

米国におけるプレキャスト・プレストレストコンクリート に関する研究の現状

Neil M. Hawkins*1

訳：小島 宏*2

本論説は、1991年11月奈良で開催された「プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム」におけるイリノイ大学 Neil M. Hawkins 教授の特別講演の内容を抄訳したものである。

現在アメリカにおいて行われている、プレキャストコンクリートおよびプレストレストコンクリートの研究計画について講演する機会を得て、大変光栄である。これらの研究の動機や現在の状況、さらにこれからの意義について説明する。

1. はじめに

アメリカにおけるシビルエンジニアリングの構造分野の研究は、建築、土木の両分野にまたがっている。アメリカにおいても日本と同様に、建設分野における投資は土木より建築が主流で、建築への投資額は土木への投資

額の約3倍にのぼる。そのため、主要な研究は橋梁よりもむしろ建築に主眼をおいている(図-1参照)。さらに、カルフォルニア以外のほとんどの州で、地震の危険に対する研究を怠っていたので、今や国の研究支出の約50%が地震の危険を軽減させる研究にあてられている。

これらの地震の危険を軽減させるための研究資金は、主に国立科学財団やアメリカ運輸省経由で連邦ハイウェイ本部から出され、またプレキャスト・プレストレストコンクリート構造に関しては、プレキャスト・プレストレストコンクリート協会から出されている。これらの機関の資金による研究は、実験を伴う場合にはおもに大学の実験室で行われ、解析を伴うときは設計会社で行われている。日本では、大成建設や清水建設のような大きな建設会社が研究援助をしたり、室内実験を行ったりしているが、アメリカでは Fluor Daniels や Bechtel のような会社が室内実験を行ったり、研究援助をすることは

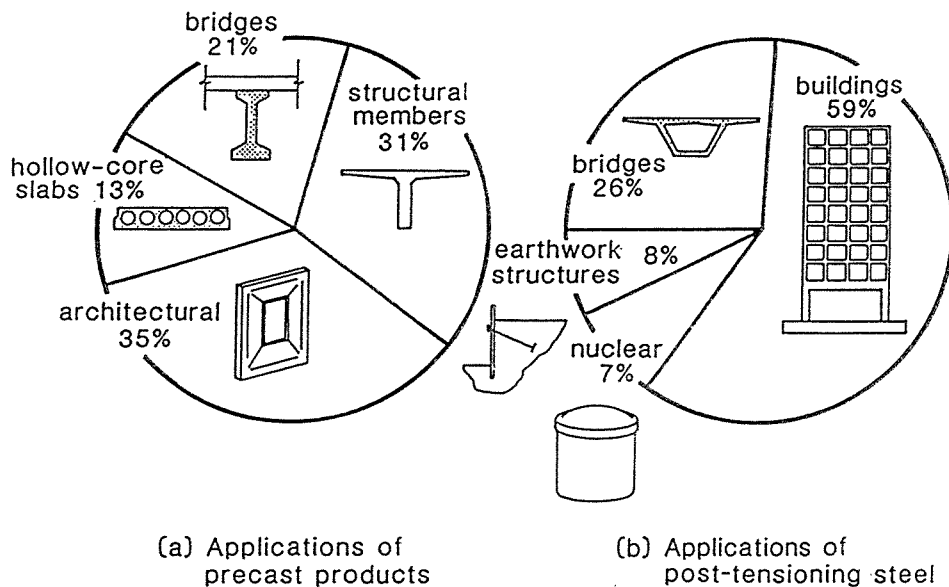


図-1 北アメリカにおけるプレストレストコンクリートの適用

*1 Professor and Head Department of Civil Engineering, University of Illinois

*2 Hiroshi KOJIMA : 首都高速道路公団

◇論説◇

ほとんどない。プレキャストコンクリート製造業者は大部分が PCI に加入しており、これらの製造業者が負担する研究のための資金水準は、日本において日本のプレキャストコンクリート製造業者が負担している資金水準とほぼ同様である。

約 20 年前、アメリカのポストテンション業者は PCI の一部であった。しかし、建設業者が場所打ちコンクリート構造に習熟してくるのに伴い、場所打ち構造を勧めるポストテンション業者とプレキャストコンクリート業者は競合するようになってきた。この対立の結果、ポストテンション業者は独自の組織、ポストテンション協会 (PTI) を設立することになった。この協会も PCI と同様に、建築にかたよっており、ごく最近、PTI から分離して橋梁分野におけるポストテンションの普及をはかるため、アメリカセグメント橋梁協会 (ASBI) が誕生した。PCI, PTI, ASBI はいずれも製造業者および供給業者の組織であり、自分たちの製品を使ってもらうような案内を発行するが、標準的な基準を制定するような組織ではない。

コンクリートに関するこれらの基準をつくる機関としては、橋梁部門は AASHTO であり、建築部門はアメリカコンクリート協会 (ACI) である。AASHTO は、コンクリート、鋼、木材、荷重、安全性等、橋梁部門すべてについて取り扱う機関である。しかし、建築に関しては、取り扱う鋼、木材、石材について各材料の組織があり、また基準を作成する 3 つの建築組織があってその管轄問題が複雑である。これらの組織は、主にアメリカ西部をカバーし、統一建築基準を公表している国際建築家会議、南部建築基準を公表している南部建築会議、および残りの地域をカバーして BOCA 基準を公表しているアメリカ建築会議の 3 つである。各自治体はいずれの基準を採用してもよく、隣接する市が異なる基準を用いることもある。

地震による危険性は地域により大きく異なり、耐震問題を取り扱う基準の範囲も大きく異なる。セントヘレンズ火山の爆発の結果、大地震の影響を小さくしようとする考えが連邦政府から生まれてきた。そして、国立標準技術協会 (NIST) や建築耐震安全性会議 (BSSC) の協力を得て、連邦非常管理機関 (FEMA) が地震危険性低減プログラム (NEHRP) を発表した。この NEHRP の規定は、連邦政府の資金が導入されているすべての建物に適用することが 1992 年から義務付けられた。

2. 研究について

ここでは、主に今後のプレストレストコンクリートにとって大きな影響を持つであろう 3 つの研究について紹介する。これらは、「プレキャストの耐震性に関する研

究 (PRESSSS)」、「維持および補修に関する研究 (RE-PRR)」、および「大規模構造物の先進技術に関する研究 (ATLSS)」である。これら研究は主に建築構造物を対象としたものである。そのほかの PC に関する同程度に重要な研究を簡単に紹介すると、4 番目が橋梁に関する研究の「高速道路に関する研究 (HRP)」で、5 番目は、「プレストレストコンクリート協会によるプログラム」である。初めの 2 つの研究 PRESSSS と REPRR は耐震問題から発生したものである。3 番目と 4 番目の研究、ATLSS と HRP では耐震問題は重要な課題であるが、5 番目の研究では耐震にはほとんど触れていない。

2.1 プレキャストの耐震性に関する研究 (PRESSSS)

ACI の規定では、プレキャストおよびプレストレスト部材の使用は、地震時および地震後にその構造物が一体構造と同程度の安全性と使用性を有する場合に許されている。

地震危険性低減プログラム (NEHRP) では、清水建設の石塚氏と著者の研究に基づき、ポストテンション使用時に平均プレストレスが 350 psi (2.41 MPa) を超えないように定めており、また接合面で正負のモーメントに対して、強度の 4 分の 1 以上のプレストレス鋼材を配置しないように規定している。

