

論文 プレキャスト RC 部材接合面におけるせん断力の伝達に関する実験的研究

鈴木 基晴^{*1}・松崎 育弘^{*2}・中野 克彦^{*3}・南 尚吾^{*1}

要旨：本研究は、プレキャスト部材接合面でのせん断伝達性状を把握することを目的とし、接合面の形状、接合筋径、材料強度、材料種類を変動要因として実験を行い、それらの要因がせん断伝達性状に及ぼす影響を定性的に把握した。更に、接合面でのずれ量とせん断伝達力との関係に着目し、ずれ量を考慮した接合部せん断耐力評価式を提案した。

キーワード：プレキャスト、接合部、せん断伝達、ずれ量、接合筋、シアキー

1. はじめに

プレキャスト鉄筋コンクリート造(以下、PC造)の接合部におけるせん断力の伝達に関する実験研究は、現在までに数多く報告されており、様々なせん断耐力評価式が提案されている[1]～[3]。しかし、それらの多くは接合部の最大耐力のみを評価するものであり、接合面でのせん断ずれ量との関係により評価する研究はほとんどなされていない。また、一般に普通コンクリート、普通強度材料を対象としているため、適用範囲が限られている。そこで本研究では、普通強度の材料だけでなく、高強度鉄筋、高強度コンクリート、人工軽量骨材 1種コンクリートを用いた場合の、接合面でのせん断力の伝達性状を把握するとともに、接合面でのずれ量とせん断伝達力との関係に着目し、ずれ量を考慮した接合部せん断耐力評価式を提案することを目的として実験研究を行った。以下に、その研究成果を報告する。

2. 実験概要

図2.1に、試験体形状及び主な変動要因を示す。試験体は、幅800mm、高さ950mm、中央に打ち継ぎ面を有する一面せん断型で、溝切り加工を施した接合筋をシアキーの外側に2本有しており、打ち継ぎ面にはグリスを塗布し付着の影響を取り除いた。主な変動要因は、試験体厚(接合筋D25のみ250mm、他は225mm)、打ち継ぎ面形状[シアキー無し(ダボ試験体)、支圧型シアキー(シアキー高さ30mm、シアキー幅240mm)]、接合筋径(d)、接合筋降伏強度(σ_y)、コンクリート強度(σ_B)、コンクリート種類(普通コンクリート、人工軽量1種コンクリート、以下それぞれ普通コ、軽量コ)とし、試験体総数48体の直接せん断実験を行った。

図2.2～図2.4に、加力装置図、変形測定位置図、接合筋歪み測定位置図をそれぞれ示す。加力は試験体を縦置きにし、試験体下部(PCa部)を反力ジャッキにより固

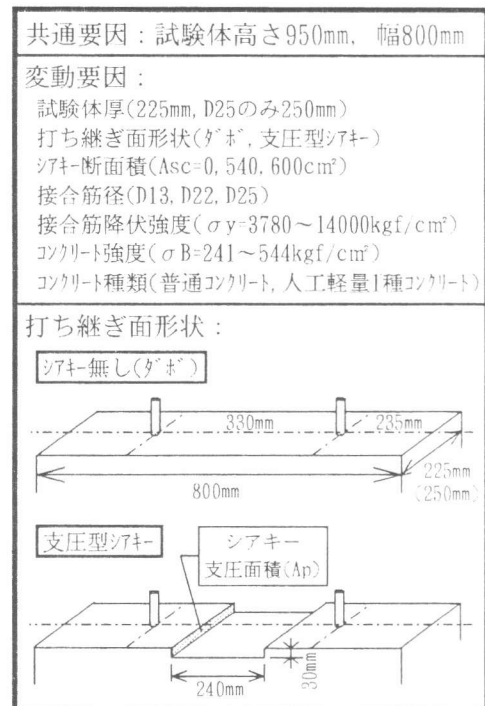


図2.1 試験体形状及び変動要因

*1 東京理科大学大学院 工学研究科 建築学専攻(正会員)

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授、工博(正会員)

*3 東京理科大学 工学部建築学科 助手(正会員)

