不連続性基盤の応力, 変形および破壊に関する模型実験*

山 本 和 夫** 有 岡 正 樹***

Model Experiments on Stress Distribution, Deformation and Fracture in the Discontinuous Rock Foundation

by

Kazuo YAMAMOTO and Masaki ARIOKA
(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

The mechanical behavior of rock mass under load is influenced by the nature of discontinuous geological planes rather than that of rock material itself.

Model tests were made with idealized models with discontinuous planes orientated vertically and horizontally.

The results obtained are as follows : stress distribution shows concentration along the vertical central axis of the loading plate. The state of fractures is different from that of the homogeneous and isotropic elastic solid. Cracks are initiated either by partial tension or partial shear, and then they are propagated toward lower parts of the foundation.

Hence it is necessary to examine sufficiently the nature of discontinuous planes involved, in order to understand the characteristics of such discontinuous rock foundation.

(Received June 13, 1968)

1 緒 言

岩盤の力学的強度は、構成する岩石そのものの強度よりむしろ岩盤内に存在する地質学的分離面の状態に影響される。したがって岩石自身の力学的性質を知ると同時に分離面をも含めた不連続体としての力学的性質を知らねばならない。しかしこれらの分離面（以下不連続面と呼ぶ）の状態が及ぼす影響は多様であり、複雑な実在岩盤の応力および変形状態や安定性を直接解明することは困難である。したがって、従来から現場において岩盤試験を行なうとともに、影響の及ぼす要素のあるものを取り出し理想化した岩盤の力学的模型により室内試験を行なっている。

本研究では、不連続面が縦と横に規則正しくはいつている模型（以下不連続性基盤と呼ぶ）を考え、その力学的挙動を実験的に把握することを目的としている。この種のブロックの積重ねの模型は Krsmanović¹⁾、Trollope²⁾、林³⁾などの研究においても取り扱われて、定性的実験と簡単な理論的解析が行なわれている。ここでは岩石のアナロジーとして、アラルダイト B とセメントモルタルの二つを用いて、定性的および定量的

な 2 種類の模型実験を行ない、この種の不連続性基盤の応力, 変形および破壊に対する不連続面の及ぼす影響について検討を行なっている。

2 光弾性材料による模型実験

2・1 実験装置と実験方法

光弾性材料アラルダイト B を岩石のアナロジーとして用い、不連続面に硬・柔 2 種類の接着材（以下充てん物と呼ぶ）で充てんして定性的実験を行なった。前者のかたい充てん物としてアラルダイト D、後者の柔らかい充てん物としてセメダインコンダクトを使用し、いずれの場合も実験は接着 24 時間後に行なった。実験に使用したアラルダイト B の性質を Table I に示す。充てん物のアラルダイト D の弾性係数は、アラルダイト B とほぼ等しく約 30 000 kg/cm²、セメダインコンダクトは非常に柔らかく弾性係数は数 10 kg/cm² である。

装置は透過式の光弾性装置を使用し、載荷はアラルダイト B の載荷板と薄いゴムシートを通して行なった。

2・2 実験結果および考察

Fig. 1 (a), (b) は柔らかい充てん物セメダインコンダクトを使用した場合の等色線しま模様である。後者はブロック中心に穴をあけたものである。個々のブロッ

* 原稿受理 昭和43年6月13日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 京都大学大学院 京都市左京区吉田本町

Fig. 1. Photoelastic fringe pattern in Araldite B.

Table I. Properties of Araldite B.

Elastic modulus	29 000~32 000 kg/cm ²
Poisson's ratio	0.35~0.37
Stress-fringe value	10.0~11.0 kg/cm

ク端においてかなりの応力集中の現象が認められ、接着部において応力は不連続である。また、荷重は側方へはほとんど伝達せず載荷面直下に集中している。これは充てん物が柔らかいので、層全体があたかもはりのような挙動を示すためである。また、載荷面直下になかなか大きな横方向の引張力が見られ、荷重の増大とともにその傾向は著しい。このような現象は等方等質の弾性体においては現れないものである。したがって、引張りに弱い岩石はきわめて分離破壊を起こしやすい状態になるものと思われ、軟弱な充てん物はそれを含む基盤全体の強度を弱めることはもちろん、基盤を構成する岩石の強度をも引き下げるような作用をすることになる。

