

論文 ジョイント部のせん断すべり破壊基準に関する検討

金津努*1・西内達雄*2

要旨：グラウト注入されたコンクリートブロック間のジョイント部でのせん断抵抗挙動を、実験および有限要素解析（FEM解析）により検討した。実験結果から、種々のせん断面の状態に対するジョイント部のせん断すべり破壊基準を設定することができた。また、非線形接合要素（ボンド要素）を用いたジョイント部の力学モデルについて検討し、実験結果との比較から、提案した力学モデルの有効性を検証した。
 キーワード：ジョイント、せん断すべり破壊基準、非線形接合要素、アーチダム

1. はじめに

アーチダムでは、一般的に鉛直方向のジョイントが設置され、ここにグラウト注入する事により2つのコンクリートブロック間の応力の伝達が行われる。従来、アーチダムの解析においては、計算機の容量、計算時間の関係から構造系を連続体として取扱い、応力、変形の評価を行ってきた。しかし実際には、例えば、気温変化によるダムの挙動を検討する場合には、ジョイント部の挙動の影響が大きく、ダムの構造を忠実にモデル化する必要がある。最近の計算機および解析技術の発達に伴い、このようなダムのジョイント部の挙動を考慮した非線形解析が実施できる環境になってきた[1][2]。

本研究は、FEM解析に適用するダムのジョイント部力学モデルを開発する事を目的として、グラウトを施したコンクリートブロック間ジョイント部の挙動を、モデル試験体により実験的に把握し、この結果を反映したジョイント部の力学モデルについて検討したものである。

2. ジョイント部の一面せん断実験

2.1 試験体と使用材料

実験に用いた試験体は図-1に示すように、40×76×15cm寸法のマトック型せん断試験体である。せん断面は中央の15×30cmである。試験体はせん断面を境界にして2つのコンクリートブロックを先に作製し、十分な強度が発現した後で、ジョイント部の幅を2mmとしてここにペースト（W/C=80%）をポンプ（筒先50 kgf/cm²圧力）で注入し、接合したものである。ペースト注入後試験までの日数は14日以上である。

コンクリートの配合は表-1に示す通りである。セメントは普通ポルトランドセメント（比重

*1（財）電力中央研究所構造部建設材料グループ研究主幹グループリーダー、工修（正会員）
 *2（財）電力中央研究所構造部建設材料グループ担当研究員、工修（正会員）

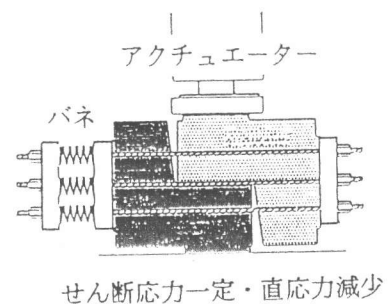
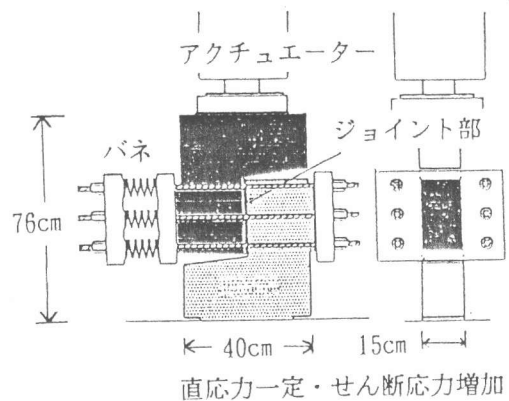


図-1 試験体および試験状況

3.15)、粗骨材は秩父産砕石(粒径5~13mm, 比重2.70)、細骨材は鹿島産(比重2.65)のものを使用した。実験は接合部でのせん断すべり破壊を試験するため、コンクリート部分でひびわれたり、破壊しないように鉄筋で補強し、十分に養生した。

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
55	42	10±2	4±1	146	270	809	1138	2.16

2.2 試験方法

試験体への荷重は、図-1に示すように2つの方法を採用した。

①直応力一定・せん断応力増加タイプ

せん断面へ所定の直応力を導入し、この応力度を一定に保持したまません断力を加力してすべり破壊させる。

②せん断応力一定・直応力減少タイプ

せん断面へ直応力(後に導入するせん断力により破壊しないような十分大きな直応力)を作用させてから所定のせん断応力を導入する。その後、このせん断応力を一定に保持したまま直応力を除荷してすべり破壊させる。



