

◆ 小 特 集 ◆

PC 压着工法

建築における PC 圧着工法

大野 義照*

1. はじめに

わが国の建築分野におけるプレストレストコンクリート（以下 PC と略記する）の歴史は、昭和 28 年に建設された東京駅 6, 7 番ホーム上屋、今も供用されている昭和 29 年建設の JR 浜松町駅ホーム上屋、昭和 31 年建設の 2 層 1 スパンの国鉄新宿信号所および PC が初めて本格的に不静定架構に利用された 3 層 1 スパン兵庫県南淡町庁舎に始まる。これらの構造物は、いずれもプレキャストコンクリート（以下 PCa と略記する）の梁、柱を現場において圧着接合により組み立てられている。

昭和 36 年に制定された日本建築学会の PC 設計施工規準・同解説（以下学会 PC 規準と略記する）においても PCa を用いた組立構造が現場打ちコンクリートよりも重きをおいて記述されている。当時すでに、現在使われている主な柱・梁接合詳細が考案され、同書の付録に紹介されている。

このように、PC 圧着工法は PC 構造の初期の段階から用いられている工法で、当時は現場打ち一体構造よりも PCaPC 圧着組立構造の方が主流に考えられていたといえる。

昭和 40 年代のボーリングブームでボーリング場が大スパンと剛性の確保の観点から現場打ちの PC 構造で建設され、現場打ちの PC 構造も普及したが、その後も PCaPC 組立構造の大規模倉庫、駐車場、競技場スタンド、事務所などさまざまな建築が建設されている。

鉄筋コンクリート（以下 RC と略記する）の PCa 骨組の場合、その柱・梁の接合方法として、柱梁接合部を現場打ちコンクリートとする方法、柱仕口位置と梁端部に埋め込んだ鉄骨のガセットプレートを高力ボルトで接合する方法、柱と梁を一体として作成し梁中間部において鉄筋を機械式継手でつなぎコンクリートを現場打ちする方法などがある。PC 構造の場合にもこれらの接合工法が用いられる場合もあるが、ほとんどの場合は PC 圧着工法が用いられている。

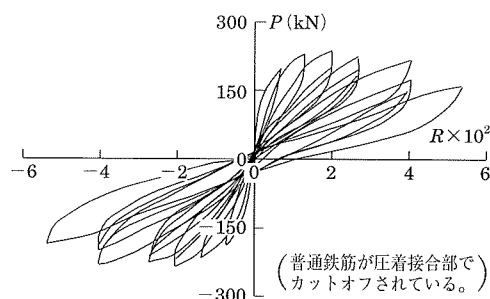
PC 圧着工法は、梁や柱の剛接架構部材の接合だけでなく、長大な部材を分割、製作した PCa 部材の接合や PCa 壁板や床板の接合にも有力な手段である。

PCaPC 構造は、工業化による品質の向上、工期短縮、現場作業の低減、地球環境に配慮した型枠の削減などの視点から注目をされている。意匠的に複雑な部材断面を有し、PCa の採用により初めて可能となる建築もある。本報では、PCaPC 構造と一体の技術である PC 圧着工法の特徴、建築分野における圧着部の設計法、接合部詳細、適用事例を紹介し、課題と展望を述べる。

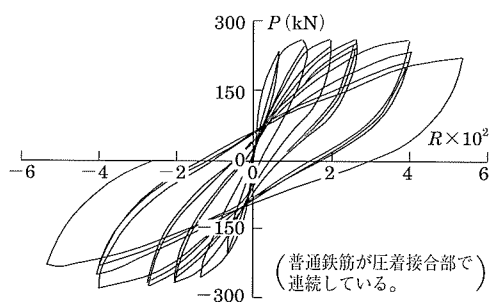
2. PC 圧着工法の特徴

PC 圧着工法は、コンクリートの柱、梁部材を工場でプレキャスト化し、梁部材にはプレストレスを導入し、現場で建方した後に PC 鋼棒や PC 鋼線を用いて締め付け柱梁の一体化を図る工法、あるいは柱と梁に限らず部材同士を PC 鋼材を用いて締め付けて一体化を図る工法である。

PC 構造における現場打ち一体工法では梁に導入されるプレストレス力が柱に流れ、いわゆる導入不静定力が発生する。PCa 部材を用いて組立て構造とすることは、PCa 単体時にプレストレスが導入されるので PC 鋼材の緊張力がすべて部材に導入される。また組立ての途中で固定荷重を載