ポストテンション構造とは異なり、プレキャストコンクリート構造に対しては、2 つの意見がある。1 つは鉄筋コンクリート構造物と同様に取り扱おうという考え方であり、もう 1 つは、プレキャスト構造特有の性質を考慮し、解析によって一体構造のものと比較して、同等かそれ以上の性能をもつことを確認しようとする考え方である。

鉄筋コンクリート構造と同様に取り扱う方法は、日本で行われている方法である。ここでは、プレキャスト部材間のモルタル接合、機械的接合やポストテンションは部材間の接合方法として同等なものとする。フレームにおいては、接合部は部材本体よりも強度が大きいことが要求される。パネルにおいては、接合部はパネル自体よりも強度が大きいことが要求されるが、アメリカにおいてよく使用されるホロー構造のパネルでこれを達成するのはむずかしい。

1991 年 5/6 月号の PCI ジャーナルで、アルフレッド・イー氏が鉄筋コンクリート構造に対して提案した接合部の詳細を図-2 に示す。

床版の上下と垂直方向に接合部を貫通する鉄筋が配置されているので、接合部で破壊が生じても構造としては一体を保つ。床版上側に配置された負の曲げに対する鉄筋が、水平方向および鉛直方向の荷重に対する剛性を確保する。また、場所打ちコンクリート部分に延長された斜め鉄筋によって、パネルが集中するコーナー部分が破

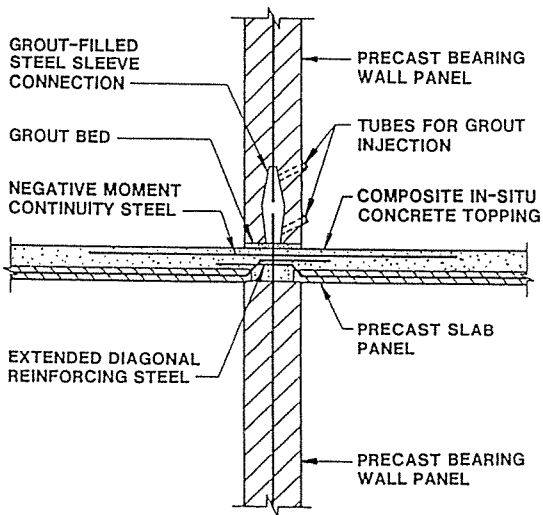


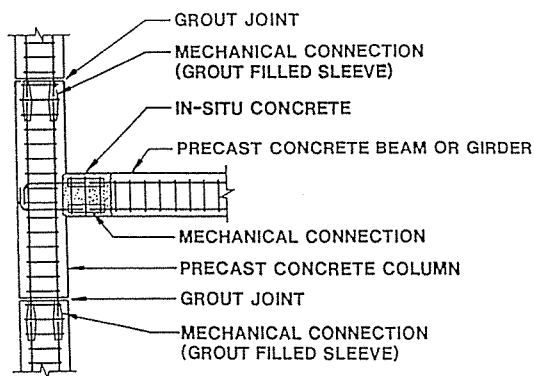
図-2 場所打ちコンクリートを有するプレキャスト床版と壁との接合

壊してもパネルが落下しないようにしている。図-3 にイー氏が推奨するプレキャストコンクリートのフレームとせん断壁の接合部の詳細を示す。

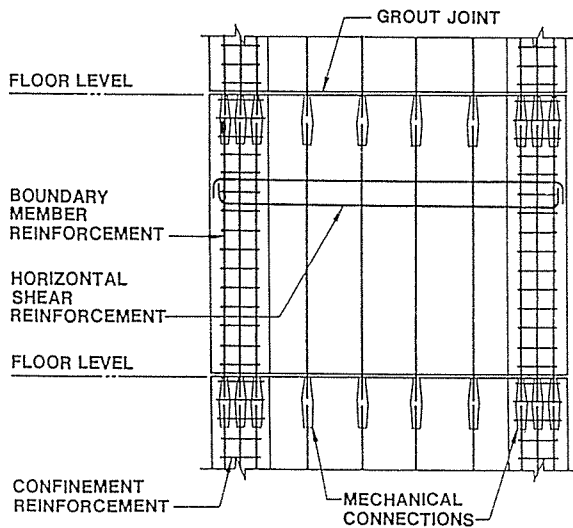
地震の危険性の高い場所において、プレキャストコンクリートをRC構造と同一に考えるのは正しいと思われるが、最大地盤加速度が0.3以下の中程度以下の地震危険地域でこのような考え方をするのは経済的でない。図-4 にアメリカにおける地盤加速度の分布図を示す。

この図からわかるように、大部分が中程度以下の危険性の地域であるため、プレキャスト構造にとっては、一体構造として考える方法以外のやり方が適当であると考えられ、ドライジョイント接合法がプレキャストの耐震性に関する研究の目指す方向である。

0.15 G 以下の中程度の地震地域では、設計荷重による繰返し変形に対して、全体系が安全でなければなら



Precast Concrete Frame.



Precast Concrete Shear Wall With Boundary Members.

図-3 プレキャストコンクリートのフレームおよびせん断壁の接合部

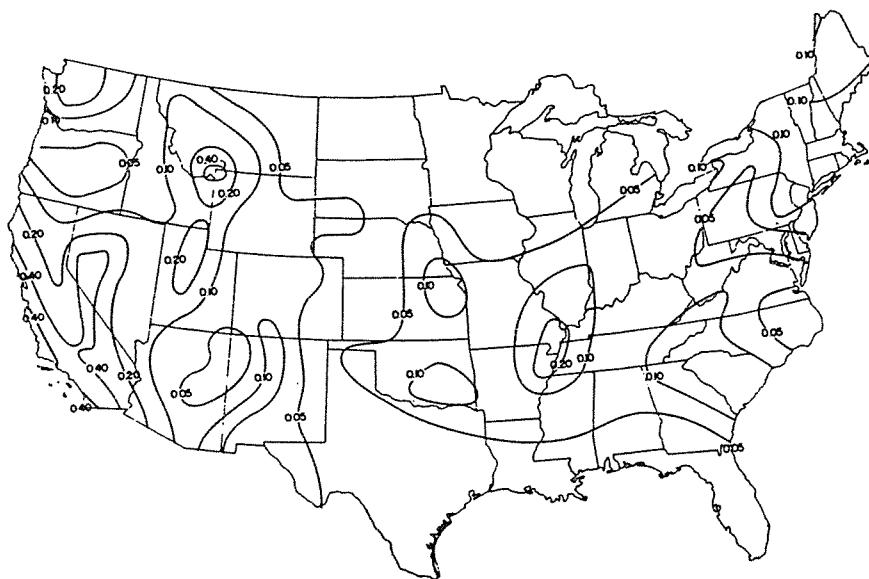


図-4 アメリカにおける地盤加速度分布図

◇論説◇

い。このためには、次のことが必要である。

1つは、エネルギーを分散させる適当なドライ接合をもち、ここでは接合部材が伝達する力の少なくとも2倍の強度を有していること。

2つ目は、エネルギー非分散の接合部を持ち、エネルギー分散の接合部が最大耐力になったときに、降伏点に対して少なくとも1.5倍の安全率を持つことである。

地震の危険性の高い地域では、上記のどちらかを満足するだけでなく、プレキャストおよび一体構造に対して、エネルギー吸収および分散能力が要求される。地震の危険性が中程度の地域では、要求性能はこれよりゆる