定し、上部(後打ち部)に純せん断力(Q)を与える正負交番繰り返し载荷とした。荷重は、加力ジャッキに取り付けた100tfロードセルによって測定し、高感度変位計により打ち継ぎ面相互の相対ずれ変位($\delta_{sd}:(DEL1+DEL2)/2$)、相対目開き変位($\delta_{vd}:(DEL3+DEL4)/2$)を測定した。また、接合筋溝切り部に貼付した歪みゲージにより、接合筋各部の歪み度(ε)を測定した。

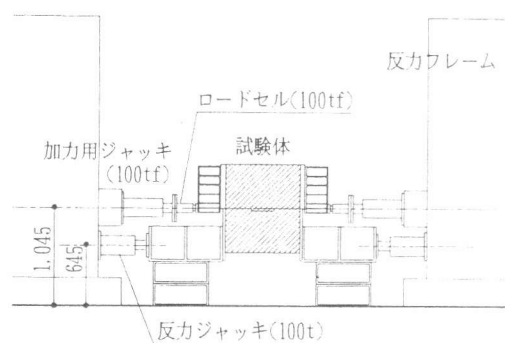


図2.2 加力装置図

3. 実験結果

3. 1 破壊性状

図3.1に破壊状況の一例を示す。打ち継ぎ面形状の違いにより、以下の2種類に分類された。

(1)打ち継ぎ面のずれ破壊：全てのダボ試験体に生じた破壊であり、加力初期から打ち継ぎ面にずれが生じた。接合筋径がD25の場合、接合筋に沿うひび割れ(①)が発生したものも見られたが、その他の材料特性による影響は見られなかった。

(2)ｼｰｷｰ圧壊：全ての支圧型ｼｰｷｰに生じた破壊であり、ｼｰｷｰ右側よりPCa部及び後打ち部に伸びる斜めひび割れ(①)が発生し、それが伸展し多数発生(②)すると共に、ｼｰｷｰ支圧面近傍のｺﾝｸﾘｰﾄが圧壊(③)した。この時、軽量ｺﾝを用いた場合には、普通ｺﾝと比較して斜めひび割れ(②)の発生が顕著であった。

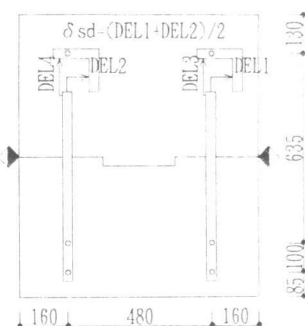


図2.3 変形測定位置図

3. 2 変形状

(1)打ち継ぎ面形状の影響：図3.2に、打ち継ぎ面形状を変動要因としたせん断力(Q)-相対ずれ変位(δ_{sd})関係の一例を示す。ダボ試験体は、ずれ変位の増加に伴い徐々に剛性が低下し、接合筋が曲げにより局部的に降伏して剛性が低下する現象(局部降伏点、接合筋が打ち継ぎ面より2d位置で降伏した時と定義)が発生した。

