

論文

[2081] 曲げ降伏型プレキャスト接合面のせん断伝達に関する実験的研究

正会員○金本清臣 (横浜国立大学大学院)
 正会員 壁谷澤寿海 (横浜国立大学建設学科)
 正会員 倉本洋 (横浜国立大学建設学科)
 五味学 (横浜国立大学大学院)

1. 序文

現在、建設業界では労務事情が逼迫しており、施工の合理化による生産性向上に富むプレキャスト (以下P C a. と略記) 工法化への要求は非常に高まっている。P C a. 工法の研究開発はこれまでも数多く行われてきたが、その成果のわりには普及が十分でないのが現状である。その理由として、施工の認可に対する行政上の取扱いが異なり適用範囲が限定されることが考えられる。このような状況を背景に、P C a. 工法の設計法の確立を目指した組織的な研究が行われつつある。本研究ではその一環として曲げ、せん断、軸力を受けるプレキャスト接合面 (打継面) の挙動を明らかにするために要素実験を2シリーズにわたって行った。本報では、前報 [1] のパイロット実験に引き続き、第2シリーズの実験結果について報告する。

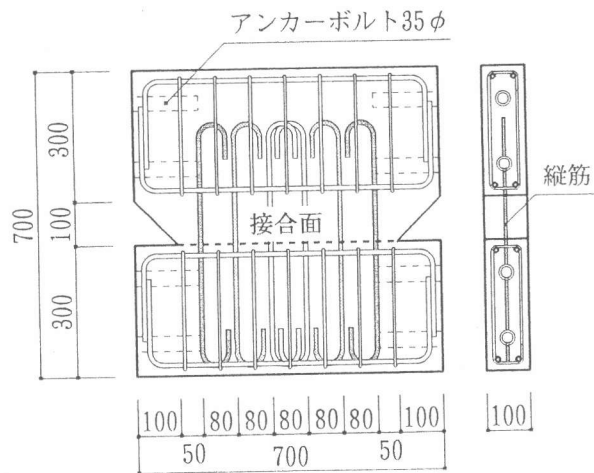
2. 試験体および使用材料

試験体の形状寸法、配筋図を図1に、試験体一覧を表1および加力条件一覧を表2に示す。試験体数は32体で軸力、シアスパン比 (M/QD)、鉄筋比および接合面の処理状態をパラメータとした。

試験体の形状寸法は、高さ70cm×横70cm×幅10cmで、試験体底部から30cmの位置に破壊面を規定するために、接合面に沿って両端から中央に向かう切り欠きを設けることによって横50cm×幅10cmなる接合面 (打継面) があり、この接合面に対して垂直に横切る縦筋 (2-D10, 4-D10, 6-D10) を配筋した。

試験体は横打ちとし、中央に鋼製型枠またはアルミニウム製型枠による平滑な打継面、あるいはシアキーによる接合面を分離打ちにより形成した。下部を先打ちし、2日ないし4日後に上部壁板を後打ちしている。

試験体に用いた材料は全て共通で、コンクリートの設計基準強度は $F_c = 300 \text{ kgf/cm}^2$ 、縦筋はD10 (SD295) とした。材料の力学的特性を表3に示す。



凡例) 2本配筋の場合: [Symbol]
 4本配筋の場合: [Symbol] + [Symbol]
 6本配筋の場合: 図示の全縦筋

図1 試験体配筋図

表1 試験体一覧

試験体名	体数	縦筋 (pgσy)	接合面 (型枠)
P*-** -2	4	2-D10(10)	平滑 (アルミ製)
P*-** -4	4	4-D10(20)	平滑 (アルミ製)
P*-** -4	4	4-D10(20)	平滑 (鋼製)
P*-** -6	4	6-D10(30)	平滑 (鋼製)
R*-**	8	4-D10(20)	一体打ち
S*-**	8	4-D10(20)	シアキー

*: シアスパン比, **: 軸応力度 [kgf/cm²]

