

塩を添加したベントナイトのせん断特性

菊沢正裕*・長谷川高士**・芦原康裕***

粘土の粒子結合構造が変形・強度特性に及ぼす影響を一面せん断試験により検討した。供試体は、NaClやCaCl₂の塩溶液にベントナイトを混ぜ、その後圧密したものである。間隙を満たす塩溶液（外液）のイオン種や濃度から推定すると試料の粒子結合構造は、概ね分散、フロック、アグリゲートに分類された。外液条件、したがって粒子結合構造に対してせん断強さと間隙比が密接な関係をもつこと、及び、ひずみ軟化や硬化といった変形特性も粒子結合構造の影響を受けることを示した。

Keywords : clays, fabric/structure of soils, physico-chemical properties, shear strength

1. 序

粘土の粒子構造がその力学特性と密接に関係することは約30年前にWarkentinら¹⁾が指摘した。最近ではSridharanら¹⁰⁾が有機溶媒を用いた実験から外液の誘電特性と間隙比やせん断特性の関係を検討し、廃棄物による汚染水の影響評価など環境地盤工学上の問題を論じている¹¹⁾。また、Fang³⁾は土壌汚染が基礎構造物の安定に強く影響することを、Torranceら¹²⁾は地すべり粘土の強度がpHに依存することを指摘している。

このような現況とは対照的に外液の塩濃度やイオン価数とせん断特性の関係という極めて基本的な問題がWarkentin以来進展していないように思える。そこで、外液の塩濃度やpHによって粘土粒子の結合形態を理論的に分類できるようになってきたこと¹⁾を踏まえ、モンモリロナイトを主成分とするベントナイトを用い基礎的な実験を行った。その結果、外液条件あるいは粒子結合形態によって変形・強度特性を分類できることを示した。

なお、粘土の力学特性に及ぼす外液環境の影響を明らかにしておくことは、石原⁹⁾も指摘しているように凝灰岩など軟岩の力学特性を評価する上でも重要と考える。

2. 試験方法

海成粘土にも多量に含まれる化学的活性度の高いモンモリロナイトを対象とし、同粘土を主成分とするベントナイト（段谷化学産業原料（株）製ハイボンド300、CaO=0.99%、Na₂O=2.23%）を試料として用いた。

(1) 沈降体積試験

粘土の粉末を水溶液に混ぜ良く攪拌したのち静置すると粘土粒子は凝集沈降するか分散沈降する。前者は凝集した粘土粒子がゆっくり沈降する現象であり、後者は微細粒子が単一に分散する分散相の下方に粗大粒子が沈降し沈積面を呈する現象である¹⁾。このような沈降状態と経時的に変化する沈積面以下の体積（沈降体積）から粘土粒子の結合形態を分類できる。ここでは以下の要領で沈降体積試験を実施した。まず、ペースト状態のCaCl₂と1N（規定）のNaCl水溶液から6種類の濃度（1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02N）の水溶液20mlを作製し、同溶液中に乾燥した粉末状ベントナイト0.5gを投入した。続いて1分間振とう、48時間以上恒温（22°C）で静置、再び30秒間振とうした試料の沈降状態と沈降体積を一定時間（2, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 150, 510, 1440分）毎に観測した。

(2) 一面せん断試験

沈降体積試験の結果を勘案し、0.02, 0.1, 1.0Nの濃度に調整したNaCl及び、CaCl₂水溶液を内径10cmのアクリル容器に入れ、その中にベントナイトを少量ずつ投入（含水比350%以上）した。投入時を含め約3時間動力プロペラで攪拌しその後静置した。沈降が終わるのを待って真空ポンプによる脱気を行い、自重圧密ののち段階的に荷重を増やし最終的に0.2kgf/cm²の予備圧密を行った（塩溶液により異なるが圧密が終了し試料の成形が可能になるのに最長2ヶ月を要する）。せん断方法は、沈降堆積面が破壊面となるよう一面せん断（CD）とした。手順としては供試体を試験機にセットしたのち所定の圧力で再圧密し（2~4日）、排水条件下で緩速せん断（速度0.04mm/分）を行った。急速せん断では破壊領域が狭く、その領域内で粒子が平行配列に変わり易いものに対して、緩速せん断では粒子の再配列が少なく、また広い領域にわたって乱されるとの点を配慮したわけである。もちろん、上記のせん断速度では完