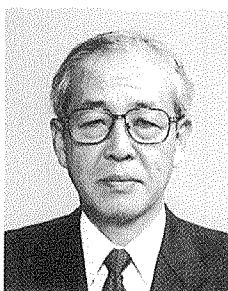


(a) 軸方向鉄筋がスタブに定着されていない場合



(b) 軸方向鉄筋がスタブに定着されている場合

図 - 1 PC 圧着接合した部材の荷重・変形関係²⁾



* Yoshiteru OHNO

大阪大学大学院 工学研究科
建築工学専攻 教授

荷する等の手段によって、架構の設計に用いる断面力の分布を調整することが可能で長期応力をコントロールすることができる。したがって、構造設計と施工計画とを結びつけることが大切である。

圧着接合された部材の力学的特性としては、柱に梁を接合する場合、クリティカル断面となる圧着接合部では普通鉄筋はカットオフされ PC 鋼材のみが貫通しているため、図 - 1²⁾ に示すように、普通鉄筋が柱に定着されている現場打ち一体型に比べ架構のエネルギー吸収能が小さいことがあげられる³⁾。

3. 圧着接合部の設計

3.1 接合部のせん断耐力

圧着接合は、あらかじめプレストレス導入により与えられた圧縮力によって生じる摩擦抵抗せん断力により、部材間もしくは部材を分割したブロック間での境界面におけるせん断力伝達を得るものである。

学会 PC 規準では、継目の表面が平滑であるモルタルまたはコンクリート目地の場合、摩擦係数を 0.5 として継目に沿うせん断耐力に対して設計している。圧着面のせん断耐力は、この面におけるすべりが生じない範囲での最大せん断耐力としており、継目を貫通する鋼材のダボ作用は期待せず、摩擦抵抗機構のみによってせん断力を伝達するものとしている⁴⁾。

継目におけるせん断耐力 Q_u は次式で与える。

$$Q_u = \mu \cdot P$$

ここに、 μ ：摩擦係数

P ：柱と梁の接合面では、有効プレストレス力 P_e

柱と柱の接合面では、 P_e + 軸方向力 N

現行の設計法では柱と柱の接合面においては有効プレストレス力に変動軸力を加算するものとしている。柱と梁の接合面では、終局時には引張側にはひび割れが生じ接合面は離れているが、圧縮側には PC 鋼材の引張力に等しい曲げ圧縮力が生じ、この圧縮力に対応する摩擦抵抗せん断機構が生じている。

なお、きわめて大きな地震時における大変形の繰返し後に図 - 2 に示すような PC 鋼材の降伏や接合面の目地モルタル

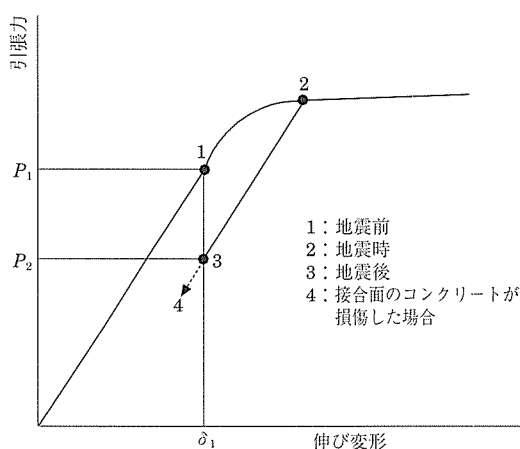


図 - 2 地震後の PC 鋼材の残存緊張力

ルあるいはコンクリートの損傷による圧着力の減少と摩擦係数の低下にともなう圧着面のせん断耐力の減少が生じる可能性がある。その場合、長期荷重を支持できることが最低限の性能として必要である。兵庫県南部地震において圧着接合架構に大きな被害がなかった⁵⁾ ことなどから通常の場合は問題にならないが、とくに PC 鋼材引張力の有効プレストレス力からの増加を見込んで設計する際にはこの点の注意が必要である。

