

(27) プレキャスト部材の圧着接合部のせん断力伝達性能に関する実験的研究

オリエンタル建設(株) 技術部 ○森山毅子彦
 同上 営業本部 正会員 大島 幸
 同上 建築支店 正会員 木村 義男
 同上 技術部 正会員 小山内 裕

1. はじめに

コンクリートやモルタルを介して圧着されたプレキャストコンクリート (PCa) 部材の接合部において、滑りが生じる前のせん断耐力については、筆者らが前報1)、2) でコンクリートの強度を考慮したせん断耐力の統一式を示した。また文献3) にも報告されている。接合面にシアキーを形成したり意図的に接合面を粗にした研究報告文は多数見られるものの、平滑面圧着接合の研究報告例はまれである。また、建物が巨大地震に遭遇した場合、終局時には接合部に滑り変位が生じ、せん断耐力が低下する可能性がある。しかしながら、滑り後の耐力および挙動についての研究報告例はない。

本報告は、プレストレス力により圧着されたPCa部材のせん断実験を行い、その結果に基づき、滑りを生じた後のせん断耐力、接合面の摩擦係数、滑り変位量について推定方法を提案するものである。

2. 試験概要

2.1 供試体

供試体のモデル化は、図-1に示すように壁が付いた梁と柱の接合部を取り出し、1面せん断を想定し、場所打ちスラブのないものとした。図-1は前報4)~7)で報告した載加実験の供試体図である。試験体の概略図を図-2に示す。接合面は平滑面とするため鋼製型枠仕上げとした。供試体は平置で組み立て、目地にはプレミックスタイプのモルタルを充填した。試験体の概要は次のとおりである。

接合面の面積：550cm² (20 × 27.5cm)

目地幅：1 cm

圧着力：10ton (A-10: $\sigma_N=18.18$ (kgf/cm²))

25ton (A-25: $\sigma_N=45.45$ (kgf/cm²))

40ton (A-40: $\sigma_N=72.72$ (kgf/cm²))

供試体は以下の順序で製作した。まず、供試体3体分の鋼製型枠を用いて柱側部材、梁側部材のセットを計9組製作した。次に接合面の目地幅が10mmとして両部材をセットして、プレミックスタイプ無収縮モルタルを目地部に充填した。本体コンクリートと、目地モルタルはいづれも横打ちで打設した。最後に本体コンクリートと目地モルタルの強度を確認してPC鋼棒により目地を介して圧着し、一体化した。接合面はサンダー掛けなどせず黒皮のままの無処理の鋼製型枠による平滑面をそのまま使用した。

