圧着接合部に発生する上下

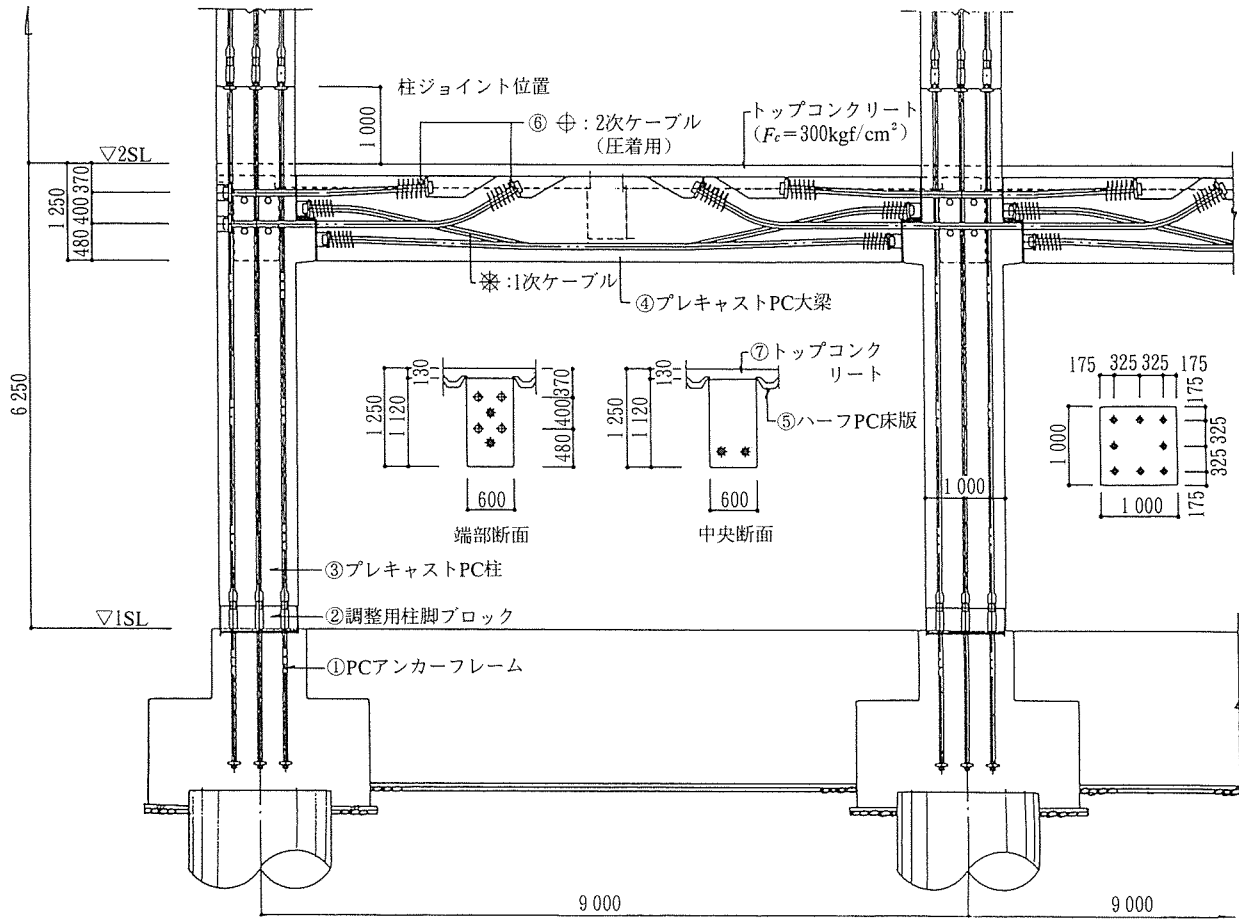


図-3 PC 圧着接合工法架構詳細図

端の曲げ応力に対して有効なプレストレスの分布状態を保持させるため、PC 圧着接合用ケーブルは上段、下段に配置させることが望ましい。

柱コーベル式 PC 圧着接合のパネルゾーンの地震時応

力メカニズムを、図-4 に示すように、終局時の全せん断力をコーベルが直接に柱に伝達できる靱性設計をすることによって、圧着接合部は地震時の曲げモーメントに対してのみ引張力、圧縮力が作用する。この柱断面内応

