

論文

[2101] プレキャスト部材接合部におけるダウエル筋のせん断伝達能力

小川祥平^{*1}、楨谷栄次^{*2}、謝爽^{*3}

1. はじめに

架構式プレキャスト鉄筋コンクリート構造を構成する柱および梁材の界面にコッターをもたない水平または鉛直接合部におけるせん断伝達メカニズムを解明するため、接合幅、鉄筋径および鉄筋の配置、接合面における摩擦、接合面垂直方向圧縮外力、単調および繰り返し載荷、横方向主筋拘束筋等の因子とせん断挙動との関係を直接せん断実験によって調べた。[1][2][3]

本論文は、前年までの研究成果をもとにコッターの無い接合部のせん断抵抗メカニズムをダウエル力と摩擦力の和として評価し、接合幅、接合面垂直方向圧縮外力、接合部のダウエル強度の鉄筋の配筋位置を影響因子とした直接せん断実験結果に対して、せん断挙動と評価式との対応に関して検討を試みた。以下に得られた成果を報告する。

2. 実験概要

2. 1 試験体

本実験に用いた試験体は、P C a フレーム構造における接合部を想定したもので、幅×長さ×高さが225×450×(165, 195, 210, 217.5, 225)mmの2個のP C a 部材を接合幅0・15・30・60・120mmのジョイントと、4-D19のフープ状の接合筋により接合した。ダウエル効果のみを調べるための試験体には、接合面の付着を0.3mmのテフロンシートを貼ることにより無くした。試験体には、表-1に示すように接合幅の違いによる5体とし、ダウエル効果および摩擦効果による軸拘束効果を調べるために、それぞれ3体ずつの総計15体を作成した。

2. 2 使用材料

表-2にコンクリート、ジョイントモルタルおよび鉄筋の材料性状を示す。また、P C a 部材部には普通ポルトランドセメント、山砂、碎石を使用し、水セメント比を48.3%としてコンクリートを調合した。ジョイントモルタルには、普通ポルトランドセメント、川

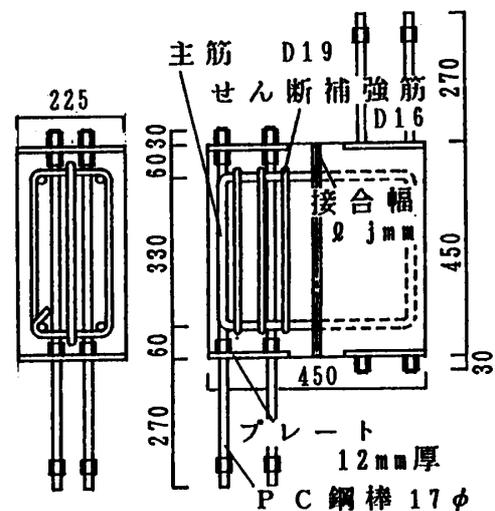


図-1 試験体配筋図

表-1 試験体一覧

試験体名	接合幅 (mm)	接合筋 SD-345 (接合筋比)	摩擦効果	軸拘束力 (kgf/cm ²)
JPC 0-000	0	4-D19 (1.14)	摩擦効果無し	0
JPC 15-000	15			
JPC 30-000	30			
JPC 60-000	60			
JPC120-000	120			
JPC 0-001	0	4-D19 (1.14)	摩擦効果有り	0
JPC 15-001	15			
JPC 30-001	30			
JPC 60-001	60			
JPC120-001	120			
JPC 0-201	0	4-D19 (1.14)	摩擦効果有り	20
JPC 15-201	15			
JPC 30-201	30			
JPC 60-201	60			
JPC120-201	120			

*1 関東学院大学大学院 (正会員) *2 関東学院大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*3 関東学院大学工総研 研究員

砂を使用しセメントと砂を1:2の割合で混ぜ、水セメント比53.0%で調合した。

2.3 加力方法および測定方法

加力方法は、図-2に示すように試験体を配置し、P C a 部材部内部に配したP C 鋼棒に、接合部中心線状に取り付けた押し引き両用のオイルジャッキを取り付け、正負交番繰り返しにより载荷した。加力サイクルを2個の部材の相対すべり変位に対し0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15mmの変位制御によって挙動を調べた。軸拘束力を調べる試験体は、接合部中心線状に垂直方向から部材拘束力(20kg/cm²)をオイルジャッキを用いて載加した。