やかでよい。

図-5に中程度の地震地域における構造例を示す。この構造は、エレベーターのための3階建ての建物である。境界部での応力は、 $0.2f_c$ を超えないので、境界部材は用いられていない。しかし、転倒を防止するために端部には連続鉄筋が配置されており、引張カップラーを用いることによって連続性が確保されている。パネル間およびパネルと基礎の間に、滑りを防止するが、垂直方向の動きを拘束しない接合部が必要である。もし、垂直方向の動きを拘束してしまうと、連続鉄筋の降伏によって地震力を低減させることができなくなってしまう。

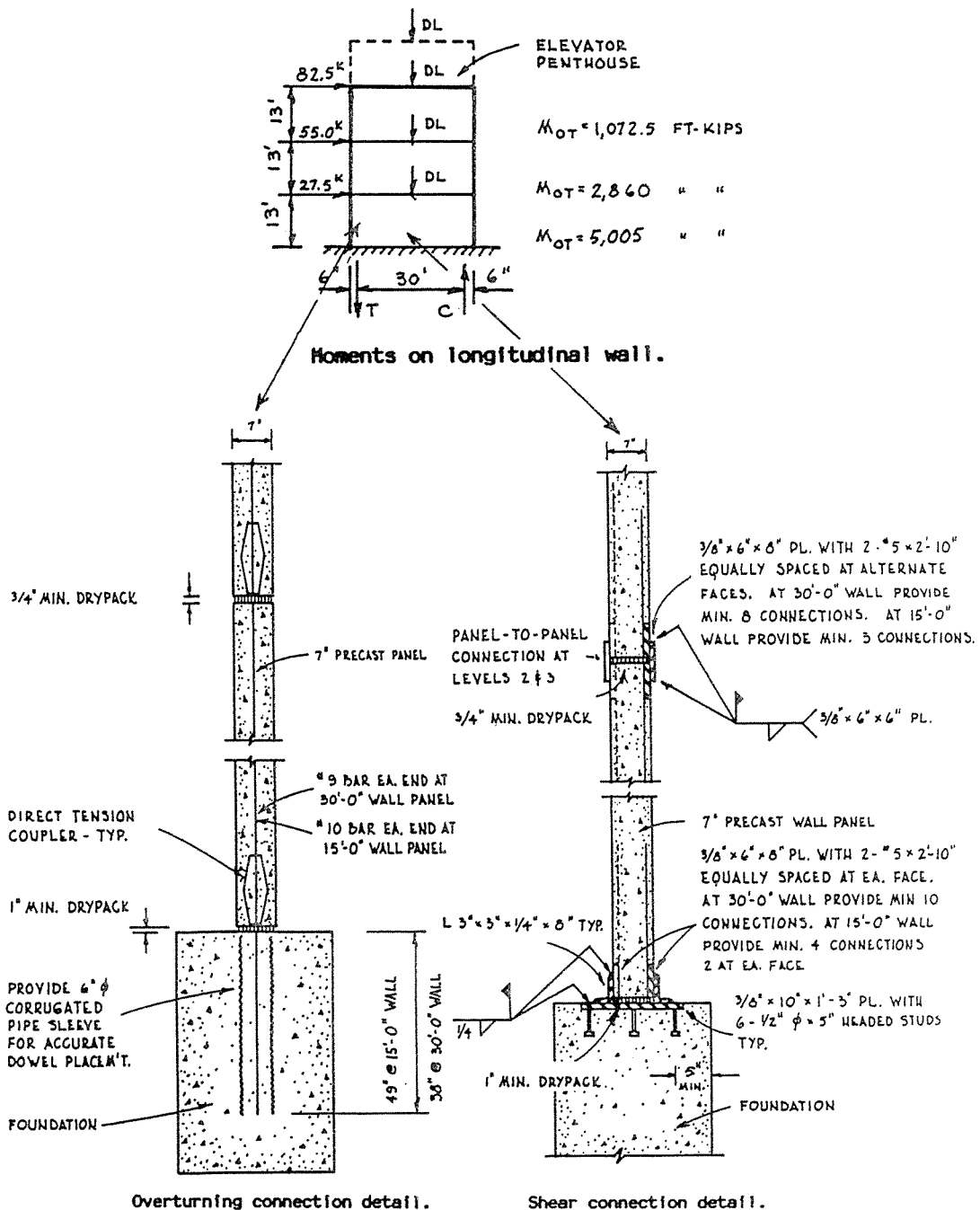
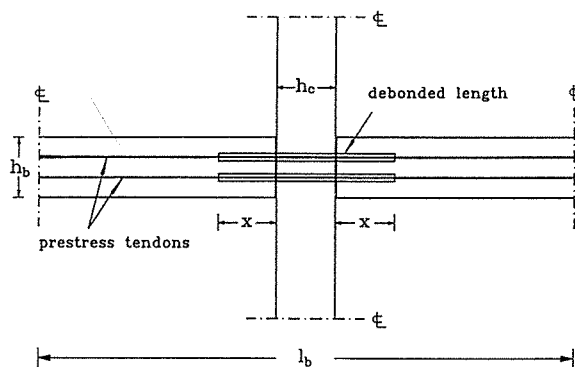


図-5 中程度の地震地域における構造例

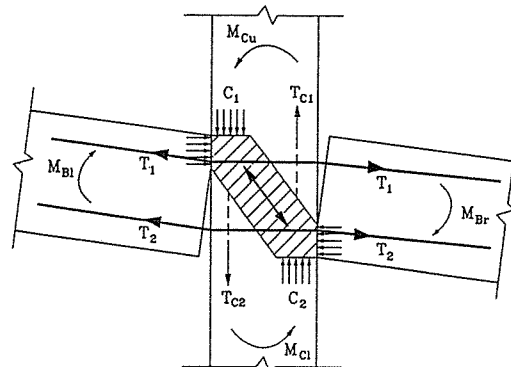
より地震の危険性の高い地域においては、柱の両側の短い部分にアンボンドプレストレス鋼材を配置してせん断抵抗を向上させ、復元力を高めたプレキャストコンクリート部材が提案されている（図-6 参照）。橋梁や建築の骨組みなどでは、最大変形量は弾塑性的な性質を持つ

システムに比べて若干大きくなることが予想される。

国立標準技術協会 (NIST) の研究で、繰返し荷重を受けるプレキャストコンクリートの梁と柱の接合部の実験結果を図-7 に示す。ポストテンションの梁で、完全にグラウトされたもののじん性を右下の図に、一体構造