一方、支圧型ｼｰｷｰを有する試験体は、加力初期から高い剛性を示し、ずれ変位が1mm程度で圧壊し始めた後、最大耐力を迎えた。

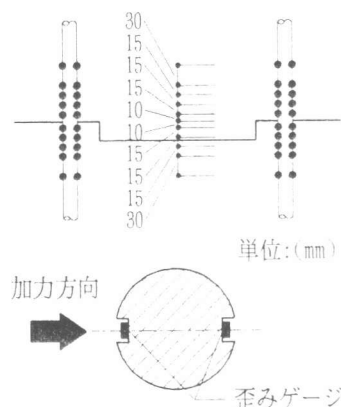


図2.4 接合筋歪み測定位置図

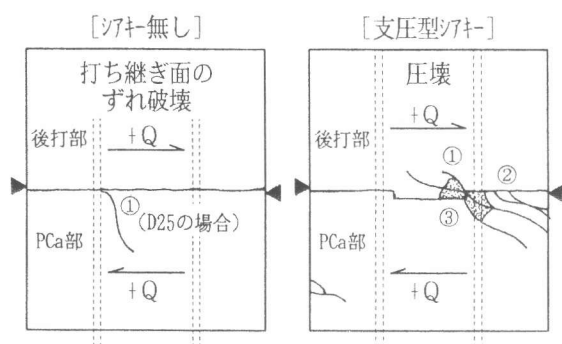


図3.1 破壊状況

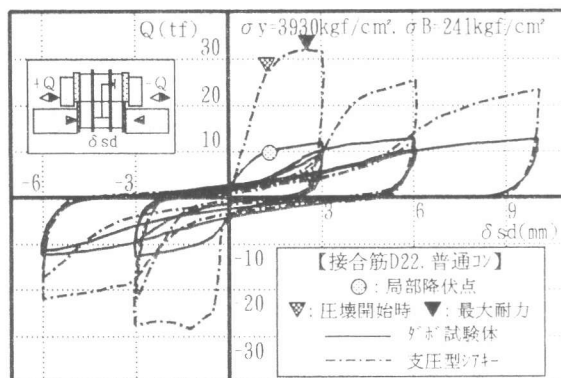


図3.2 Q- δ_{sd} 関係(打ち継ぎ面形状)

(2)材料強度の影響：図3.3に、接合筋強度及びコンクリート強度を変動要因とした $Q-\delta_{sd}$ 関係包絡線を打ち継ぎ面形状別に示す。タボ試験体は、コンクリート強度が高いほど剛性が高くなる傾向が見られた。また接合筋に高強度鉄筋を用いた場合には、普通強度鉄筋の局部降伏点まではほぼ同じ関係を示し、それ以降は普通強度のそれを上回り、局部降伏時の耐力、ずれ変位とも大きくなる傾向が見られた。一方、支圧型ツキを有する試験体は、コンクリート強度が高いほど、圧壊開始時耐力及び最大耐力が高くなる傾向が見られた。接合筋強度による影響は、ツキ破壊後の履歴性状に見られた。普通強度鉄筋を用いた場合には耐力を維持、もしくは低下したのに対して、高強度鉄筋を用いた場合には耐力を維持、もしくは上昇する傾向が見られた。

(3)接合筋径の影響：図3.4に、接合筋径を変動要因とした $Q-\delta_{sd}$ 関係包絡線を、打ち継ぎ面形状別に示す。タボ試験体は、材料強度によらず接合筋径が大きいほど剛性、耐力とも高くなる傾向が見られ、局部降伏時のずれ変位も大きくなる傾向が見られた。支圧型ツキを有する試験体にも同様の傾向が見られたが、圧壊開始時及び最大耐力時のずれ変位に顕著な差異は見られなかった。

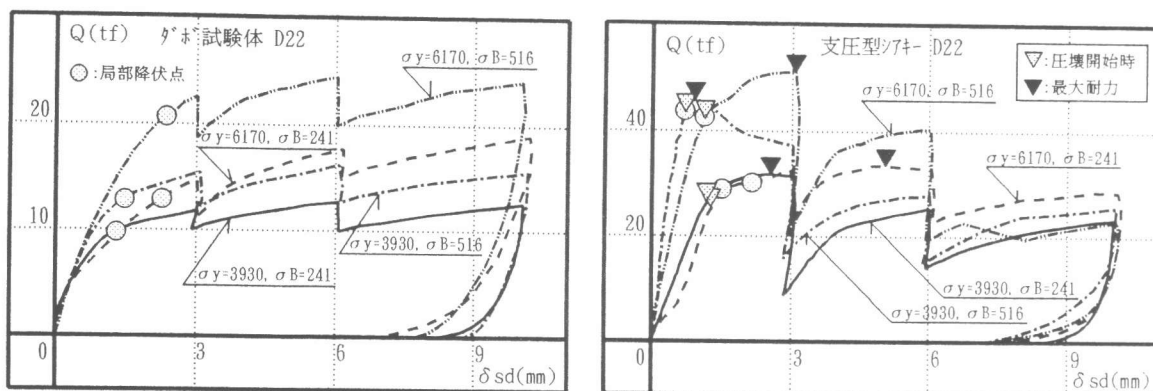


図3.3 $Q-\delta_{sd}$ 関係包絡線(材料強度)