Fig. 1 (c) はかたい充てん物アラルダイトDを使用した場合の等色線し模様である。この場合においては、ブロック端における応力集中の現象、接着部における応力の不連続および層のはりのような挙動はいずれも認められず、ほぼ等方等質体の場合と一致している。

この種の光弾性材料などを使用した実験では、難解な相似律の問題がつきまとうのは避けがたく、定性的範囲でしか現象をつかめない。したがって、ここでは次の3で述べるセメントモルタル材料による模型実験の予備としてその現象を定性的に理解することを目的とした。

3 セメントモルタル材料による模型実験

3・1 実験装置と実験方法

ここでは立方体セメントモルタルのブロックを岩石のアナロジーとして使用し、不連続面にはセメントペーストを用いて定量的実験を試みた。

Fig. 2に実験装置を示す。不連続性基盤模型は5cm立方のモルタルブロックを厚さ3mmの充てん物セメ

Fig. 2. Testing apparatus.

ントペースト（セメントとフライアッシュを水で配合したもの）を用いてモザイク状に積み重ねて作成された。その手順を示すと、モルタルブロックを打設後24時間を経て脱型し、約1ヶ月の水中養生（温度 $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ）を行なった後、2日間恒温室（温度 $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $60\pm 5\%$ ）に放置して乾燥させる。乾燥後ブロック表面を金属ブラシを用いてレイタンスを取り除き、型わく内で3mm間隔でモルタルブロックをモザイク状に並べる。次に、セメントペーストの充てん物をブロック間に流し込んで2日後に脱型した後、2日間水中養生と1日間の恒温室内乾燥をする。次に、模型の表面と裏面をみがいてアセトンで清浄した後、その表面にアラルダイトDを用いて二軸型光弾性ひずみ計を接着し、1日後その裏面に三軸型抵抗線ひずみ計および沈下測定用鋼棒を接着する。その1日後に載荷試験を行なう。載荷試験は島津製リーレー式万能試験機（容量100t）を使用して行ない、載荷速度は約 $10\text{ kg/cm}^2/\text{min}$ である。なお、載荷試験5~6時間前に特殊アルミナセメントを用いて模型を剛な鋼板に設置しておき、偏心の影響を軽減させた。

応力測定と沈下測定は個々のブロックの中央点において、各荷重段階ごとに二軸型光弾性ひずみ計と三軸型抵抗線ひずみ計およびダイヤルゲージにより行なった。

載荷は剛性載荷（剛な鋼板による載荷）とたわみ性載荷（剛な鋼板の下に厚さ7mmのゴム板を置いて載荷）の2種類により行ない、載荷幅をブロック幅の1、

2 および 3 倍の 3 種類に変化させた。

逐次破壊の状況は表面に現われるクラックを肉眼で観察した。

3・2 模型材料の性質

3・2・1 セメントモルタルの性質 岩石のアナロジーとして使用したセメントモルタルの配合は、宇部普通ポルトランドセメントと豊浦標準砂を重量比で 1 : 2 とし、水セメント比を 60% とした。Table II に諸性質を示す。

Table II. Properties of cement mortar.

Compressive strength	305	kg/cm ²
Tensile strength	19.1	kg/cm ²
Elastic modulus	25 000~28 000	kg/cm ²
Poisson's ratio	0.23~0.26	

3・2・2 セメントペーストの性質 充てん物として使用したセメントペーストは次の 3 種類であり、その配合は宇部普通ポルトランドセメントと宇部ポゾラン（フライアッシュ）を重量比で 1 : 0（以下充てん物 1 とする）、1 : 1（以下充てん物 2 とする）および 1 : 2（以下充てん物 3 とする）とし、水セメント比を 60% とした。Table III に諸性質を示す。

Table III. Properties of cement paste used as filler.