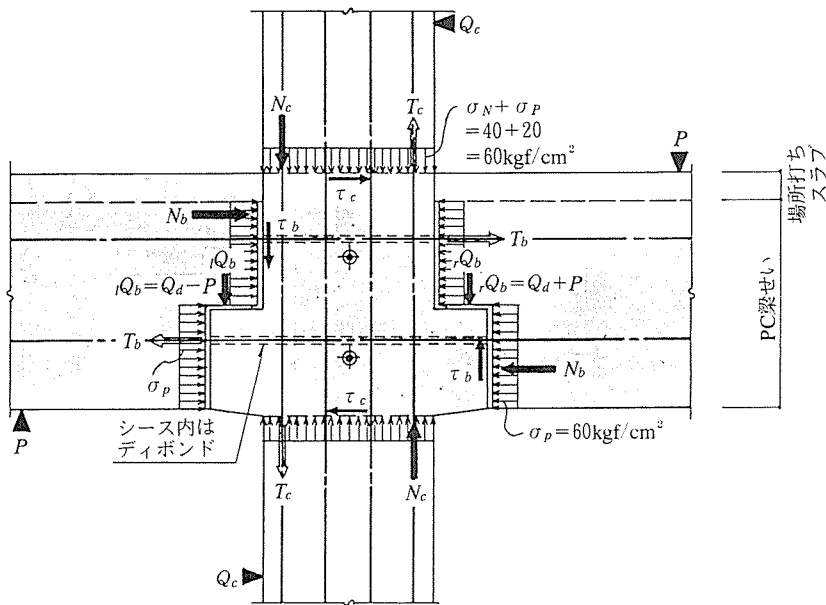


図-4 地震時応力メカニズム

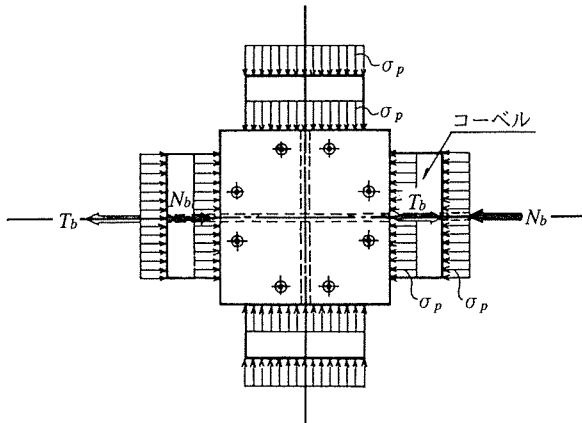


図-5 柱断面内応力図 (3軸プレストレス)

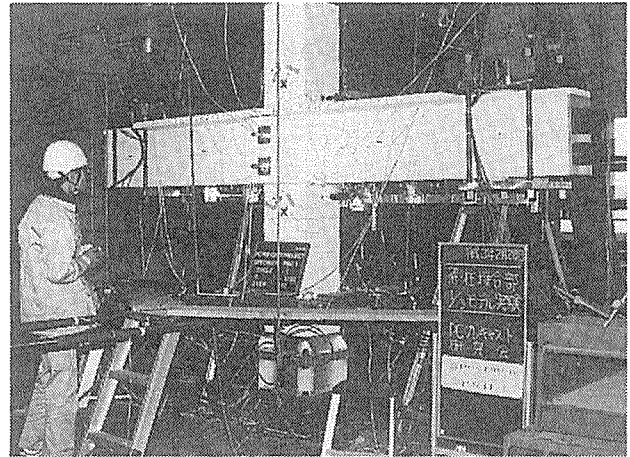


写真-1 実験状況

力図 (図-5) からわかるように、柱のパネルゾーンは3軸方向のプレストレスによって剛体となるため、RC造の柱・梁接合実験にみられるような仕口部の圧縮ストラットによるせん断破壊は生じなく、コーベル上の

圧着接合目地のヒンジデバイス機構によって、高靱性変形が容易に得ることができ、短柱設計であっても梁先行崩壊系を保証できる優れたPC圧着フレームを形成する構築工法であることが実験によって検証された (図-6、

