

埼玉大学 正員 吉中 龍之進 阪口 聡
 (株) 熊谷組 正員 清水 昭男 新井 元
 正員 〇加藤 恵三

1. はじめに

節理性岩盤のせん断に対するロックボルトの作用効果およびその機構を明らかにするため、規則正しい歯型を持つ節理モデルのせん断試験を行った。ここでは、せん断試験における不連続面内の歯型の破壊状況およびロックボルトの変形状況の観察を踏まえ、それらのメカニズムを明らかにするため有限要素法を用いて実験モデルの解析を行い、2, 3の成果を得たので報告する。

2. 試験概要

試験供試体は図-1に示すように $80 \times 40 \times 20 \text{ cm}$ のモルタル製で、一軸圧縮強度は約 200 kg/cm^2 である。ロックボルトはSD30 (D10, D16)の鉄筋を用い、その敷設角を不連続面に対し $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ と変化させた。不連続面の形状は、初期ダイレイタンスー角 $i_0 = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ の規則正しい歯型とした。載荷は、平面ひずみ状態を保ち、不連続面の垂直応力 σ_n が一定となるようにして行った。

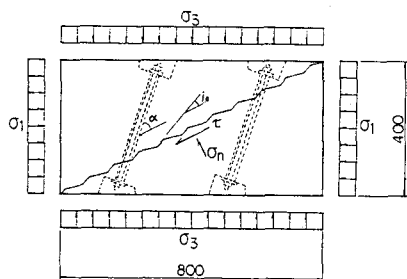


図-1 実験モデル (mm)

3. 歯型の破壊機構

(1) 解析方法

試験供試体における不連続面上の歯型の応力をFEMによって求め、各要素における最大主応力方向からすべり破壊面の推定を行った。破壊規準としてFairhurstの放物線を用い(図-2参照)、放物線から σ 軸におうした垂線の長さともール内から σ 軸までの距離との比を最小となるような方向(σ 方向から ϕ だけ傾いた方向)で求めた。これらの方向を結んでできた曲面をすべり破壊面と考え、この面における全せん断力と全せん断抵抗力との比としてすべり破壊安全率 F_s を算出した。(日比野らの方法)

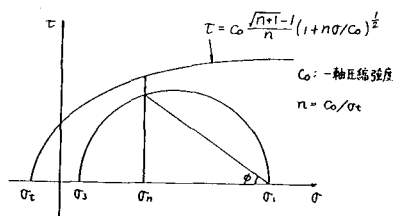


図-2 破壊規準

(2) 観察結果および解析結果との検討

図-3は、前報¹⁾に提示した実験データより推察される不連続面上の歯型の破壊過程を模式的に示したものである。同図は図-1に示した不連続面の一部を表わしたもので、 $i_0 = 10^\circ$ の場合の破壊過程を示している。まずせん断強度がピークに達し歯型に沿って滑り出すと、接触面に応力が集中し(段階②)、その結果すべり面が生じ破壊する(段階③)。 $i_0 = 20^\circ$ 、 $\sigma_n = 40 \text{ kg/cm}^2$ のときは、ほとんど歯型に沿って滑ることがないまますべり面が生じ破壊する。このことは、歯型の破壊過程が i_0 および σ_n によって変化し、これらの値が大きくなるに従ってせん断に伴うダイレイタンスーが起りにくくなることを示唆しているものと考えられる。ここで、供試体がせん断によって破壊するとき、歯型に沿って滑る場合と滑らない場合の違いについて考えてみよう。歯型角を i_0 、垂直応力を σ_n 、歯型表面の摩擦角を ϕ とすれば、歯型に