図-2 相対変位計測位置

実験パラメータは表-2に示す通り、ジョイント接合面の処理状態(型枠を外したままの無処理と軽微なチップング処理)、応力(直応力、せん断応力)レベル等とした。実験において測定した項目は、荷重荷重とせん断面の相対ずれ変位量(ジョイント部を挟んで15.2cm間の相対変位:図-2参照)である。

表-2 実験パラメータ

ジョイント部 接合面の状態	応力経路	
	直応力一定・せん断応力増加	せん断応力一定・直応力減少
無処理	$\sigma_n = 2, 5, 10, 12$	$\tau = 8, 12, 15, 21$
チップング処理	$\sigma_n = 1, 2, 5, 10, 15, 18$	$\tau = 17, 20, 23, 28$

(直応力 σ_n (+圧縮), せん断応力 τ , 単位kgf/cm²)

3. ジョイント部のせん断すべり性状

3.1 せん断応力-ずれ変形の関係

直応力をパラメータとして、接合面が無処理の場合、チップング処理した場合のせん断応力とずれ変形量との関係を、それぞれ図-3および図-4に、せん断応力をパラメータとして、接合面が無処理の場合、チップング処理した場合の直応力とずれ変形量との関係を、それぞれ図-5および図-6に示す。これらの図から、以下の事柄が判断される。

(1) せん断面が無処理の場合(図-3, 5)

a. 直応力一定・せん断応力増加タイプ

①せん断応力の増加とともにずれ変形も大きくなり、せん断応力-ずれ変形関係はほぼ直線的で

ある（やや上に凸のせん断応力-ずれ変形関係であるがほぼ直線的）。あるせん断応力レベルで急速にずれ変形が増大（すべり破壊）する。

- ②せん断応力-ずれ変形の関係の傾きは、せん断面に導入された直応力に拘らず、ほぼ同じ大きさである。
- ③せん断面に導入された直応力の大きさは、すべり破壊開始時のせん断応力（耐力）に影響する。
- ④すべり破壊面の観察から、せん断すべりはコンクリートブロック間に注入されたペーストがコンクリートから剥離することにより生じていることが判断された。
- b. せん断応力一定・直応力減少タイプ
- ⑤せん断応力を一定に保持する荷重機構であることから、すべり破壊の発生により瞬時に数mmずれが進行する。
- ⑥直応力減少時には、すべり破壊の発生まではずれ変形はあまり進行しない。
- ⑦せん断面に導入された直応力レベルは、すべり破壊発生時のせん断応力（耐力）に影響する。

⑧直応力とすべり破壊時のせん断応力（耐力）とは、荷重形態に影響されない。

(2) せん断面のコンクリートをチップングした場合（図-4, 6）

a. 直応力一定・せん断応力増加タイプ

- ①せん断応力-ずれ変形の定性的な傾向は、接合面が無処理の場合と基本的な同じである。
- ②せん断応力-ずれ変形の傾きは、接合面無処理の場合と比較して、あまり変わらない。
- ③すべり破壊が発生する時のせん断応力は、接合面が無処理の場合と比較してチップング処理の場合の方が大きい。
- ④すべり破壊は、コンクリートブロック間のペーストの剥離により発生するが、チップングした凹部分にペーストが入り込んでコンクリートとペーストとの付着耐力が増加している分、せん断耐力が増加するものと考えられる。