3.2 離間安全度

圧着継目においてはコンクリートの引張抵抗は存在しない。したがって、長期荷重に対してこの断面に引張応力を許容するパーシャルプレストレスの設計とすることはできず、フルプレストレスの設計としなければならない。ひび割れの発生の防止がとくに強く要求される場合には必要に応じて圧着面の離間安全度 F_{dc} を検査するのがよい。

$$F_{dc} = M_{dc} / M_{(G+P)}$$

ここに、 M_{dc} ：離間モーメント（Decompression モーメント）、 $M_{(G+P)}$ による引張側縁応力度とプレストレスの合成応力度が 0 になるときの曲げモーメント）

$M_{(G+P)}$ ：圧着面に作用する長期設計用曲げモーメント

3.3 最小圧着力

圧着面における圧着応力度が小さすぎると設計用算定では扱っていない、コンクリートの収縮、温度変化による伸縮などによる圧着力の減少によって圧着応力度が 0 になるおそれがあるので、この点に対する配慮する必要がある。学会 PC 規準ではクリープ・収縮による減退後の圧着面における有効平均圧着応力度は原則として 2 N/mm² 以上とすることを推奨している。

3.4 施工上の留意点

圧着工法は部材へのプレストレス導入用の緊張材を用いる方法と、圧着用には専用の緊張材を用いる方法がある。後者の方法では、圧着力導入のために用いる緊張材は材長が短い場合が多いため、くさび式定着の場合緊張力定着時のセットロスによる圧着力の損失の割合が大きい。この点を十分に考慮するとともにねじ式の定着具を用いる等の配慮をする。

通常の PC 鋼材を用いた圧着の場合、鋼材緊張後のグラウト工事が重要である。PC 鋼材は普通鉄筋よりも腐食に対して鋭敏で、グラウト工事が不備の場合短期間に破断し、破断した場合の影響も鉄筋の場合よりも大きい。グラウト工事の慎重な施工と管理が求められる。

接合継目には、モルタル、コンクリートおよび接着剤による継目の 3 種類がある。モルタルの目地幅は 20~30 mm とし、部材の接合面は平滑に仕上げてよい。コンクリートの目地幅はコンクリートの締固めができる幅とし、目地コンクリートはプレキャスト部材と同等以上の品質とする。地震時に目地モルタルや目地コンクリートが落下すると耐荷性能を低下させるだけでなく地震後の圧着性能を大幅に低下させるので、せん断補強をかねるあばら筋を配置するなどの落下防止の対策をとる必要がある。接着剤による接合の目地幅は 1 mm 程度で、接合面は両端面が密着できる

ように製作する。そのようなプレキャスト部材の製作は、すでに製作された部材の接合面を型枠面に利用し接合する部材を製作する方法や、一体の型枠に仕切り板をはさんで製作する方法によって行われている。

4. 柱・柱および柱・梁の圧着接合詳細

部材と部材の接合部には、基礎・柱接合部、柱・柱接合部、柱・梁接合部、梁・小はり接合部、梁・床接合部などがあるが、架構を構成する主要な構造部材である基礎・柱、柱・柱および柱・梁の圧着接合部の詳細を図-3で紹介する⁶⁾。

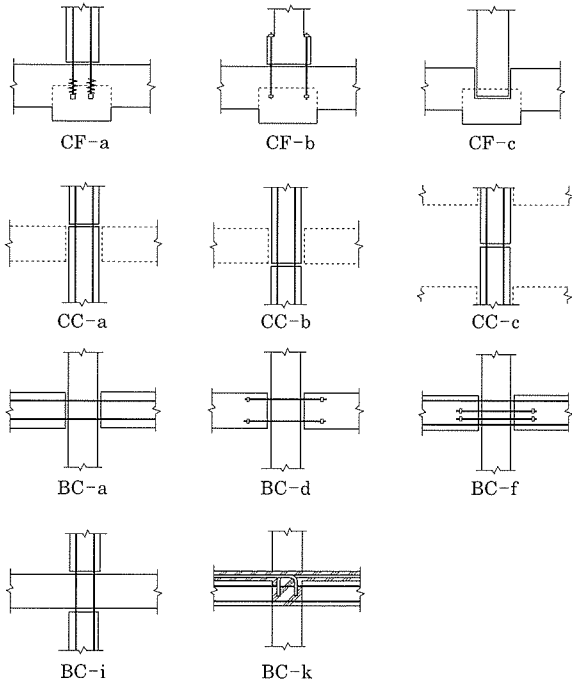


図-3 圧着接合部の詳細

4.1 基礎・柱接合部

基礎・柱接合部に圧着工法を用いる場合には、部材の緊張材を圧着にも用いるもの(CF-a)と圧着専用の緊張材を用いる場合(CF-b)がある。圧着工法は用いずPC部材を用いる架構に使用される方法としてソケットベース式(CF-c)がある。