表2 加力条件一覧

軸応力度 [kgf/cm ²]	シアスパン比(M/QD)						
	0	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5	2.0
-20	R0(-20) S0(-20)						
0	P0-0-4 R0-0 S0-0			P' 1-0-4 R1-0 S1-0		P' 15-0-4 R15-0 S15-0	
20	P0-20* P' 0-20-2 P' 0-20-4 P 0-20-6 R0-20 S0-20	P05-20-6	P' 075-20-2 P' 075-20-4 R075-20 S075-20	P1-20* P' 1-20-2 P 1-20-4 P 1-20-6 R1-20 S1-20	P125-20*	P15-20* P' 15-20-2 P 15-20-6 R15-20 S15-20	P2-20*
40	P0-40*						
80	P0-80-4				P125-40*		P2-40*
120	P0-120-4						

* : Phase-1

表3 材料の力学的特性

鉄筋				コンクリート				
降伏強度	降伏歪	引張強度	ヤング係数	打設箇所	圧縮強度	圧縮強度時歪	割裂強度	ヤング係数
3650	0.196%	5134	2.02×10 ⁶	上部	264	0.155%	23.5	2.89×10 ⁵
			[kgf/cm ²]		312	0.155%	25.2	3.04×10 ⁵
				下部	358	0.170%	28.3	2.78×10 ⁵
					316	0.177%	24.2	2.74×10 ⁵

3. 実験概要

3.1 加力方法

加力装置は図2に示すように、試験体は上下左右4つの山型治具を介して、アンカーボルトによって門型フレームおよび鋼製ベッドに固定した。加力方法は、直接せん断実験では、両側の鉛直のオイルジャッキで総軸力を設定した一定値に保ち、接合面レベルに正負交番繰返しせん断力を加える。さらに、モーメントを加える場合は、アクチュエータは同じ位置で、せん断力のレベルに応じて接合面のシアスパン比(M/QD)が一定値になるように左右のオイルジャッキを独立に制御した。この際に、鋼製フレームの回転によるP-Δ効果も考慮して微調整している。加力サイクルは、変位制御とし試験体の水平変位の値δ = ±1mm, ±2mm, ±4mm, ±8mm(接合面から上部の測定点までの変形角で表すと、R = ±1/100, ±1/50, ±1/25, ±1/12.5)で繰返した。

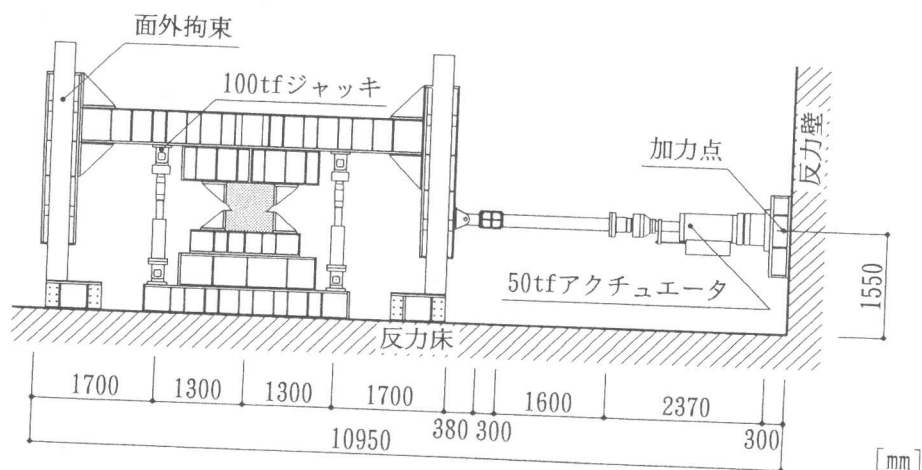


図2 加力装置図

3. 2 測定方法

変位測定位置図を図3に示す。縦筋に沿って接合面より上下10cmに埋め込んだ4本のインサートを介して全体水平変形、回転変形および軸方向変形を電気式摺動型変位計（精度1/500 mm）で測定した。これにより、曲げを受ける場合の接合面でのすべり変形は、式(1)