* 正会員 農博 京都大学助手 農業工学科
(〒606 京都市左京区北白川追分町)

** 正会員 農博 京都大学教授 農業工学科

*** 特許庁 (元京都大学学生)

表一 外液条件による粒子結合形態

イオン種 濃度 C (N)	NaCl	CaCl ₂
1. 00	●	○
0. 10	▲	○
0. 02	△	▲
純 水		×

● 面～面結合が極めて優勢なアグリゲート構造
 ○ 面～面結合が優勢なアグリゲート構造
 ▲ 端～面結合が優勢なフロック構造
 △ フロック構造に近い分散構造
 × 分散構造

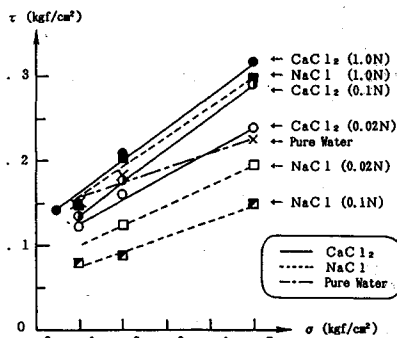
全な排水状態は期待できないが、外液条件に依存した粒子結合形態がせん断特性に及ぼす効果を調べる目的は達せられると考えた。

3. 試験結果および考察

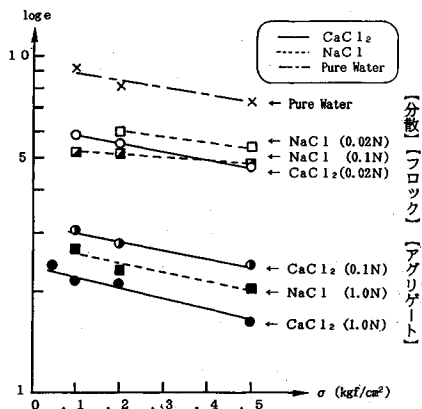
赤江¹⁾は、拡散2重層理論とヘテロ凝集理論に基づいて粘土・水系で粒子間結合が生じる溶液条件を塩濃度-pH 平面上に定め、理論の有効性を沈降体積試験によって検証した。ここに実施した沈降体積試験でも沈降体積が塩濃度の変化に応じて緩やかに変化し粒子結合形態が移行する状況が観察された。そこで典型的な結合形態をとる濃度を表一のように定めた。同表は、赤江による粒子結合分類にも整合している。粒子結合の名称は分野によって異なるが⁶⁾、ここでは以下の定義²⁾に従った。面～面結合からなる1～数枚のタクトイド同士が、面～面で結合する密な構造をアグリゲート、タクトイドが端～面や端～端結合した単位をフロック、フロック同士がさらに結合した単位をクラスター、クラスターやアグリゲートのような団粒(ベッド)を形成せずマクロポーアが少ない状態で、かつランダム構造とは異なり不完全ながら配向性をもつ状態を分散と呼ぶ。

塩濃度が高いとアグリゲートが形成され急速凝集が起こり、低濃度では緩い凝集フロックが形成される。濃度がさらに低いと分散状態となる。一般に低濃度での凝集や分散はpHに強く支配されるが、ここではpHを制御しなかった(NaCl外液のpH値は1Nで9～9.5, 0.1Nで9.3, 0.02Nで9.8～10.2, 純水は11.5)。しかし、結果的に、得られた表一の分類はpHを考慮した場合の理論^{1),2)}と対応するものとなった。なお、同表でCaCl₂外液0.02NとNaCl外液0.1Nはともにフロックと判定されたが前者では急速凝集が見られるなど両者の沈降状態に差異があり、後述のように変形特性も微妙に異なっている。