4.2 柱・柱接合部

柱・柱接合部は、接合面の位置が梁上端のもの(CC-a),

梁下端のもの(CC-b), 階の中間のもの(CC-c)の3種類があり、階の中間のものが多く用いられている。これらには緊張材が通しの場合と緊張材を途中でつなぐ場合がある。

4.3 柱・梁接合部

柱・梁接合には多くの接合詳細が考案されているが、代表的なものをあげると次のようになる。

接合部パネルに梁を圧着するもので、スパン内で連続する梁緊張材を圧着に用いるもの(BC-a), 圧着専用の緊張材により圧着するもの(BC-d), および両者を併用するもの(BC-f)がある。

梁を接合部パネル内で連続とするものに、接合部パネル内を貫通する鉛直緊張材により上下の柱に圧着するもの(BC-i)と、接合部パネルを現場打ちコンクリートで打設し、コンクリートの強度発現後緊張力を導入するもの(BC-k)がある。

5. 圧着工法の種々の利用

圧着工法は、剛接架構の柱と梁の接合のほかにもさまざまに部材接合に利用されている。板と板の接合、長大なプレキャスト梁の分割されたブロックの接合、耐震補強部材と架構の圧着接合などにも用いられている。以下に実例をあげて紹介する。

5.1 柱と梁の圧着剛接合

この圧着接合は、もっとも広く用いられている。はじめに述べたように、わが国においてPC構造が建築に用いられ始めたときには現場打ち一体型でなく、PCa部材の圧着接合による組立構造が一般的であった。紹介するのはFIP賞を受賞した大規模な剛接架構と免震工法を併用したPCaPC構造である。

1) 横浜国際総合競技場⁷⁾

2002年のワールドカップサッカーの主会場となった競技場で、内野スタンドの平面形は、長辺280m、短辺220mの方円形、外周約900mの7階建てで、階高は1階が8.1m、標準階が4.2mである。柱、梁ともPCa部材で、PC圧着工法により、エキスパンションジョイントのない一体構造として建設された(図-4)。床にはハーフPCa板が用いられている。施工に際しては、プレストレス導入に伴う架構の弾性収縮、PCa部材の乾燥収縮、温度応力等による不静定二次応力を低減するため全体を4つのエリアに分けて圧着を行っている。