	Strength of bending moment (kg/cm ²)	Compressive strength (kg/cm ²)	Elastic modulus (kg/cm ²)
Filler 1	37.5	153.8	35 000
Filler 2	25.2	71.6	20 000
Filler 3	15.6	31.4	12 000

3・2・3 不連続面のせん断強度 不連続性基盤の応力分布および破壊現象を定量的に考察するために、不連続面のせん断強度を把握する必要がある。Fig. 3 に二面せん断試験の方法と結果を示す。ここでは簡単にせん断強度は Coulomb の直線式で表わされるとする。

3・3 実験結果および考察

Fig. 3. Shear lines in two-section shearing test.

この種の不連続面を含む基盤の応力、変形および破壊は不連続面の性質・充てん物の性質、荷重幅に対する不連続面の大きさ・ひん度・方向性および含水状態などに強く影響される。

3・3・1 充てん物の性質の影響 光弾性材料による模型実験により充てん物の性質は基盤の応力および変形に大きな影響を及ぼすことがわかっている。

Fig. 4 (a), (b), (c) はブロック幅 C と荷重幅 T との比 C/T が 1 である場合の充てん物 1, 2, 3 を用いた模型におけるそれぞれの逐次破壊状態を示す。これよ

Fig. 4. States of progressing fracture of discontinuous models for $C/T=1$ through rigid loading plate using (a) filler 1, (b) filler 2, (c) filler 3.

り充てん物の強度が小さくなるにつれて初期クラックの発生する荷重が 250, 160, 80 kg/cm² としだいに下がっているのがわかる。また、クラックの発生は充てん物 1 ではかなり大きな破壊音を伴うが、充てん物 2 および 3 ではほとんど音もなく起こる。クラックの進展する順序と最終的破壊強度（モルタルブロックの破壊強度に等しい）はいずれの場合においてもほぼ同様であるが、弱い充てん物 3 の場合においては載荷面直下深部までクラックが進展する。ここで、1) のクラックはおもに引張りが支配的である破壊（以下局部引張破壊と呼ぶ）により発生して下層へ進展したものと

考えられ、2) のクラックはおもにせん断が支配的である破壊（以下局部せん断破壊と呼ぶ）によるものと考えられる。このことは後述する。

ここで林が考えているように、等方等質の弾性理論より計算される応力によって不連続面のせん断破壊を考えると、各充てん物1, 2, 3 の場合において2) の位置の第1層にそれぞれ57, 32, 10 kg/cm² の非常に低い荷重で初期クラックが生ずることになる。またこの考え方では、1) のクラックを説明することはできず、実験結果と相違する。これは等方等質の弾性理論によって不連続面上の平均的垂直応力およびせん断応力を算出していること、充てん物の存在とその変形を考慮していないことおよび水平不連続面上のせん断力を無視していることなどの問題点が考えられ、この種のある程度のせん断抵抗（付着抵抗と摩擦抵抗）をもつ充てん物を含む模型については不適当である。

次に応力は充てん物1, 2, 3 とも初期クラックが生ずる以前より載荷面直下に集中する現象を示し、軟弱な充てん物ほどその傾向は強い。また、荷重が増大してクラックが進展すると、なお一層側方への分散が少なくなりその傾向は強くなる。これは鉛直方向の主弾性係数が水平方向のそれより大きい直交異方性基盤の載荷面直下への応力集中現象と類似する。すなわち、水平な不連続面と鉛直な不連続面は別な働きを示すものと考えられる。また、荷重の増加とともに載荷面直下のブロックに水平方向の引張主応力が認められているが、軟弱な不連続面ほどその傾向は強い。これは層自体がはりの挙動を示す曲げ引張りと同転したブロック端による応力集中のためと考えられる。以上のことは前の光弾性材料による実験でも認められている。

