

切欠きを有する模擬岩盤の崩落に関する遠心力載荷実験

CENTRIFUGAL EXPERIMENT ON SUDDEN FALL OF ROCK MASS WITH NOTCH

日下部祐基*, 三浦 均也**, 池田 憲二***, 渡邊 一悟***

Yuki KUSAKABE, Kinya MIURA, Kenji IKEDA, and Kazunori WATANABE

The aim of this study is to reveal the mechanism of the collapse of rock mass under gravitational force. A large-scale centrifuge apparatus was newly developed by the authors to apply centrifugal force to a rock specimen. The large-scale centrifuge apparatus is 3.5 m in radius, 100 G in maximum centrifugal acceleration and 250 G tons in maximum capacity, and is capable of reproducing freezing-thawing cyclic process on the specimen. A series of loading tests were conducted on the rectangular parallelepiped specimens made of cement mortar with V-notch, and the deformation of specimen up to the collapse was carefully observed by means of some sets of strain gauges on the surface of the specimen. The rock mass movement at the time of collapse was recorded with mount-type CCD (charge-coupled device) cameras. The collapse of the rock mass was analyzed by means of the limit equilibrium method.

The comparison of the experimental results with the analytical results showed that the collapse was related not with shear strength, but with the tensile strength of the rock mass, and the stability of the rock mass would be predicted by means of the limit equilibrium method regarding the geometry of the rock mass and the tensile strength.

Key Words: centrifuge, rock mass, slope, failure, numerical calculation

1. はじめに

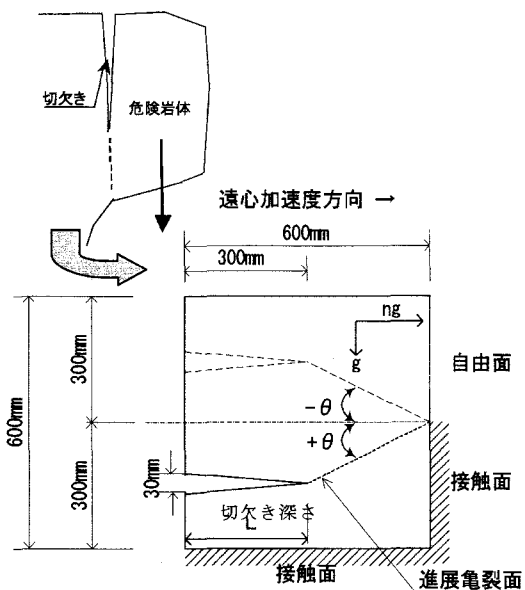
近年、北海道で発生した豊浜トンネルと第2白糸トンネルにおける崩落事故に関して、事故原因究明のために設けられた調査委員会の報告書^{1) 2)}によると、共通した事故原因の一つとして岩体の自重と浸透水圧、凍結圧などの複合的な作用によって亀裂が進展したことが指摘されている。北海道の日本海沿岸にある多くの急崖斜面は、溶岩が水中で急激に冷やされてできた水冷破碎岩で構成されている。水冷破碎岩は、亀裂が少なく均質であるにもかかわらず脆さを有した岩盤であるとされている。このような急崖斜面では、なんらかの要因によって内部の応力状態が変化すると、斜面背面の岩体内部に潜在する微細な亀裂が拡大して連結し、結果として大規模な崩落に発展する可能性がある。

本研究では、積雪寒冷地における大規模岩盤崩落のメカニズム解明を目的として、亀裂進展の機構を明らかにするために一連の遠心力載荷実験を実施した。これまでに、所定の位置に設定した切欠きを有する模型供試体について自重（遠心加速度）を作用させて破壊に至らせる実験、および自重に加えて切欠き内に水圧を作用させて破壊に至らせる実験³⁾を行った。その結果は有限要素法および極限つりあい法によって解析した。ここでは、切欠き位置を種々に変化させた供試体について同様な実験を行うとともに、より広い切欠きの条件を考慮した極限つりあい式を導いて、実験結果を分析することによって極限つりあい法に基づいた簡易な亀裂の進展に伴う破壊推定法の適合性と問題点を把握した。さらに遠心力載荷実験で測定されたひずみ分布などをもとに極限つりあい式の誘導仮定を再検討し、破壊条件をより正確に予測できる極限つりあい法に基づいた推定式を誘導したので報告する。