Griffiths ら⁴⁾は水銀注入法による実験から圧密圧力が初期の粒子構造に与える影響が少ないことを示した。この点は議論の余地もあるが^{7),9)}、ここで対象とする圧密圧と試料に対しては図一2などの結果から圧密後も粒子結合構造が概ね保持されていると考えられる。よって、



図一 圧密圧力σとせん断強さτの関係



図二 圧密圧力σと最終間隙比eの関係

以下の考察は沈降試験から推定される初期の粒子結合構造が圧密後も保持されることを前提としたものである。

図一にせん断強さτと圧密圧力σの関係を示す。外液条件によらずτは通常のようにσとともに増大するが膨潤性の高い純水や低濃度NaClで増大の度合いが小さい。Sridharan ら¹⁰⁾は有機物質がベッド間の結合力を高めることから外液が有機溶媒の場合、純水に比べてτが大きくなることを示した。しかし、塩溶液は有機溶媒のような効果をもたないはずである。そこで、外液の種類や濃度によってτが変わる原因として、ベッドを形成する粘土粒子の結合形態が外液条件に依存して変わりベッド自体の強さが変わることにあるとして以下考察を進める。

粒子結合構造の違いは間隙比に反映される。ベントナイト試料は間隙流体が大半を占め、かつ透水性が極めて低いいため排水せん断時の間隙比の変化も少ない。そこでせん断後の間隙比eを基準にσとの関係を図二に示した。同図ではσの増加に対するeの低下は小さくGriffiths らの指摘通りそのほとんどがアグリゲートやフロック間の間隙(マクロポーア)の変形によるものと思われる。なぜなら、図二の下3本(アグリゲート)と

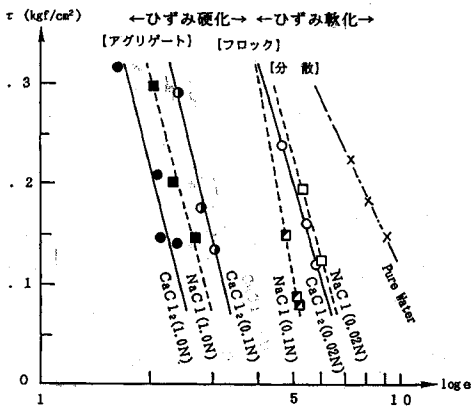


図-3 最終間隙比 e とせん断強さ τ の関係

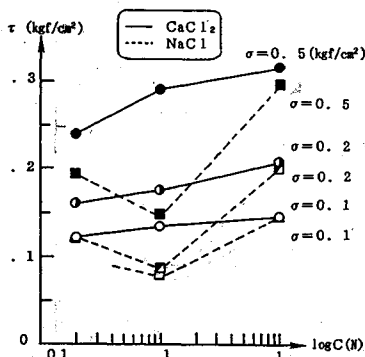


図-4 濃度 C とせん断強さ τ の関係

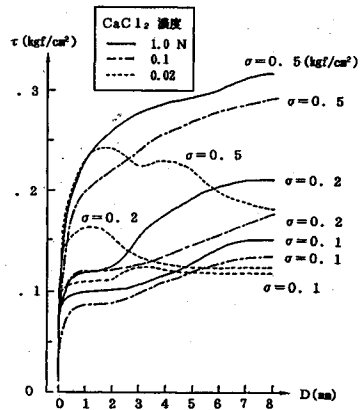


図-5 水平変位 D とせん断強さ τ の関係

それ以外の e に格段の差があること、 σ が増すときの e の低下が単純で、 e の低下量が粒子構造の違いからくる e の差に比べ小さいこと等による。ただし、分散構造では圧密時その構造を保持しながらも配向性を高め e が低下するものと考え。ところで、図-1 では、 CaCl_2 外液で濃度増加の順に τ が大きくなるのに対し NaCl では濃度の順にならない。これに対し、図-2 では分散、ブロック、アグリゲートの順に e が小さくなる中で、 $\sigma \sim \log e$ 関係は外液によらず同一の σ に対し τ は濃度の順に変化している。 σ と τ が線形関係にあることから $\tau \sim \log e$ も外液条件に対して図-2と同様の関係をもつと予想される。