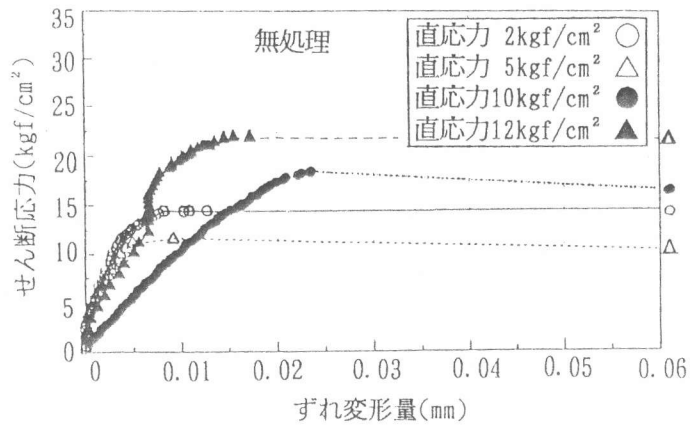


図-3 せん断応力とずれ変形量との関係（接合面無処理）

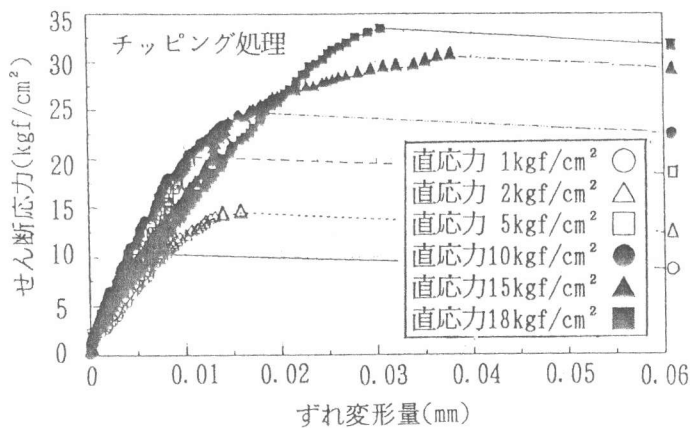


図-4 せん断応力とずれ変形量との関係（接合面チップング処理）

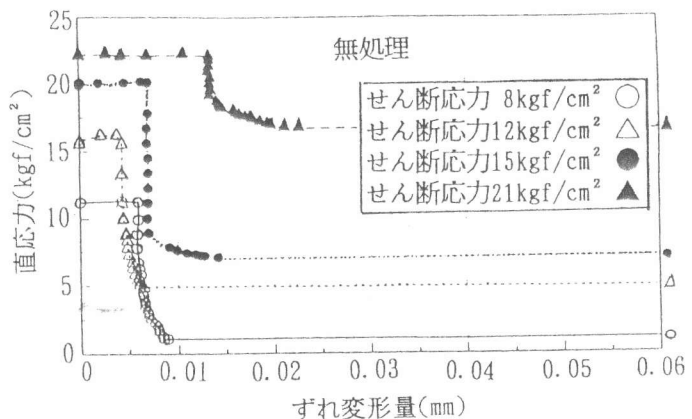


図-5 直応力とずれ変形量との関係（接合面無処理）

b. せん断応力一定・直応力減少タイプ

⑤直応力-ずれ変形の定性的傾向は、接合面が無処理の場合と基本的に同じである。

⑥すべり破壊が発生するときの直応力は、接合面が無処理の場合と比較してチップング処理の場合の方が小さい。

3. 2 せん断すべり破壊基準

接合面無処理の場合とチップング処理の場合の、すべり破壊時の直応力とせん断応力との関係を図-7に示す。この図から次のことが分かる。

①せん断すべり破壊時の直応力とせん断応力との関係は、載荷方法の相違（直応力一定・せん断応力増加タイプとせん断応力一定・直応力減少タイプ）に関わらず、ほぼ一つの直線で表すことができる。

②接合面が無処理の場合には軽微なチップング処理を施した場合に比較して、破壊時のせん断応力度は約20~30%小さくなる。

④せん断面の状態に対して、せん断すべり破壊基準はモールクーロンの破壊則 $\tau = \alpha + \beta \cdot \sigma_n$ で表現できる。各条件ごとに実験結果を回帰すると以下の式が得られた。

$$\tau = 10.2 + 0.733 \sigma_n \quad (\text{表面無処理}) \quad (1)$$

$$\tau = 13.1 + 1.140 \sigma_n \quad (\text{軽微なチップング処理}) \quad (2)$$

ここで、 τ : せん断応力 (kgf/cm²) σ_n : 直応力 (kgf/cm²)

4. ジョイント部の力学モデルに関する検討

以上よりせん断応力とずれ変形の定性的傾向が、破壊基準に関しては定量評価が得られたので、これらの結果に基づいてジョイント部の力学モデルを検討する。

表-3 解析で用いたコンクリート、ペーストの物性

	圧縮強度	引張強度	弾性係数	ポアソン比
コンクリート	297~411	24.2~28.6	$1.9 \sim 3.0 \times 10^5$	0.2
ペースト	157~207	—	$7.6 \sim 9.0 \times 10^4$	0.2

(各試験体ごとに物性値は異なる。単位kgf/cm², ポアソン比は無次元)

FEM解析で用いた要素分割と拘束条件とを図-8に示す。検討したジョイント部の力学モデルは、せん断面に垂直な方向に軸剛性、並行方向にせん断剛性を有し、クーロン則に従った破壊