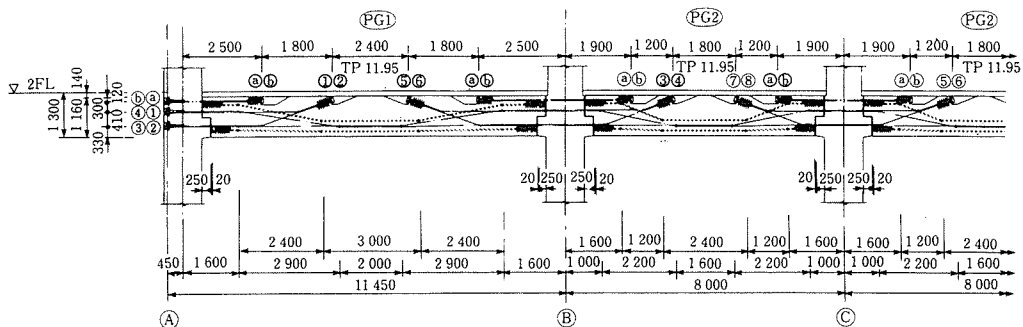


図-4 横浜国際総合競技場

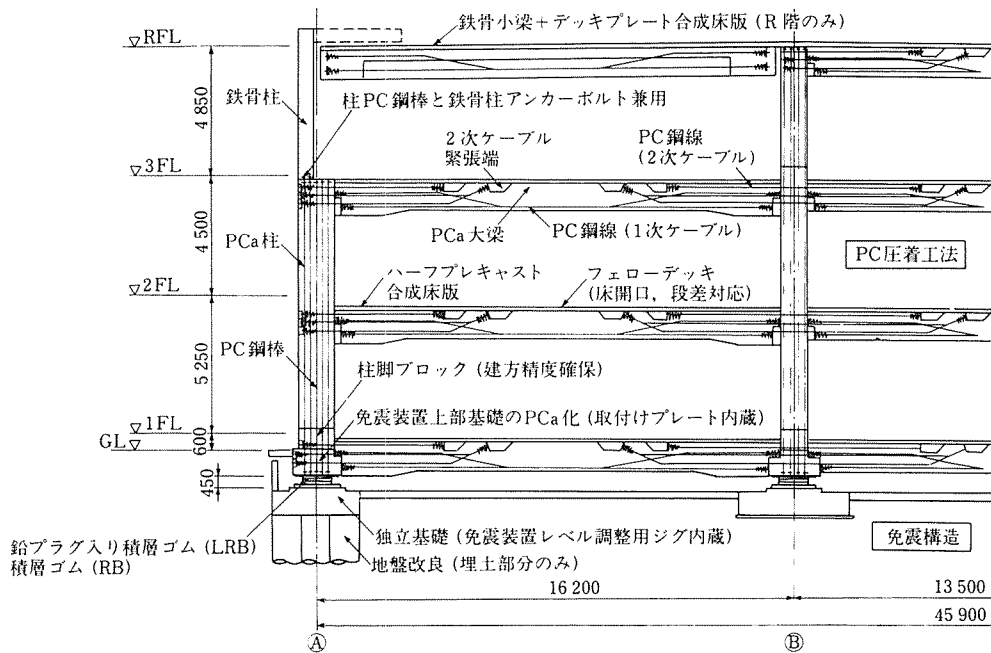


図 - 5 興亜火災神戸センター

2) 興亜火災神戸センター⁸⁾

フレキシビリティを確保するための大スパン化、免震構造を効果的に機能させるための剛性の確保の2つの理由から剛性と重量を確保できるPC構造が採用され、環境への配慮と工期短縮の目的からPCa圧着工法が採用された(図-5)。履歴減衰の少ないPC構造に集約型エネルギー吸収機構である免震装置を用いることによって、耐震安全性を確保するとともに、フレキシビリティ、耐久性のある高品質、工期、環境への配慮のいずれの点においても高性能を有する建築物を実現した。

5.2 板と板の圧着

板と板の接合に圧着接合が用いられた例を2つ紹介する。いずれも本誌などに紹介され、FIPの作品賞、あるいは本協会賞を受賞した、技術的にも芸術的にも優れた作品である。

1) 南長野運動公園多目的競技場内野スタンド⁹⁾

冬季長野オリンピック開閉式会場になった競技場の内野スタンドが桜の花弁をイメージしたPCaで建設された(図-6)。複合円で構成された複雑な曲面形状を有するスタンドの建設は、現場打ちの在来工法では困難でPCaPC工法が採用された。花卉はPCa工場で平打ちで製作され、現場でPCa板どうしが接合され、現場打ちの大梁に圧着接合された。平面形状、断面形状ともいくつもの曲面を多用した複雑な構造の建築物をPCaPC圧着工法を用いることにより可能とした。

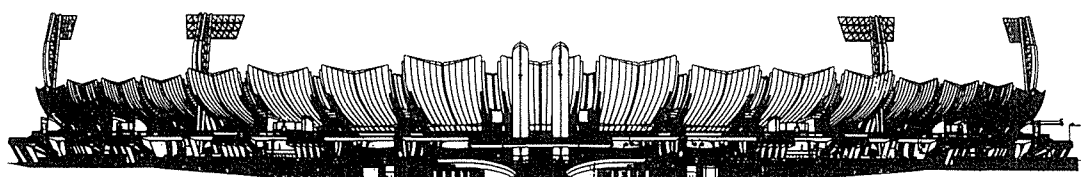
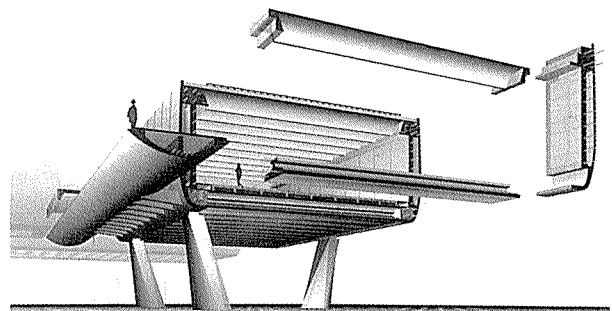