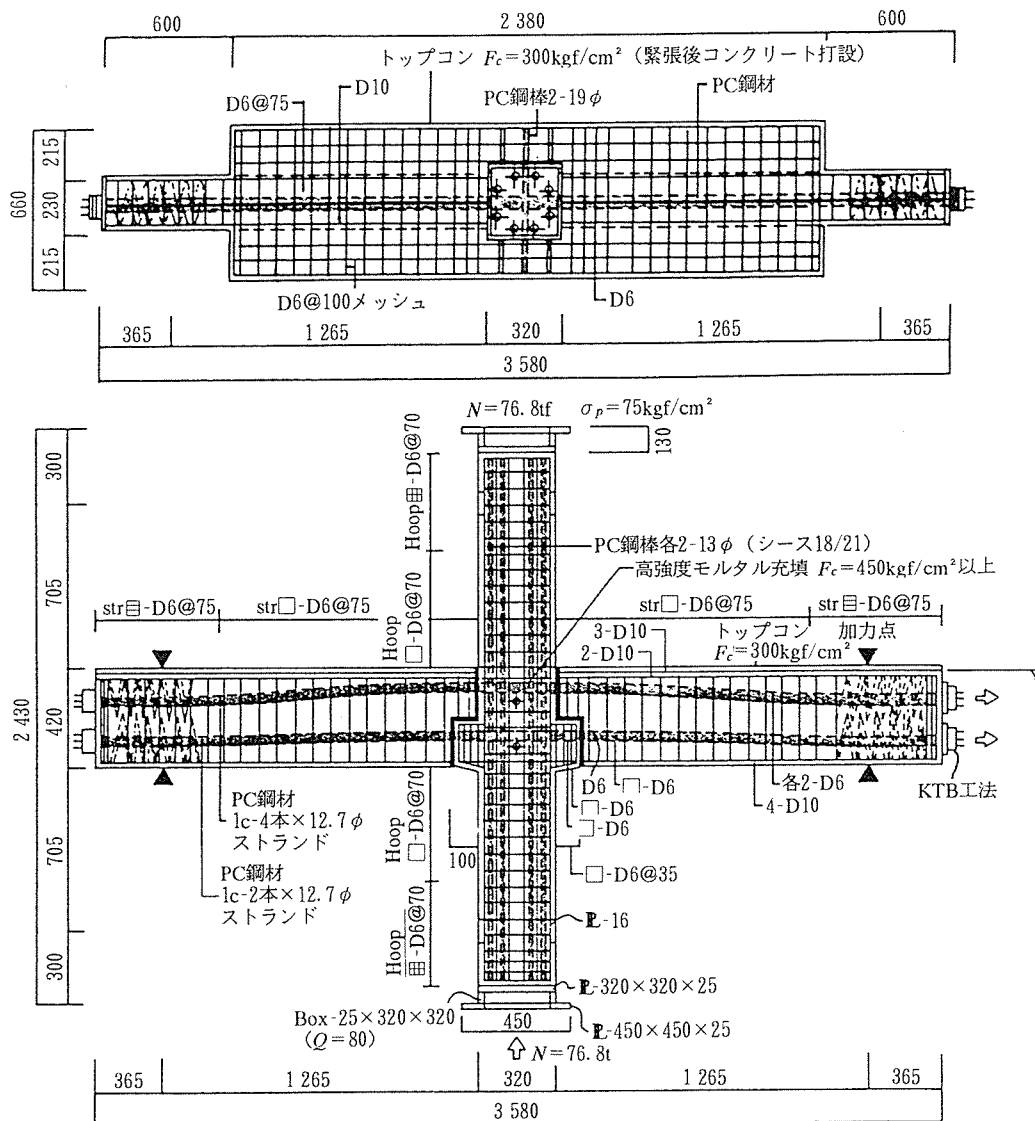


図-6 PRH 0, PRH 1 試験体

写真-1)。

2.2 PC 圧着接合設計法の特徴

高品質・高強度コンクリートを使用した工場生産の柱・梁部材に、プレストレスによる圧着接合を適用した PC フレームを形成するプレファブリケーション技術の設計法を提案する。コーベル式 PC 圧着工法は、現在、PC 構造物の大規模建築物（31 m 以下）に日本建築センターによる評価の必要がなく、一般的に普及されている。

この PC 圧着接合法による設計法の特徴は、

- ① 建物のスパン数が 20 スパン、全長 200 m を超えてもエキスパンションを設置することなく多連続ラーメン構造が構築できる。
- ② 合成 PC 床板上のトップコンクリート部分のみ場所打ち工法とし、他の構造部材はすべて、 $F_c=500$ kgf/cm² 以上の高強度コンクリートを設定できるプレキャスト PC 圧着工法である。
- ③ 鉄骨構造と同様、垂直方向のプレストレス導入によってコーベルと一体な柱自立を可能とし、高層建物の建方の施工性・安全性を向上させることができる。
- ④ コンクリート系建物の躯体工期を 1/3 に短縮できる。
- ⑤ コーベル式圧着接合は、終局崩壊段階に柱・梁圧着接合部がヒンジ機構となるので梁先行崩壊系の高靱性復元力を有する耐震設計が容易にできる。

本設計法の特徴のその①は、PC 梁は全荷重による設計応力に対して、工場生産時にポストテンションによるプレストレス導入を行った PC 単純梁の設計がなされ、建物全体に影響を及ぼすプレストレスによる弾性収縮、乾燥収縮、クリープ等の変形と PC 梁の 1 次ケーブルの偏心曲げモーメント等によって生ずる不静定曲げモーメントの 2 次応力を非常に小さくする設計法にすることができることによって、多連続ラーメン構造を構築できることである。その②は、場所打ち PC 構造のコンクリート強度を約 1.5 倍～2 倍に設計できることから、コンクリート系構造物の軽量化を図ることができること。その③は、柱・梁圧着接合を行う前に、仮のプレストレス導入による片持ち柱の状態、その層の地震力や風力による水平力に耐えられる架設時の安全設計ができること。その④は、③の施工性の改善によって建設工期の大幅な短縮を可能とさせていること。その⑤は、従来のコーベルなしのブラケットの柱・梁圧着接合方式は、崩壊時に曲げ・せん断応力を受けたとき、垂直方向のスリップ変形が先行して、圧着目地部周辺の割裂と PC 鋼材の破断による崩壊の危険が大きくなるが、コーベル式圧着接合方式は、プレキャスト PC 大梁の全せん断力を直接、

