

プレキャスト部材の圧着接合部の最大せん断耐力

小山内 裕*

1. はじめに

コンクリート部材の圧着接合部には、接合鉄筋を有するもの、接合面を意図的に粗面としたもの、接合面に直交する応力（圧着力）の作用するもの、接合部にモルタルやコンクリートなど付着力を有するものが介在するものなど、接合部のせん断耐力に影響の大きな要素がパラメーターとして多数存在しており、その構造性能の解明は困難を極める。圧着接合は特異な接合方法で、鉄筋コンクリート造一体式や鉄骨造の接合方法が弾性領域から曲げ終局耐力に至るまで、ひび割れ耐力、曲げ降伏耐力を経て終局に至る一連の弾塑性挙動で表されるのに対し、プレキャスト（以後、PCa）部材の圧着接合部では、接合鉄筋が貫通していないために目地部分でずれが生じ、最大せん断耐力以降の挙動がまったく異なる抵抗機構に変化してしまう。最大耐力以降は、滑り挙動を生じながら滑り面の摩擦係数の大きさと圧着力に依存する摩擦抵抗によりせん断力を保持する構造となる。

圧着接合では摩擦接合における最大せん断耐力評価式や滑り後の摩擦係数が確定されていない。現在は圧着力のみでせん断耐力を決定しているが、部材の間に充填するコンクリートやモルタルの強度の影響があるものと思われる。また、滑り後の挙動も明確にされていない。滑り挙動を把握するには、滑り摩擦係数および滑り量を推定する必要があるが、そのような報告は見られない。

「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）」は「9.1.4 接合に関する諸規準および設計式」で「例えば、接合部のせん断伝達機構をとっても、摩擦抵抗説、コンクリートの破壊理論説などがあり、まだ確立したものとは言えない¹⁾」としている。

ここで研究の対象とする圧着接合の最大せん断耐力は、接合鉄筋のないもの、プレキャスト部材の接合面が平滑でかつモルタルなどの付着強度を有する充填材を介して圧着力によりせん断力の伝達能力を与えられたものについて検討した。

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。滑りを生じる場合は、構造系の変化を伴うため、設計では解析が複雑すぎて実用的ではなく、これまで研究の対象とされなかったものと思われる。

2. 研究の目的

PCa部材の接合部には、軸力、曲げモーメント、せん断力が作用しており、これらの応力を安全に伝達させなければならない。軸力および曲げモーメントにより生じる応力度は、接合面に対して直角な方向に作用するので、部材が降伏しても材軸がずれて構造系が変化したりすることはない。しかし、せん断力は材軸と直角方向に作用するので、材料が降伏すると構造部材軸がずれて構造系が変化してしまう。ここでは、圧着接合部のせん断力に対する最大耐力を明確にする。

3. 既往の研究

接合鉄筋のないもの、接合面が平滑なものを接合部の条件としたもので、圧着力によりせん断力を伝達する摩擦接合方式のせん断耐力の提案式は以下のとおりである。

(1) MattockとHawkinsの提案式²⁾

$$v_u = 14 + 0.8 (p f_y + \sigma_N)$$

ただし、 $v_u \leq 0.3 f_c'$ で、 $p f_y + \sigma_N \geq 14$ (kgf/cm²) を適用限界とする。

圧着力 $\sigma_N \geq 0$ では $p f_y + \sigma_N \leq 98$ (kgf/cm²) までは適用可能。

(2) Gastonらの提案式¹⁾

アンボンド接合

$$v_u = 3.0 + 0.78 \sigma_N$$

ボンド接合

$$v_u = 7.7 + 0.70 \sigma_N$$

(3) Bennettらの提案式¹⁾

$$v_u = \alpha v_0 + \mu \sigma_N + 1.48 \sqrt{(f_y f_c)} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

