

成層岩盤斜面上基礎の安定に関する模型実験

小西 純一* 大谷 和弘**

(昭和53年5月31日受理)

Model Experiments on the Stability of Foundations on the Stratified Rock Slopes

Junichi KONISHI and Kazuhiro CTANI

The stability of the stratified rock slopes depends upon several factors, such as slope angle, height, slope angle of bedding joints, distance between two adjacent bedding joints, frequency of cross joints, properties of joints and so on.

In this paper, the important role of the slope angle of bedding joints in the stability of rock slopes is investigated experimentally by the use of the models made of plaster bricks.

Eight models of different slope angles of bedding joints and a homogeneous model of no joints are tested.

The load-settlement behaviour, the bearing capacity and the coefficient of subgrade reaction of the foundation on the shoulder of the slope are measured and the deformation and fracture of the model rock mass are observed.

The test results show that the stability of rock slopes is heavily influenced by the slope angle of bedding joints and that the different predominant modes of deformation and/or failure seem to appear at different slope angles of bedding joints.

1 ま え が き

斜面には、盛土や切取の斜面のように人工的に造られたものと、地山のままの自然斜面とがある。盛土は性質のわかった材料を用いて、比較的等方等質に築造されるが、自然斜面や自然の地山の一部を切取った切取斜面は等方等質の場合とは異なる挙動を示すことが多く、通常安定計算法を適用し難い場合が少くない。その原因としては、地山を構成している材料の不均一性、異方性や層構造を成していること、不連続面の存在などが挙げられる。

岩から成る斜面すなわち岩盤斜面においては、その力学的性質は層構造および不連続面

* 土木工学科教室 講師

**元大学院修士課程、現熊谷組

の如何によって大きく左右されることが知られている。したがってその安定を論ずる場合には対象としている岩盤の地質学的構造、不連続面の位置と性質などを把握することが不可欠となる。それと同時に、層構造を成す岩盤あるいは不連続面を有する岩盤の力学的性質および安定性に関するデータの集積と、それらに基づいた合理的な安定解析手法の確立がなされなければならない。

従来より岩盤斜面の安定解析についていくつかの理論的方法が提案されている。たとえば、明瞭な潜在すべり面を有する場合には、すべり面と斜面の関係、すべり面相互の関係をステレオ投影法によって求め、図解法によって全体安全率を検討する方法が提案されている¹⁾²⁾。またクロスジョイントを有する成層岩盤斜面に対して、成層面の方向と斜面の関係、クロスジョイント間隔などを用いて限界斜面角を求める方法が Terzaghi によって提案されている³⁾。さらに近年、層構造あるいは不連続面を表現する特別の要素を組込んだ有限要素解析によって、変形特性さらには安定性の検討が行われるようになった⁴⁾。

また、石膏あるいはセメントモルタルを材料に使用した模型実験も、Goldstein 他⁵⁾、Stacey⁶⁾などによって試みられている。

一方、層理や節理などのひび割れを有する岩盤の力学的性質に関しても主として模型実験による検討がなされ、強度・変形特性が、主たるひび割れの方向と最大主応力方向とのなす角や、主応力比、ひび割れ面の連続性、ひび割れ面の性質などによって大きく変化することが示されている^{7)~9)}。

以上のような理論的・実験的研究が行なわれる一方、実際の斜面における安定例および崩壊例の調査結果が集積され、設計における基本資料となっている¹⁰⁾。岩盤の性状は一般に複雑であって、安定を考える場合に考慮すべき要因も多いことを考えると、このような現場調査・追跡調査の重要性は言うまでもない。

著者らは、岩盤の性質を支配する重要な要素である層構造ないしは不連続面の性状が岩盤斜面上基礎の安定にいかなる影響を及ぼすかを定性的に把握し、理論解析あるいは実際の事例の検討に際しての基礎を与えることを目的として、模型実験を行なった。本報告においては層理角の影響に関する実験結果を述べる。