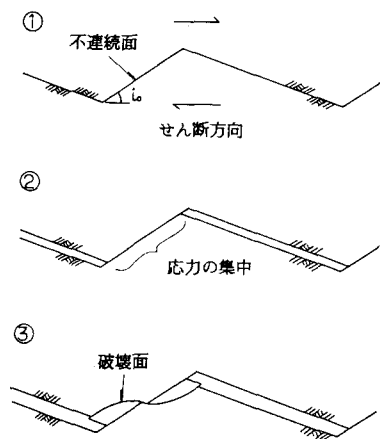


図-3 歯型の破壊過程

沿って滑るときせん断強度は、 $T_s = \sigma_n \tan(\phi + i_0)$ で与えられる (Patton 1966)。この T_s と σ_n を使い、歯型の解析 (1) 解析方法参照) によって破壊安全率 F_s を求める。 $F_s \geq 1$ のとき歯型に沿って滑り、せん断強度は T_s となる。 $F_s < 1$ のとき歯型は破壊し、そのときのせん断強度は次のようにして求められると推測される。上述の解析に用いた T_s の替わりに $T_s \times F_s$ を使用し F'_s を計算する。この計算を F'_s が 1 に収束するまで繰返せばせん断強度 T_s が得られる。図-4 は、①に $i_0 = 20^\circ$ 、 $\sigma_n = 40 \text{ kg/cm}^2$ でせん断試験を行ったときの破壊面の一例を、②に同様の条件下で解析をして求めた破壊面をそれぞれ示したものである。②において、 F_s の値は各破壊面における安全率を示しているが、0.99~1.07 とそれほど大きな違いはない。このことは、同図に示したどの破壊面でも破壊を起こす可能性があり、この解析手法によって①図に示した 2 つの破壊面が同様の破壊現象として説明できることを表わしていると考えられる。

注) 本来この値は 1 であるべきだが、各歯型による強度のパラツキを考慮すれば、1 よりも若干大きくなると思われる。

4. ロックボルトの補強効果

(1) 解析概要

実験試体中のボルトの挙動を模擬するため、ボルトを梁要素、モルタルの付着および支圧をボルト軸に平行と直角な二方向バネ要素 (結合要素) で表現し、2~3 の例に対し FEM 解析を実施した。梁とバネは降伏応力を境に弾性係数を低下させる、バイリニアモデルとし、ボルトは対称性を考慮して不連続面の片側をモデル化した。不連続面でのせん断変位と鉛直変位 (ディレイタンス) より、梁軸方向変位、軸直角方向変位を求め、梁先端に強制変位として分割载荷した。図-5 にモデル概念図を、表-1 に入力定数を示す。

(2) 解析結果

支圧バネ応力の総和よりダウエル効果 (ボルトのせん断による効果) が得られ、ボルト先端の軸力 N と傾角 θ より、不連続面の摩擦角 ϕ を用いて、軸力効果 F は、 $F = N (\sin \theta \cdot \tan \phi + \cos \theta)$ で計算できる。解析結果の一例を図-6 に示す。図中での不連続面摩擦応力は、ボルトを含まないケースも含めた全体の傾向から推定したものである。解析結果は実験結果と比較的よい一致を示し、本モデルでボルトの挙動および効果を表現できるものと考えられる。解析によれば、ダウエル効果は小さく、ボルト効果のほとんどは軸力効果である。ボルト効果は、不連続面の垂直応力 σ_n と無関係であるから、 σ_n が小さい場合に不連続面摩擦強度が小さく、ボルト効果の相対的比率が上昇して、ボルトがより有効に働くものと考えられる。

参考文献

- 吉中, 新井ら; 岩盤分離面に対するロックボルトの作用効果に関する基礎研究, オ17 回岩盤シンポジウム, P281~285 1985

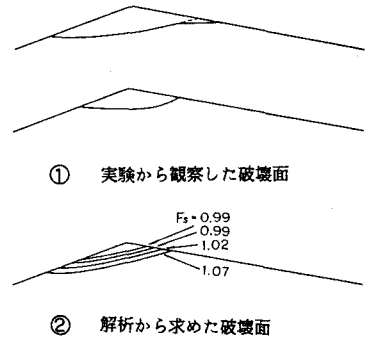


図-4 歯型の破壊面

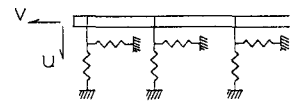


図-5 ボルト解析モデル

表-1 入力定数表

	降伏応力	初期弾性係数	降伏後弾性係数
梁	3000 kg/cm ²	210000 kg/cm ²	12600 kg/cm ²
付着バネ	21 kg/cm	32000 kg/cm ²	32 kg/cm ²
支圧バネ	400 kg/cm	34000 kg/cm ²	34 kg/cm ²

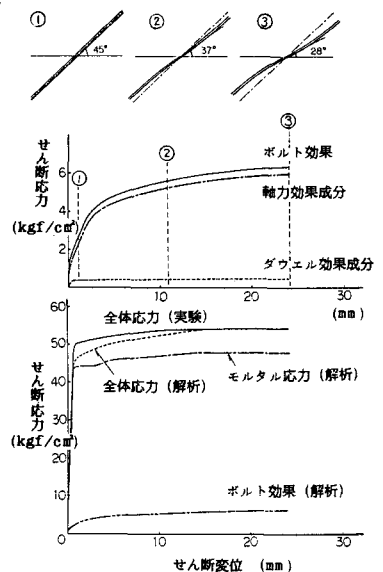


図-6 ボルトの補強効果および変形