コーベルに伝達させているのでスリップ変形は全くない。したがって、終局時には終局曲げ耐力用の上下 2 段に設置した 2 次ストランドケーブル方式により、層間変形角 1/30 まで、この PC 鋼材を弾性状態におく適切な初期導入力の設定を調整して、目地部のヒンジ化を促進させて、プレキャストの PC 柱・梁部材の損壊を少なくさせ、高靱性復元力特性をもたせた耐震設計法を確立できること等が主な特徴となっている。

3. PC ケーブル配線法と不静定 2 次応力

PC ケーブル配線方式は、大きく分けると、ホッチキス方式、X-クロス方式、連続方式等に分類される。ホッチキス方式は比較的に大スパンでなく中央断面の設計応力が端部応力よりも支配でない高層建物の場合に適した方法である。X-クロス方式は比較的低層建物で大スパン、積載荷重の大きい場合に適した方法である。連続方式は 3 スパン以内の大スパン構造物に適用され、外柱に対してプレストレスによる弾性収縮の不静定 2 次応力が最も大きくなり、フレーム解析に最も悪影響を及ぼす結果となる。

これらのケーブル配線方式の中で、ホッチキス方式は最もプレストレスによる不静定 2 次応力を小さくすることができるので、建物のスパン数が 20 スパンを超えるラーメンフレームでも設計が可能となる。X-クロス方式は 2 スパン連続となるのでホッチキス方式より外柱の不静定 2 次応力が大きくなり、可能なラーメンフレームのスパン数は 10～15 スパンを限度とする。

本研究で提案する構築工法の PC ケーブル配線法は、すべての高層建築物や大規模構造物に対して、最も PC 構造物のプレファブリケーション技術の促進が容易で、施工性、構造的安全性を有するホッチキス方式、X-クロス方式を推奨している。

この配線法は、プレキャスト梁部材を工場生産時に単純梁として設計時全荷重に耐えられるよう 1 次ケーブルにプレストレス導入を行って、弾性収縮、乾燥収縮、クリープ等による軸変形による収縮ひずみをほとんど終了させたプレキャスト PC 梁を柱コーベル上に載せて、お互いの梁端部間のみ、上下段に配置した圧着接合用 2 次ケーブルの片方から順次プレストレス導入の施工法を原則とした PC ラーメン構造を形成する構築工法である（図-7）。

この配線法による構築工法は、プレストレスによる不静定 2 次応力を最小にする工法となったことから、多スパン連続ラーメン構造を可能としている。また、この組立 PC 工法の場合の架構応力は、不静定 2 次応力を施工段階ごとに応力解析する精算値と同等の近似解析法によって求めた応力と全体系全荷重時に対する PC 圧着