測定方法は、接合筋上における部材間の相対ずれ変位、相対目開き変位等の変形を高感度変位計によって測定した。

表-2 材料性状一覧

試験体名	打設箇所	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kgf/cm ²)	比重
		接合部	388	23.3	1.72
JPC 0-000	部材部	276	23.6	2.09	2.5
JPC 15-000		233	16.6	2.11	2.3
JPC 30-000		243	16.6	2.63	2.3
JPC 60-000		260	22.3	2.54	2.3
JPC120-000		241	16.7	2.46	2.2
JPC 0-001	部材部	276	23.6	2.09	2.5
JPC 15-001		237	16.7	2.44	2.3
JPC 30-001		243	16.6	2.63	2.3
JPC 60-001		260	16.6	2.54	2.3
JPC120-001		241	16.7	2.46	2.3
JPC 0-201	部材部	276	23.6	2.09	2.5
JPC 15-201		264	19.8	2.41	2.3
JPC 30-201		264	19.8	2.41	2.3
JPC 60-201		254	24.7	2.66	2.2
JPC120-201		291	16.8	2.21	2.3

鉄筋の種類	降伏点応力 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁶ kgf/cm ³)	伸び率 (%)
D16	3980	5734	1.95	16.7
D19	3928	5498	1.94	17.2

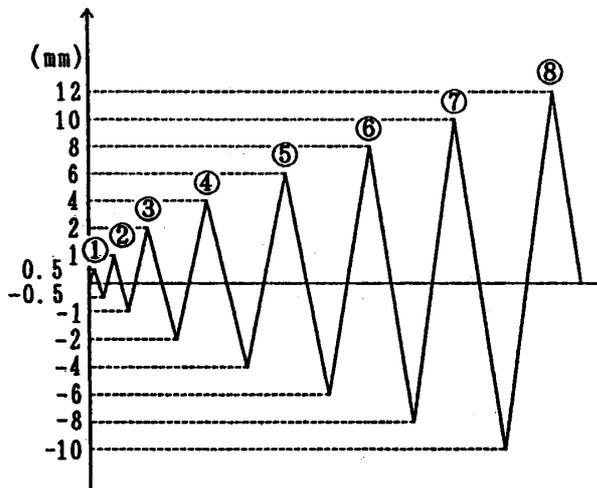


図-3 加力サイクル

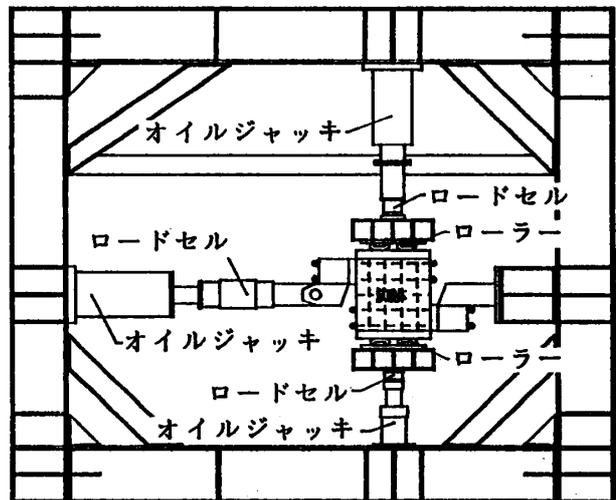


図-2 加力装置図

3. ダウエル作用に対するモデル化とせん断耐力式の検討

3.1 ダウエル効果

せん断力を受けたコンクリート間の接合面において鉄筋がせん断伝達を行なうとき、接合面から鉄筋の塑性ヒンジ間では、支圧応力が集中的に生じ、その応力度は接合面における相対すべり変位δsが数mmになると、コンクリートの圧縮強度の数倍になる。これは弾性支承理論からも報告されている[4]。したがって、この接合面と、鉄筋の曲げモーメントが最大になり、塑性ヒン