図-3のように $\tau \sim \log e$ 関係はほぼ直線となり、左からアグリゲート、ブロック、分散の領域に区分できる。ただし、領域の境界が明確に定まるわけではない。粒子結合形態が外液濃度に応じて徐々に変化するためである。また、同じアグリゲートに分類される場合でも面-面結合の優勢度は同じではなく(表-1)、図-3でも3本の直線となっている。ところで、カオリンでは図-3と逆の関係、即ち分散構造より綿毛化構造をとるときのほうが同一間隙比に対するせん断強さが大きくなること

れている¹⁴⁾。これは、カオリンの粒子サイズがモンモリロナイトに比べるとはるかに大きく、分散構造になると間隙比が小さくなることによるものと推察される。

図-4に τ と濃度 C の関係を整理した。 CaCl_2 外液では C の上昇に対してブロック→アグリゲート→アグリゲートと構造が変わり(表-1参照)対応する τ が増すのに対して、 NaCl 外液では分散→ブロック→アグリゲートと構造が変わり τ が線形に増加しないことがわかる。このことは、図-1で NaCl のせん断強さが濃度の順に大きくなることに対応している。一方、粒子結合構造と密接に関係する間隙比 e を用いて整理すれば、図-3のように NaCl と CaCl_2 の何れの場合にも濃度が高くなるにつれ直線関係が左へシフトするという特性が現れる。

図-3は有用な関係と思われるがベントナイトという特定の粘土に対するものである。しかし、 e の代わりに I_L なる指標で整理すれば粘土の種類を問わず図-3のような関係が得られる可能性がある。ただし $I_L = (\ln w - \ln w_p) / (\ln w_L - \ln w_p)$ は、甲本⁸⁾が粘土の種類に関わらずせん断強さをユニークに定め得るとして提案した指標である(\ln は自然対数、 w_L , w_p は液性、塑性限界)。

次に、粒子結合形態が変形特性に及ぼす影響を考察する。図-5によると CaCl_2 ではアグリゲートがひずみ硬化、フロックがひずみ軟化を示し、 NaCl ではアグリゲートがひずみ硬化、分散がひずみ軟化、フロックがその中間の特性を示す。純水を用いた場合の分散沈降状況は低濃度 NaCl の場合と類似しており、ひずみ軟化を示した。これらを図-3で分類すると、ひずみ軟化もひずみ硬化もしない NaCl : 0.1 N ラインを中心に左側ではひずみ硬化、右側ではひずみ軟化の領域となる。この特性は、綿毛化構造ではせん断時に端～端結合や端～面結合が破壊されるためひずみ軟化を示し、ランダム構造ではひずみ硬化を示すとされる一般的な知見¹³⁾とは符合しない。

最後にイオン価数の影響をさらに検討するため AlCl_3 を用いて行った実験の結果を若干述べる。0.02, 0.1, 1.0 N の3濃度に対する $\sigma \sim \tau$ 関係はすべて図-1の CaCl_2 濃度 0.1 N と 1.0 N の間に入り、間隙比を考慮した図-2以降の一連の特性は AlCl_3 では全く認められなかった。応力・変形曲線は NaCl や CaCl_2 のものと異なり焼きなまし軟鋼やアルミニウム合金と類似した特性を示した。

4. 結 論

化学的活性度の高いモンモリロナイトを主成分とするベントナイトのせん断特性について以下の知見を得た。

(1) 外液条件(イオン種と濃度)によって粘土粒子の結合形態を分類した。(表-1)