したがって、この種の不連続性基盤に対する理論は充てん物の性質・厚さ、弾性あるいは粘弾性定数および強度を一をなんらかの形で含んだものでなければならない。

3・3・2 荷重幅の影響 構造物の大きさに対する不連続面のひん度、すなわち荷重幅に対するブロック幅の比 C/T が変化した場合、基盤の応力や破壊にどのような影響を及ぼすかについて若干の検討を行なう。Fig. 5 (a), (b) に充てん物2を使用した $C/T=1/2, 1/3$ の模型における剛性載荷の場合の逐次破壊状態を示す。ここで初期クラックが生ずる荷重を比べてみると、 C/T が1, $1/2, 1/3$ と小さくなるに従ってそれぞれ160, 130, 100 kg/cm² とその荷重は小さくなっている。しかし、ここで注意しなければならない点は、初期クラックの発生が局部せん断破壊によるものと局部引張破壊によるものの2種類があるということである。したがって、まず局部せん断破壊によるクラックの発生荷重を考えると、 C/T が1, $1/2, 1/3$ と小さくなるにつ

Fig. 5. States of progressing fracture of discontinuous models through rigid loading plate using filler 2 (a) for $C/T=1/2$, (b) for $C/T=1/3$.

れてそれぞれ260, 130, 120 kg/cm² と小さくなっている。これは C/T が小さくなるにつれて局部せん断クラックが生ずる位置のせん断力が大きくなることによるものと考えられる。次に局部引張破壊によるクラックの発生荷重を考えると、 C/T が1, $1/2, 1/3$ と小さくなくてもそれぞれ160, 210, 100 kg/cm² と漸減していない。これは C/T が小さくなるにつれて局部引張クラックが生ずる位置の局部せん断力が大きくなる一方、ブロックの回転が少なくなり局部引張力が減少するためと考えられる。また同じく C/T が小さくなるにつれて、この両者によるクラック発生荷重の差異は少なくなり、かつ載荷面直下において深部までクラックが発生することが認められる。

C/T が $1/2, 1/3$ の場合に荷重が増すにつれて Fig. 5 の E F の位置にクラックの発生が認められることは興味深い。これは A B あるいは C D におけるクラックの開口と沈下の増大に伴って、E F における抵抗が減じためと考えられる。

3・3・3 載荷板の剛度の影響 この種の不連続性基盤の破壊、応力および変形の特徴を $C/T=1/3$ の場合の剛性載荷板を用いたものとたわみ性載荷板を用いたものの二つを対比しながら述べる。

(1) 破壊状態: Fig. 5 (b), Fig. 6 は $C/T=1/3$ の場合の剛性載荷およびたわみ性載荷による逐次破壊状態を示す。剛性載荷による場合は、10回の同じ条件下の実験において第1番めのクラック（初期クラック）が生ずる割合は A B, C D, E F, G H に沿う不連続面にそれぞれ60, 10, 10, 20%であり、第2番めのクラック（第2クラック）が生ずる割合はそれぞれ20, 50, 30, 0%である。これより A B に沿う不連続面に最も

Fig. 6. States of progressing fracture of discontinuons models through flexible loading plate using filler 2 for $C/T=1/3$

クラックが発生しやすく、次いでCDに沿う不連続面にクラックが発生しやすいことがわかる。これらのクラックは、ABに沿う場合はAに始まる局部引張破壊が、CDに沿う場合はCに始まる局部せん断破壊がそれぞれ支配的であり、その後ブロックの回転やクラック先端に誘発される局部引張破壊が加味されて下層にクラックが進展していくものと考えられる。また、GHに沿う不連続面にクラックが発生するのは、載荷面および支持面の不均一の影響によって最下端部において曲げ引張りが生ずるためと考えられる。次に、たわみ性載荷による場合は、剛性載荷に比べて非常に低い荷重 (50~70 kg/cm²) でGHに沿う不連続面に初期クラックが発生する割合が全実験 (5回) の80%と圧倒的に高く、これは後述するように、たわみ性載荷により載荷面直下への応力集中度が高いことから、支持面での曲げ引張りを誘発する可能性が強いためであると考えられる。しかし、全体としてはりの挙動を示さないほど模型の深さが充分ある場合においてはこのような現象は起きないだろうし、事実 1 cm³ の小さなモルタルブロックを同様に13層積み重ねた実験においては認められなかった。次いで、ABおよびCDに沿う不連続面にクラックがほぼ同じ荷重で発生するが、これは後述するように剛性載荷に比べて鉛直応力が載荷中心部に集中する傾向を示すので、ブロック12の回転が少なくなってAにおける引張力が小さくなり、局部引張破壊がいくぶん抑制されるためと考えられる。また、終局破壊強度がたわみ性載荷の場合は 200 kg/cm² と剛性載荷の場合の 300 kg/cm² より低い値を示すが、これはブロックが奥行き方向に割裂するためである。