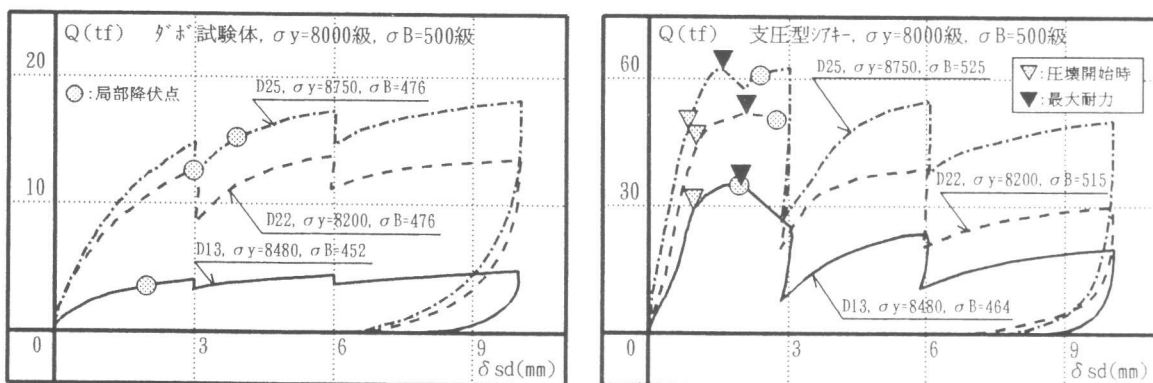


図3.4 $Q-\delta_{sd}$ 関係包絡線(接合筋径)

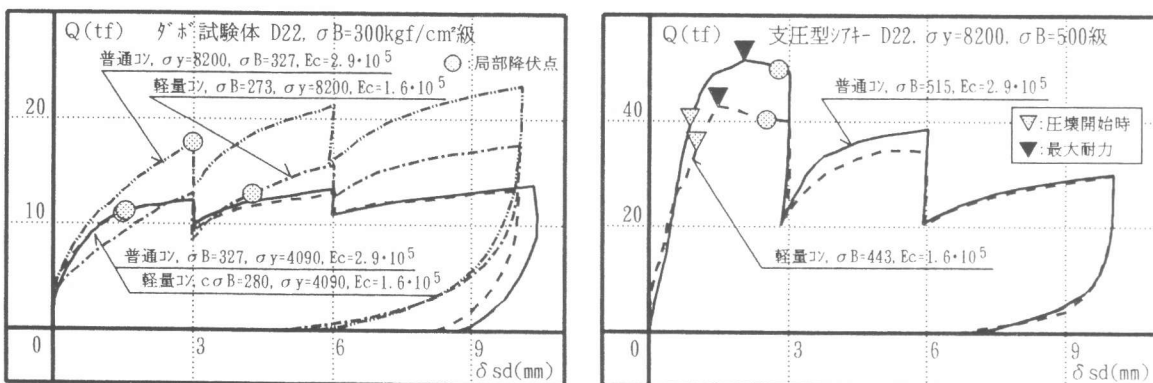


図3.5 $Q-\delta_{sd}$ 関係包絡線(コンクリート種類)