(2) せん断強さと間隙比は密接に関係し、粒子結合形態によって分類できる。(図-3)

(3) 応力・変形曲線(図-5)は、図-3の NaCl (0.1 N) ラインの左側の条件でひずみ硬化を、右側の条件でひずみ軟化を示した。

参 考 文 献

- 1) 赤江剛夫：粘土・水系中の粒子間結合存在領域の推定と

- 沈降体積, 滋賀県立短期大学学術雑誌, 36号, pp.32~38, 1989.
- 2) 赤江剛夫：添加塩溶液濃度がベントナイト・水系の分散・凝集および流動特性に及ぼす影響, 農業土木学会論文集, 133号, pp.43~49, 1988.
- 3) Fang, H.Y. : Soil-pollutant interaction effects on the soil behavior and the stability of foundation structures, *Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks*, Balasubramaniam et al. (eds) Balkema, pp.155~163, 1987.
- 4) Griffiths, F.J. & Joshi, R.C. : Change in pore size distribution due to consolidation of clays, *Geotechnique* 39-1, pp.159~167, 1989.
- 5) 石原裕治：軟岩の力学特性に及ぼす塩化ナトリウムおよび塩化カルシウム水溶液濃度の影響, 土木学会論文集, 400号/III-10, pp.75~81, 1988.
- 6) 嘉門雅史・前田 隆：土の物理化学と土質工学への応用 4. 土の構造, 土と基礎, 33-7, pp.73~79, 1985.
- 7) 嘉門雅史・安原一哉・喜田大三：前掲6) : 7. 土の体積変化, 土と基礎, 33-11, pp.75~84, 1985.
- 8) 甲本達也・加来 研：攪乱粘土の非排水剪断強さ特性について, 農業土木学会講演集, pp.422~423, 1990.
- 9) Nagaraj, T.S. et al. : Discussion on 4), *Geotechnique*, 40-2, pp.303~309, 1990.
- 10) Sridharan, A. & Rao, G.V. : Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept, *Geotechnique*, 29-2, pp.177~193, 1979.
- 11) Sridharan, A. & Sivapullaiah, P.V. : Engineering behavior of soils contaminated with different pollutants, op.cit. 3), pp.165~178.
- 12) Torrance, J.K. & Pirnat, M. : Effect of pH on the rheology of marine clay from the site of the south nation river, Canada, *Landslide, Clays and Clay Minerals*, 32-5, pp.384~390, 1984.
- 13) 安原一哉・山内豊聡：前掲6) : 8. 土の物理化学とせん断, 土と基礎, 33-12, pp.47~54, 1985.
- 14) Warkentin, B.P. & Yong, R.N. : Shear strength of montmorillonite and kaolinite related to interparticle forces, *Clays and Clay Minerals*, Vol.9, pp.210~218, 1962. (1990.8.6受付)

DIRECT SHEAR BEHAVIOR OF BENTONITE WITH SALT

Masahiro KIKUSAWA, Takashi HASEGAWA, Yasuhiro ASHIHARA

We examined the effects of the fabric of clay on its strength and deformation properties by a standard box shear test. Specimens used are consolidated clay of bentonite with salt such as NaCl and CaCl_2 . The fabric of the clay is either dispersed, flocculated or aggregated structure, by estimating from the conditions of its pore fluid, that is, salt species dissolved and its concentration. It is found that the shear strength is closely related to the void ratio for its pore fluid condition and its fabric. It is shown that the fabric also affects the deformation characteristics, such as strain hardening or softening.