平滑面の場合： $v_0 = 0.4$ (N/mm²)、 $\alpha = 0.5$ 、 $\mu = 0.6$

(4) 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準³⁾

$$Q_{DH} = 0.7 (\sigma_y \Sigma a_h + N_h)$$

接合鉄筋を無視する場合は $\sigma_y = 0$ とする。

a_h ：鉄筋の断面積、 N_h ：接合面に作用する応力

(5) 岡本晴彦の提案式⁴⁾

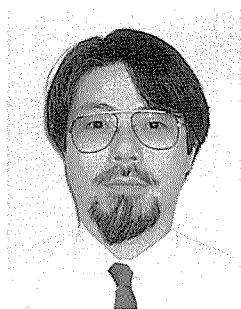
$$\tau_u = 15 + 0.88 \sigma_n \text{ ただし、 } \sigma_n \geq 20 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

三角形コッター接合面：接合面の粗度が本研究の対象とは異なるが、同型の式を提案するので掲載する。

$$\tau / f_c = 0.071 + 1.24 Q_n / f_c$$

(6) 黒田洋子らの提案式⁵⁾

$$\tau_s = 1.12 + 0.99 \sigma \text{ (MPa)}$$



* Yutaka OSANAI

オリエンタル建設(株)
技術部 主任研究員(工学博士)

これらの提案式では、岡本の三角形コッター接合面における式以外ではコンクリートの強度を考慮したものはない。しかし、岡本の三角形コッター接合面における式はコッターの破壊を考慮したもので、平滑面接合とは接合面の破壊メカニズムが異なる。

圧着接合の最大せん断耐力には付着による耐力成分が存在すると思われる。したがってコンクリートの強度が、提案されたこれらの式のもととなる実験に使用されたものと異なる場合は適用に難がある。

4. 最大せん断耐力

接合部のせん断耐力に対して最も重要なものは最大せん断耐力である。「PC規準(1998年)」⁶⁾では圧着接合部のせん断耐力を伝達する摩擦係数を $\mu = 0.5$ としている。また、日本建築学会の「PCa規準」⁷⁾では摩擦係数を $\mu = 0.7$ としている。

平滑面の摩擦係数に関してはいくつかの報告が見られるが、数値にはばらつきがある。目地部の最大せん断耐力は、摩擦係数だけではなくコンクリートの付着力等により異なる。接合部のせん断耐力伝達性能に関しては、最大せん断耐力を明確にしなければならない。接合部のせん断耐力は、接合面のせん断応力度がある限界に達して破壊面が形成されるときに荷重と考えられる。そこで、いくつかの実験結果より最大せん断耐力時のせん断応力度を推定する方法を検討する。

5. 最大せん断耐力の推定式

5.1 圧着応力とせん断耐力の関係

図-1、図-2に試験体の概要図を示す。タイプAとタイプCは試験体の形状は同じであるが、載荷点の位置が異なる。タイプBは接合面に欠落ちが生じることを想定した試験体である。

Aタイプにおける接合面の圧着応力度と最大せん断応力度の関係を図-3に示す。この図に岡本らの報告⁴⁾、黒田らの報告⁵⁾を並記する。図から、本研究で得られた回帰式を示す。

$$\tau_{max} = 12.75 + 1.24 \cdot \sigma_N \dots \dots \dots (1)$$

本実験の回帰式に対し岡本らの式は、定数項で1.18倍、1次の項で0.7倍となっている。黒田らの式は定数項で0.9倍、1次の項で1.28倍となっている。これらの違いは材料特性の影響を考慮していないこと、試験の違いによるばらつきに理由があると思われる。

5.2 コンクリート強度の影響

コンクリートの引張強度は部材のせん断耐力に影響を及ぼす。一般的にはMohrの応力円を利用して算定されることが多い。ここでは、Mohrの応力円による算定式と、圧縮力とコンクリート強度の和の形で表す回帰式を検討する。