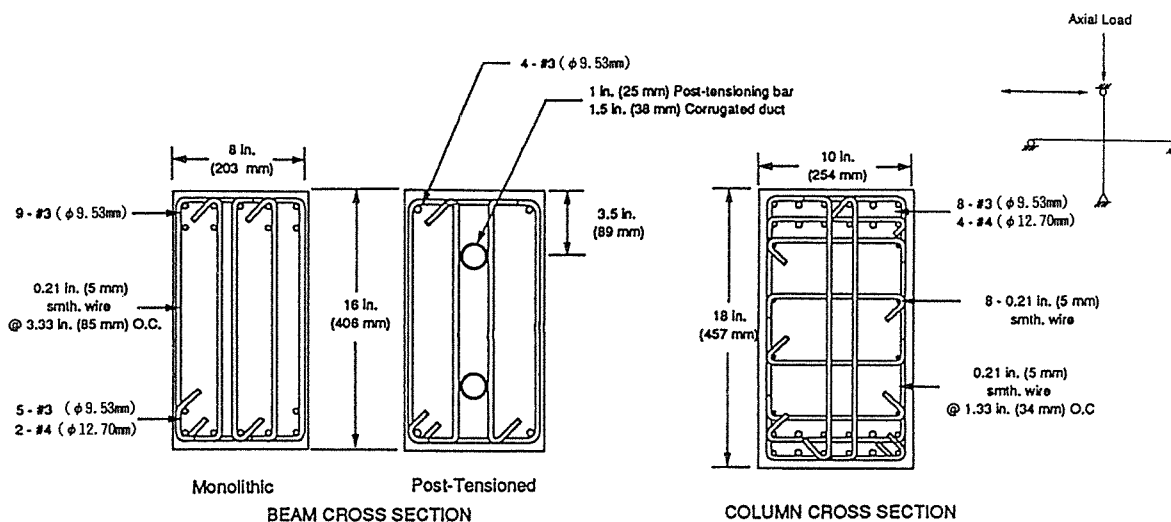


Interior precast beam column unit with partially debonded tendons

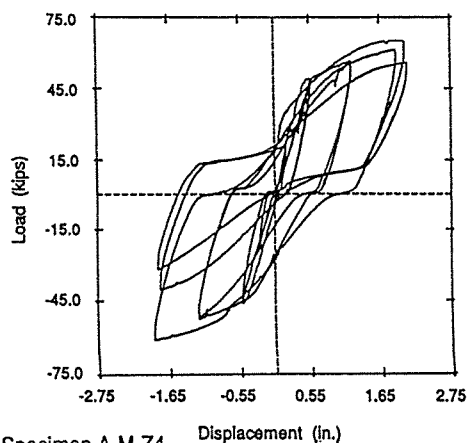


Forces contributing to joint shears with partially debonded prestressing tendons

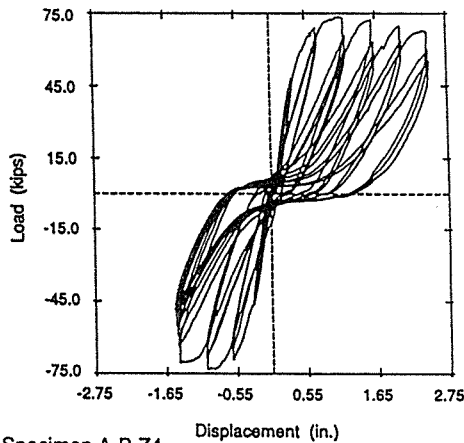
図-6 アンボンド鋼材を配置した梁と柱の接合部



Reinforcement details for the Zone 4 specimens.



Specimen A-M-Z4
RESPONSE FOR MONOLITHIC
ZONE 4 SPECIMENS



Specimen A-P-Z4
RESPONSE FOR PRECAST POST-TENSIONED
ZONE 4 SPECIMENS

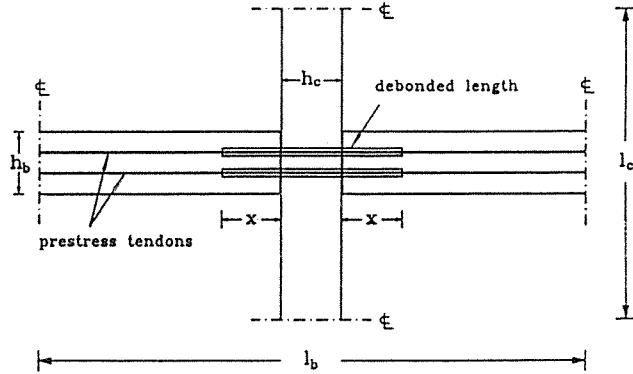
図-7 繰返し荷重を受ける梁と柱の接合部

◇論説◇

のものを左下の図に示す。ポストテンションの接合部では、通常のじん性を発揮したあと、剛性の低下がみられる。

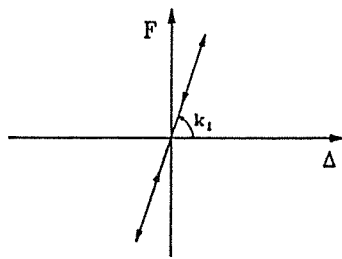
図-8 にプリーストリーとタオの行った接合部の実験

結果を示す。アンボンドの長さ X は、終局変位がプレストレス鋼材の比例範囲を超えないように設定されている。これにより、どのレベルにおいてもプレストレスの損失はなく、プレストレスの大きさは、死荷重に対して

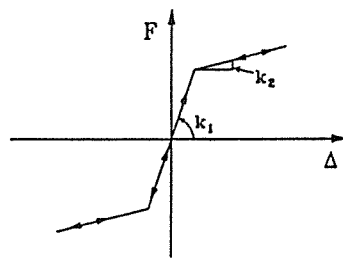


Interior precast beam column unit with partially debonded tendons

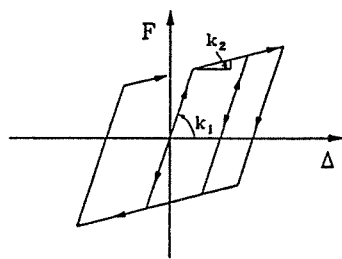
Displacement Ductility Demands For Different Force Deformation Characteristics



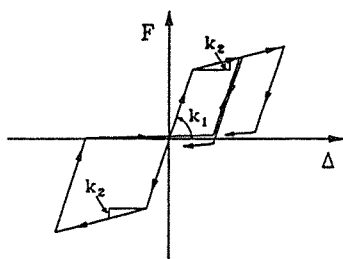
(a) Linear elastic



(b) Bilinear elastic



(c) Bilinear elastoplastic



(d) Bilinear degrading

Force/deflection characteristics for dynamic analyses

*Scaled to 0.4g PGA.

** Related to yield displacement of other loops

E.Q. Record / Model	Orion Blvd.* 1971
(a) T = 0.4	
Linear**	8.1
Bilinear Elastic	16.4
Bilinear Plastic	12.4
Bilinear Degraded	20.0
(b) T = 0.8	
Linear	8.6
Bilinear Elastic	19.3
Bilinear Plastic	10.1
Bilinear Degraded	20.0
(c) T = 1.2	
Linear	9.6
Bilinear Elastic	10.9
Bilinear Plastic	8.1
Bilinear Degraded	15.8
(d) T = 1.6	
Linear	10.5
Bilinear Elastic	7.5
Bilinear Plastic	8.1
Bilinear Degraded	11.1
(e) T = 2.0	
Linear	7.8
Bilinear Elastic	5.9
Bilinear Plastic	7.0
Bilinear Degraded	7.4

図-8 アンボンド接合部を有するプレキャスト梁のじん性

十分なように決められる。計算された荷重・変位曲線は、計測された6つの地震のうちで最も大きな応答を示した1971年のサン・フェルナンド地震に基づいている。周期が1.2秒以上の場合には、接合部は十分なじん性を持っている。

図-9にプレキャストの耐震性に関する研究の流れの一部を示す。この研究は、今年で2年目であり、図に示すように4つの基本分野から成り立っている。コンセプトの設計は、カリフォルニアのイングリカーク社、ハート社、セイボル社が担当し、接合部の分類とモデル化はワシントン大学が、システムのモデル化はカリフォルニア大学バークレイ校が、設計形式はカリフォルニア大学ロスアンゼルス校がそれぞれ担当した。これまでは、解

析が主業務であったが、来年から実際の試験が始まる予定である。

コンセプトの当初案では、2つの地震地域について3種類の骨組み構造の4階建てオフィスビルと、同じ2つの地震地域について2種類の壁構造の4階建てホテルを想定した(合計10ケース)。図-10に3つの当初案を示す。

これに対して、改良案を図-11に示す。ここでは、低層構造の建物は分布骨組み構造に変更され、高層構造ではタワークレーンの使用に適するように、ポストテンションの骨組み構造に変更された。接合部は、曲げ鉄筋やアンボンド鋼材、鋼製コーベルを有する構造となっている。