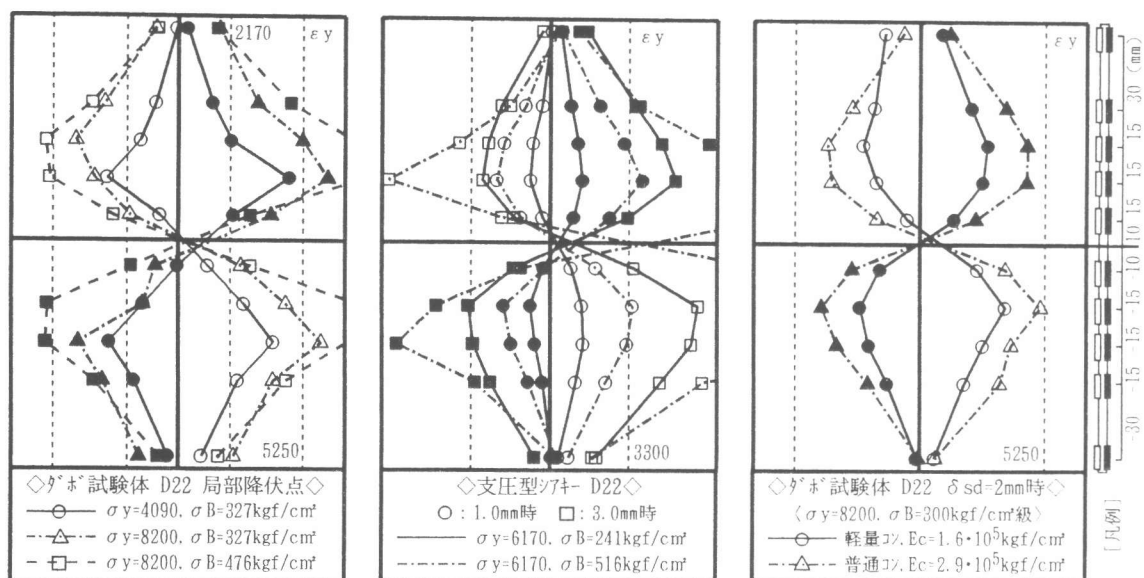


図3.6 歪み分布(ﾀﾞﾙﾏ試験体) 図3.7 歪み分布(支圧型ｼｰｷｰ) 図3.8 歪み分布(ｺﾝｸﾘｰﾄ種類)

(4)ｺﾝｸﾘｰﾄ種類の影響：図3.5に、ｺﾝｸﾘｰﾄ種類を変動要因とした $Q-\delta sd$ 関係包絡線を、打ち継ぎ面形状別に示す。打ち継ぎ面形状によらず全体の性状に差異は見られなかったことから、軽量ｺﾝを用いた場合のせん断伝達性状は、普通ｺﾝの場合と同傾向にあることが確認された。普通強度の接合筋を用いた場合には剛性、耐力とも差異は見られなかったが、高強度接合筋を用いた場合には、軽量ｺﾝの剛性、耐力が普通ｺﾝの場合と比較して低くなる傾向が見られた。

3. 3 接合筋歪み分布

(1)図3.6に、ﾀﾞﾙﾏ試験体の接合筋強度及びｺﾝｸﾘｰﾄ強度を変動要因とした、局部降伏時の接合筋歪み分布を示す。材料強度によらず、打ち継ぎ面に対して対称、及び加力方向に対して表裏対称に歪んでおり、接合筋が局部的に曲がることでせん断力に抵抗していることが確認された。接合筋強度によらず、打ち継ぎ面から25～40mm、ほぼ1d～2dの位置で最も大きく歪む傾向が見られた。ｺﾝｸﾘｰﾄ強度が高い場合には、打ち継ぎ面近傍(1d)での歪みが大きくなる結果となった。

(2)図3.7に、支圧型ｼｰｷｰを有する試験体のｺﾝｸﾘｰﾄ強度を変動要因とした、 $\delta sd=1.0, 3.0\text{mm}$ 時の接合筋歪み分布を示す。ｺﾝｸﾘｰﾄ強度によらず、圧壊開始時の1mm時ではﾀﾞﾙﾏ試験体と同様にほぼ表裏対称に歪んでいたが、ｼｰｷｰ破壊後の3mm時には引張歪みが大きくなる傾向が見られた。またｺﾝｸﾘｰﾄ強度が高い場合には、打ち継ぎ面近傍での歪みが大きくなる傾向が見られた。

(3)図3.8に、ﾀﾞﾙﾏ試験体のｺﾝｸﾘｰﾄ種類を変動要因とした $\delta sd=2\text{mm}$ 時の接合筋歪み分布を、高強度接合筋を用いた場合について示す。ｺﾝｸﾘｰﾄ種類によらず、接合筋表裏対称に歪み、打ち継ぎ面近傍での歪みが最も大きくなるなど、全体の性状にはｺﾝｸﾘｰﾄ種類による差異は見られなかったが、軽量ｺﾝでは、普通ｺﾝと比較して打ち継ぎ面近傍での歪みが小さくなる傾向が見られた。

4. 接合部せん断耐力式の提案

PCa接合部のせん断耐力評価について、各種せん断抵抗要素を累加する場合には、それぞれの抵抗要素の変形を適合させる必要があるため、接合面でのずれ量を考慮しなければならない。また筆者らは、PCa部材を用いた構造実験を行い、PCa部材が一体打ちと同等の構造性能を発揮する時、観察される接合面のずれ量は2mm程度までの範囲であること、既往の耐力評価式では2mm時での耐

力を過大に評価してしまうことを報告してきた[4]～[9]。本研究における実験結果では、2mm程度のずれ量を生じた時には、接合筋は局部降伏の前後、支圧型ｼｰｷｰでは最大耐力を迎える前後であったことから、接合筋及び支圧型ｼｰｷｰの持つ能力が十分に発揮されているずれ量であると考えられる。そこで本研究では、ずれ変位を2mmに設定した接合部せん断耐力式を構築することとした。