ジを形成する個所までの領域 $a (= C1 \cdot d_r)$ において、コンクリートの支圧応力 $\sigma_{cc} (= C2 \cdot f_c)$ が一様に作用すると仮定すると、コンクリートの支圧による鉄筋のダウエル強度 Q_{dc} は、次式によって与えられる。

$$Q_{dc} = \sigma_{cc} \cdot a \cdot \Sigma d_r \cdot \left(\frac{\delta s}{\delta s_l} \right)^{1/4}$$

$$= C_d \cdot f_c \cdot \Sigma d_r^2 \cdot \left(\frac{\delta s}{\delta s_l} \right)^{1/4} \quad (1)$$

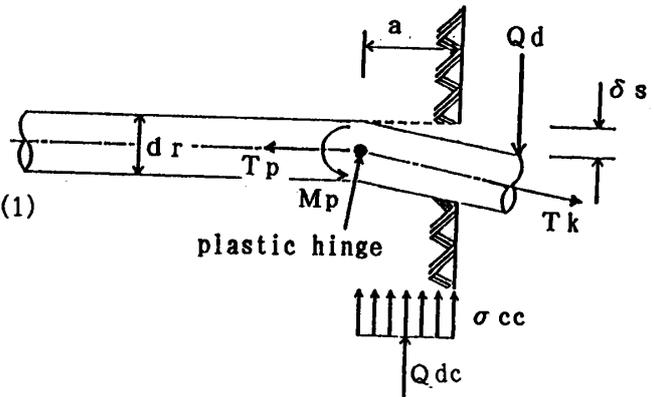


図-4 ダウエルメカニズム

C_d : 係数

f_c : コンクリート圧縮強度

δs_l : 支圧強度限界すべり変形

Σd_r^2 : 鉄筋径の2乗の総和

3.2 軸拘束力による摩擦効果

接合面の垂直方向に圧縮応力(軸力: N)が作用すると、せん断強度としては、鉄筋のダウエル効果に摩擦効果が累加される。この摩擦力は、直接せん断実験によって得られた結果を用いて、外部圧縮力を加えたせん断強度からダウエル強度を差し引くことによって、1次回帰式 ($\mu = 0.43 + 0.018 \delta s$) において、支圧強度の限界すべり変形を $\delta s_l = 4\text{mm}$ と仮定すると、摩擦係数 $\mu = 0.5$ が得られ、次式が導かれた。

$$Q_n = \mu \cdot N = 0.5 N \quad (2)$$

この結果は、修正Mohr-Coulombの破壊基準と極限解析からからも同一の結果が得られている。[3]

3.3 鉄筋の塑性ヒンジの位置

接合幅 l_j をもつ接合部において、その中心に鉄筋の曲げモーメントの反曲点が生ずると仮定すると、最大曲げモーメントの接合面からの位置 a は、弾性支承理論から、支承係数 β と接合幅 l_j によって次式で与えられる。[4]

$$a = \frac{1}{\beta} \tan^{-1} \frac{1}{(1 + \beta l_j)} \quad (l_j \leq 2.73/\beta) \quad (3)$$

また、接合幅 l_j が大きくなると、鉄筋に生じる曲げモーメントの分布は、図-5 に示すように接合部とプレキャスト部において、接合面の近傍で最大曲げモーメントが起り、接合面においては、曲げモーメントが零になる。鉄筋において接合部の中央部 ($x = l_j/2$) で、鉄筋の曲げモーメントが零になると仮定すると、 a は、弾性支承理論より次式のように書き改め

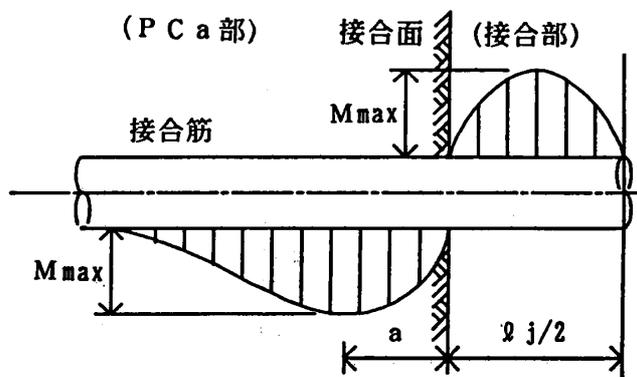


図-5 接合幅の大きい場合、鉄筋に生ずるモーメント分布

られる。[5]

$$a = \frac{\ell_j}{8} \quad (\ell_j > 2.73/\beta) \quad (4)$$

3. 4 ダウエル強度の累加式

以上より、ダウエル強度 Q_d は、 $\delta_s \leq \delta_{sl}$ のとき支圧強度で与えられる。本実験では被り厚さが少ないため、被り厚さによる低減係数 ϕ を乗じたものをダウエル強度 Q_{dc} とする。

$$\begin{aligned} Q_d &= Q_{dc} + Q_n \\ &= \phi \cdot C_d \cdot f_c \cdot \Sigma d_r^2 \cdot (\delta_s / \delta_{sl})^{1/4} + 0.5N \end{aligned} \quad (5)$$