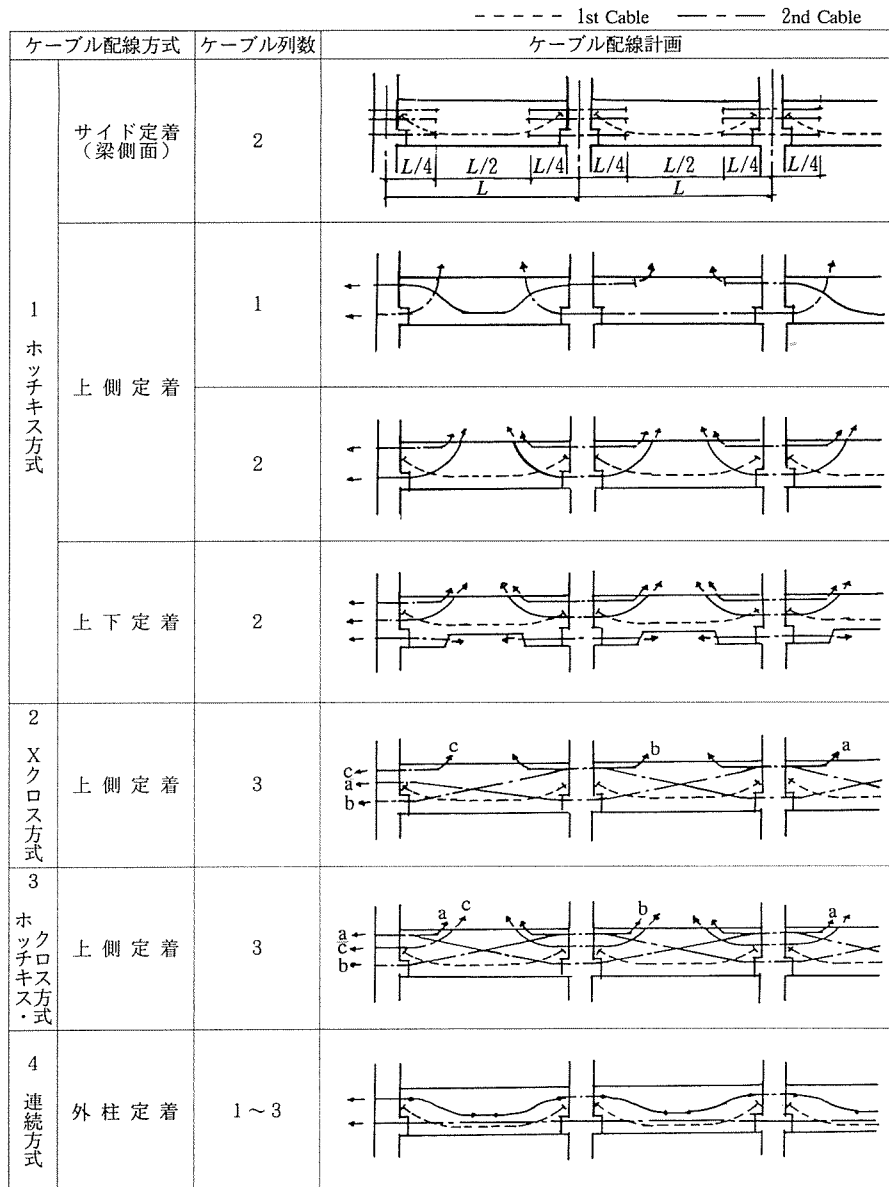


図-7 柱・梁圧着接合のケーブル配線計画

接合後の端部応力に対して荷重比に分配した鉛直応力とを合成することによって、これまでの一体な鉄筋コンクリート構造と同様に全体フレームのラーメン解析法を基本に簡便に適用できる。

4. PC 圧着接合の設計

PC 圧着工法を大規模構造物に適用した多くの実施設計のフレームを 1/3 に縮小したモデルに正負交番荷重を与えて検証実験を行った結果、図-8 に示す層せん断力と層間変形角の復元力特性が得られた。この実験により層間変形角と柱・梁の PC 鋼材の応力挙動がわかり、PC 鋼材の降伏が先行する崩壊型を防止でき

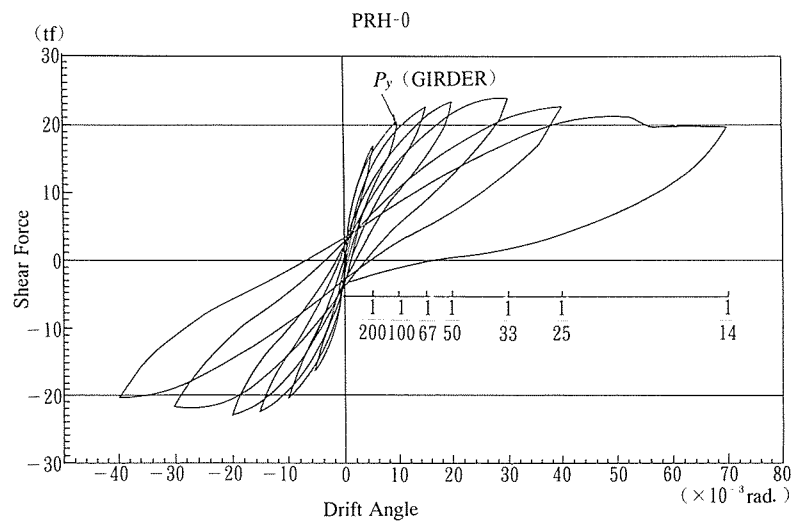


図-8 柱・梁圧着接合復元力特性 (1/3 モデル)