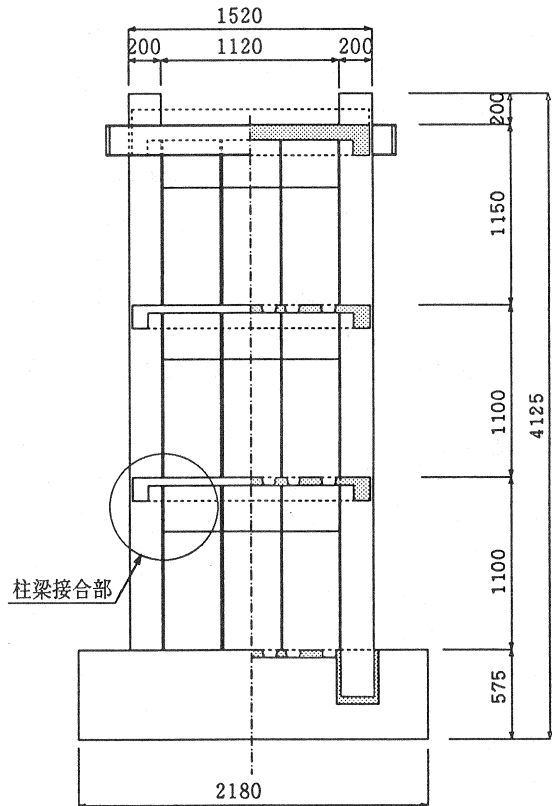


図-1 柱梁接合部位置

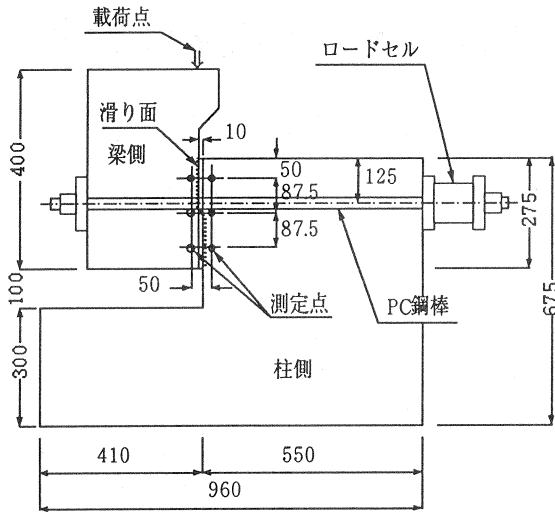


図-2 試験体図

PC鋼棒は導入する圧着力に応じて、10tonf用に ϕ 17mm、25tonf用に ϕ 23mm、40tonf用に ϕ 26mmの3種類を使用した。供試体の製作に使用した材料を表-1に示す。純せん断試験では、データのばらつきが大きいので、誤差を小さくするために各パラメーター毎に供試体を3体ずつ製作した。

2.2 加力計画

加力は目地の中心位置に静的荷重を載荷した。加力にはアクチュエーターを使用し、変位制御により1方向単調載荷を行った。荷重が大きくなると接合面が滑り、同時に荷重は一旦低下するが、さらに加力すると荷重はある程度まで増加した。滑り変位が生じた後は何ら調整すること無く、観察の後そのまま加力を継続した。

2.3 測定方法

測定の位置を図-2中に示す。測定には2方向亀裂ゲージを使用し、目地を挟む2点間の鉛直方向および水平方向の相対変位を測定した。また供試体の表面と裏面を測定し接合面の中心位置の挙動を把握できるようにした。亀裂ゲージは、鉛直方向および測定点が接近する変位の限界は2mmで、測定点が離れる方向の測定限界は3mmであるため、この限界に達した時点で2方向亀裂ゲージは取り外し、疲労試験機のストロークを載荷点の鉛直変位の目安として載荷した。PC鋼棒にはロードセルを取り付けておき、載荷中の鋼棒の応力の変化を測定した。

表-1 コンクリートの材料試験結果

供試体	圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
A-10	491	2.96
A-25	551	3.22
A-40	567	3.03
目地	626	2.31