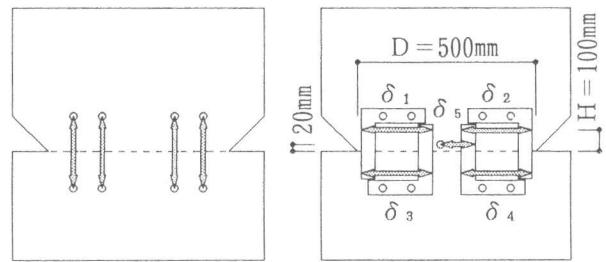


図3 変位測定位置図

に示すように、試験体を剛体として相対変形から回転変形（変形の2次成分も考慮する）を除くことにより算出した。また、接合面から20mmの高さでもすべり変形を直接測定し、式(1)によるすべり変形と一致することを確認した。

$$\delta_s = (\delta_T + \delta_B) / 2 - D \theta^2 / 2 \quad (1)$$

ここに、 $\delta_T = (\delta_1 - \delta_2) / 2$ 、 $\delta_B = (\delta_3 - \delta_4) / 2$ 、 $\theta = (\delta_T - \delta_B) / 2H$ 、 $H (=100\text{mm})$ 、 $D (=500\text{mm})$ 、 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ ：相対変位（図3参照）。

4. 破壊性状の概要

接合面の種類、すなわち、型枠面（P）、一体打ち（R）、シアキー（S）ごとに、試験体の破壊性状の概要を示す。

P試験体 M/QD=0で軸応力度20kgf/cm²の低軸応力度レベルが比較的低い試験体は、接合面が平滑であるためせん断応力度が軸応力度前後に達すると、接合界面間のコンクリート摩擦抵抗が減少し急激にすべりが生じた。その後、繰返し载荷によって縦筋のだぼ効果によりハードニング現象が起こり、耐力が上昇した。すべり変形は、何れの試験体も全体水平変形と一致している。

モーメントの存在する試験体では、切り欠き隅部が圧壊した。すべり変形の全体水平変形に対する比率はシアスパン比の増大に伴って徐々に減少する傾向がみられた。また、正負加力によって耐力上昇のレベルに差異がみられるのは、縦筋の歪レベルの相違によるものと考えられる。

R試験体 M/QD=0で軸応力度20kgf/cm²レベルの試験体の最大耐力は、軸応力度の2.5倍程度であった。すべり変形は、当然ながらほとんど生じなかった。しかし、引張軸力を導入した試験体では、その影響で上部壁板の危険断面（接合面）から高さ100mmの位置に亀裂が生じた。すべり変形は、繰返し载荷による亀裂幅の伸縮量として生じた。モーメントと軸力が作用していない試験体では、+1サイクルのピーク点直前で上部壁板にせん断亀裂が生じて終局に至った。全般にわたり、危険断面は接合面位置より高さ100mmの位置に移行した。

S試験体 接合面のシアキー強度が高いため、R試験体同様、危険断面位置が接合面より100mm上に移行した。M/QD=0で軸力作用の試験体では、シアキーのかみ合いによるせん断抵抗により耐力が上昇した。しかし、モーメントが存在するとシアキーが破壊面に沿ってせん断破壊し、耐力は±1サイクル目をピークに緩やかに低下した。

5. せん断抵抗とすべり変形

本報告では、接合面が平滑面の場合について、軸力、鉄筋比、シアスパン比をパラメータとして、せん断抵抗機構とすべり性状について検討する。

5. 1 直接せん断抵抗に対する軸力、鉄筋の効果

既往のせん断摩擦理論と同様に、直接せん断におけるせん断抵抗力は、式(2)のように圧縮軸力レベルと鉄筋比に比例する項の累加であらわされると仮定する。

$$V_u = V_c + V_s = \mu C + \lambda R \quad (2)$$

ここに、 $C (=N)$: コンクリート接合面の圧縮軸力 (=作用軸力)、 R : 全鉄筋の引張抵抗力 (= $A_R \sigma_y$, A_R : 鉄筋全断面積, σ_y : 鉄筋降伏強度)、 μ , λ : 比例係数である。