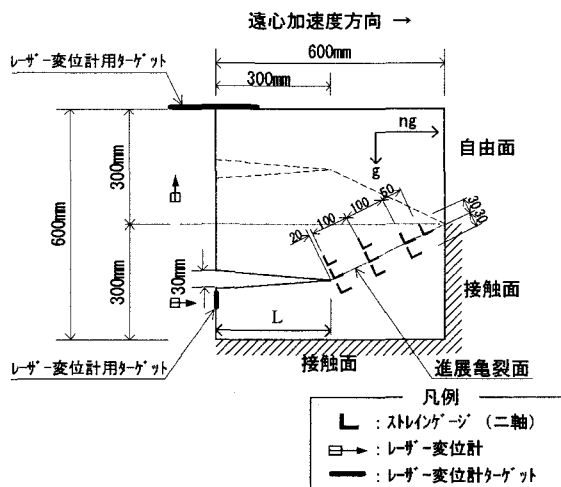
* 正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 地質研究室

** 正会員 豊橋科学技術大学 建設工学系

*** 正会員 独立行政法人北海道開発土木研究所 構造研究室



図－１ 模型概念と供試体寸法図



図－２ 計測器設置位置図

表－１ 各実験ケースの実験条件

実験ケース No.	亀裂進展 角度 θ°	供試体 本数
1	-10	2
2	-20	4
3	10	2
4	20	3

表－２ 計測項目と計測器

計測項目	計測センサ	数量	備考
切欠き面 水平変位	レーザー 変位計	2	切欠き頂部 及び下部
ひずみ分布	ストレイン ゲージ	9	2方向 (二軸)

2. 実験概要

本研究で用いた遠心力装置の詳細な説明は既往文献⁴⁾に譲るが、本研究のために開発した有効回転半径 3.5m、最大遠心加速度 100g (g は重力加速度)、最大搭載質量 2500kg (最大加速度時) の比較的大型の装置である。

供試体は、図－１に示すように幅 600×奥行き 600×高さ 600mm の躯体で、開口幅 30mm 深さ 300mm の切欠きを設けた。新たな亀裂の進展が予想される切欠き先端と固定端を結んだ面 (以下、進展亀裂面と呼ぶ) と、水平面との角度 θ (以下、進展亀裂角度と呼ぶ) を $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ (反時計回りを正とする) になるように切欠き位置を設定した。実験では、遠心力加速度の作用方向が供試体の切欠きの深さ方向に平行であり、この条件は図－１の左上に示すように上向きに切欠きを有する岩盤に対応している。供試体は、同一条件で 2 個以上準備し複数回の実験を行った。表－１に今回実施した実験ケースと実験条件、供試体の数を示す。

供試体はセメントモルタル製で、一軸圧縮強度 20.0N/mm² を目標として、高炉セメント B 種のセメント材料を用い、セメント砂比=1:4、水セメント比=0.65 で配合した。実験後、供試体から採取したコア試料に対して一軸圧縮試験、圧裂引張試験および一部供試体で三軸圧縮試験を実施して力学特性を求めた。