単位：1.0kgf=9.80665 N

1.0 kgf/cm²=9.80665 $\times 10^{-2}$ MPa

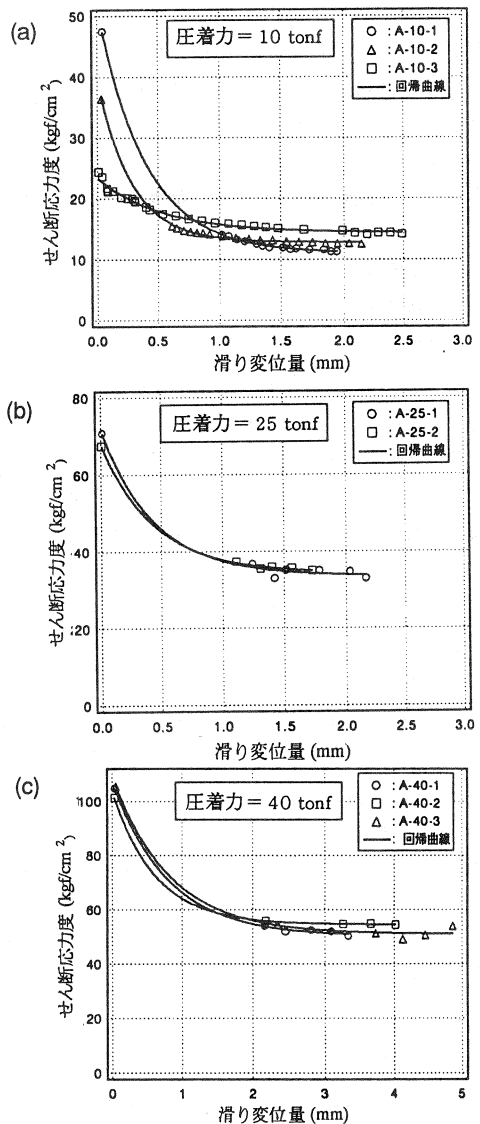


図-3 せん断応力度と滑り変位量

3. 滑り後のせん断挙動

3. 1 耐力推定式

図-3 (a), (b), (c)に、横軸を接合面の滑り変位量、縦軸をせん断応力度として、圧着力別に接合部の純せん断試験結果を示す。この図では滑り後の耐力を検討するため、滑りが生じた瞬間に低下したときの荷重は省略した。すなわち、滑り変位に伴うせん断耐力の上限を表わす包絡線が示されている。図中の曲線は各々の実験値の回帰曲線である。すべての実験値は滑り量の増加に従い減少し、ある値に収斂する。このような曲線は次のような指数関数で表わすことができる。

$$\tau = K_0 + K_1 \cdot \text{EXP}(-K_2 \cdot X) \quad (1)$$

ここでXは滑り変位量を示す。

各試験体の係数 K_0 、 K_1 、 K_2 およびプレストレスレベル σ_N を表-2に示す。またプレストレスレベル毎の係数の平均値とプレストレスの関係を図-4に示す。図中の直線は各係数の回帰値であり、次式で示される。

$$K_0 = -0.242 + 0.7208 \cdot \sigma_N \quad (2)$$

$$K_1 = 13.737 + 0.5449 \cdot \sigma_N \quad (3)$$

$$K_2 = 3.183 - 0.02371 \cdot \sigma_N \quad (4)$$

これらを式(1)に代入すると滑り後の耐力式(5)が得られる。

$$\tau = (-0.242 + 0.7208 \cdot \sigma_N) + (13.737 + 0.5449 \cdot \sigma_N) \cdot \text{EXP}(-(3.183 - 0.02371 \cdot \sigma_N) \cdot X) \quad (5)$$

式(5)はプレストレスおよび滑り量の影響を考慮したせん断耐力の上限値を表現している。ここで $X=0$ とすれば式(5)は $\tau = 13.495 + 12.657 \cdot \sigma_N$ となり、前報(2)で報告した最大せん断耐力式にほぼ一致する。

3. 2 摩擦係数推定式

弾性梁が曲げ変形を生じる場合、荷重(P)の大きさと梁の曲げ剛性に応じた変位量(δ)の積で表わされる弾性エネルギー ($E = P \cdot \delta / 2$) が梁に蓄積される。荷重が接合部のせん断耐力を越えると、接合面に滑り変位が生じる。荷重が積載荷重であれば滑り挙動は停止することなく、接合部は破壊されるが、地震荷重により生じる部材応力のように応力が変形量に依存する場合は、滑り量の増加に伴い部材応力は減少し、滑りは停止する。この場合の接合部のモデル、および載荷点の挙動を各々を図-5および、図-6に示す。載荷点において荷重の低下 ($P_0 \rightarrow P_1$) により減少した弾性エネルギー (E_1) は図-6のハッチ部分で示され、次式で表わされる。