まず、接合筋によるせん断耐力を評価するにあたり、ずれ変位が2mm時での接合筋1本当たりの耐力($eQ(2)$)について検討した。変動要因として与えた材料特性のうち、接合筋の局部的な曲げ変形抵抗(ｸﾞﾎﾞ)、ｺﾝｸﾘｰﾄの局部支圧破壊の状態を想定し[10]、ｺﾝｸﾘｰﾄ強度(σB)、接合筋強度(σy)、接合筋1本の断面積(as)を抽出した。それら各要因による影響について、他の要因を共通として実験結果より回帰することで定量的に評価した。尚、ｺﾝｸﾘｰﾄ種類による影響については、その特徴的な材料特性であるｺﾝｸﾘｰﾄﾔﾝｸﾞ係数(E_c)の関数として評価した結果、式(1)が得られた。

$$q(2)=11.5 \cdot as^{0.96} \cdot \sigma y^{0.35} \cdot \sigma B^{0.5} \cdot (E_c/E_s)^{0.42} \quad (\text{kgf}) \quad (1)$$

支圧型ｼｰｷｰを有する場合は、ずれ変位が2mm時での耐力($eQ(2)$)から、同程度の材料強度の接合筋による耐力($eQdb(2)$)を差し引いた、ｼｰｷｰ耐力($eQk(2)=eQ(2)-eQdb(2)$)について検討した。このｼｰｷｰ耐力を、ｼｰｷｰ支圧面積(Ap)とｺﾝｸﾘｰﾄ強度(σB)の積、 $Ap \cdot \sigma B$ との関係により評価し、接合筋本数を n (本)として式(1)と累加することにより、式(2)が得られた。

$$Q(2)=Qk(2)+n \cdot q(2) \\ =0.85 \cdot Ap \cdot \sigma B + n \cdot \{11.5 \cdot as^{0.96} \cdot \sigma y^{0.35} \cdot \sigma B^{0.5} \cdot (E_c/E_s)^{0.42}\} \quad (\text{kgf}) \quad (2)$$

図4.1に、式(2)による計算値と実験値との比較を示す。相関係数は0.984となり、打ち継ぎ面形状、材料強度、ｺﾝｸﾘｰﾄ種類によらず概ね $\pm 20\%$ の範囲に分布していることから、2mm時での耐力を概ね評価できているものと思われる。

しかし式(2)では、各因子の影響を指数関数で評価しているため煩雑であり、実用的ではないと思われる。そこで設計の実用性を考慮して指数部を簡略化した結果、以下の修正式が得られた。

$$Q(2)=0.85 \cdot Ap \cdot \sigma B + n \cdot \{3.52 \cdot as \cdot \sqrt{\sigma y \cdot \sigma B \cdot E_c/E_s}\} \quad (\text{kgf}) \quad (3)$$

図4.2に、式(3)による計算値と実験値との比較を示す。式(2)を用いた場合と比較して、若干安全側にばらつく傾向が見られるが、概ね $\pm 20\%$ の範囲に分布しており、比較的良い適合性を示しているものと考えられる。そこで、式(3)が実験式であることを考慮し、不合格率を5%以下として低減係数を導入し、接合部のせん断耐力に関する設計式として、次式を提案する。

$$Q_{min}=0.85 \times Q(2) \\ =0.7 \cdot Ap \cdot \sigma B + 3.0 \cdot n \cdot as \cdot \sqrt{\sigma y \cdot \sigma B \cdot E_c/E_s} \quad (\text{kgf}) \quad (4)$$

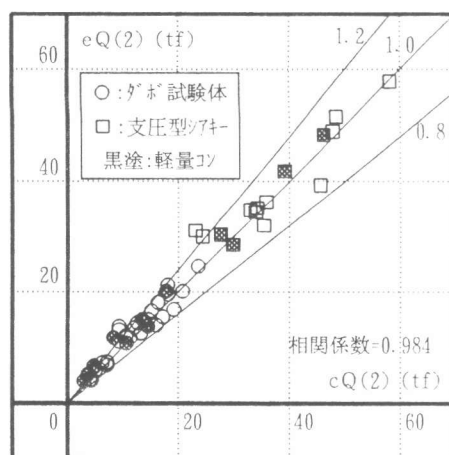


図4.1 式(2)と実験値との比較

ここで、 A_p : シヤ-支圧面積(cm^2)