(1) Mohrの応力円による検討

最大せん断耐力を接合部分の最大せん断耐力をモールの応力円から算定する。材料特性は、モールの応力円の引張強度として考慮する。

$$\tau = \sqrt{(\sigma_t^2 + \sigma_t \cdot \sigma_N)} \dots \dots \dots (2)$$

σ_t : コンクリートの引張強度 $\sigma_t = 0.07 \sigma_b$

σ_N : プレストレスによる圧縮応力度

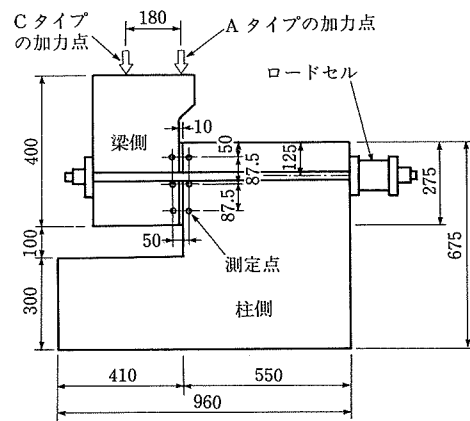


図-1 A、Cタイプの試験体概要図

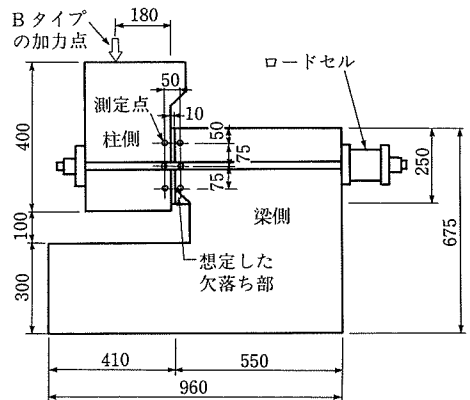


図-2 Bタイプの試験体概要図

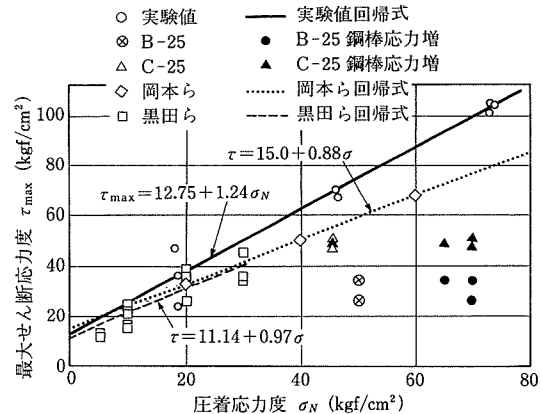


図-3 最大せん断応力度と圧着応力度の関係

縦軸を実験値、横軸を計算値として図-4に示す。この図ではX軸の40 (kgf/cm²)あたりに実験値にばらつきがあること、Y切片が21.97なので $\sigma_b > 314$ (kgf/cm²)でなければならず、実用上無理があり採用するには難がある。

(2) コンクリート強度を考慮した回帰式

圧着応力とコンクリートの強度を考慮した回帰式を次の形で与える。

$$\tau = a\sigma_N + b\sigma_b$$

コンクリート強度で無次元化すると次式となる。

$$\frac{\tau}{\sigma_b} = a \frac{\sigma_N}{\sigma_b} + b$$

係数 a , b は回帰分析より次のようになる。

$a=1.008, b=0.038$
 よって回帰式は次式となる。

$$\frac{\tau}{\sigma_b} = 1.008 \frac{\sigma_N}{\sigma_b} + 0.038 \dots\dots\dots(3)$$

縦軸を τ_{max}/σ_b , 横軸を σ_N/σ_b として図-5に示す。
 この図に示されている回帰直線を Mohr の応力円とともに図-6に表す。この図には文献⁸⁾で報告した滑り後のせん断耐力回帰線を併記した。式(3)の直線と滑り後の直線の差がコンクリートまたはモルタルの付着による強度差と言える。