図 - 6 南長野運動公園多目的競技場内野スタンド

2) 愛媛県美術館¹⁰⁾

建築物の展示空間を構成する壁・屋根・床すべてをPCa板とし、PC圧着工法により箱を形成している。幅1.8mをモジュールとした板を並べ、中に挿入したPC鋼線を緊張することによって板を連結させて組み立てている(図-7)。PCa構造の採用理由は、美術館の特徴ある形状の精度確保と美しい打込みタイル壁の実現にある。長期荷重・偏心荷重・地震時荷重に対して、引張応力が生じないようにプレストレス力は設計されている。建物全体をPCa板の圧着接合によって構成された本建築物はPC構造の可能性を広げた。



断面パース

図 - 7 愛媛県美術館

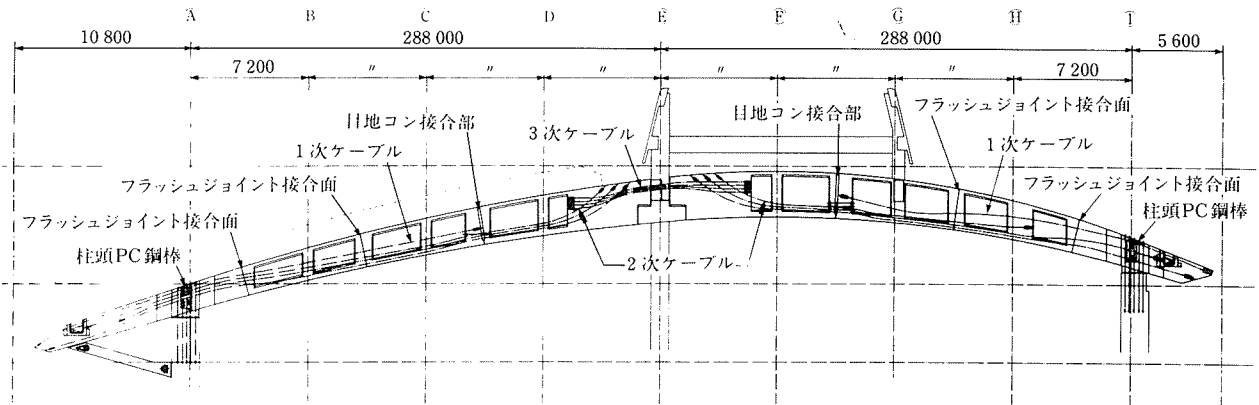


図 - 8 那覇空港国内線新旅客ターミナルビル

5.3 長大な梁のブロック圧着接合（那覇空港国内線新旅客ターミナルビル）¹¹⁾

航空機の翼をイメージした大屋根の梁は、複数の曲線を組み合わせた形状をなし、軽量化を図り梁せい約 1.5~2.8 m、梁ウエ幅 0.25 m とスレンダーな断面形状をしている。この梁は長さが 40 m（28.8 m + 片持ち部分 10.8 m）で、約 140 t の重量があるので、14.1 m~7.4 m 長の 4 つのセグメントに分割してサイト工場で製作し、現場に搬入された後に 2 ブロックに圧着接合され揚重・仮設された後、柱に圧着接合された（図 - 8）。

5.4 PCa 部材の既存構造物への圧着

既存構造物の耐震補強方法として、PCaPC のブレース架構を PC 鋼棒を用いて既存建築物に圧着接合する補強¹²⁾や、圧着接合により構成した PCaPC ラーメン架構を既存構造物の架構の外部に圧着接合する補強方法（図 - 9）がある。これらの工法は、PCa を用いることによって現場作業が少なく工期の短縮、および建築物を使用しながらの工事、いわゆる居ながら施工が可能であることから広く用いられるようになった。