$$E_1 = (P_0 + P_1) \cdot X_1 / 2 \quad (6)$$

圧着面にはプレストレス力 (P_{pre}) が作用している。ある滑り変位において摩擦力が一定であると仮定すると摩擦力の成した

表-2 耐力式の係数

試験体	K_0	K_1	K_2	σ_N (kgf/cm ²)
A-10-1	11.033	40.534	2.534	18.71
A-10-2	12.857	26.752	3.586	18.67
A-10-3	14.405	8.947	1.875	18.73
平均	12.765	25.411	2.665	18.70
A-25-1	33.532	38.262	2.227	46.02
A-25-2	34.340	33.493	2.253	46.25
平均	33.936	35.878	2.2400	46.14
A-40-1	50.129	57.326	1.264	73.65
A-40-2	54.525	49.302	1.637	72.80
A-40-3	51.005	58.490	1.227	73.02
平均	51.886	55.039	1.376	73.16

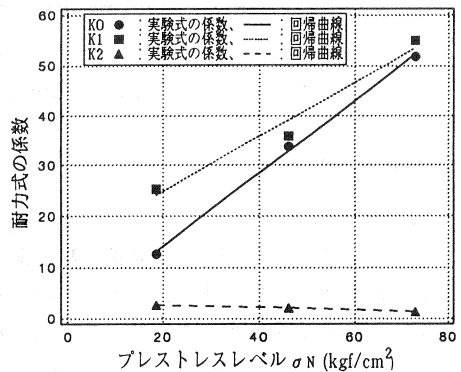


図-4 耐力式の係数

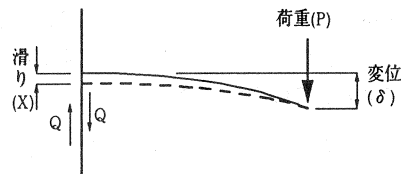


図-5 接合部のモデル

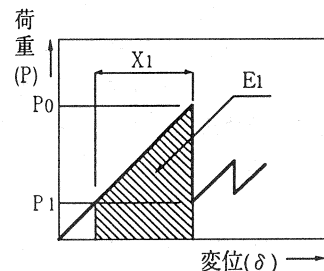
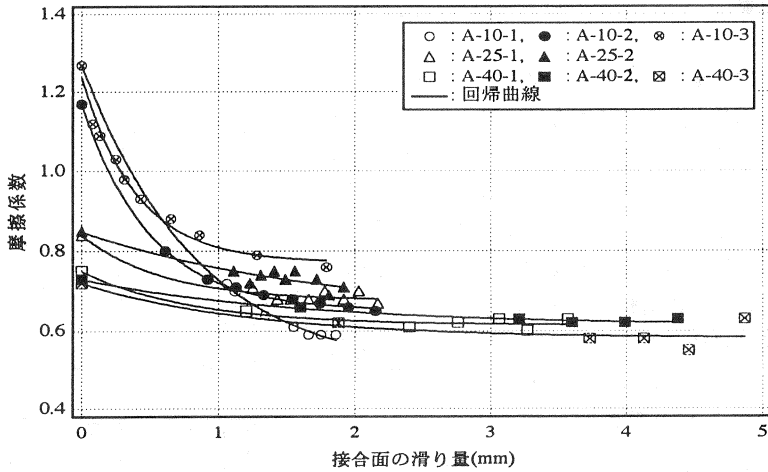


図-6 載荷点の荷重と変位量の関係



図・7 摩擦係数と接合面の滑り変位置

仕事量 (E_2) は、

$$E_2 = \mu \cdot P_{pre} \cdot X_1 \quad (7)$$

で表わされる。 μ は接合面の摩擦係数である。

ここで発生する音や熱などのエネルギーを無視すれば、2つのエネルギー量は等しく、式(6)、式(7)を用いて摩擦係数(μ)を求めることができる。

$$\mu = (P_0 + P_1) / (2 \cdot P_{pre}) \quad (8)$$

求めた各供試体の摩擦係数と接合面の滑り変位置の関係を図・7に示す。図中の曲線は各供試体の実験値の回帰曲線である。実験値から得られる摩擦係数値は一定ではなく、滑り変位置に応じて初期値から徐々に低下し、ある値に収束するので式(1)と同様のe関数式で近似する。