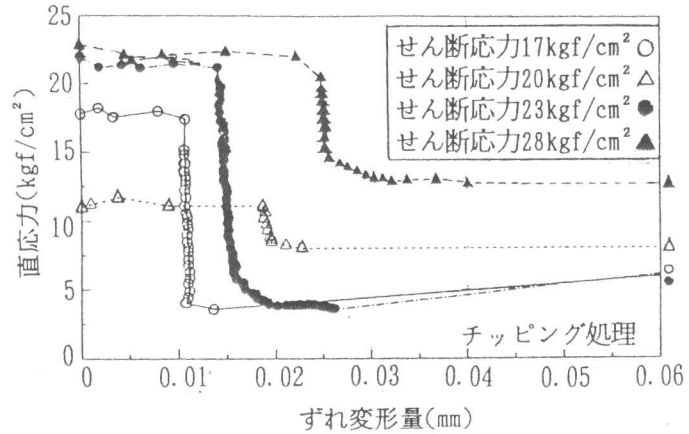


図-6 直応力とずれ変形量との関係 (接合面チップング処理)

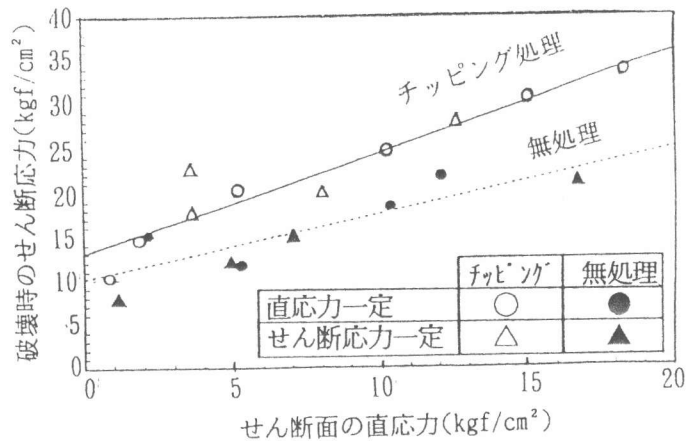


図-7 ジョイント部のせん断すべり破壊基準

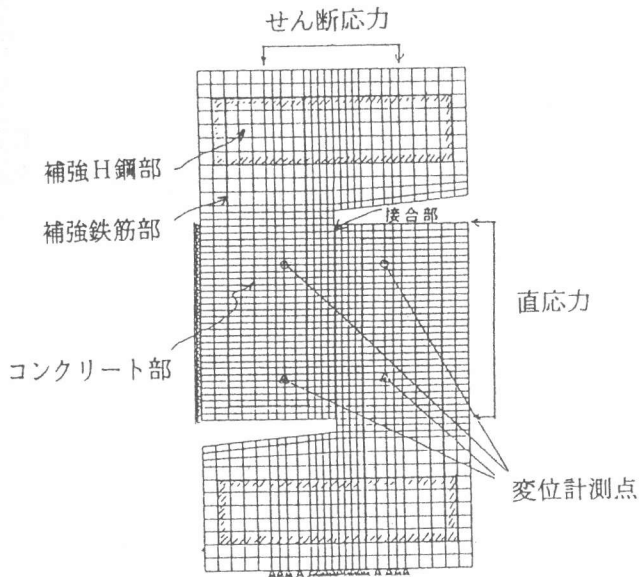


図-8 有限要素解析で用いた要素分割と拘束条件

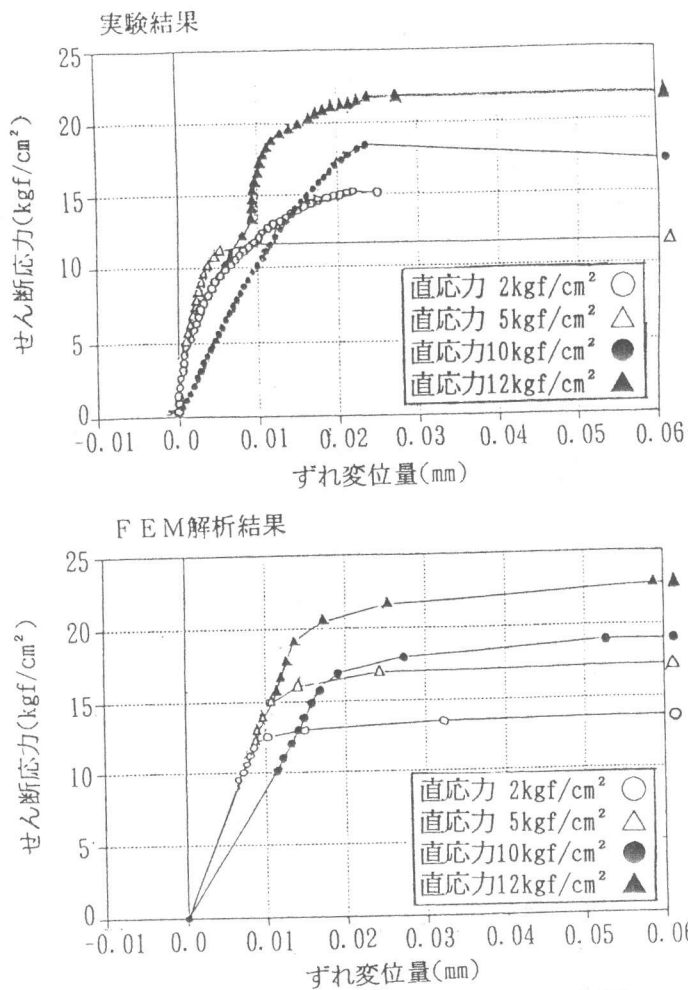


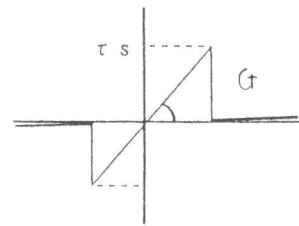
図-10 直応力一定・せん断応力増加での比較(接合面無処理)

れペーストの弾性係数およびせん断弾性係数を用いた。ペーストおよびコンクリートの物性値を表-3に示す。

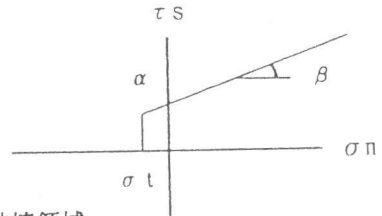
作用応力とずれ変形量との関係に着目し、実験結果とFEM解析結果とを比較して図-10お

(a) $\tau - \gamma$ 関係

せん断破壊後の応力



(b) 破壊包絡線



破壊領域

$$\tau s \geq \alpha + \sigma n \cdot \beta$$

$$\sigma n \geq \sigma l$$

図-9 接合要素の力学特性

条件を持つ接合要素である。接合要素の特性と破壊条件は以下の通りである(図-9参照)。実験では接合部から離れたコンクリート部分の一部にひびわれが認められたため、解析でのコンクリート部分は非線形特性としてKupfer則[3](コンクリート強度に応じて各係数は設定)、ひびわれ特性として二軸応力判定を適用し、ひびわれ発生後は全応力を解放するものとした。

軸剛性 ; $\sigma = E \varepsilon$ (3)

剥離破壊後は、剛性の全成分を零、応力の全成分を解放。

せん断剛性 ; $\tau = G \gamma$ (4)

すべり破壊後は、せん断剛性を零、軸剛性、軸応力は保持。

軸剛性とせん断剛性には、それぞ

よび図-11に示した。なお、実験値で初期のずれ変形量が負側に生じている理由は、直応力の導入に伴う接合部のせん断変形により生じたものである。これらの図から、