なお、前者の PC ブレース架構では圧着力と接合部摩擦材の選択によってブレースの負担水平力を制御し、ブレースの損傷を防いでいる。

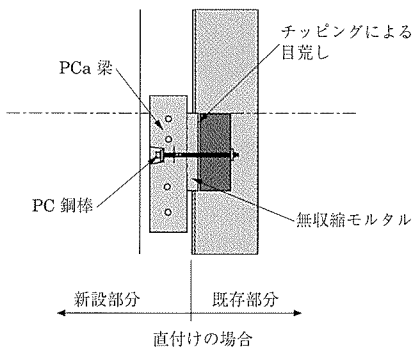


図 - 9 耐震補強の圧着接合部

6. 圧着接合上の課題と展望

6.1 梁端部ヒンジ部の変形性能

PC 圧着工法によって梁を接合部パネルに接合した場合、

クリティカル断面となる圧着部では普通鉄筋がカットオフされ PC 鋼材のみが貫通しているため一体型の接合部に比べ、部材の繰り返し荷重下の荷重-変形関係は原点志向の傾向を示し、復元特性は優れているが、エネルギー吸収能は劣る^{2), 3)}。また PC 鋼材の付着性能が部材の荷重-変形関係に及ぼす影響がよりいっそう顕著になる。図 - 10 は片持ち梁の繰り返し載荷試験から得られた等価粘性減衰定数である¹³⁾。圧着型は一体型に比べ等価粘性減衰定数は小さく、PC 鋼材が丸鋼の場合異形棒鋼の場合よりさらに小さくなるのが分かる。今後、限界耐力設計法の導入により、性能規定型の設計法への移行が進むものと思われるが、圧着型の接合部の変形性能、およびその変形性能への PC 鋼材の付着特性の影響の解明が望まれる。

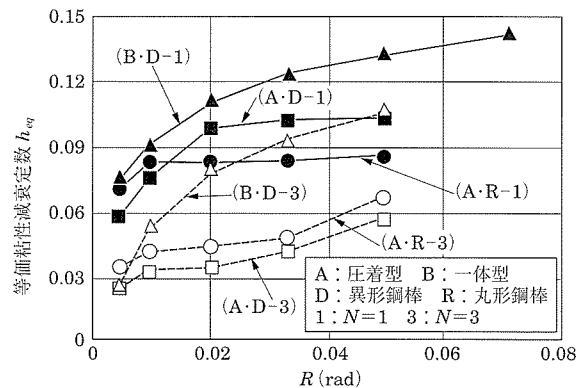


図 - 10 等価粘性減衰定数

このような圧着型のエネルギー吸収能の小さい点を改善する方法も開発されている¹⁴⁾。図 - 11 は、M. J. Nigel Priestley らによって考案されたもので、梁の上縁、下縁に配置された普通鉄筋でエネルギー吸収能の改善を図り、中心に配置されたアンボンド PC 鋼材で梁を柱に圧着するとともに復元性を確保しようとするものである。アメリカにおいてはすでにこの方法で高層建築物が建設されている¹⁵⁾。

6.2 免震構造の併用

PC 構造の重量や剛性が大きいという PC 構造単独では短所となる点が免震構造にとっては有利な点となる。また PC 構造は大スパンで柱の数が少ない点も免震構造には有利で、

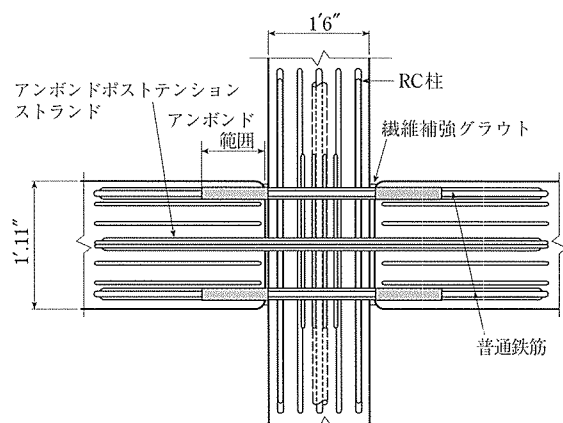


図 - 11 PRESS の接合部詳細

一方、PC 構造のエネルギー吸収能が小さい点は免震構造によって補われる。PC 建築物における PC 圧着工法と免震構造の併用は、今後の発展が期待される組合せである。

6.3 アンボンド PC 工法の利用

柱と梁の接合において PC 圧着工法を用いた場合、地震時に PC 鋼材が降伏すると、地震後に圧着力が低下する。このことを避けるためにアンボンド PC 鋼材を用いることが考えられる。アンボンド工法を用いると将来の解体が容易になるとともに部材の再利用も可能となる。ただし、万が一 PC 鋼材が破断したときのための対策をとっておくことが必要である。