$$\mu = K_0 + K_1 \cdot \text{EXP}(-K_2 \cdot X) \quad (9)$$

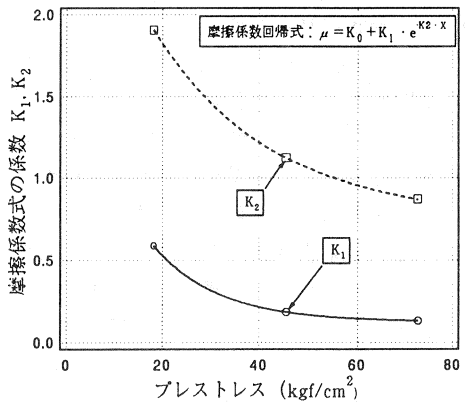
式の係数とプレストレスレベルを表・3に示す。

これらの係数のうち K_0 はすべての供試体の実験値が収束する値であるので実験値の平均とする。

プレストレスレベルと係数 K_1 、 K_2 の関係を図・8に示す。曲線は実験値の回帰曲線であり式(9)と同様のe関数式で近似し、各係数を求めると摩擦係数(μ)は次式となる。

表・3 摩擦係数式の係数

試験体	K_0	K_1	K_2	σ_N (kgf/cm ²)
A-10-1	0.492	0.778	1.192	18.71
A-10-2	0.651	0.518	2.009	18.67
A-10-3	0.772	0.466	2.519	18.73
平均	0.638	0.587	1.907	18.70
A-25-1	0.766	0.163	1.666	46.02
A-25-2	0.644	0.205	0.582	46.25
平均	0.661	0.184	1.124	46.14
A-40-1	0.615	0.136	1.220	73.65
A-40-2	0.613	0.117	0.608	72.80
A-40-3	0.581	0.139	0.783	73.02
平均	0.603	0.131	0.870	73.16



図・8 摩擦係数式の係数

$$\mu = 0.634 + (0.123 + 1.793 \cdot \text{EXP}(0.0409 \cdot \sigma_N)) \cdot \text{EXP}((0.747 + 2.454 \cdot \text{EXP}(0.0227 \cdot \sigma_N)) \cdot X) \quad (10)$$

4. せん断滑りが生じる場合の判定

プレキャスト部材の圧着接合部は、PCa部材のせん断補強が十分に行われている場合、曲げ終局耐力またはせん断滑り変形により終局状態に至ると考えてよい。その分岐点は、せん断応力とせん断滑り耐力の比が1以上であるがどうかで判定することができる。ここでは実験値による回帰式を利用してその判定方法を提案する。

シアスパン比： $\alpha = \frac{M}{Q \cdot D}$ 、曲げによるせん断力： $Q = \frac{M}{\alpha \cdot D}$ であるから、滑りが生じる前に曲げ降伏するための条件は次式となる。

$$\frac{M_u}{\alpha \cdot D} \leq Q_{\max} = \tau \cdot A \quad (11)$$

ここで τ は式(5)で得られる値で、Aは接合面の面積である。 $M_u = (d_p - X/2)P_y$ とすれば式(11)から、

$$\frac{P_y \left(d_p - \frac{P_y}{2 \cdot b \cdot F_c} \right)}{D \cdot Q_{\max}} \leq \alpha \quad \text{ここで } X = P_y / (2 \cdot b \cdot F_c)$$

$$\therefore \alpha \geq \frac{P_y}{Q_{\max}} \left(\frac{d_p}{D} - \frac{q}{2} \right) = \alpha \min \quad q: \text{鋼材係数 } \left(q = \frac{P_y}{b \cdot D \cdot F_c} \right) \quad (12)$$