る設計システムが可能となった(図-9, 図-10)。

PC 圧着接合の靱性設計を保證できる耐震設計法の条件は次のようになる。

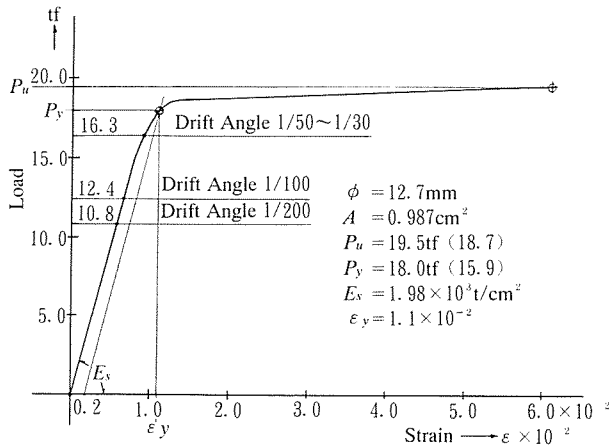


図-9 大梁断面内 PC ストランドの応力挙動

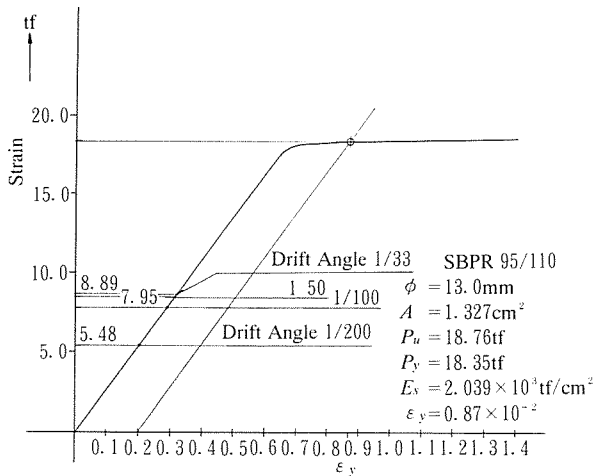


図-10 柱断面内 PC 鋼棒の応力挙動

- ① 層間変形角が 1/30 ぐらいまで圧着部のスリップをさせないためには、せん断力をスムーズに伝達させ終局せん断耐力を持たせたシアキー、ブラケット、コーベル等のアゴの設置を原則とする。
- ② 柱・梁圧着接合に使用する PC 鋼材は、原則として PC ストランドとし、梁断面内に上段ケーブルと下段ケーブルに分けて配置する。ただし、初期導入力を小さく配慮している場合は、PC 鋼棒を使用しても良いものとする。
- ③ 1/30 の層間変形角まで PC ストランドの先行降伏を避けるために、圧着用 2 次ストランドケーブルの有効緊張力は降伏耐力の 60 % を超えてはいけない。また、PC 鋼棒を使用する場合は 40 % を超えないものとする。
- ④ ケーブル配線方式は不静定 2 次応力が外柱に集中して増大する連続ケーブル方式を少なくし、不静定 2 次応力を最小にするホッチキス方式、または X-クロス方式を適用して、不静定ラーメン応力の局部集中を防止する。

5. PC 圧着接合フレームの復元力特性モデル

柱・梁圧着接合フレームの実験結果から得られた復元力特性において、梁降伏時の層間変形角は約 1/100 であり、弾性範囲内の最大柱せん断力は梁降伏時柱せん断力の約 2/3 倍の値であることがわかった。そこで弾性範囲の最大柱せん断力における層間変形角と終局耐力を建物の設計段階で計算値を求めておけば、実施設計による PC 圧着工法フレームの復元力特性をトリリニア弾塑性タイプにモデル化することができる(図-11 参照)。

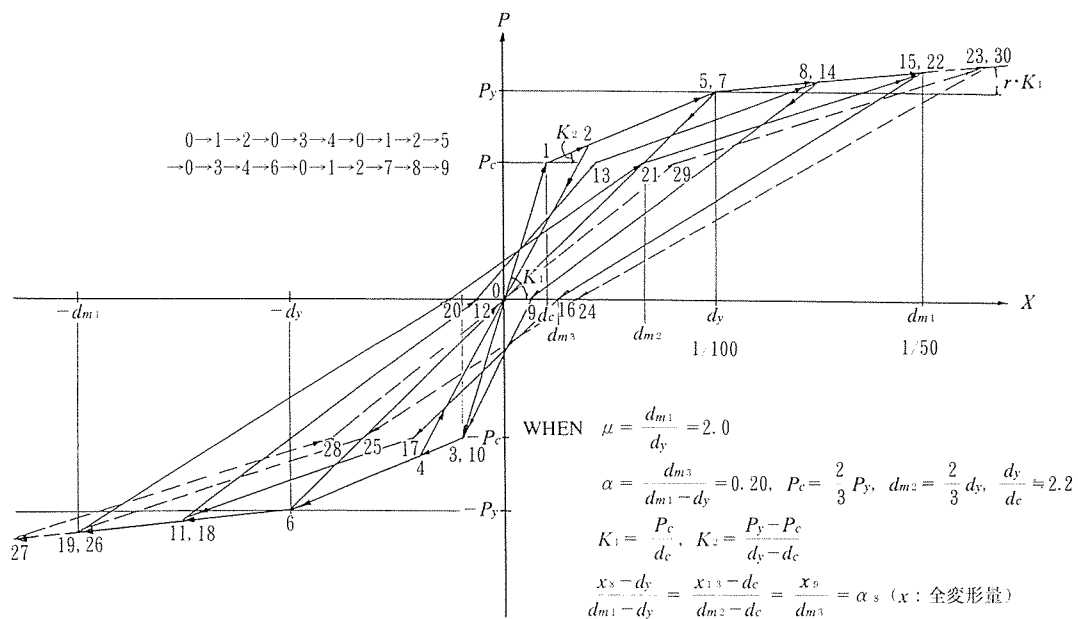


図-11 復元力特性モデル (PC ラーメン圧着工法)