2 実験の概要

堆積岩やある種の変成岩は、ある方向に多くの層理面 (bedding joint) を有する、いわゆる成層岩盤を形成する。このような成層岩盤の中には、しばしば各層にクロスジョイント (cross joint) をもつような石積み状の成層岩盤となっている場合がある。この場合のクロスジョイントは一般に層理面に対して垂直かつ千鳥に入っていると考えられる場合が多いとされている。

著者らは、このような石積み状の成層岩盤を想定して、石膏ブロックの積層体を用いた模型岩盤斜面をつくり、平面ひずみ状態で、のり肩に載荷し、支持力および沈下ならびに破壊状況の測定と観察を行なった。その場合、層理角は8通りに変化させ、他の条件すなわち、斜面高さ、斜面こう配、石膏ブロックの強度、ジョイントパターンなどはなるべく一定として、層理角の影響のみを取り出せるように配慮した。

2.1 石膏ブロック

模型に使用したブロックは、石膏と珪藻土の混合物を固めたものである。石膏、珪藻土および水を重量比1:0.3:1.4で混合し、これを型枠に流し込んで3×3×6cmの直方体ブロックを鋳造した。このようにして作ったブロックを約50日間室内で大気乾燥させた後使用した。

ブロックの力学的性質は従来の研究によってもかなりばらつくものとされているが、本研究に用いたブロックの諸性質もかなりのばらつきを示した。図1(a)~(c)に、一軸圧縮強度 q_u 、変形係数 E_{50} 、引張強度 σ_t の頻度分布を示す。これらの平均値は、 $\bar{q}_u \approx 27 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\bar{E}_{50} \approx 2.6 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\bar{\sigma}_t \approx 6.5 \text{ kg/cm}^2$ である。なお引張強度は圧裂試験に準じた方法により求めた。

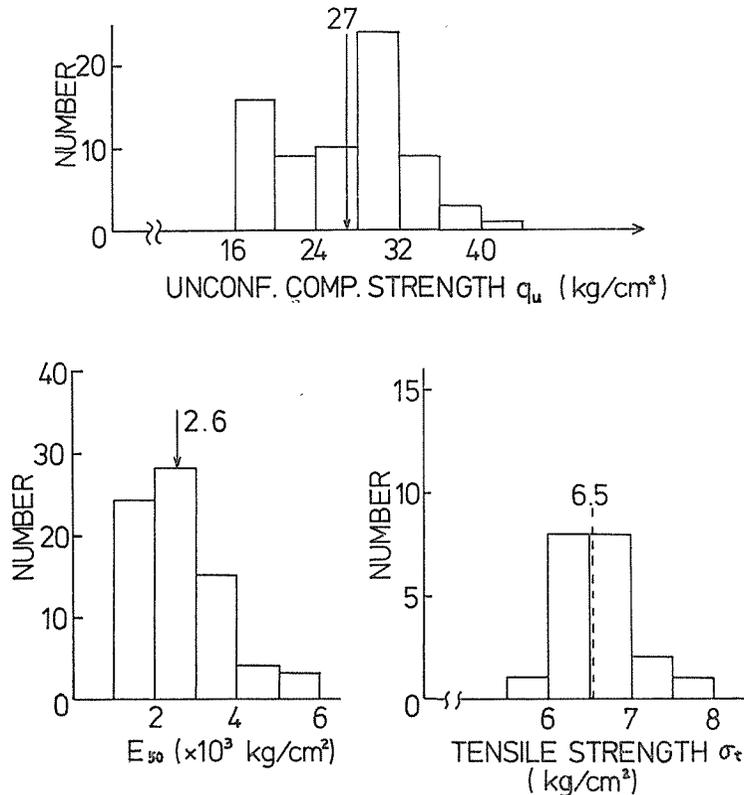


Fig. 1 Mechanical Properties of Bricks

またブロック同士をすべらせる一種のせん断試験を行なってブロック表面のせん断定数を求めたところ、摩擦角 $\phi \approx 30^\circ$ 、粘着力成分 $c \approx 0.01 \text{ kg/cm}^2$ を得た。