直接せん断における荷重変形関係の例を図4に示す。この繰返し载荷下におけるせん断抵抗機構は以下のように推定される。単調载荷あるいは新たな最大目標変位に至る場合は、せん断抵抗力は、式(2)であらわされるようにコンクリート接合面における摩擦力と鉄筋のだぼ効果の和であると考えられる。除荷後の逆向きの再载荷にいたる平坦な領域(第2、第4象限)におけるせん断抵抗では、鉄筋のだぼ効果が小さい(前の経験変位近くまで鉄筋が抵抗力を発揮しない)と考えられるため、コンクリート面の摩擦力が主体になっている一定レベルとみなせる。あるいは、この領域ではむしろ鉄筋が逆に作用して、コンクリート接合面のみかけの摩擦係数は実際よりも小さくなると考えられる。このときのせん断摩擦係数は、打設時に用いた型枠の材質の違いから明らかに異なることが明らかになった。すなわち、鋼製型枠を用いた接合面は滑らかであるため、その係数はアルミニウム製型枠で形成した接合面よりも低い。鉄筋のだぼ作用による抵抗は、この領域から最大強度に至るまでの上昇分に対応するものとして評価できる。これは、軸力の作用していない直接せん断試験体の最大耐力とよく一致しており、この上昇分が鉄筋比に比例して大きくなっていることから理解できる。

比例係数(μ および λ)を、図5に示すように各試験体の1サイクル目の正のせん断耐力から推測すると、概ね、アルミニウム製の型枠では $\mu = 0.7$ 、鋼製型枠では $\mu = 0.6$ 、 $\lambda = 0.4$ となり、厳密には繰返し载荷下での摩擦係数は異なることも考えられるが、これらの係数によって上記の繰返し载荷下における挙動も概ね説明できる。これらの係数には、さらにコンクリート強度、鉄筋強度、鉄筋径等の本実験にないパラメータが影響することが考えられるが、既往の直接せん断試験結果(単調载荷)を参照することにより詳細な検討が可能になる。

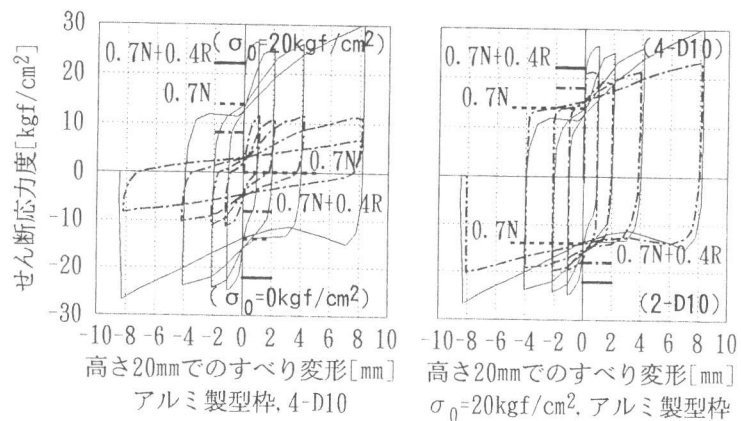


図4 直接せん断における荷重変形関係

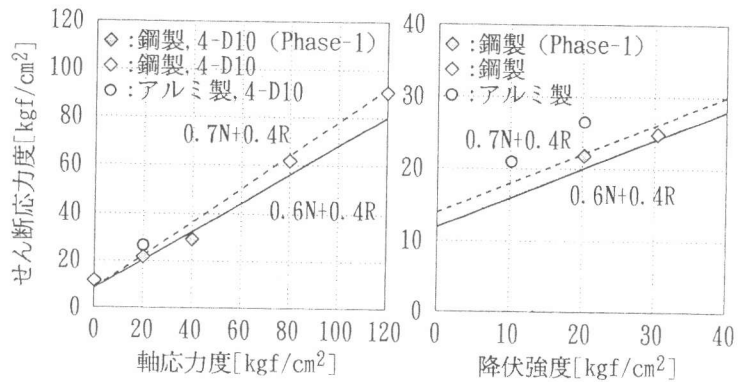


図5 直接せん断における最大荷重(1サイクル)