○印でプロットした Mattock の実験結果ともよく一致している。この式は、コンクリートの引張強度を反映してお

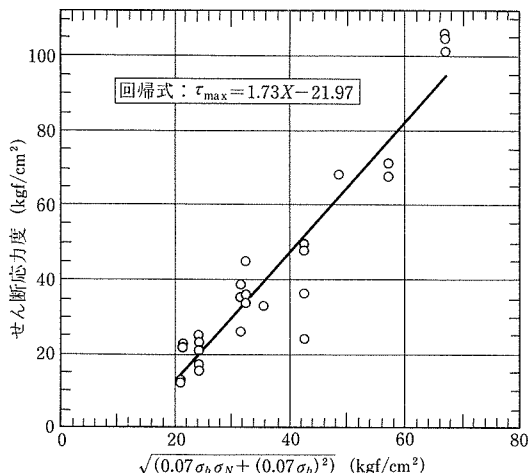


図-4 最大せん断応力度：Mohr の応力円による評価

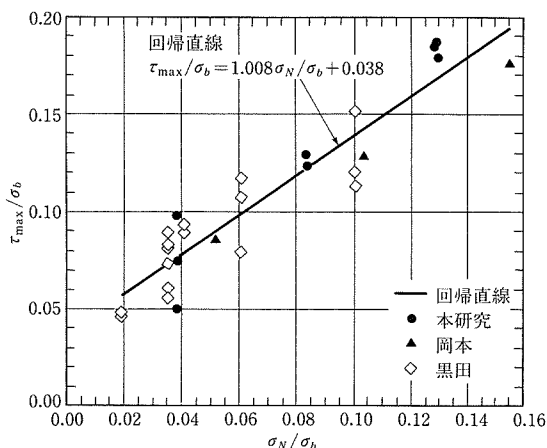


図-5 無次元化された最大せん断応力度

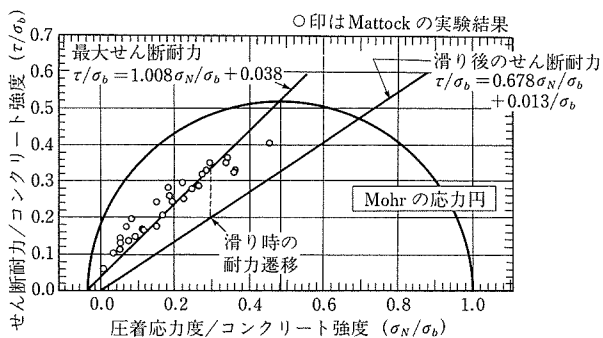


図-6 最大せん断耐力, 滑り後のせん断応力度と圧着応力度

り, 材料強度の異なるコンクリートの圧着にも適用可能と思われる。ただし, コンクリート強度は試験体に使用されたコンクリート強度から $200 < \sigma_b < 600$ (kgf/cm²) の範囲に限られる。

6. プレキャスト部材の圧着接合部の挙動判定方法

6.1 曲げせん断タイプ

図-7ではB, Cタイプのせん断応力度と接合面の相対変位量の関係は, 曲げ降伏の挙動を示している。荷重の増加に伴い, 接合面は下側が圧縮応力状態で上側が開く曲げ変形を示した。このときにPC鋼材の応力も増加した。部材降伏時はPC鋼材は降伏しておらず, 曲げ耐力はコンクリートの剛性低下により決定されるものと思われる。

増加したPC鋼棒の応力を使用して計算した接合面の曲げ降伏耐力時のせん断耐力と最大荷重を表-1に示す。BタイプとCタイプの計算値の違いは, 接合面の断面積および圧縮縁からのPC鋼材の距離の違いによる。計算値に対する最大荷重の比は, Cタイプでは平均 $27.2/26.1 = 1.04$ でほぼ一致するが, Bタイプでは平均 $15.9/19.7 = 0.81$ で計算値に対し実験値が小さい。Bタイプでは断面の欠落ちが想定どおりに生じ, 圧縮縁断面の欠損により曲げ耐力は全断面を考慮した耐力より小さくなったものと考えられる。

6.2 せん断滑りの生じるシアスパン比の推定式

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, せん断耐力とせん断滑り耐力の比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。

$$\text{シアスパン比: } \alpha = \frac{M}{QD}$$

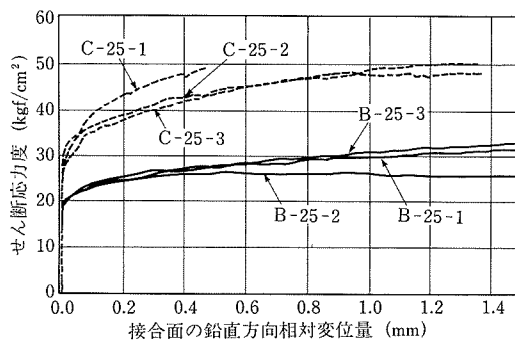


図-7 荷重-変位関係 (B, Cタイプ)