2.2 模型成層岩盤斜面

模型は直方体ブロックを図-2に示すような、8通りの層理角となるよう積み上げたものである。同一パターンのものを奥行方向に9列並べ、奥行270mmとしてある。斜面高さは約28~30cmとし、斜面角は $85 \sim 90^\circ$ である。奥行方向は図-3に示すようにL型鋼

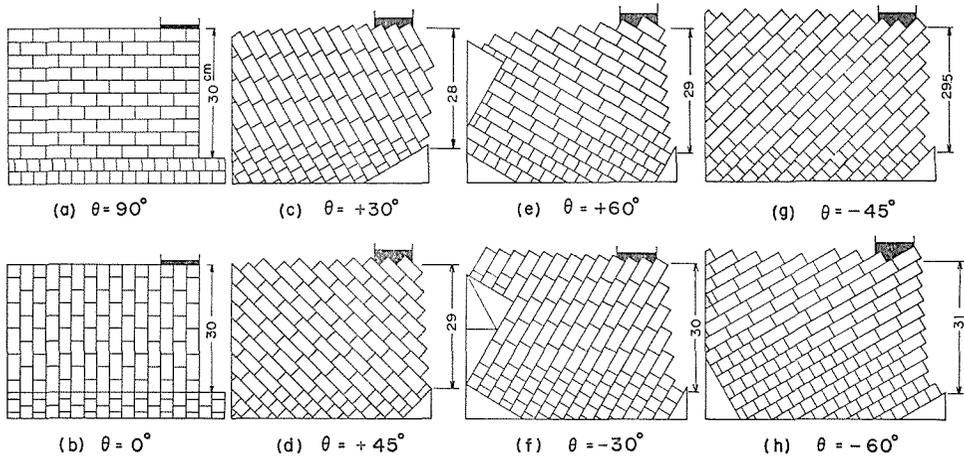


Fig. 2 Joint Patterns and Slope Angles of Bedding Joints

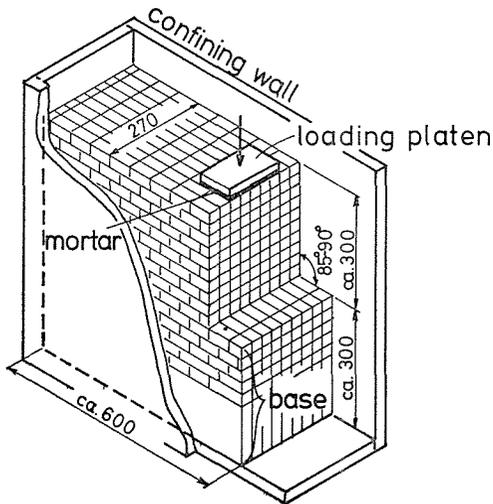


Fig. 3 Model Rock Mass with a Slope

で補強した厚さ24mmの合板によって変位を拘束してあり、のり肩部にセメントモルタルでキャッピングをした上、90×150mmの載荷板を置く。

なお層理角 θ は鉛直方向から層理面までの角であって、図-2においては反時計まわりを正、時計まわりを負とする。したがって、いわゆる流れ目のとき正、差し目のとき負の値を与える。

荷重は油圧ジャッキによって行ない、荷重値は能力5 tonのひずみリングにより検出した。また沈下量はダイヤルゲージによって測定した。

3 実験結果と考察

3・1 荷重・沈下量曲線

8通りの層理角を有する成層岩盤斜面上基礎の荷重・沈下量関係を図-4(a)~(c)に示す。これらの図を通覧して明らかのように、荷重・沈下量関係は層理角によってかなり異なっている。すなわち、