(2) 応力状態: Fig. 7 (a), (b)に剛性載荷およびたわみ性載荷による荷重と鉛直応力の関係を示す。なおここでは、ブロック中央点で測定したひずみより算出した鉛直応力の値をブロック内では一様に分布するとして示している。光弾性ひずみ計に現われるしま模様は、丹羽らによって考えられた理論的解析法に従って解析したが、モルタルの絶対ひずみが小さくあまり高い精

Fig. 7. Relation between load q and vertical stress σ_v .

度は期待されないので、補足的に利用することに止めた。これによると、剛性載荷の場合に第1層の載荷面直下のブロック 11, 11', 12, 12' における鉛直応力の総和はまだクラックが発生していない荷重 100 kg/cm² 付近ではその約85%にしかならず、Boussinesqの解の約88%と比べて少ない。これは Kršmanović らの実験にも見られるように、剛性載荷板の影響により載荷中心線より荷重幅の $1/3$ だけ左右にずれた位置、すなわち著者らの実験の場合には不連続面付近に鉛直応力が集中し、不連続面はもとより1個のブロック内であっても鉛直応力は一様に分布していないことによる。この事実は第2, 3層の鉛直応力分布から容易に推測される。したがって、このことを考慮に入れると、荷重の大部分は載荷面直下の四つのブロックに分布されており、それより側方への分散はほとんどないと言える。次に、第2層と第3層においては剛性載荷板の影響により載荷中心線より左右にずれた位置、すなわち 21, 21', 32, 32' のブロックに鉛直応力が集中していると同時に、荷重 100 kg/cm² 付近まではCDの不連続面の内側にある載荷面直下のブロックにおいて鉛直応力の総和は載荷重の90~95%を占めている。しかし、荷重の増大とクラックの発生に伴って載荷中心部への鉛直応力集中の変化が現われる。特に、荷重が 150 kg/cm² 付近での局部破壊の急激な進行に伴い上層部における変化が著しく、載荷中心部のブロック 11, 20 において曲線のこう配すなわち応力増加率が大きくな

るが、12のブロックでは逆に応力は減少している。たわみ性載荷の場合は、剛性載荷の場合に比べて載荷中心部への鉛直応力集中の傾向は著しい。その集中度は第1層においては荷重60, 120, 180 kg/cm² に対してそれぞれ86, 100, 105%を示し、第2層においてはそれぞれ83, 99, 121%を示すように剛性載荷の場合と同様に荷重の増大とともに中央部への集中度は増す。また、載荷中心線上の鉛直応力が第1層および第2層において荷重の約1.0~1.2倍の値を示しているが、これは林の考えている複合パスカル分布とほぼ一致する。しかし、Krsmanovićらの実験に示される荷重幅の0.667倍の深さで荷重の2.6倍もの集中度は認められない。

Fig. 8 (a), (b)に破壊が相当に進行した状態の剛性載荷およびたわみ性載荷による主応力の大きさと方向を示す。剛性載荷の場合において、主応力方向は載荷中心線近くのブロックでは Boussinesq の解よりも鉛直

Through (a) rigid loading plate, (b) flexible loading plate.

Fig. 8. Direction and magnitude of principal stresses.

Through (a) rigid loading plate, (b) flexible loading plate.

Fig. 9. Relation between load q and settlement ζ .