表-1 曲げ降伏時せん断力の計算値 (tonf)

供試体	PC鋼棒応力 P_{pre}	せん断力計算値 Q	最大荷重
B-25-1	36.7	20.7	17.3
B-25-2	30.1	17.5	13.3
B-25-3	36.9	20.8	17.2
平均	34.6	19.7	15.9
C-25-1	35.7	25.0	26.9
C-25-2	38.4	26.6	28.2
C-25-3	38.4	26.6	26.5
平均	37.5	26.1	27.2

$$\text{曲げによるせん断力} : Q = \frac{M}{\alpha D}$$

$$\therefore \frac{M_u}{\alpha D} \leq Q_{\max} = \tau \cdot A \dots\dots\dots (4)$$

A : 接合部面積

式(4)に $M_u = (d_p - X/2) P_y$ を代入して次式を誘導できる。

$$\alpha \geq \frac{P_y}{Q_{\max} \left(\frac{d_p}{D} - \frac{q}{2} \right)} \dots\dots\dots (5)$$

$$q = \frac{P_y}{b \cdot D \cdot F_c} : \text{鋼材係数}$$

$$X = \frac{P_y}{b \cdot F_c}$$

$$\frac{P_y \left(d_p - \frac{X}{2} \right)}{2\alpha} \leq Q_{\min}$$

これより最大せん断力 Q_u に対するシアスパン比 α の最小値を得る。設計応力によるシアスパン比がこの式による値より小さい場合は、せん断滑り変位が生じるものと考え、滑り後の挙動およ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合せにおいて曲げの方向に注意し、曲げにより断面の欠落ちが生じる可能性のある場合は、欠落ち断面において曲げ耐力を検討する必要がある。

7. 結 論

PCa 部材の圧着接合部における最大せん断耐力、および曲げ降伏の場合の分岐点の判定方法を提案した。目地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部材の平滑接合面のせん断力伝達性能に関して、次のような知見が得られた。

- ① 接合面は圧着力以上の最大せん断耐力を有する。

- ② 最大せん断応力度と圧着応力度の関係は一次式で表される。 $\tau = 1.008 \sigma_N + 0.038 \sigma_b$
- ③ 純せん断の場合、接合面は滑り変位の後にも圧着力の約7割のせん断力伝達性能を有する。
- ④ 接合面に断面の欠落ちが生じるような応力の組合せに対しては、欠落ちにより曲げ耐力が低下しないよう考慮する必要がある。

なお、本報告は「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5、その6、日本建築学会大会梗概集、1996年9月」⁹⁾、¹⁰⁾の内容を加筆修正したものであり、また、京都大学博士課程における学位論文(2000年3月)の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)，pp.171～176，1997
- 2) Mattock, Hawkins：Shear Transfer in Reinforced Concrete Recent Research, PCI Journal, pp.55～75, March-April 1972
- 3) 日本建築学会：壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説，1982改定，9条接合部，1982
- 4) 岡本，村井：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，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.1 063～1 064，1993.9
- 5) 黒田，八木，飯塚：滑り発生前後におけるプレキャスト部材圧着接合面の摩擦に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.3, pp.733～738，1998
- 6) 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，p.330，1998
- 7) 日本建築学会：プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工，pp.106～107，1986
- 8) 小山内ほか：プレキャスト部材圧着接合部のせん断滑り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.18, No.2, pp.1 191～1 195，1997
- 9) 森山ほか：付帯柱と絶縁したプレキャスト壁の耐震性に関する実験的研究 その5 柱梁接合部のせん断実験の概要，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，構造IV，pp.903～904，1996.9
- 10) 小山内ほか：付帯柱と絶縁したプレキャスト壁の耐震性に関する実験的研究 その6 柱梁接合部のせん断実験の結果，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，構造IV，pp.905～906，1996.9

【2000年4月12日受付】