- 1) 層理角によって支持力(最大荷重)値がかなり異なる。
- 2) 最大荷重に到達するまでの沈下量も層理角によってかなり異なる。
- 3) その結果、曲線の形状がピークを有するものから、だらだら進むものまでいろいろあり、曲線のこう配から得られる地盤係数値も区々となる。

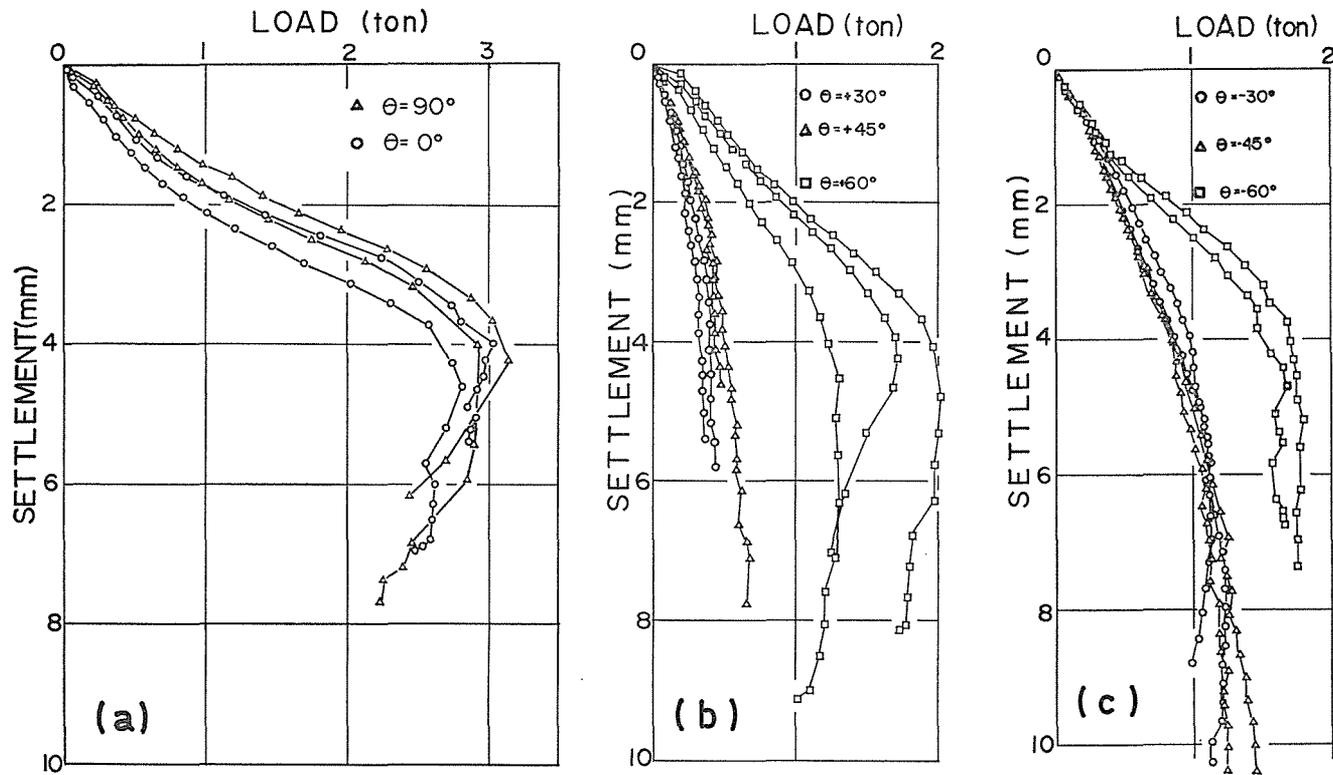


Fig. 4 Load-Settlement Relationships

このような差異が生じるのは、層理の方向と主たる荷重の方向との関係によって、卓越する変形の様式、最終的には卓越する破壊の様式が異なるためではないかと考えられ、これについては節を改めて考察する。