- ① 2種類の荷重形態の場合とも、作用応力-ずれ変形量関係の解析値と実験値とは良好に一致している。
- ② 急速に変形が進行する直前の点を計算上の破壊と判定すると、破壊時点の直応力とせん断応力の関係(破壊包絡線)の実測値と計算値も、良好に一致している。

以上から、ここで検討したジョイント部の力学モデルは妥当なものであると判断される。なお、コンクリートの非線形特性によるひびわれの影響は、接合部のすべりや接合面近傍のコンクリートには認められなかった。

4. まとめ

グラウトしたコンクリート

図-11 せん断応力一定・直応力減少での比較(接合面 χ ピソ χ 処理)

ブロックのジョイント部の挙動を把握することを目的として、モデル試験体によりせん断実験を実施するとともに、ジョイント部をFEM解析に適用するための力学モデルについて検討した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

- ① グラウトしたコンクリートブロック間のジョイント部の力学挙動の特性を、作用応力(直応力、せん断応力)とずれ変形関係との観点から明らかにした。
- ② ブロック接合面が無処理の場合とチップング処理の場合について、せん断すべり破壊基準を明らかにした。
- ③ 上記2項の結果に基づいて、ジョイント部の挙動を表わす力学モデル(非線形接合要素)を提案した。

参考文献

- [1] Third Benchmark Workshop on NUMERICAL ANALYSIS OF DAM: Non linear analysis of joint behaviour under thermal and hydrostatic loads for arch dam, ICOLD, Sep. 1994
- [2] 金子佳生: コンクリートシアキーの破壊モデルとセグメント構法による構造物への適用、コンクリート工学論文集、Vol. 4、No. 2、pp. 31-41、1993. 7
- [3] H. B. Kupfer and K. H. Gerstle: Behavior of concrete under biaxial stresses, Proc. of ASCE, EMI, EM4, 1973