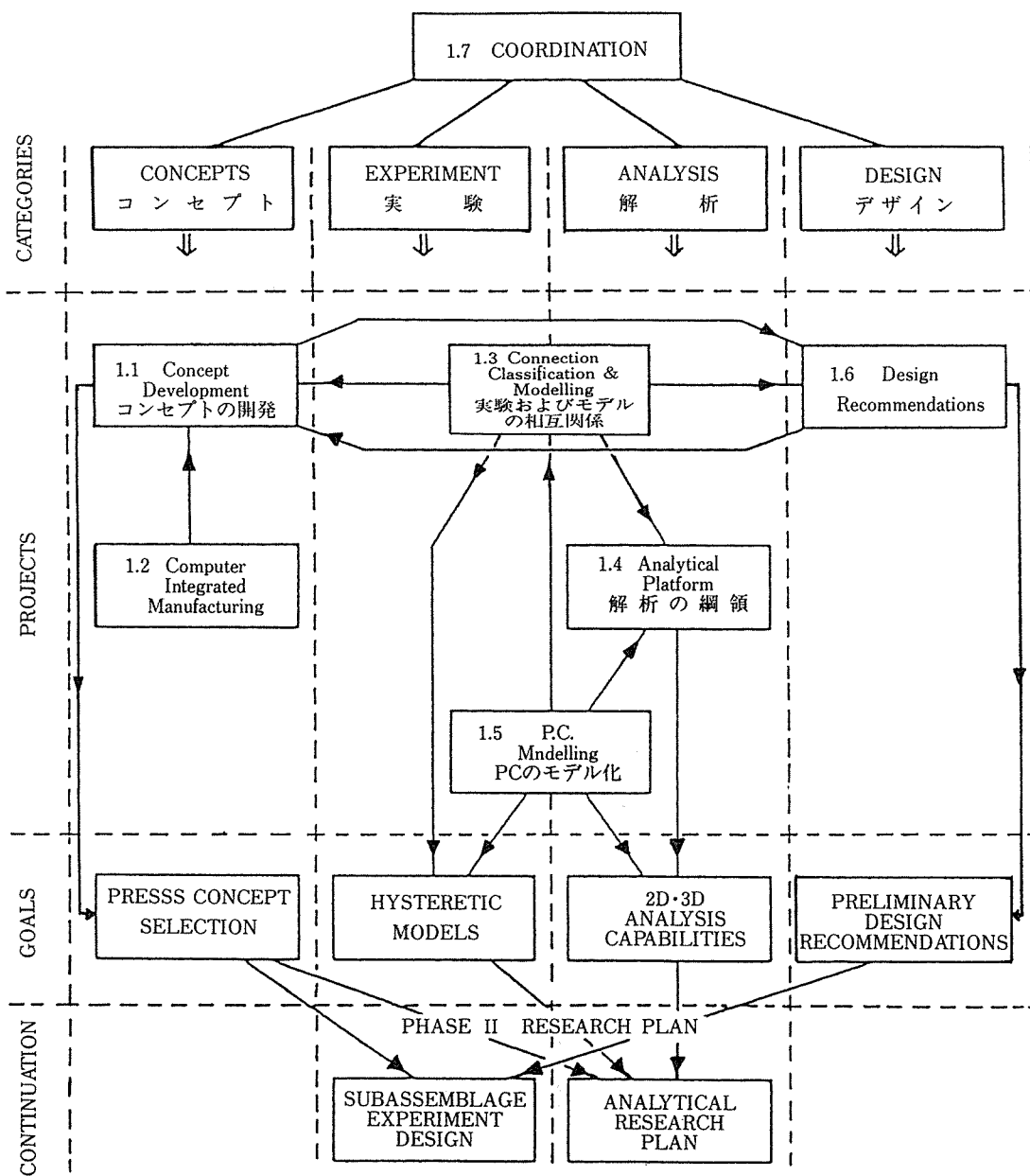


図-9 プレキャストの耐震性に関する研究の流れ

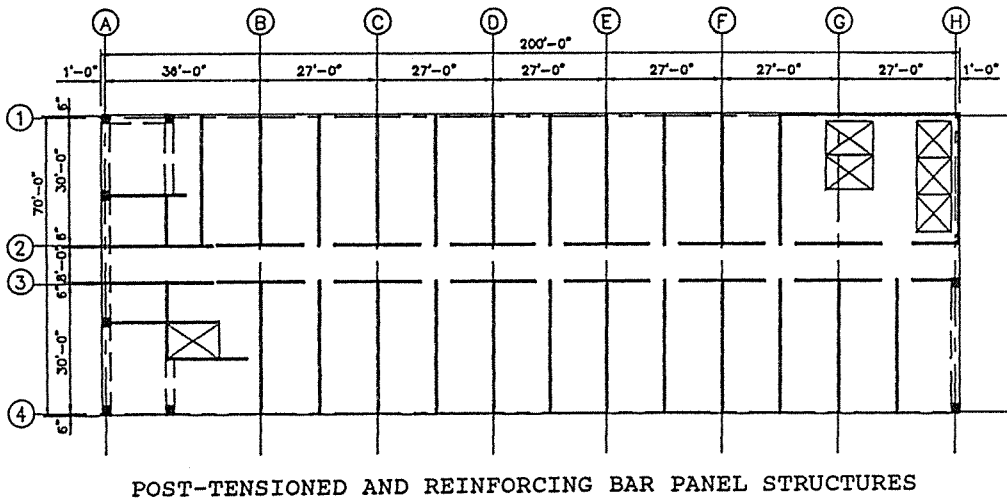
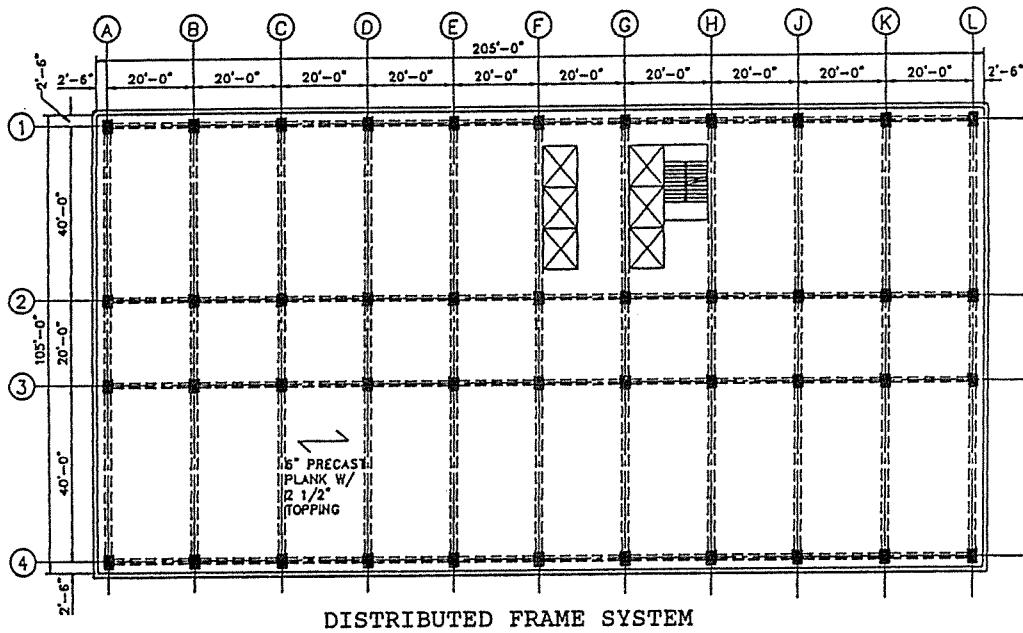
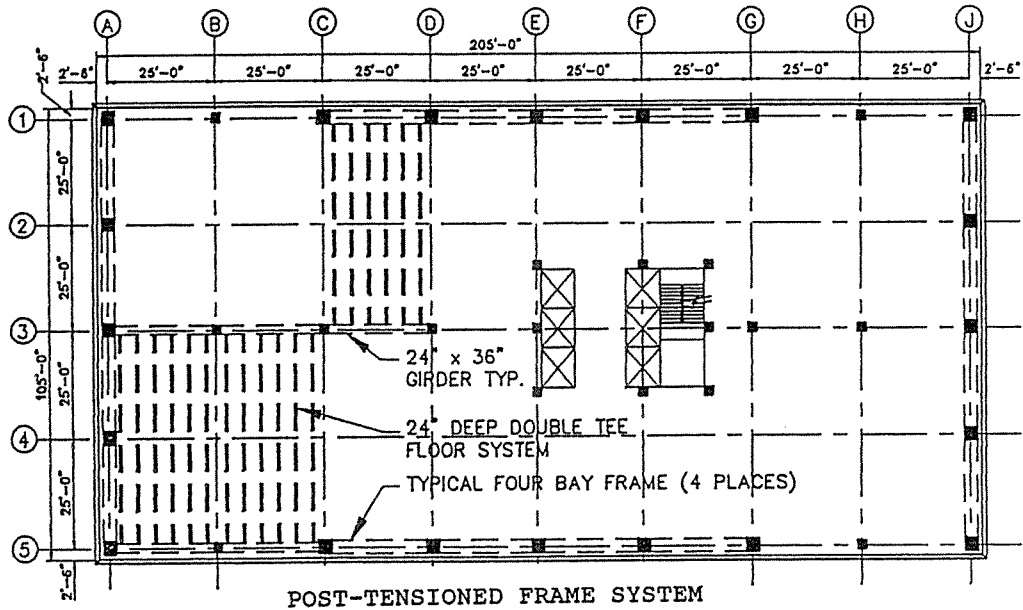
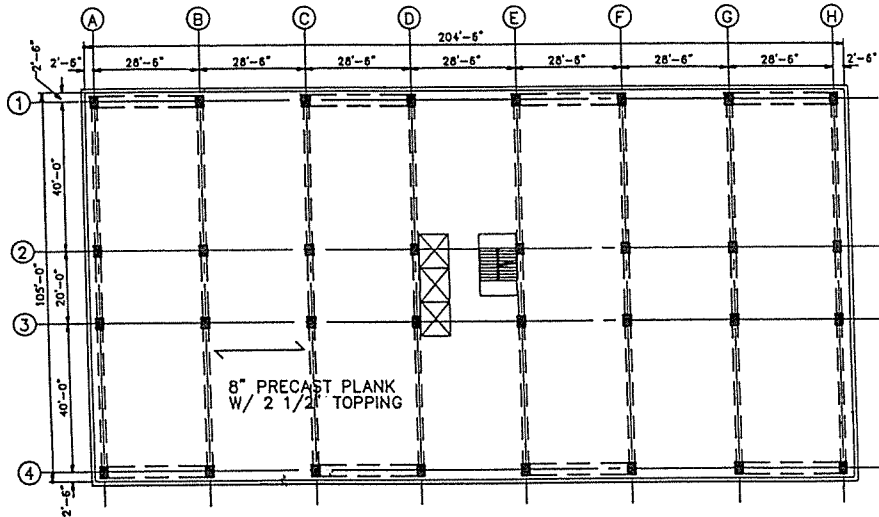
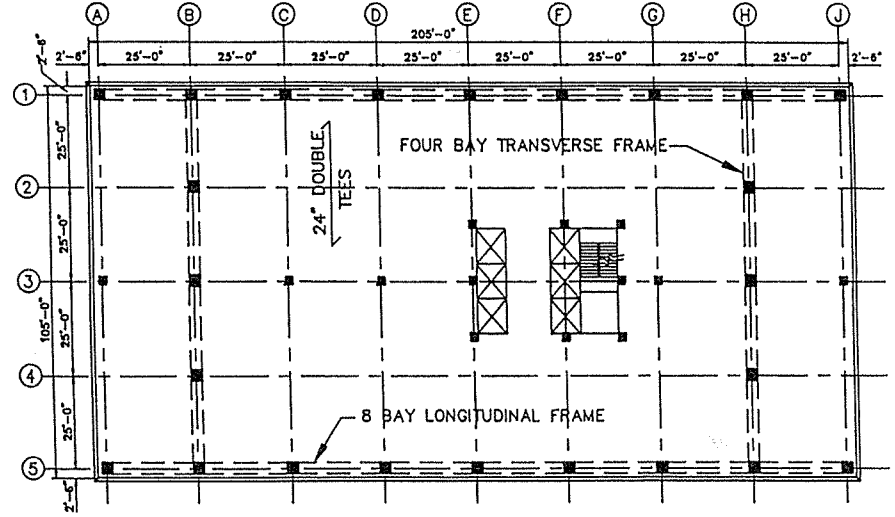