3・2 支持力

前節で述べたように最大荷重で示される基礎の支持力は層理角によって大きく変化する。この変化の様子を示すのが図-5である。図-5は極座標表示を用いており、支持力を対応する層理角方向の半径上に示してある。なお図中に homogeneous と記した円は、ジョイントのない板を9列並べた2次元的には等質等方の場合を示している。

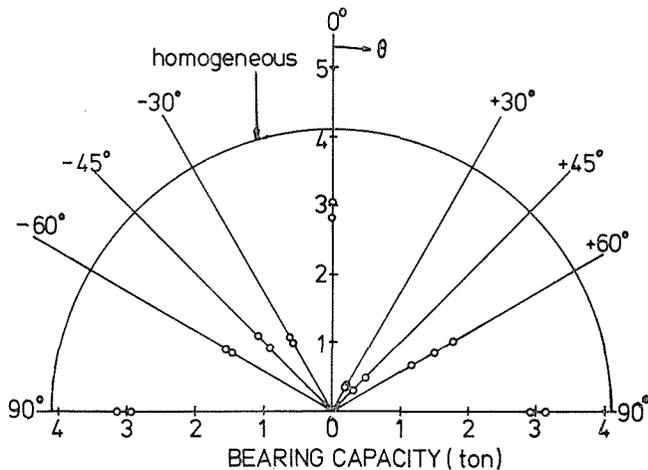


Fig. 5 Relation between Bearing Capacity and Slope Angle of Bedding Joints

層理角が90°(水平)および0°(鉛直)の場合は他の層理角と比べて支持力が最も大きく、安定であることを示しているが、ジョイントの存在により、等質等方の場合に比べると約25%の低下を示している。

層理が水平から漸次傾斜するにつれて、流れ目側、差し目側とも、支持力は急激に低下してゆき、やがて極小値に達する。流し目の30°および45°においては、ブロック間の摩擦角から考えて、支持力は持ち得ないはずであるが、本実験においては奥行方向に若干の拘束力を加えているため奥行方向各列間の摩擦抵抗が生じ、支持力が生じている。さらに層理が鉛直に近づくと、急に支持力が増大するが、どの辺から増大するかは、層理の間隔、斜面高さ斜面角載荷板の寸法の相対的な関係によって決まる。すなわち載荷板を支持している層が斜面の途中に出てしまうか、のり先より内側の基盤内を通るかによるであろう。

3・3 地盤係数

荷重・沈下量曲線の傾きを比較するため、最大荷重の50%荷重の点における接線の傾きを求めて地盤係数 K_{50} (kg/mm) と定義し、これを図-5と同様に表示したのが図-6で

ある。層理角に対して地盤係数の値は大きく変化しているが、その傾向は耐荷力の場合とほとんど同様である。

3・4 変形および破壊の様式

荷重・沈下量曲線、耐荷力、地盤係数などが層理角によって著しい差異を見せるのは、層理の存在により、層理角によって、異なった変形、ないしは破壊様式が卓越するためではないかと推察される。このことを確かめるために、試験終了時点において、成層岩盤の変形・破壊状況の観察を行なった。

写真1～8に各層理角についての変形・破壊状況を示す。これらの写真は載荷中心に近い列において撮影したものである。

層理角 90° (写真-1)では、まず、載荷板直下のブロック自体の破壊により多くのクラックが生じていることが観察される。これらのクラックは主として石膏材料のぜい性せん断破壊によるものと思われる。これと同様のブロックのせん断破壊は流れ目 $60^\circ(+60^\circ)$ 、鉛直(0°)、差し目 $60^\circ(-60^\circ)$ (それぞれ写真2, 5, 8)においても観察される。