用いた計測器は、表－２に示すように供試体の変形量を計測するレーザー変位計、および供試体表面のひ

表－３ 実験結果一覧表

実験 No.	亀裂進展 角 度 θ	破 壊 加速度 n_r (g)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	一軸圧縮 強度 q_u (N/mm ²)	破壊 ひずみ ε_f (%)	静弾性 係数 E_{50} (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	強度定数	
								C_{uu} (N/mm ²)	ϕ_{uu} (度)
1	$\theta = -10^\circ$	75	2.216	25.4	0.63	4.95×10^3	2.46	3.96	46.0
2	$\theta = -10^\circ$	74	2.215	29.5	0.52	7.87×10^3	2.60	--	--
3	$\theta = -20^\circ$	80	2.196	23.0	0.43	7.39×10^3	1.82	6.02	23.6
4	$\theta = -20^\circ$	75	2.205	22.2	0.57	4.93×10^3	2.19	--	--
5	$\theta = -20^\circ$	74	2.195	19.0	0.66	3.58×10^3	2.02	--	--
6	$\theta = -20^\circ$	80	2.211	23.4	0.70	3.74×10^3	2.11	--	--
7	$\theta = 10^\circ$	65	2.195	15.9	0.82	2.72×10^3	1.77	3.86	35.4
8	$\theta = 10^\circ$	60	2.217	16.1	0.57	3.98×10^3	1.89	--	--
9	$\theta = 20^\circ$	65	2.202	14.3	0.51	4.09×10^3	1.27	3.35	33.7
10	$\theta = 20^\circ$	65	2.199	16.6	0.48	4.98×10^3	1.35	--	--
11	$\theta = 20^\circ$	60	2.185	18.6	0.68	3.04×10^3	1.99	--	--

ずみを計測するストレインゲージである。また、供試体の破壊時に生じる亀裂の進展状況を観察するために、切欠き先端部を撮影するCCDカメラを取り付けた。図－２に各計測器の設置位置を示す。

遠心力載荷実験は、制御パネルおよびモニター画面を確認しながら、遠心加速度を所定の値まで基本的に5～10g（想定破壊加速度の70%まで10gステップ、以後5gステップ）のステップで段階的に増加させ、1ステップ5分間以上維持した。実験中は、ひずみの増加傾向やクラックの発生状況を常に観察して異常状態を監視した。ひずみの発生量が急増した場合には、遠心加速度を一定に保ってひずみの動向を観察した。その結果、ひずみがクリープ的に増加していないことを確認した場合には、次の加速度段階に移行した。

3. 実験結果

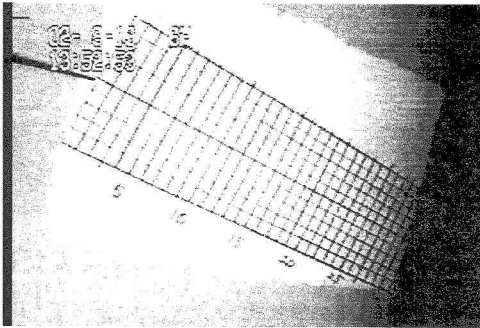
表－３に、実験で得られた破壊時の加速度と供試体の物性値を示した。また、写真－１は小型CCDカメラで撮影した連続画像で、供試体が遠心力載荷により破壊する瞬間を捉えたものである。左側の３組の写真は、表－３に示した実験ケースNo.2の $\theta = -10^\circ$ （切欠き位置が供試体中心より上側）の破壊形態を示したものである。この形態の特徴としては、(b)破壊過程で発生した亀裂の幅が、全長にわたってほぼ一定であることが挙げられる。右側の３組の写真は、同様に表－３にある実験ケースNo.9の $\theta = 20^\circ$ （切欠き位置が供試体中心より下側）のものである。この破壊形態では、亀裂の幅が固定端に向かって小さくなっている。これらの破壊形態は、CCDカメラで撮影できた実験ケース全てに、それぞれ同様の形態が確認された。このことから、切欠きの位置によって破壊形態が異なっていることが推測される。