PC 圧着工法フレームの復元力特性に対して最も不確定な要素は、スラブの剛性評価である。ハーフ PC スラブ板上に場所打ち鉄筋コンクリートを打設して T 形梁を形成した場合、交番繰返し荷重の加力試験で 1 回目はスラブの有効幅全体を剛性評価することができる。したがって、梁の降伏耐力はスラブ面に配筋された連続鉄筋も有効となる。しかし、層間変形角が 1/33 ぐらいに変形すると、スラブ面と柱面の接するスラブコンクリートの圧壊が生じるとともに、スラブと梁の境界面にはくりが生じやすくなる傾向にあり、塑性変形段階のカーブは上昇勾配から水平に近づくことがわかった。一般に、終局設計時の層間変形角が 1/100~1/200 ぐらいに設計される場合、スラブを有効に活かして T 形梁とし、履歴消費エネルギーに対して十分に評価できることがわかった (図-8 参照)。

6. 動的振動解析における等価粘性減衰定数

建物の動的振動解析を行う場合、プレキャスト PC 圧着工法の等価粘性減衰定数を求めることが必要となる。

この PC 圧着工法を適用した実施設計建物の 1/3 フレームモデルによる実験結果から、層間変形角と等価粘性減衰定数の値は図-12 のような結果を得た。

瞬間剛性比例型の減衰定数を評価する場合は、建物の水平加力による応力と変形を増分法により逐次求め、その結果から復元力特性曲線モデル上から得られる瞬間剛性の層間変形角によって比例させる等価粘性減衰定数の算定式として次の一次式を提案する。

$$h_e = 4.15 r_0$$

h_e : 等価粘性減衰定数

r_0 : 層間変形角 (ラジアン)

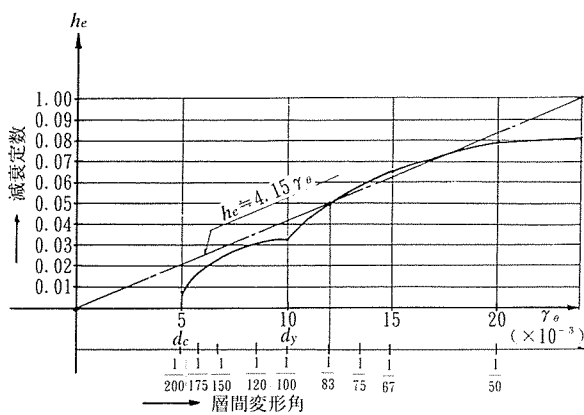


図-12 PC 圧着フレーム減衰定数

謝 辞

本プレキャスト PC 圧着接合の一連の研究にあたり、終始ご指導いただいた関東学院大学工学部 藤本一郎教授に対して心から感謝いたします。

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
- 2) 日本建築センター：構造計算指針・同解説
- 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
- 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
- 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) 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
- 9) 田辺恵三：SPC 合成構造, コンクリート工学, Vol. 21, No. 12, 1983.12
- 10) KEIZO TANABE : COMPOSITE SPC SUPER-STRUCTURE OF MISATO FILTRATION PLANT, VSL SYMPOSIUM ZERMATT IN SWITZERLAND 1984.4
- 11) 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
- 12) 荻坂 詳, 木村政文, 田辺恵三：松山市総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
- 13) 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
- 14) 田辺恵三：SPC 工法と海洋構造物への利用, 橋梁, Vol. 21, No. 7, 1985
- 15) 八幡義雄, 田辺恵三, 山田文男：アンカー工法による斜面・法面の安定設計・施工例 (PC フレーム工法), 基礎工, 1987, Vol. 15, No. 2
- 16) 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
- 17) 田辺恵三：プレストレス手法の特長と課題, 建築技術集号「多彩!!建築とプレストレス」, 1989.2
- 18) 田辺恵三：プレストレス工事管理のポイント, 建築技術特集号, 1989.2
- 19) 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
- 20) 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
- 21) G. Annamalai and Robert C. Brown Jr. : Shear-Transfer Behavior of Post-Tensioned Grouted Shear-Key Connections in Precast Concrete-framed Structures, ACI Structural Journal January-February 1990
- 22) 中村 博, 阿部康二, 田辺恵三：プレキャスト PC 化を図った TG 千住ビル設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol. 32, No. 3, May 1990
- 23) 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
- 24) KEIZO TANABE : PRECAST PRESTRESSED CONCRETE MULTI-STORY BUILDING, =HITACHI BUTSURYU HIGH TECHNICAL CENTER=, Prestressed Concrete in JAPAN, プレストレストコンクリート技術協会, FIP Hamburg, 1990
- 25) 田辺恵三: プレストレス圧着工法による純ラーメンPC 4階建の設計法と施工=ソニー(株)板倉物流センター=, プレストレストコンクリート, Vol. 33, No. 4, Jul 1991
- 26) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 建築部
- 会作成委員: プレストレストコンクリート建築マニュアル そのI・II
- 27) 岡本隆之裕, 高崎哲哉, 田辺恵三, 佐藤直昭: プレキャスト・プレストレストコンクリートはり・柱接合部モデル試験体の静的正負繰返し加力実験報告, コンクリート工学, Vol. 30, No. 6, 1992.6
- 28) 田辺恵三, 藤本一郎: プレストレストコンクリート構造のPC圧着工法に関する研究, その1 PC圧着工法の設計について, その2 PC圧着工法の実験的研究, 平成4年度関東学院大学工学部研究発表講演会論文集, 1992.11.25