また 90° において、ブロック中央部に引張クラックが入っているのが各所に観察される。これはブロックの隅角部への荷重集中により、その真下のブロック中央に集中荷重が作用してあたかも圧裂試験を行ったときのような荷重状態が発生するものと推測される。このようなクラックが発生すると、 0° の場合のジョイントパターンに接近することとなる。 90° と 0° の場合の荷重・沈下量曲線が非常に近いものとなっている原因はこの辺にあるのかもしれない。

流れ目 30° (写真-4)においては上の3層、 45° (写真-3)においては上の6層がすべっている。流れ目 60° においても同様の層間すべりが生じているのが観察される(写真-2)が、同時にブロックに層間のすべりに起因する引張亀裂と、せん断破壊による亀裂が生じているのが観察できる。以上の流れ目の場合には層間のすべりが特徴的である。

これに対して差し目の場合には各層が曲げ変形を生じているのが特徴となっている。すなわち写真6, 7, 8において観察されるように、各層はのり先を通り層理に垂直な線と交わる付近を固定端として、片持ばり的に曲げ変形を生じている。各層の曲げ変形に伴って、層間ではすべりが生じているがブロックの破壊は、上記固定端付近に集中しており、その破壊はブロックの曲げによる引張破壊と判断される。差し目 60° (写真-8)においては載荷板直下のブロックに、せん断破壊による亀裂が生じている。

流れ目における層間のすべりは、載荷初期から徐々に生じるであろう。また差し目におけるブロックの曲げ引張破壊は、曲げ応力の大きい所から順次生じてゆき、全体として進行的な様相を示すものと考えられる。また、引張強度は圧縮強度に比べて著しく低いから、これらの荷重・沈下量関係はブロック自体のせん断破壊が卓越するものに比べて、ピーク

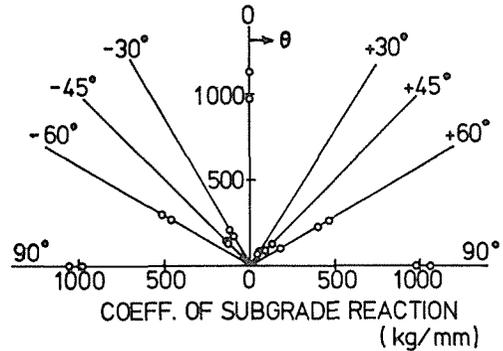


Fig. 6 Relation between Coefficient of Subgrade Reaction and Slope Angle of Bedding Joints