4. 実験結果の解析

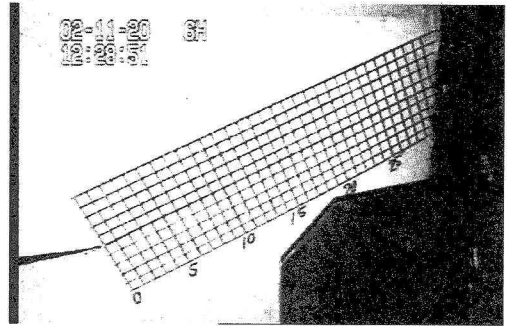
4. 1 極限つりあい式の誘導

ここでは、供試体の破壊条件を検討することを目的に、実験条件に対する簡便式を誘導する。図－３に、本供試体に作用する外力をまとめて示す。

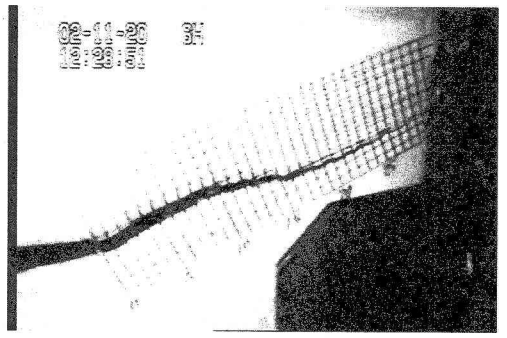
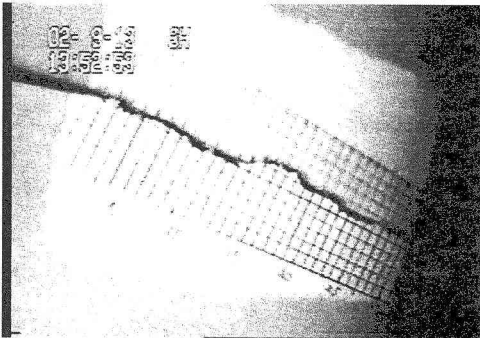
実験 No.2, $\theta = -10^\circ$, $n_f = 74 g$



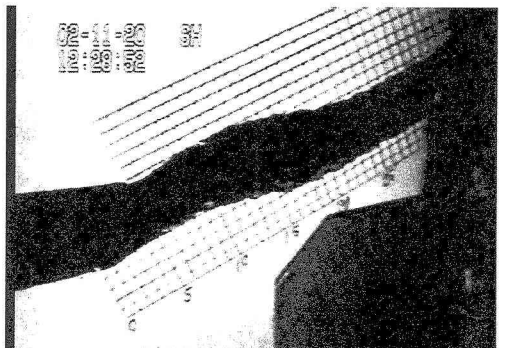
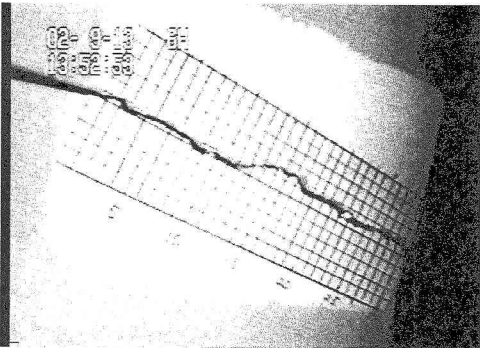
実験 No.9, $\theta = 20^\circ$, $n_f = 65 g$



(a) 破壊前



(b) 破壊過程



(c) 破壊後

写真-1 CCDカメラによる破壊時連続写真

切欠き先端部を通る進展亀裂面 e-f には、モーメント M_c が作用するため、引張り領域の垂直反力にとまなう発生応力度 σ が供試体の引張り強度 σ_t を超過すると、e-f 面に沿って亀裂が進展して開口する引張り破壊が発生すると推測される。また、e-f 面に沿って作用するせん断応力が、せん断強度を超える場合にはせん断破壊が生じると考えられる。これらの極限状態を仮定として破壊加速度 $n_f g$ (g : 重力加速度 m/sec^2) を求める極限つりあい式を誘導すると、以下の式が得られる。