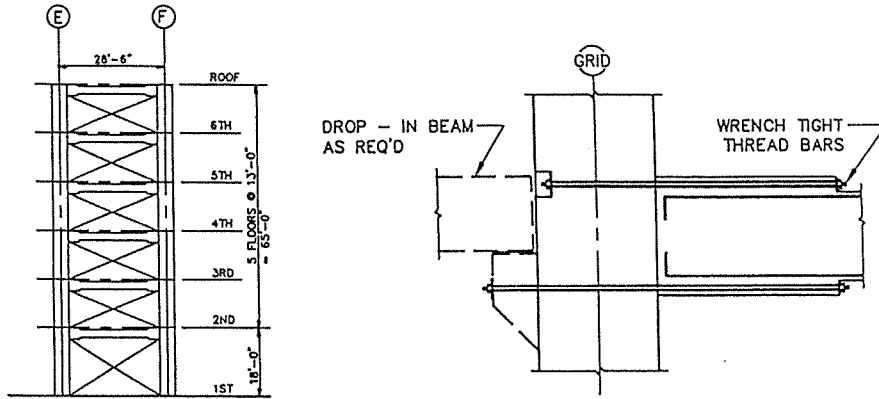
図-10 当初案



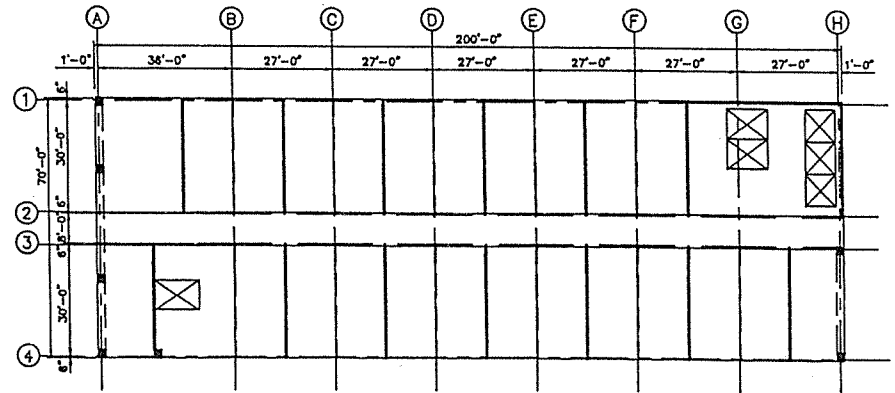
MODIFIED FRAME SYSTEM



MODIFIED POST-TENSIONED FRAME



SPACED-OUT THREADBAR FRAME



MODIFIED PANEL STRUCTURE

图-11 改良案

広く用いられる構造である。おそらく最も経済的な構造であるが、適切な細部構造がとられていない場合には、地震時に不都合が生じる。図-12に典型的なプレハブ構造を示す。