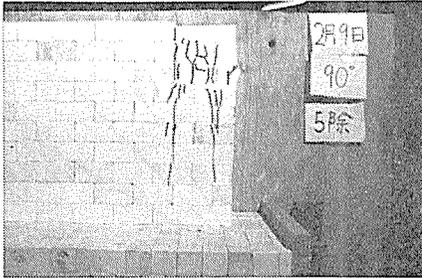


Photo 1 Model Rock Mass after Failure,
 $\theta=90^\circ$

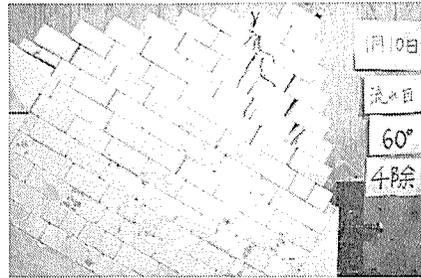


Photo 2 ditto $\theta=+60^\circ$

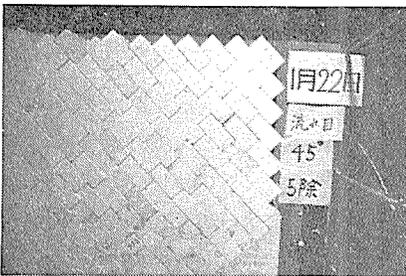


Photo 3 ditto $\theta=+45^\circ$

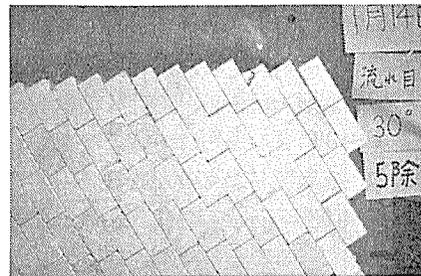


Photo 4 ditto $\theta=+30^\circ$

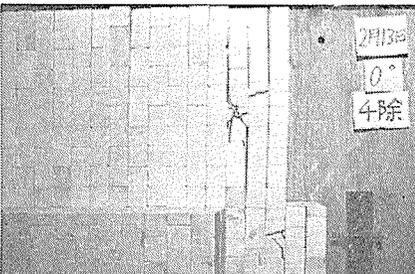


Photo 5 ditto $\theta=0^\circ$

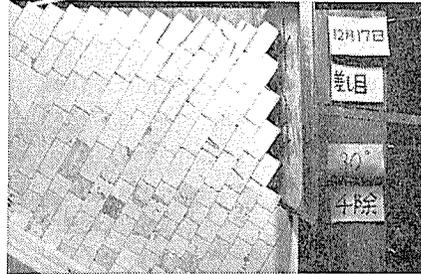


Photo 6 ditto $\theta=-30^\circ$

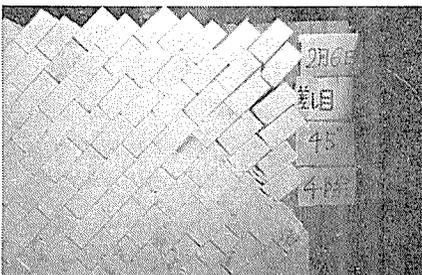


Photo 7 ditto $\theta=-45^\circ$

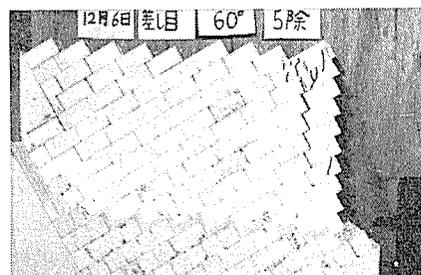


Photo 8 ditto $\theta=-60^\circ$

のないゆるやかな形状のものとなっている。

3・5 まとめ

成層岩盤の荷重・沈下量関係や支持力・地盤係数の値は層理角 θ に大きく左右されるこ

とがわかった。このような差異の生じる原因は、層理角によって卓越する変形・破壊様式が異なることにある。すなわち $\theta = 90^\circ$ 、 0° においては、実質部の変形やせん断破壊が卓越するようであり、流れ目の場合には成層間のすべりが卓越し、差し目の場合には各層が曲げ変形を受け、実質部の曲げ引張破壊が卓越していることがわかった。

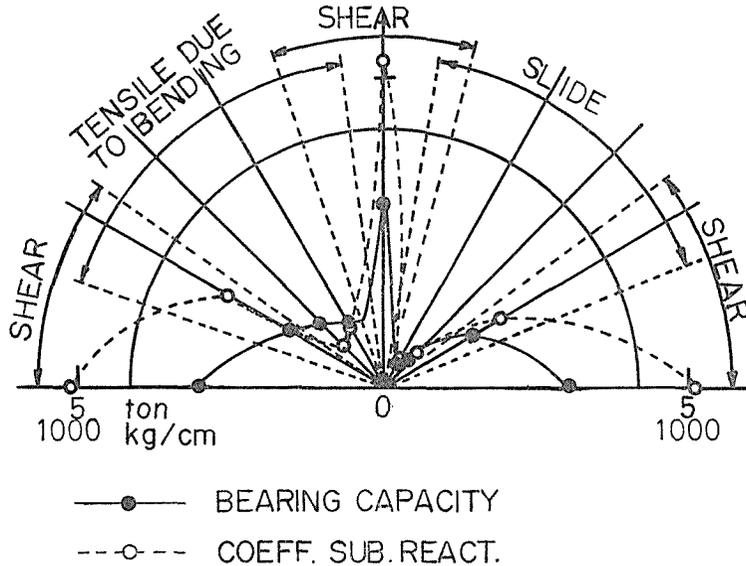


Fig. 7 Deformation and/or Failure Modes

このことをまとめて図示したのが図-7である。上述の典型的な変形・破壊様式が見られる θ の領域と領域の間に、複数の様式が混在する過渡的領域が存在している。 $\theta = \pm 60^\circ$ の実験がこれに相当している。