モーメントによる極限つりあい式

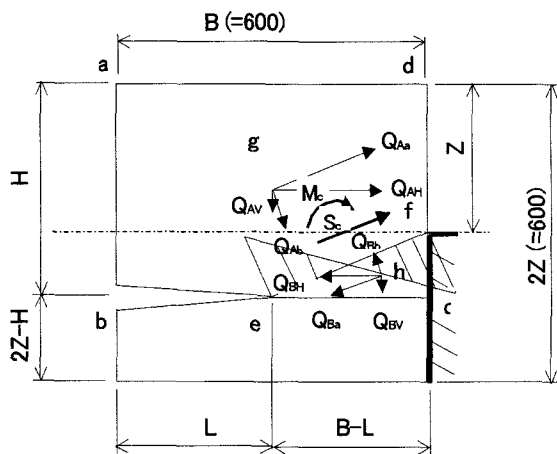


図-3 供試体に作用する外力

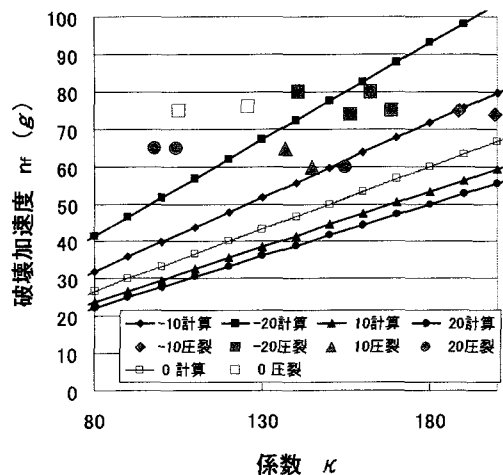


図-4 係数 κ と破壊加速度の実測値と計算値
(モーメントによるつりあい式)

$$n_f = \frac{2\sigma_t(B-L)^2}{\gamma_t \left[6BH^2 \cos^2 \theta - (B-L) \sin \theta \cos \theta \{ H(5B+L) + Z(B-L) \} \right]} \quad (1)$$

せん断力による極限つりあい式

$$n_f = \frac{(B-L)(4c + \sigma_t \tan \phi)}{2\gamma_t \cos^2 \theta \{ B(H+Z) + L(H-Z) \}} \quad (2)$$

ここに、 γ_t : 供試体の単位体積重量 (N/m^3), σ_t : 供試体の引張り強度 (N/m^2), B : 供試体幅 (m), H : 供試体天端から切欠きまでの距離 (m), L : 切欠き深さ (m), Z : 供試体の自由面長さ (m), c : 供試体の粘着力 (N/m^2), ϕ : 供試体のせん断摩擦角 ($^\circ$)

さらに、式(1)と式(2)に以下の式を代入して無次元化する。

$$L/B = \eta \text{ として } L = \eta B, \quad Z/B = \zeta \text{ として } Z = \zeta B, \quad H/B = \lambda \text{ として } H = \lambda B$$

また、式(1)には $\sigma_t/\gamma_t B = \kappa$ として $\sigma_t = \kappa \gamma_t B$ を、式(2)には $\sigma_t/c = \delta$ として $\sigma_t = \delta c$ 、および $c/\gamma_t B = \mu$ として $c = \mu \gamma_t B$ を代入する。

モーメントによるつりあい式

$$n_f = \frac{2\kappa \{ (1-\eta)^2 + (\lambda-\zeta)^2 \}}{6\lambda^2 - (\lambda-\zeta) \{ \lambda(5+\eta) + \zeta(1-\eta) \}} \quad (3)$$

せん断力によるつりあい式

$$n_f = \frac{\mu(4 + \delta \tan \phi) \{ (1-\eta)^2 + (\lambda-\zeta)^2 \}}{2(1-\eta) \{ (\lambda+\zeta) + \eta(\lambda-\zeta) \}} \quad (4)$$

図-4に、式(3)のモーメントによるつりあい式から求めた破壊加速度について、進展亀裂角度 θ をパラメータに係数 κ と破壊加速度の計算値と実測値を示す。破壊加速度の実測値に対する係数 κ の計算条件としては、供試体の単位体積重量に各コア試料の値を、材料の引張強度に圧裂引張試験の値を用いた。切欠きが供試体中心より上側にある $\theta = -10, -20^\circ$ のケースでは、比較的良好な相関が認められる。これに対して切欠きが下側にある $\theta = 10, 20^\circ$ のケースでは、実測値が計算値に比べて大きな値を示している。