5. 2 曲げ・せん断・軸力を受ける場合のせん断抵抗とすべり変形

曲げを受ける場合のせん断力（せん断応力度）と全体水平変形（実線）との履歴関係の例を図6に示す。ここで全体水平変形としては何れの試験体でも接合面から高さ500mmの位置における変位として定義し、上部試験体を剛体として測定された変形量から算定した。また、同図中には接合面におけるすべり変形を破線で示した。

全体水平変形に対するすべり変形の比率は、シアスパン比が大きいほど大きい。すべり変形は、加力条件によって徐々に異なるため一律に分類することは困難ではあるが、そのすべり性状を、接合面のせん断抵抗機構と関連させて検討する。

曲げを受ける場合のせん断抵抗力は、直接せん断試験と同様に（圧縮側の）コンクリート面のせん断摩擦力とだぼ作用との累加であらわされると仮定するが、これは以下のように単調載荷と繰返し載荷で分類して考える必要がある。

単調載荷では、図7(a)に示すように、引張鉄筋降伏時の圧縮側コンクリート面に作用する最大圧縮軸力Cは、圧縮鉄筋の軸力負担を無視すれば次式であらわされる。

$$C = N + T \quad (3)$$

ここに、N：作用軸力、T：引張鉄筋の降伏耐力（ $= R / 2$ ）である。したがって、せん断抵抗力は、圧縮域でのコンクリート面の摩擦力と降伏していない鉄筋のだぼ作用を累加して、

$$V_{um} = \mu(N + T) + \lambda T \quad (4)$$

にまで達しようと考えられる。これは、直接せん断におけるせん断抵抗力（式(2)）をやや下回るがかなり近いレベルになりうることを示している。しかし、圧縮域における軸力が一様ではないのでこの上限値より低くなる可能性がある。曲げ降伏時におけるせん断力がこのレベルに近い場合は、当然ながらすべり変形が生じることが予想される。

一方、ある方向で引張鉄筋が降伏した後、反対方向への繰返し載荷におけるせん断抵抗は上記とは異なる。すなわち、降伏後の繰返し載荷時には、引張鉄筋が圧縮側になる際にコンクリート面よりも以前に圧縮力（降伏応力）を負担する。した