これよりせん断滑りが生じる前に部材が曲げ降伏するシアスパン比 α の最小値($\alpha \min$)を得る。設計応力によるシアスパン比が $\alpha \min$ より小さい場合は、せん断滑り変位が生じるものと考え、滑り後の挙動及び耐力を検討する必要がある。シアスパン比がこの式による値より大きい場合は、接合部は部材の曲げ耐力により終局耐力が決まるので、部材の曲げ終局耐力の検討が必要となる。

また、曲げ耐力の検討には、曲げとせん断力の応力の組み合わせにおいて曲げの方向に注意し、曲げにより断面の欠け落ちが生じる可能性のある場合は、欠け落ち断面において曲げ耐力を検討する必要がある。

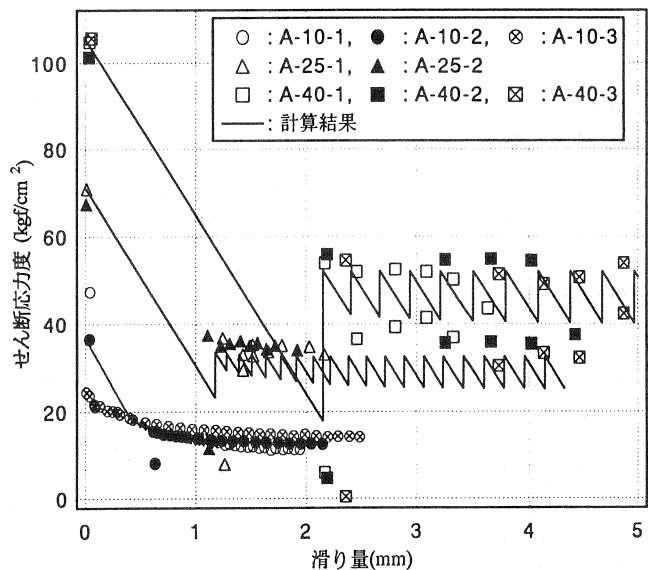
5. 滑り変位挙動の推定

式(5)を滑り変位量(X)における最大せん断耐力とし、荷重が最大せん断耐力(τ_0)に達した時点で滑り変位が生じるものとして滑り変位挙動を推定する。滑りが停止するせん断応力度($\tau_1 = Q_1/A$)および各滑り変位量(X_1)は式(10)により求められる摩擦係数(μ)を用いて算定する。 E_1 と E_2 が等しいことから式(6)、式(7)、式(8)を解いて P_1 および X_1 が得られる。

$$P_1 = 2 \cdot \mu \cdot P_{pre} - P_0 \quad (13)$$

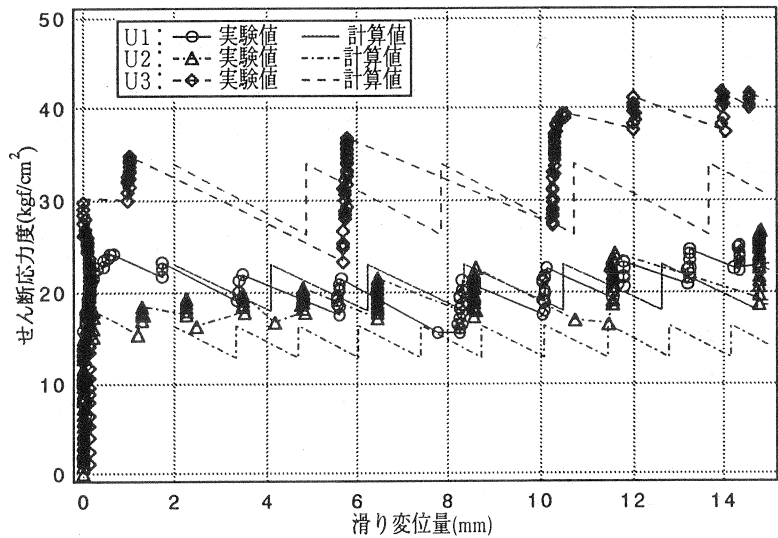
$$X_1 = (P_0 - P_1) / (2 \cdot \mu \cdot P_{pre} \cdot k) \quad (14)$$