ここで ϕ は、被り厚さの大きい接合筋の直接せん断実験と本実験を比較することによって[1][2]、0.72の値が得られた。係数 C_d は、鉄筋径 $d_r = D16, D19, D22, D25$ 、接合幅 $\ell_j = 0, 15, 30, 60, 90, 120\text{mm}$ の場合の S 型試験体による直接せん断実験より得られた実験結果を用いて、支圧強度限界すべり変位 $\delta_{sl} = 4\text{mm}$ 時のダウエル強度(1)式および(3)式から、弾性支承係数 β を

$$\beta = \frac{0.39}{d_r - 0.51} \quad (6)$$

と仮定すると、次式のように得られる。[5]

$$C_d = 7.92 - 2.17 d_r \quad (7)$$

4. 実験結果および考察

4. 1 ひび割れ及び破壊状況

摩擦有りの試験体は、軸拘束力有り・無し共に接合部と $P_c a$ 部の付着面にひび割れが発生し、摩擦無しの試験体は、接合部の接合筋上部に割裂ひび割れによって発生した。摩擦有りの試験体は、接合部の接合筋上部に割裂ひび割れが発生し、摩擦の有りおよび無しの両試験体とも変形が増大すると、支圧破壊へと進展していく。また、軸拘束力有りの試験体は、図-10に示すように、最大耐力が大きいため軸拘束力無しの試験体に比して接合面のコンクリート破壊が激しいものとなった。被りが少ないため、接合筋上部の接合面より部材部に45度の角度で亀裂が入り、その部分より剥落することが認められた。

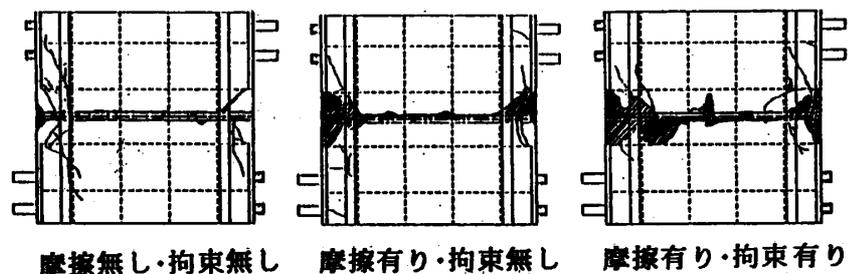


図-6 破壊性状図

4.2 荷重-すべり変位関係

荷重-すべり変位包絡線を図-7に示す。これより、拘束力が無く摩擦効果有りおよび無し試験体においては、すべり変位が4mm以降ほとんど荷重の増加が見られなかった。しかし、拘束力有りものは、すべり変位4mm以降にも荷重の上昇が見られた。摩擦有り-軸力無しと、摩擦無し-軸力無しの試験体の比較としては、相対すべり変位が0~4mmまで影響するが、それ以降相対すべり変位12mmまでは摩擦の有り・無しによる影響は殆ど見られない。