各パネルは通常 150 mm 厚で、幅 8 m、高さ 10 m で、建物は、最大長さ 500 m、奥行き 200 m までである。地震時には、パネルはおのおの片持ち梁として働くか、せん断キーを有していれば、連続壁として作用する。地震動と直角方向では、パネルは建物から倒れようとし、屋根のレベルで連続した鋼材が必要となる。したがって、屋根と壁の接合部が重要な問題となり、比較的薄い壁で適切な強度の接合部をいかにして得るかが問題となる。基礎と壁との接合については、どのように接合させるか、どのような荷重を伝達させるか、隣接するパネルとの接続が問題となる。この接合は、中西部では 80°C にもなる温度変化にも対応することができる。図-13にパネルと基礎との接合部を示す。

図-13の上を示すように、古い設計では、プレハブ構造を簡単化するために、接合部を設けずにパネルを直接基礎梁の上に置いている。パネルは床のスラブにのみ接合されている。下の図に示すように新設計基準では、パネルは基礎の梁に接続し、アップリフトを防止し、せん断力を伝達させるようにしている。

パネルとパネルとの接続は、大きな問題点である（図-14参照）。

新しい構造においては、建設中は小さな接合部を中央より上側に設け、最終的にはパネルの頂部に大きな接合部を設けて周囲を連結させる。多くの接合部ではひび割れが見られ、温度によって付着が失われることもある。

接合部は、温度変化に対して伸び能力があることが必要であるが、これには接合部のどちら側かの PC 鋼材をある程度の長さアンボンドとするか、接合部に連続鋼管を設置するのがよい。温度と地震の組合せに対する設計がドライジョイント構造の問題点である。

2.3 大規模構造物の先進技術に関する研究(ATLSS)

リーハイ大学の大規模構造物の先端技術センターはアメリカの国立科学基金の設立による 25 の工学研究センターの 1 つである。これらのセンターはすべての工学分野にまたがるものであるが、リーハイ大学のセンターのみが構造工学を取り扱っている。大規模構造物の先進技術に関する研究は、実験、設計、建設、運用の 4 つの集合に分類される。

この中で特にプレストレストコンクリートに関する研究は、

- ・プレキャストコンクリート接合部の統一設計方法および合理的モデル
- ・大規模構造物の先進技術における接合部および構造システム
- ・自動建設システム

の 3 つである。合理的モデルのプロジェクトの目標は、コンクリート、プレストレス接合を含むいくつかの接合部の一貫した設計法の確立である。合理的モデルの使用は、せん断摩擦方法による設計およびトラスモデルによる設計の両方によらねばならない。