方向に近く、荷重の増大とともに上層部のブロックにおいてその傾向は強くなる。これは前述の載荷中心部への鉛直応力集中の変化と一致する。また引張主応力の発生が認められる。たわみ性載荷の場合においても、同様に載荷中心線近くの上層部ブロックで主応力方向は鉛直方向に近くなるとともに、引張主応力の発生領域も広範囲となる。

(3)変形状態：Fig. 9 (a), (b)に剛性載荷およびたわみ性載荷による荷重-沈下曲線を示す。剛性載荷の場合においては、荷重の増大に伴い初めは沈下は直線的に増加するが、荷重が60 kg/cm² をこえるあたりからそのこう配は小さくなっている。これは充てん物の応力-ひずみ関係の非線型によるもので、圧縮されて弾性係数が增大するためと考えられる。さらに、クラックが盛んに進展する荷重130~140 kg/cm² で曲線のこう配すなわち沈下の増加率にかなりの変化が生ずる。すなわち、載荷中心線近くのブロック20, 31, 41では沈下の増加率は大きくなり、その隣りのブロック12, 21, 22, 32, 42では沈下の増加率は小さくなり、ブロック13, 33では逆に沈下の回復が認められる。これらの現象は、載荷中心部への応力集中の変化と載荷中心線より離れたブロックの回転などより説明される。なお、浮上りの現象は君島^{*1}の実験においても認められる。次に、たわみ性載荷の場合においては、荷重70~80 kg/cm² で上層部の載荷中心線近くの沈下の増加率はわずかに大きくなる。これは上層部での載荷中心部への応力集中によるものと考えられる。また、荷重が増大して終局破壊荷重に近くなると、各ブロックの沈下の増加率は全般に大きくなる傾向を示し、この場合は沈下の回復現象は認められなかった。

4 結 言

本研究は従来のこの種の模型を用いた研究と異なり、不連続面に充てん物をてん充してこの充てん物が不連続性基盤の応力、変形および破壊状態に及ぼす影響について考察を加えるとともに、理論的解析への手がかりを与えた。実験結果を要約すると次のようである。

(1) 軟弱な不連続面を含む基盤は、不連続面上での局部破壊によるクラックが発生する以前より、載荷面直下への鉛直応力集中の現象を示し、クラックの進展によりなおいっそうその傾向を強くする。

(2) 局部破壊には局部引張破壊と局部せん断破壊の二つが考えられ、 C/T が小さ

*1 君島博次, 若本 清, 第1回岩盤力学シンポジウム (1962)

くなるにつれて両者によるクラック発生荷重は近くなる。

(3) 剛性載荷の場合の鉛直応力は、載荷中心線より多少左右にずれた位置に集中する。また、荷重の増大に伴い応力集中の位置は中心線のほうに移動するとともに、載荷面直下に引張主応力が発生する。たわみ性載荷の場合の鉛直応力は載荷中心線近くに集中し、荷重の増大に伴いその傾向は増すとともに、載荷面直下の引張主応力の発生領域も広い。

(4) 荷重—沈下曲線は不連続面における充てん物の応力—ひずみ関係の非線型性により、荷重の増大とクラックの進展に伴い載荷中心線近くで沈下の増加率を大きくし、中心線より離れたところで沈下の増加率を小さくし、剛性載荷の場合においては沈下の回復現象をも示す。

(5) 初期クラックの発生後、クラックは階段状に下層へ進展するが、これは不連続面の性質（厚さ、弾性あるいは粘弾性定数および強度）、不連続面での変形

によるブロックの移動（回転および平行移動）およびクラック先端に誘発される局部引張破壊について考慮する必要がある。

この不連続性基盤に適用すべき理論的解析法については後の機会に発表したい。

最後に、本研究を行なうに際して終始ご指導くださった京都大学工学部丹羽義次教授、同赤井浩一教授、実験に協力して下さった鹿島建設村田肇昭氏の各位に感謝の意を表する。

（昭和42年5月28日 土木学会年次学術講演会にて講演）

参 考 文 献

- 1) Krsmanović, D., and S., Milić, Rock Mech. and Eng. Geol., Suppl. I, 72 (1964).
- 2) Trollope, B. H., and E. T. Brown, Water Power, **17**, 310 (1965).
- 3) 林 正夫, 電研技術研究所報告, 土木63011 (1963).
- 4) 丹羽義次, 小林昭一, 平島健一, 材料, **17**, 933 (1968).