なお、過去の実験データにおいて、実験条件が同一のもの ($\theta = 0^\circ$, 切欠き深さ $L = 300\text{mm}$, 水圧無し) を同図に示した。このデータについても良好な相関がみられない。この原因としては、この時の実験に使用した供試体強度のパラツキが大きかったことなどが影響したと考えられる。

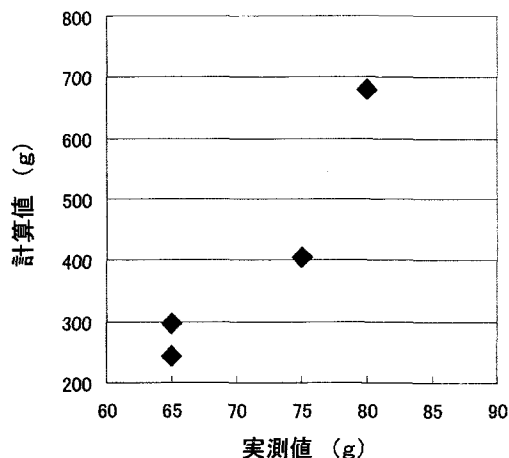


図-5 せん断破壊のつりあい式の実測値と計算値

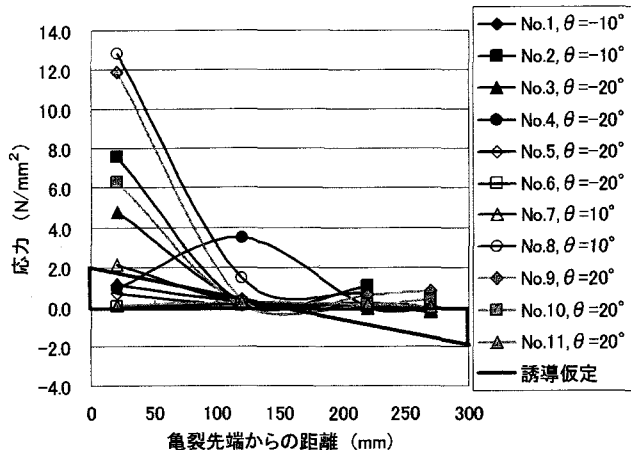


図-6 進展亀裂面付近の応力分布

図-5は、せん断力によるつりあい式(4)を用いて、供試体の強度定数 c , ϕ が求められている実験の破壊加速度を計算し、実測値と比較したものである。計算値は、実測値の4~8倍の破壊加速度を示している。このことから、今回の実験条件では供試体における亀裂の進展、崩落はせん断力によるものでなく、モーメントによる引張力が主要因になっていることが推察される。

以上から、極限つりあい法に基づく安定解析により、切欠きが供試体中心より上側にある場合 (θ が 0° 以下) の破壊時における岩の不整形形状や強度と加速度の関係を、ある程度定量的に推定できることが分かった。しかし切欠きが下側にある場合 (θ が 0° 以上) の破壊については、さらに詳細な検討が必要であることが判明した。

4. 2 極限つりあい式誘導時の仮定の検討

ここでは、 θ が 0° 以上の実測値が計算値と大きく相違した原因を以下のように想定して、あとに示す極限つりあい式の修正に用いる仮定を検討する。

- 仮定した進展亀裂面に垂直な反力にともなう応力分布が、実験と大きく異なった。
- 仮定した抵抗力以外の反力が作用した。
- 供試体材料の不均質性など実験材料のバラツキが影響した。

原因 a) の反力にともなう応力分布の検討として、測定された進展亀裂面付近の面垂直方向ひずみに静弾性係数を掛けて実験の応力分布を求め、式誘導で仮定した応力分布と比較した。応力データは供試体が破壊に至る直前のものである。図-6にその結果を示す。図より実験の応力分布には、圧縮側の応力が認められないこと、および亀裂先端付近の引張応力が、特に θ が 0° 以上の実験 No.8,9 で誘導仮定の引張強度よりも大きな値を示していることがわかる。実験の応力分布は、進展亀裂面の破壊抵抗が切欠き先端から亀裂面の $1/2$ 程度の範囲で、引張抵抗のみによりつり合っていることが推測される。