地盤の有限要素法解析ソフト

未来設計企業
CRC

世界標準のソフトウェア Mr. SOIL Version-2.5

■豊富な機能

- 弾性及び弾塑性解析が可能。
- 掘削・盛土機能により、施行ステップにしたがった解析が可能。
- 荷重の段階的載荷が可能
- 側圧係数の指定が可能*
- 充実したグラフィック機能
- 変位ベクトル図[※]、変位コンター図[※]
- 応力ベクトル図、応力コンター図
- 構・梁要素断面力図[※]
- 降伏要素プロット図[※]

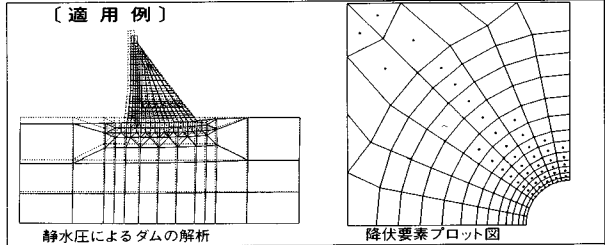
*はV.2.5による追加機能

■お求めやすい価格設定

パソコン版(PC-9801シリーズ)……64万円(税別)

EWS版(NEWS, SUN, HP, VAX など)……220万円(税別)

■実績が示す高信頼性(使用実績187名 平成2年度8月末現在)



静水圧によるダム解析

降伏要素プロット図

(株)アースコンサルタント アイドールエンジニアリング(株) (株)葵エンジニアリング (株)荒谷建設コンサルタント 石川工業高等専門学校 (株)ウエスコ 上山試錐工業(株) 運輸省港湾技術研究所 (株)エイトコンサルタント (株)N T T 鈴鹿電気学園 (株)オリエントコンサルタント (株)応用地学研究所 大阪大学 大阪市交通局 大阪市立工業研究所 (財)大阪土質試験所 大阪府立工業高等専門学校 大阪府立大学 岡山大学 岡山大学 (株)奥村組 技術研究所 奥村組土木興業(株) 小田急建設(株) 小野田ケミコ(株) 小野田ケミコ(株) 鹿児島大学 梶谷エンジニア(株) 鹿島建設(株) 金沢大学 川崎地質(株) 関西電力(株) 岩水開発(株) 関西航測(株) (株)基礎建設コンサルタント 関西大学 九州共立大学 九州産業大学 九州産業大学 九州産業大学 九州大学 九州電機開発(株) 京都市立伏見工業高等学校 京都大学 京都大学 京都大学 協和電設(株) 近畿実測(株)	近畿大学 近畿大学 近畿大学 岐阜工業高等専門学校 久保田建設(株) (株)熊谷組 (株)熊谷組 (株)建設企画コンサルタント (株)建設工学研究所 神戸大学 神戸大学 神戸大学 神戸大学 興亜開発(株) 佐賀大学 佐伯建設工業(株) 佐田建設(株) 佐藤工業(株) 佐藤工業(株) サンコーコンサルタント(株) 滋賀県立短期大学 (株)CIT構造技術研究所 島根大学 昭和地質情報リサーチ(株) (株)新日本技術コンサルタント 新日本製鉄(株) 新技術計画(株) 技術設計部 J.R.西日本コンサルタント(株) (株)住化土建建設 住友建設(株) 住友建設(株) (株)西播設計 (株)ソイルプレーン 促進工務(株) (株)第一コンサルタント 大成建設(株) 大成基礎設計(株) 大豊建設(株) 大豊建設(株) (株)ダイヤコンサルタント (株)ダイヤコンサルタント (株)高千穂設計コンサルタント (株)タカラエンジニアリング (株)竹中工務店 玉野総合コンサルタント(株) (株)地崎工業 (株)地盤調査事務所 (株)中央設計技術研究所 中央復建コンサルタント(株)	中国電力(株) 中部工務(株) 中部電力(株) 通信土木コンサルタント(株) (株)テノックス 東海大学 (株)東京建設コンサルタント 東京大学 東京地下工事(株) 東京都土木技術研究所 東建地質調査(株) 東鉄工業(株) 東電設計(株) 東電設計(株) (株)東日測量設計社 東邦エンジニアリング(株) (株)東和技術コンサルタント 動力炉・核燃料開発事業団 戸田建設(株) (株)中堀ソイルコーナー 西谷技術コンサルタント(株) 西松建設(株) 技術研究部 日本大学 日本大学 日本鋼管(株) 日本鋼管(株) 日本シールドエンジニアリング(株) 日本工営(株) 日本工営(株) 日本交通技術(株) 日本通信建設(株) 日鉄敏コンサルタント(株) 日本水工設計(株) 日本道路公団 試験所 (株)日本パブリックエンジニアリング (株)日建技術コンサルタント (株)ニュー設計 八戸工業大学 林建設工業(株) (株)阪神コンサルタント 東日本旅客鉄道(株) (株)日造造船技術研究所 ヒメノコンサルタント(株) ヒロセ(株) 福井大学 (株)藤井基礎設計事務所 フジタ工業(株) フジタ工業(株)	(株)復建エンジニアリング (株)復建エンジニアリング 藤原技術士事務所 復建調査設計(株) 不動建設(株) 不動建設(株) 不動建設(株) (株)芙蓉調査設計事務所 北光ジオリサーチ(株) 前田建設工業(株) 前田建設工業(株) 前田設計(株) (株)松村組 三井建設(株) 三菱重工業(株) 明治コンサルタント(株) メトロ設計(株) (株)守谷商会 山口大学 山口大学 山口大学 (株)四電技術コンサルタント りんかい建設(株) 和歌山工業高等専門学校 和歌山工業高等専門学校
--	--	---	---