図-15に単純梁の端部における曲げ鉄筋の定着方法の例を示す。支点を超えて適切な定着長がとれない場合、曲げ鉄筋の定着の方法としては次の 3 つがある。

- (a) 支点後方に鉄筋を注意深く曲げ上げる。

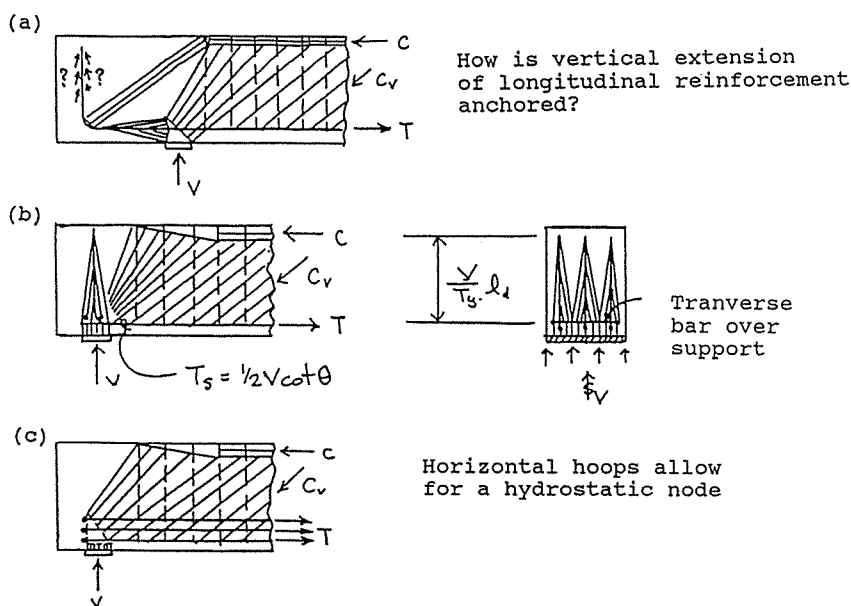


図-15 単純梁の曲げ鉄筋の定着

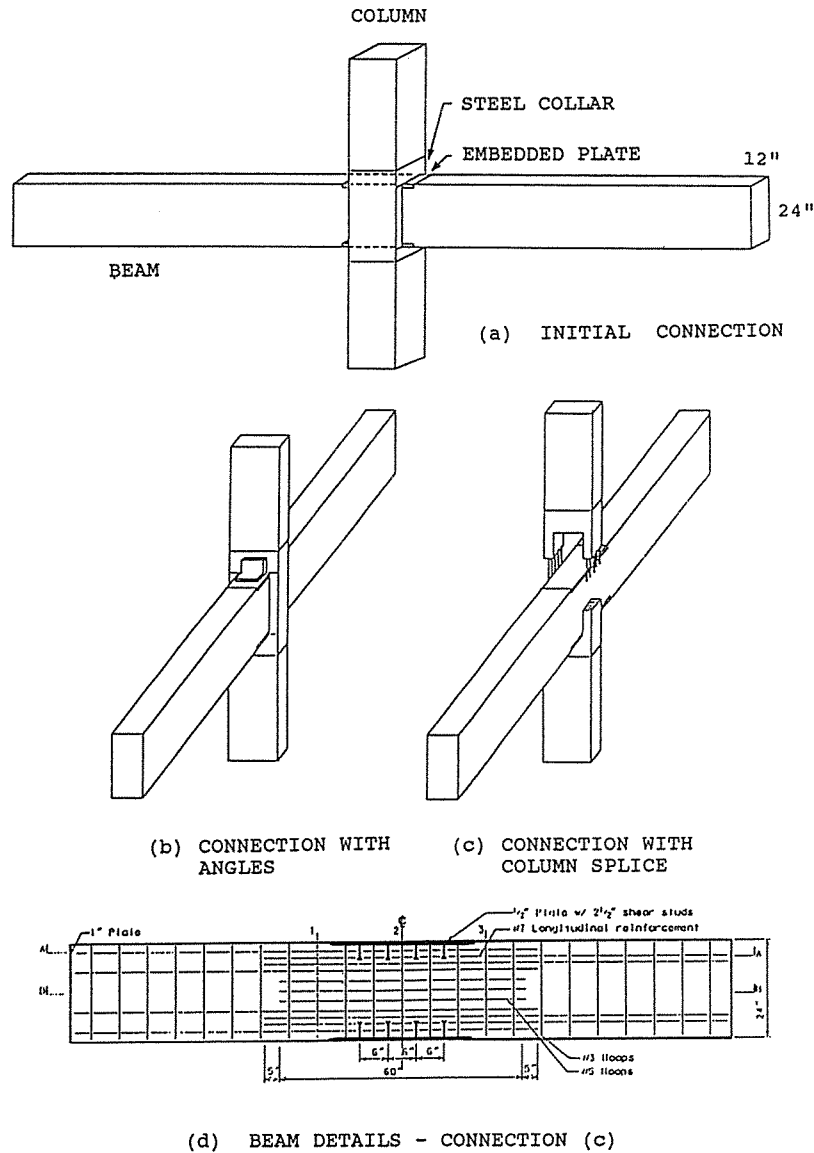


図-16 中規模地震に耐えるプレキャスト部材の接合部
 (a) 柱の中心に梁が通る穴をあける。梁と柱の間のモーメント抵抗は鋼板を介して伝達される。(b)と(c)はこれの変形である。(b)においては、溶接されたアングルを介して引張力は柱に伝達され、(c)ではグラウトと柱の接合が採用されている。最も優れた接合方法は、適切なグラウトが行われた場合にはおそらく(c)の方法であろう。

- (b) 支点上方に延長鉄筋を配置する。
- (c) 水平方向にフープ筋を配置する。

自動建設システムのプロジェクトでは、現場溶接を殆ど行わないプレキャスト継手の開発を進めている。これまで行われている試験の概念図を図-16に示す。

2.4 連邦ハイウェイ機構 (FHWA) の研究

FHWAでは毎年、調査研究のランク付けを発表している。この中で、上位6つの研究のうちの4つが地震に関するものであり、他の2つがプレストレスに関するものである。

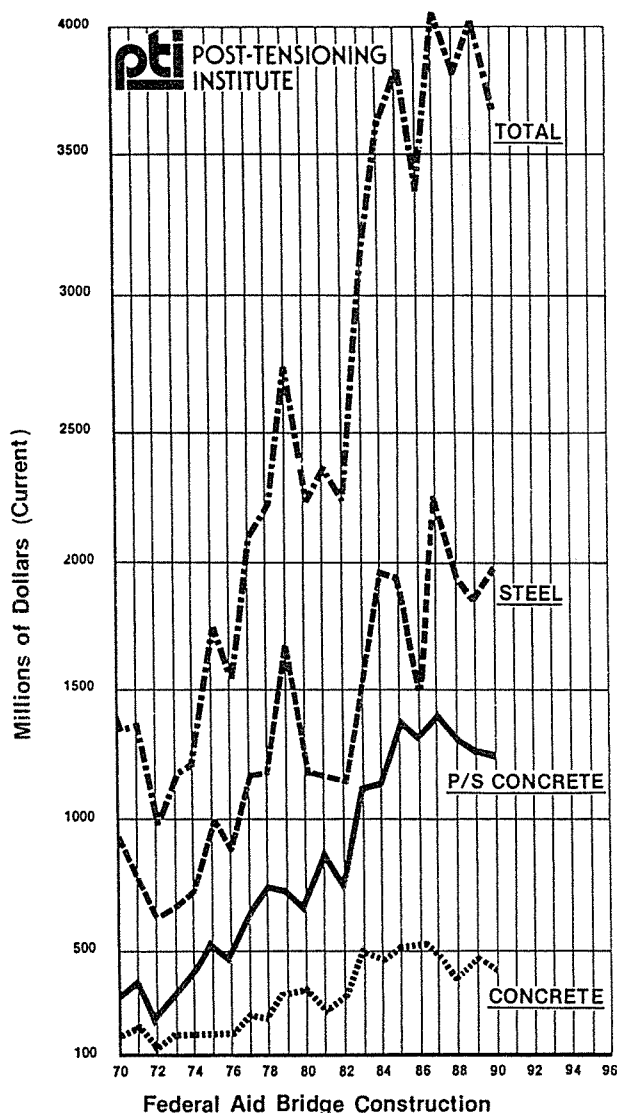
図-17に1970年から1990年までのアメリカ連邦政府

の橋梁建設に関する支出を示す。1970年には、プレストレストコンクリート橋は鋼橋のわずか1/3であったが、1990年には約70%になっている。1970年の比率は現在の日本の比率とほぼ同じであるが、1990年代の終わりには日本でも現在のアメリカの比率に近づくものと思われる。

2.5 プレストレストコンクリート協会 (PCI) の研究

PCIの研究委員会では、製造業者にとって優先順位の高いいくつかの研究課題を毎年指定している。設計会社や大学に対してこれらの課題にこたえるよう依頼している。ここ数年の研究プログラムを表-1に示す。

表-1 PCIの研究プログラム



Total Cost of Bridges			
Concrete	Prestressed Concrete	Steel	Other
\$374,131,827	\$1,217,181,910	\$1,916,082,934	\$123,671,573
Cost of Bridges—New			
Concrete	Prestressed Concrete	Steel	Others
\$44,293,585	\$532,778,712	\$397,056,764	\$100,841,326
Percentage by Cost			
4.1	49.6	36.9	9.4
Cost of Bridges—Major Rehabilitation			
Concrete	Prestressed Concrete	Steel	Others
\$95,755,686	\$147,930,360	\$817,281,265	\$18,232,586
Percentage by Cost			
8.9	13.7	75.7	1.7

図-17 アメリカにおける橋梁建設費用の推移

- 1987-88
1. Effect of Edge Distance on Stud Groups Loaded in Shear and Torsion—Oklahoma State University, Stillwater, Oklahoma.
 2. Kevlar Prestressing of Structural Concrete—Cornel University, Ithaca, New York.
 3. Shear Strength of Group of Studs with Interaction Effects in Precast Concrete Members—Arizona State University, Tempe, Arizona.
-
- 1988-89
1. Behavior of Composite Panels—University of Oklahoma, Norman, Oklahoma.
 2. Effect of temperature on Bond Strength of Epoxy Coated Prestressing Strand—University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, Wisconsin.
 3. Horizontal Shear Strength of Machine-Cast Slab and C.I.P. Topping Interface—Portland State University, Portland, Oregon.
-
- 1989-90
1. Connections for Precast Concrete Shear Wall Load-Bearing Panels Used for High-Rise Buildings—University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
 2. Minimization of Floor Thickness in Multistory Buildings—University of Nebraska at Omaha, Nebraska.
 3. Development of Standard Test for Bond Characteristics of Epoxy Coated and Uncoated Prestressing Strand—Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana.
-
- 1990-91
1. Prestressed Double Tee Slab Bridge Decks—Auburn University, Auburn, Alabama.
 2. Complete Stress-Strain and Shrinkage Properties of High Strength Silica Fume Concrete—University of Washington, Seattle, Washington.

3. おわりに

アメリカにおけるプレストレストコンクリート構造にとって、現在2つの大きな課題がある。1つは、いかにより経済的に製造するか。2つ目は、いかにしてより耐震的にできるかである。経済的にするには、可能な箇所にフレキシブルな構造を採用することであり、耐震的にするには、ドライジョイントをうまく使用することである。

今後次の3つが問題になると思われる。

- 1) プレストレストコンクリートに対して高強度コンクリートの利点をどう生かして使うか。
- 2) 現在あるプレストレストコンクリート構造物の劣化をどう評価し、どのようにその劣化を防止するか。
- 3) プレストレストコンクリート構造物の耐久性をどう数学的に評価するか。

最後に、改めて発表の機会を与えていただいたことに感謝する次第である。