σ_B : コンクリート圧縮強度(kgf/cm^2)

σ_y : 接合筋降伏強度(kgf/cm^2)

E_c : コンクリートヤング係数(kgf/cm^2)

E_s : 接合筋ヤング係数(kgf/cm^2)

a_s : 接合筋1本の断面積(cm^2)

n : 接合筋本数

式(4)は、接合面でのずれ量を2mmに設定し、接合筋による耐力と支圧型シヤ-による耐力を、変形適合を考慮して累加することで評価したものであり、既往の評価式の適用範囲を超えた幅広い材料強度、材料種類に対応でき得るせん断耐力評価式であると考えられる。

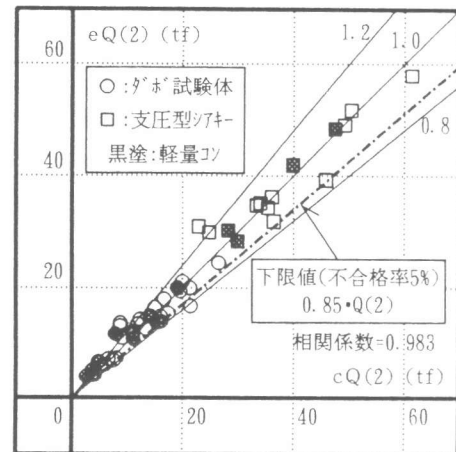


図4.2 式(3)と実験値との比較

5. まとめ

プレキャスト部材接合面におけるせん断力の伝達性状について、普通強度の材料のみならず、高強度コンクリート、高強度鉄筋、人工軽量1種コンクリートにまで及ぶ幅広い材料について実験検討を行い、その性状を定性的に把握した。また、それらの材料特性がせん断伝達力に及ぼす影響を定量的に検討し、幅広い材料特性に対応でき、且つ接合面でのずれ量を2mmに設定した、変形適合を考慮したせん断耐力評価式を提案した。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、東京理科大学大学院松崎研究室卒業生の大淵英夫氏(現 東急建設(株)構造設計部)に、御指導、御協力を頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Mattock, A. H. and Hawkins, N. M. : Shear Transfer in Reinforced Concrete -Recent Research, PCI Journal, Vol.17, No. 3, pp55-75, Jul.1972
- [2] Hansen, K. et al. : Design of vertical keyed shear joints in large panel buildings, Building Research and Practice, pp202-215, July/August.1974
- [3] 望月 重、榎田栄次、永坂具也 : 壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力、ダウエル効果および圧縮拘束力を考慮した場合、日本建築学会構造系論文報告集、第424号、pp11-21、1991.6
- [4] 三田 卓、松崎育弘ほか : 水平打ち継ぎを有するRC梁部材の曲げせん断性状に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C構造Ⅱ、PP609-610、1993.9
- [5] 大淵英夫、松崎育弘ほか : プレキャスト鉄筋コンクリート造基礎梁部材の曲げせん断実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、PP853-858、1994.6
- [6] 中野克彦、松崎育弘ほか : 高強度材料を用いたプレキャストRC有孔梁の変形性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.2、pp213-218、1995.6
- [7] 吉野次彦、松崎育弘ほか : プレキャスト部材の接合面の性能評価に関する研究(その1)部材実験より得られた接合面のすべり変位について、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2構造Ⅳ、PP643-644、1995.8
- [8] 南 尚吾、松崎育弘ほか : プレキャスト部材の接合面の性能評価に関する研究(その2)既往の耐力評価式とすべり変位量との関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2構造Ⅳ、PP645-646、1995.8
- [9] 鈴木基晴、松崎育弘ほか : プレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する実験研究(その6)-架橋式プレキャスト鉄筋コンクリート構造の耐震性能に関する研究-、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2構造Ⅳ、PP653-654、1995.8
- [10] 大淵英夫、松崎育弘ほか : プレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する実験研究(その7)-架橋式プレキャスト鉄筋コンクリート構造の耐震性能に関する研究-、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2構造Ⅳ、PP655-656、1995.8