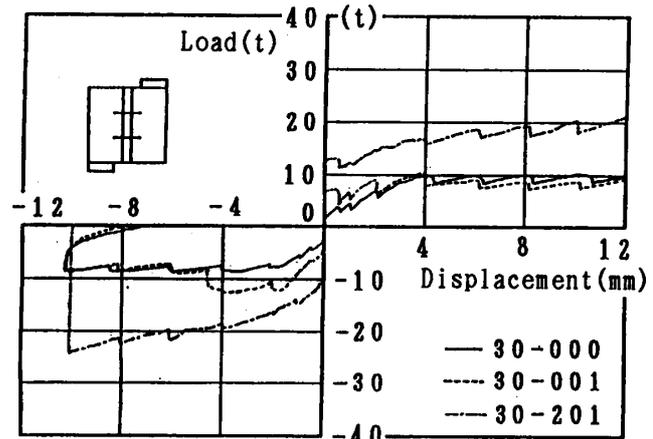


図-7 荷重-すべり変位

4.3 限界すべり変形時荷重

限界すべり変形までの包絡線と理論カーブの関係を図-8 ($\delta s=4mm$)に示す。これにより実験値は、(5)式より算出した理論カーブに対して近い値を示している。計算値は、Pca部のコンクリート圧縮強度に依存しているため試験体により異なっている。限界すべり変位時の計算値と実験値の関係を図-9にプロットした。これにより、計算値と実験値に対する比が概ね±20%以内にあることが認められた。

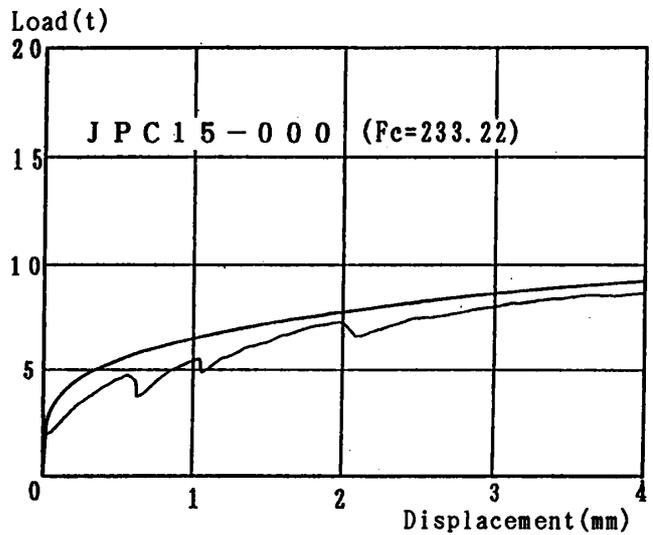


図-8 包絡線と理論カーブの関係

4.4 最大荷重

実験結果一覧を表-3に示し、最大荷重と接合幅の関係を図-10に示す。接合幅の比較としては、相対的に見ると接合幅のない試験体は他の試験体よりも耐力が高く接合幅の増大に伴って、耐力は減少する傾向に有る事が認められた。また、軸拘束力無し-摩擦効果無し、軸拘束効果-摩擦効果有り、軸拘束力有り-摩擦効果有りの順に耐力は大きくなった。

4.5

ダウエル、せん断摩擦、および拘束力効果

接合面の付着効果および摩擦効果の無い試験体の耐力を全てダウエル効果に支配されていると考え、それを基にして各試験

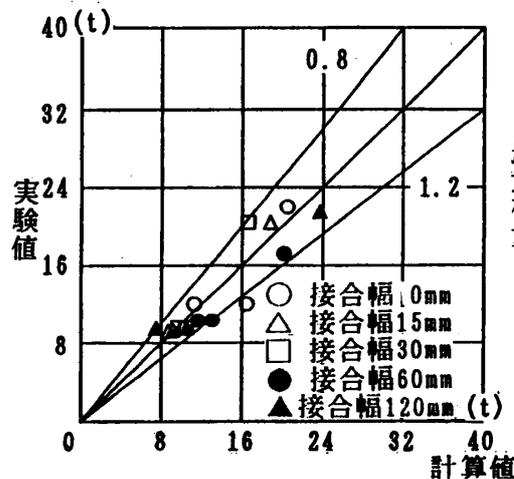


図-9 計算値/実験値の関係

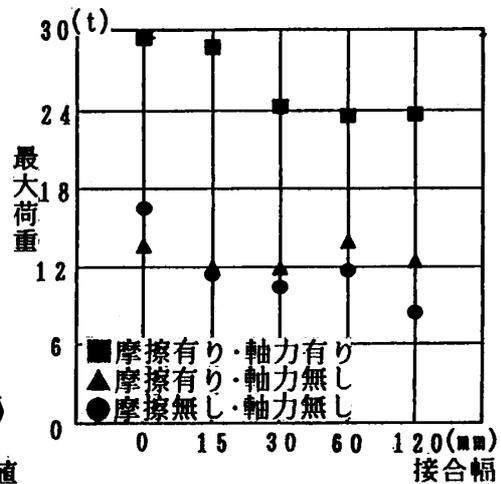


図-10 最大荷重と接合幅の関係

体の実験値からダウエル効果・せん断摩擦効果および拘束力効果の3つのメカニズムごとに分解したものを図-11に示す。接合部初亀裂発生時、Pca部発生時、限界すべり変形にしたがって、ダウエル効果は増大し、摩擦効果は減少していく傾向にあった。