4 結論と今後の課題

石膏ブロックの積層体によって成層岩盤斜面上基礎の支持力および沈下性状が層理角によってどのように異なるかを調べた。

その結果、層理角は基礎の支持力および沈下に非常に大きな影響を及ぼすことがわかった。その理由は層理角によって卓越する変形様式、破壊様式が異なることにあることがわかった。

今回の実験においてはブロックは空積みとしており、ジョイントを満たす物質は存在していない。また、クロスジョイントの間隔も1種類のみとしている。今後、層厚、ジョイントの性質、クロス・ジョイント間隔などが岩盤安定性にどのように寄与するかの検討を行なうとともに、FEM計算との対比、実際例との対比を行なってゆきたい。将来は成層岩盤の簡易な安定計算法あるいは安定判別チャートのようなものを作成できればよいと考えている。

終りに、常に暖かい助言と激励をいただいている川上 浩教授、実験に多大の労をとっ

てくれた佐々木敏裕君(現岩手県)に感謝の意を表する。また道路工学研究室のスタッフ・学生諸君には実験・作図に関してお世話になった。お礼申し上げる。

なお本研究の概要は土木学会第32回年次学術講演会で発表した¹¹⁾ことを付記する。

参 考 文 献

- 1) John, Klaus W., "Graphical Stability Analysis of Slopes in Jointed Rock", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 94, No. SM2, pp.497~526, 1968.
- 2) 土木学会編, 「土木技術者のための岩盤力学」, 第4章, pp.290~292, 1975.
- 3) Terzaghi, Karl, "Stability of Steep Slopes on Hard Unweathered Rock", Géotechnique, Vol. 12, pp.251~270, 1962.
- 4) Mahtab, M.A, and R.E. Goodman, "Three Dimensional Finite Element Analysis of Jointed Rock Slopes", Proc. 2nd Congress of Int. Soc. for Rock Mechanics, Vol. 3, pp.353~360, Beograd, 1970.
- 5) Goldstein, M., M. Berman, B. Goosev, T. Timofeyeva and A. Turovskaya, "Stability Investigation of Fissured Rock Slopes", Proc. 1st Cong. Int. Soc. for Rock Mechanics, Vol. 2, pp.175~178, Lisbon, 1966.
- 6) Stacey, T.R., "The Behaviour of Two- and Three-dimensional Model Rock Slopes", Quarterly Journ. of Engineering Geology, Vol. 8, pp.67~72, 1974.
- 7) Müller, Leopold, and F. Pacher, "Modellversuche zur Klärung der Bruchgefahr geklüfteter Medien", Felsmechanik und Ingenieur Geologie, Suppl. II, pp.7~24, 1965.
- 8) Sirieys, P.M., "Sur les Lois de Fragmentation des Roches", Proc 1st. Cong. Int. Soc. for Rock Mechanics, Vol. 2, pp.81~86, 1966
- 9) 林 正夫:「不連続な節理面の強度特性——極値分布理論の導入」電力中央研究所技術研究所報告, 土木65052, 1952.
- 10) 前出2) 第7章 p.426.
- 11) 大谷和弘, 小西純一, 佐々木敏裕:「成層岩盤の安定に関する一考察」, 土木学会第32回年次学術講演会講演集, 第3部, pp.52~53, 1977.
- 12) 佐々木敏裕:「成層岩盤斜面の模型実験」, 信州大学工学部土木工学科卒業論文第723号, 1977.