ここで、kは載荷点の荷重と鉛直方向変位に関する剛性で、 $k = (P_0 - P_1) / X_1$ である。これらの式を用いて、接合面のせん



図・9 滑り変位量・荷重関係の計算値と実験値の比較

断耐力、滑り変位量および滑り変位により低下する荷重を順次算定する。算定されたせん断応力度と滑り変位量の関係を図・9に示して実験値と比較する。また「PC構造設計指針作成のための共同研究」の「構造性能評価WG」において実施(豊橋技術科学大学担当)された実験データの提供を受け、計算値と比較検討した。その結果を図・10に示す。計算値は実験値をよく表現している。



図・10 他の実験データとの比較

6. まとめ

今回の実験の結果から、接合部の挙動には、プレストレスレベルと滑り変位量が影響することがわかった。本報告ではモルタルを介して圧着された平滑面接合部を有するPCa部材が、純せん断力を受ける場合の接合部の挙動を推定する方法を提案した。

- 1) 滑り変位が生じた接合面の摩擦係数は、滑り変位量に応じて低下してある値に収斂し、プレストレスレベルを考慮してせん断耐力を式(5)で定式化した。
- 2) 滑り変位が生じた接合面の摩擦係数は、滑り変位量に応じて低下してある値に収斂し、プレストレスレベルを考慮して摩擦係数を式(10)で定式化した。
- 3) 接合部がせん断滑りを生じるかまたは曲げ降伏するかの判定方法を提案した。
- 4) 今回の実験結果に基づき、エネルギー一定則により、純せん断力を受けるプレキャスト圧着接合部の滑り量と低下する荷重を推定する方法を提案した。

謝辞：本研究は(社)建築研究振興協会に設置された「プレキャスト耐震壁の性能検討委員会(委員長：渡邊 史夫、委員：岡本 伸、勅使川原 正臣、加藤 博人、立花 正彦、世良 耕作、小幡学)」にて実施されました。委員の方々には多くの貴重なご意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。また実験データの提供申し入れに快く応じて下さった豊橋技術科学大学の田中助教授に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 森山毅子彦ほか：付帯柱と絶縁したプレキャスト壁の耐震性に関する研究・その5柱梁接合部のせん断実験の概要・、建築学会大会学術講演'96梗概集C・2構造IV pp.903-904
- [2] 小山内裕ほか：付帯柱と絶縁したプレキャスト壁の耐震性に関する研究・その6柱梁接合部のせん断実験の結果・、建築学会1996年度大会学術講演'96梗概集C・2構造IV pp.905-906
- [3] 岡本晴彦ほか、プレキャストコンクリート柱・梁接合部の圧着接合に関する研究・接合面のせん断伝達に関する実験結果、建築学会1993年度大会学術講演梗概集C構造II pp.1063-1064
- [4] 立花正彦他：付帯柱と絶縁したプレキャスト壁の耐震性に関する実験的研究・その1供試体および加力方法・、建築学会大会学術講演'94梗概集9月 pp.1029-1030
- [5] 小山内裕ほか：同・その2荷重・変位関係および破壊性状・、建築学会大会学術講演'94梗概集9月 pp.1031-1032
- [6] 小山内裕ほか：同・その3終局耐力の算定方法・、建築学会大会学術講演'95梗概集C・2構造IV pp.957-958
- [7] 森山毅子彦ほか：同・その4終局耐力の算定方法・、建築学会大会学術講演'95梗概集C・2構造IV pp.959-960