従来の耐震設計では、梁端に塑性ヒンジを形成させてエネルギー吸収を図り、大地震時には建築物の倒壊を免れるものの多大な損傷を受け、再使用が困難になる場合がある。アンボンド PC 鋼材を用いた圧着工法にて PCa 梁の一部に制震デバイスを組み込めば、そこでエネルギー吸収を図り、損傷したデバイスは地震後取り替えることも可能であろう。

6.4 その他

圧着後のグラウト施工は、PC 工事において安全性と耐久性を支配する重要な工事でありながら、十分な施工管理がなされていない場合がある。グラウト施工マニュアルの作成、ならびにグラウト充填の確認が容易にできる試験あるいは検査方法の開発が求められる。

最小圧着応力度は、前述のように 2 N/mm^2 が推奨されている。柱や梁の接合においては妥当な値と思われるが、板と板の接合部においては確保できない場合がある。適切な値あるいはその決め方を定める必要がある。大地震後に PC 鋼材の降伏によって残存圧着力が減少する場合があります、その予測法の確立も求められる。

7. おわりに

圧着工法は PC 構造の誕生時から用いられてきた工法である。今やこの工法は柱梁の接合だけでなく板と板との接

合、あるいは既存構造物への補強架構の圧着接合など広く用いられている。ただし、グラウト工事を確実に行うことがこの工法の最重要点の一つであることを忘れてはならない。一方、アンボンド工法の耐震部材へ使用がまもなく認められるものと思われるが、アンボンド工法の併用によって、圧着工法はますますさまざまな分野に用いられていくものと思われる。

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（第1版）、1961.10
- 2) 小川哲朗，末次宏光，浜原正行ほか：プレキャスト・プレストレストコンクリート部材のせん断性状に関する実験的研究，日本建築学会学術講演梗概集，構造IV，C-2，1077-1078，1999
- 3) 加藤博人，市澤勇彦，岡本直人：準実大 PC 造架構試験体による耐震性能の検証，プレストレストコンクリート，Vol.41.No.4，pp.22-27，1999.7
- 4) 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（第4版），2002.5
- 5) 日本建築学会他：阪神・淡路大震災調査報告建築編-2，プレストレストコンクリート造建築物他；pp.71-75，1998.8
- 6) 建設省建築研究所他，共同研究 PC 構造設計・施工指針の作成 報告書 1999.3
- 7) 坂井吉彦，小林直紀，田辺恵三，桑折能彦：プレスジョイント耐震システムによる PC 圧着フレーム構造-横浜国際総合競技場の構造設計と施工-；プレストレストコンクリート，Vol.39，No.4，pp.16-24，1997.7
- 8) 福山國夫，上田博之，池田英美：プレキャストプレストレストコンクリート組立工法による免震構造建物-興亜火災神戸センター計画-，プレストレストコンクリート，Vol.41.No.4，pp.30-34，1999.7
- 9) 斉藤裕一，清水茂男，根本克之，末木達也：冬季長野オリンピック開閉式会場 PC 工事；プレストレストコンクリート，Vol.39.No.5，pp.5-14，1997.9
- 10) 大和田精一，陶器浩一：PCaPC 圧着工法による「組立箱構造」の建築物の設計-愛媛県美術館-；コンクリート工学 Vol.37，No.5，pp.23-30，1999.5
- 11) 辻英一，森高英夫，山浦晋弘，大迫一徳：PCaPC コンクリート工・構法による空港ターミナルビルの建設-那覇空港新旅客ターミナルビルの設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.41.No.4，pp.56-65，1999.7
- 12) 小山内裕，浅川弘一，山本光一，谷本政隆：PCa プレース耐震補強工法の設計と施工，プレストレストコンクリート，Vol.41.No.4，pp.50-55，1999.7
- 13) 阿波野昌幸，中塚信，石井孝幸，上田真也：圧着型および一体型片持 PC 梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究（その3）；PC 技術協会第8回シンポジウム論文集，pp.135-140，1998
- 14) M.J.Nigel Priestley et al: Preliminary Results and Conclusion from the PRESS Five-Story Precast Concrete Test Building, PCI Journal. Vol.44, No.6, pp.42-67, 1999
- 15) Ner Heights for Concrete Seismic Framing ; Building Design and Construction, September, 1999

【2003年5月20日受付】