また、計算に用いた引張強度よりも大きな値を示したことについては、ここでのひずみに塑性域が含まれていることが考えられるが、切欠き先端が拘束されているために圧裂引張試験の条件と異なって、引張強度が大きく出現していることも推測される。これらのことから、鉛直反力の応力分布を切欠き先端から進展亀裂面の $1/2$ までの引張応力のみとし、切欠き位置により極限引張応力の大きさを変化させる必要があることが推察される。

原因 b) の想定した抵抗力以外の反力としては、自重による圧縮力が考えられる。進展亀裂面には、その面

より遠心装置中心側の自重が作用する。この圧縮力が亀裂を開こうとする引張力に抵抗したことが考えられる。

原因 c)については、今回の実験結果をみると強度には多少のバラツキがあるが、進展亀裂角度 θ ごとの破壊加速度に大きなバラツキがみられないことから、実験材料などには大きな問題はなかったと考える。

以上のことから、極限つりあい式誘導の修正には、次の事項を考慮する必要がある。

- 1) 進展亀裂面に垂直な反力の応力分布は、切欠き先端から進展亀裂面の 1/2 までとし、抵抗力は引張応力のみとする。
- 2) 亀裂先端部の極限引張応力は、圧裂引張試験により求められた引張強度を割り増す必要がある。
- 3) 自重による圧縮抵抗力を進展亀裂面に作用させる必要がある。

4. 3 極限つりあい式の修正

前述で議論した進展亀裂面上の応力の算定に際して考慮すべき点に基づき、極限つりあい式を修正する。モーメントによる極限つりあい式は、1)の仮定を考慮して求めると、破壊加速度 n_f は、以下の式になる。

$$n_f = \frac{\sigma_t (B - L)^2}{\gamma_t [6BH^2 \cos^2 \theta - (B - L) \sin \theta \cos \theta \{H(5B + L) + Z(B - L)\}]} \quad (5)$$

この式を前式と同様に無次元化して、以下の式が得られる。

$$n_f = \frac{\kappa \{(1 - \eta)^2 + (\lambda - \zeta)^2\}}{6\lambda^2 - (\lambda - \zeta) \{\lambda(5 + \eta) + \zeta(1 - \eta)\}} \quad (6)$$

次に、2), 3)の仮定を考慮する。この仮定に関係する係数は κ のみである。他の係数は供試体形状から決まるものであるから、式を簡略化して以下のようにする。

$$n_f = K \kappa \quad (7)$$

$$\text{ここに、} \quad K = \frac{(1 - \eta)^2 + (\lambda - \zeta)^2}{6\lambda^2 - (\lambda - \zeta) \{\lambda(5 + \eta) + \zeta(1 - \eta)\}} \quad (8)$$

引張強度の割り増し係数を b 、切欠き先端に作用する自重応力を σ_p として係数 κ_t (係数 $\kappa = \sigma_t / \gamma_t B$ と区別する。) は以下のようになる。

$$\kappa_t = \frac{b * \sigma_t + \sigma_p}{\gamma_t * B} \quad (9)$$

また、これらを考慮した破壊加速度を n_R とすると自重応力 $\sigma_p = n_R * L * \gamma_t * |\sin \theta|$ となり、上式に代入して(7)式と同様にして示すと以下のようになる。

$$n_R = K \kappa_t = K \frac{b * \sigma_t + n_R * L * \gamma_t * |\sin \theta|}{\gamma_t * B} \quad (10)$$

上式を整理して破壊加速度 n_R について解くと、以下のようになる。

$$n_R = \frac{b * n_f}{1 - K \eta |\sin \theta|} \quad (11)$$

4. 4 実測値との比較

上式(11)において破壊加速度 n_R を求めるための未知数は、割り増し係数 b である。そこで、実験結果の破壊加速度を n_R として、以下の式により b を逆算して求めた。

$$b = \frac{(1 - K \eta |\sin \theta|) \cdot n_f}{n_f} \quad (12)$$

図-7は、逆算 b が切欠き位置と関係があるとして係数 λ ($=H/B$)との関係を示したものである。 b 値は切欠きが下方になるほど大きくなる傾向がみられ、1.5~5程度の値を示した。この関係を対数近似させた結果、図にある回帰式が得られた。