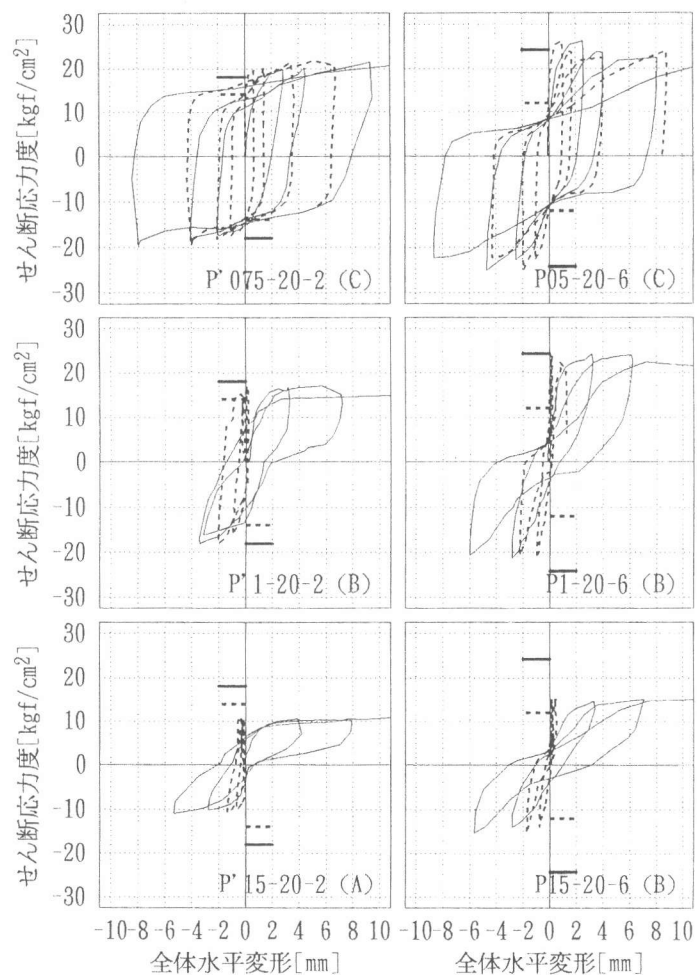


図6 曲げを受ける場合の荷重変形関係

がって、図7 (b)に示すように、降伏時のコンクリート面の圧縮力は、

$$C = N + T - T = N \quad (5)$$

となり、すべり変形が生じてだば作用が有効に作用するまでのせん断抵抗力は、

$$V_{ur} = \mu C (= V_c)$$

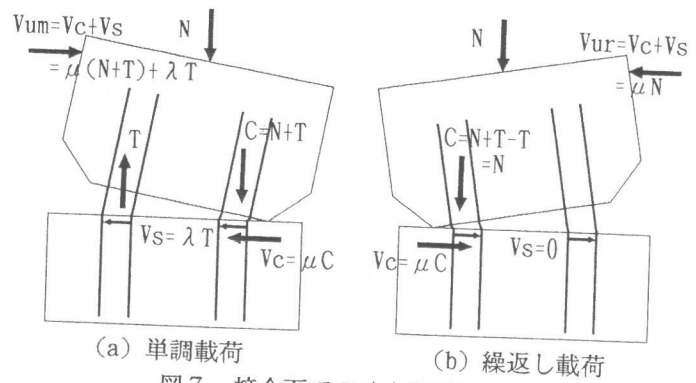


図7 接合面でのせん断抵抗機構

(6)

にまで減少する可能性がある。

以上のせん断抵抗機構にもとづいて、単調荷重時および繰返し荷重時におけるすべり性状は、曲げ終局時の最大のせん断力レベル (V_f) に応じて次の3タイプに分類しうると考えられる。

- (A) V_f が V_{ur} を下回る場合は、繰返し荷重下でもすべり変形は小さい。
- (B) V_f が V_{ur} 以上で V_{um} よりは小さい場合は、すべり変形は単調荷重でかなり小さいが、繰返し荷重下においては増大する。
- (C) V_f が V_{um} に近い、またはそれより大きい場合、すべり変形は単調荷重下において生じ、繰返し荷重でかなり大きくなる。

直接せん断試験から求めた係数を用いて算定したせん断抵抗力レベル V_{um} 、 V_{ur} をそれぞれ図6中の太実線と太破線で示した。ただし、 $V_{um} = V_c$ なので図中には V_c を示した。また、図中に上記の分類結果も示した。他の試験体も含めて、以上の分類法によって試験体のすべり性状が概ね説明しうる。

6. 結論

- (1) シアスパン比が減少するにしたがって、また、軸応力度レベルが減少するにしたがって、曲げ降伏接合面でのすべり変形は増大する。
- (2) これらのすべり変形は、(A) 繰返し荷重でも小さい、(B) 単調荷重では小さいが繰返し荷重では大きくなる、(C) 単調荷重で生じる、の3タイプに分類できる。
- (3) これらの分類は、それぞれ単調および繰返し荷重下におけるせん断抵抗機構によって、直接せん断試験の結果と対応させて説明することが可能である。

《謝辞》

本研究は、日米共同研究プログラム「プレキャスト耐震構造システム」と文部省科学研究費(課題 No. 02302078)によって行われた。関係各位ならびに実験に際して御助力頂いた平野雄也氏に感謝します。

《参考文献》

- [1] 金本清臣・壁谷澤寿海：曲げ・せん断・軸力を受けるプレキャスト接合面の要素実験、コンクリート工学年次論文報告集第13巻第2号、pp. 635-640、1991.6