【1993年3月23日受付】

参考表-1 プレストレスト高強度コンクリート部材工場生産管理基準
($F > 360 \text{ kg/cm}^2$)

平成4年4月
社団法人プレストレストコンクリート建設業協会
建築製品品質管理委員会

番号	生産管理名	管理項目	判定基準(規格値・規定値)	試験・検査方法	時期・回収	試験機関	不合格処理
①	セメント	新鮮度	試験成績書による規定値	目視・触手・納品書 JIS R 5201 による確認	入荷時 1回/月	自主管理	返品する。
		骨材	外粒	観度 標準粗粒率 標準粒度範囲	目視・触手 JIS A 1102	入荷時 1回/月	
	細:細骨材 粗:粗骨材	粒形判定実績	実績率 細:55.0%以上 粗:60.0%以上	JIS A 1104	1回/月	自主管理	
		比重	比重 2.5(絶乾)以上	細: JIS A 1109 粗: JIS A 1110	1回/月	自主管理	
		吸水率	吸水率 3.0%以下	粗: JIS A 1110	1回/月	自主管理	
		有害物	有機不純物 粘土塊量 細:1.0%以下 粗:0.25%以下 洗い 2.0%以下	JIS A 1105 JIS A 1137 JIS A 1103	1回/月	自主管理	
				軽石 5.0%以下 石炭亜炭等で比重1.95の液体に浮く物 0.5%以下	JIS A 1126	1回/年	
		単位質量	細:1.55kg/l以上 粗:1.50kg/l以上	JIS A 1104	1回/月	自主管理	
		細骨材塩分	含有量 0.02%以下	JIS A 5002	1回/月	自主管理	
		すりへり減量	40.0%以下	JIS A 1121	1回/年	第3者機関	
	安定性	12.0%以下	JIS A 1122	1回/年	第3者機関		
	アルカリ骨材反応	アルカリシリカ反応性 A種	建設省通達 244号	1回/6ヵ月	第3者機関		
	混和剤	化学混和剤	JIS A 6204による規定	JIS A 6204	1回/月	自主管理	
水	水質	JIS A 5308 付属書9に適合すること。	JIS A 5308	1回/年	第3者機関	上水道に替える。	
②	調合	表面水率	実測値	JIS A 1111	2回/日	自主管理	現場配合修正。
③	計量	動荷重試験	計量精度	動荷重試験	1回/月	自主管理	調整及び修理する。
④	スランプ 空気量 塩化物量	スランプ	8.0±2.5 cm	JIS A 1101	調合別 1回/日	自主管理	廃棄処分する。
		空気量	2.5±1.0 %	JIS A 1116, JIS A 1118			
		塩化物量 CL-(%)	塩素イオン量 0.3 kg/m ³ 以下	JIS A 1128			
⑤	強度	脱型時(導入時)	所定強度以上	テトスピース	1回/日	自主管理	検査規定による。
		設計基準強度	※1 設計基準強度以上(材令28日)	JIS A 1108	配合強度毎	※2 自主管理	廃棄処分する。
⑥	鉄筋		JIS G 3112による規格値, JASS 5基準	目視・触手・納品書	入荷時	自主管理	返品する。
⑦	PC鋼材		JIS G 3536による規格値 JIS G 3109による規格値	目視・触手・納品書	入荷時	自主管理	

番号⑤ 強度管理用テトスピースの本数(1回毎)

(蒸気養生)	脱型時(導入時)	3本
(蒸気養生後現場放置)	出荷時	3本
(標準養生)	28日	3本
(蒸気養生後現場放置)	現場 28日	3本
		計 12本

※1 ただし, 設計基準強度の1.1倍以上を管理目標とする。

※2 原則として自主管理とし配合強度ごとに隔月1回公的機関とする。または, 設計者, 監理者の指示による。