表-3 結果一覧表

試験体名	初亀裂発生時荷重		最大荷重	限界すべり変形時荷重
	接合部	部材部		
JPC 0-000	7.4	9.9	16.5	16.5
JPC 0-001	10.4	10.4	13.6	11.3
JPC 0-201	29.5	29.5	29.4	20.5
JPC 15-000	3.4	5.4	11.4	8.7
JPC 15-001	5.0	7.0	12.0	9.2
JPC 15-201	17.5	17.5	28.7	18.8
JPC 30-000	2.3	4.0	10.4	9.7
JPC 30-001	7.1	7.2	11.9	10.5
JPC 30-201	12.7	12.8	24.3	16.6
JPC 60-000	5.1	6.1	11.7	11.7
JPC 60-001	8.0	9.4	13.9	13.0
JPC 60-201	22.3	23.4	23.6	20.2
JPC120-000	3.9	3.1	8.4	7.4
JPC120-001	4.9	6.1	12.4	10.8
JPC120-201	14.9	21.3	23.7	23.4

5. まとめ

PCa部材接合部の直接せん断実験より、次の事柄が示唆される。

- (1). 最大荷重は、接合幅が60mmまでの範囲で接合幅も増大に伴い減少していく傾向が認められた。
- (2). 本実験に用いた計算式は、実験値(4mm)に対して概ね一致した。
- (3). 接合部初亀裂発生時、部材部初亀裂発生時、限界すべり変形(4mm)に従い、ダウエル効果増大していき、摩擦効果は、減少していく。
- (4). 摩擦効果は、軸拘束効果に大きく影響されることが認められた。

紙面の関係で、諸式の展開が十分に記述できなかった。詳しくは別の機会に公表したく思っているが、出版は文献[5]に示されている。

謝辞 本研究は、平成4年度総合研究(A)-架構式プレキャストコンクリート造の耐震性能に関する研究(研究代表者:望月 重 武蔵工業大学教授)による文部省科学研究助金によって行われた成果の一部である。ここに謝意を表す次第である。

参考文献 [1] 油田憲二: プレキャスト部材接合部のせん断挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 13-2, pp. 641-645, 1991. 6
 [2] 西岡幸一: プレキャスト部材接合部のダウエル挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 14-2, pp. 481-486, 1992. 6
 [3] 西岡幸一: 架構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(その3)、日本建築学会大会学術梗概集、pp. 755-756, 1992. 8
 [4] Bengt F. Friberg, "Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements," Transactions, ASCE, V. 105, 1940, pp. 1076-1093
 [5] 岡田賢一: 高層プレキャスト壁式ラーメン柱の力学的挙動に関する研究、関東学院大学大学院、修士論文(1993)

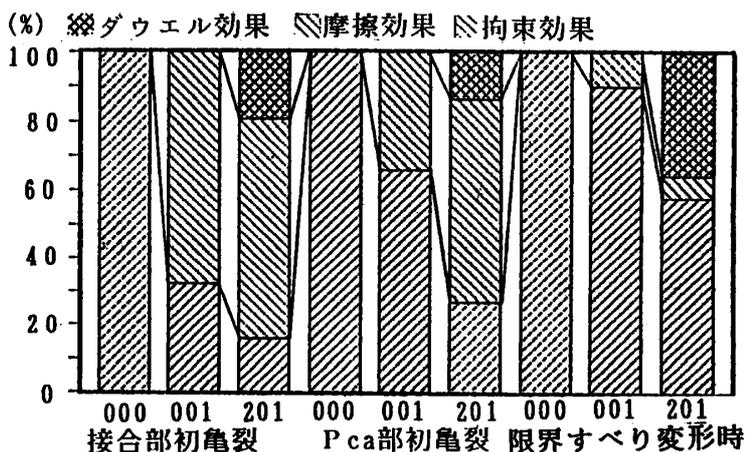


図-11 ダウエル、せん断摩擦、および拘束力効果の比較