図-8は、回帰式による割り増し係数 b を用いて、進展亀裂角度 θ をパラメータに係数 κ_t と破壊加速度 n_{ft} の関係を示したものである。図には、実測破壊加速度の値も示した。回帰式の精度に問題があるが、ある程度の相関が得られている。

5. まとめ

- 1) CCDカメラによる破壊形態の観察結果では、切欠きの位置によって破壊形態が異なることが推測された。
- 2) 極限つりあい法に基づく安定解析により、切欠きが供試体中心より上側にある場合の破壊時における岩の不整形形状や強度と加速度の関係を、ある程度定量的に推定できた。
- 3) 今回の実験条件では供試体における亀裂の進展、崩落はせん断力によるものでなく、モーメントによる引張力が主要因になっていることが推察された。
- 4) 切欠きが下側にある場合の破壊については、引張強度の割り増し係数 b と進展亀裂面に作用する自重による圧縮応力 σ_p を考慮することにより、ある程度相関のある極限つりあい式が得られた。

6. あとがき

遠心力载荷装置を用いた岩盤の実験は、現在基礎的な実験を終了して供試体の作成や設置方法などの実験手法を確立したところである。今後は、さらにより複雑な実験条件を取り込んで実際の現場条件に近い模型実験等を行い、防災工事などの現場に役立つ研究成果を得るよう努力する所存である。

参考文献

- 1) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会 (1996) : 豊浜トンネル崩落事故報告書。
- 2) 第2白糸トンネル崩落事故調査委員会 (1998) : 第2白糸トンネル崩落事故報告書。
- 3) 日下部祐基, 池田憲二, 渡邊一悟, 三浦均也(2002) : 切欠きを有する岩盤の遠心力場における崩落実験, 第47回地盤工学会シンポジウム論文集, pp.327-334。
- 4) 池田憲二・中井健司・日下部祐基・原田哲朗(2000) : 岩盤亀裂発生装置 (大型遠心力载荷装置) の製作, 開発土木研究所月報, No.571, pp.31-39。

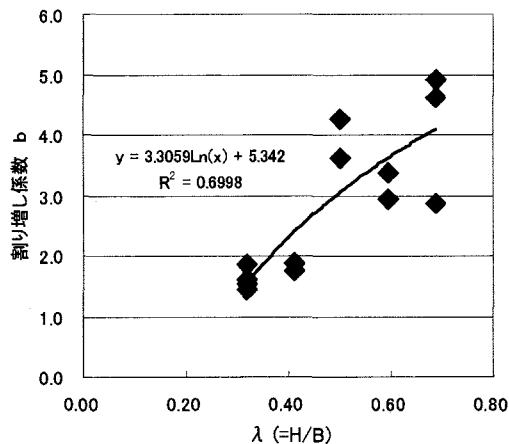


図-7 係数 λ と逆算 b

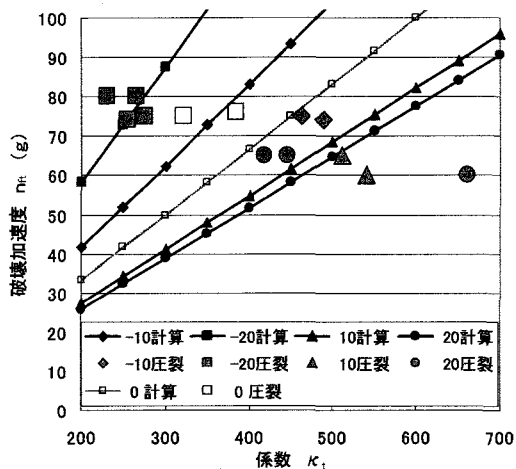


図-8 係数 κ_t と破壊加速度 n_{ft} の実測値と計算値