(五十音順 敬称略)

株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本支社

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 営業担当: 岩崎

個別要素法プログラム **CRC**

未来設計企業

CRC-ITASCAが提供するカンドールモデル個別要素法(DEM)!!

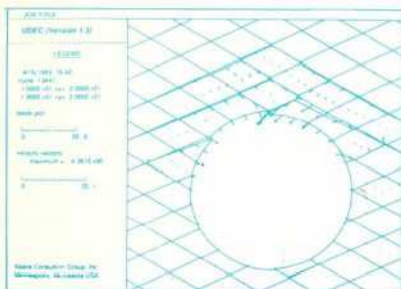
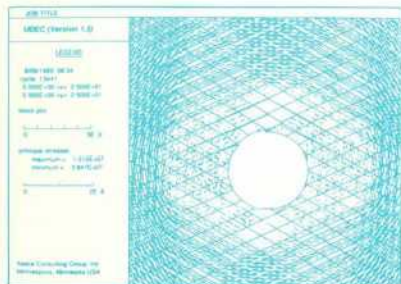
二次元個別要素法プログラム(ソースコード)



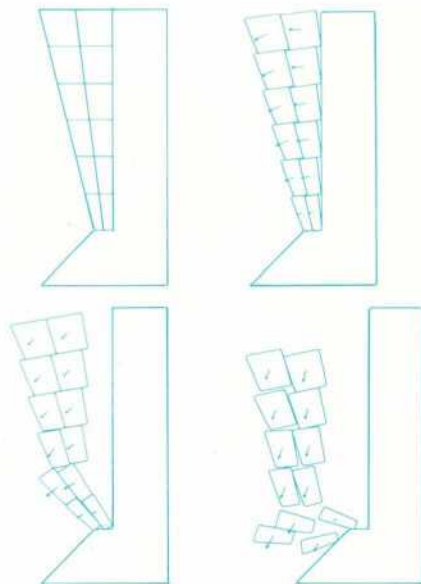
三次元個別要素法プログラム(ロードモジュール)



個別要素法とは、1971年にDr. P. Cundallが発表した不連続体に対する動的崩壊過程をシュミレートするための解析手法です。すなわち、岩盤をジョイントとブロックから構成される岩石ブロックの集合体と考え、個々のブロックの挙動を時々刻々に追跡し、全体挙動を解析しようとするものです。集合体としての岩盤や地盤が最終的に、安定状態となるのか、あるいは大変形するのか、崩壊していくのかなど、時間の経過に伴うモデル全体のブロックの動きや破壊の進行の様子を視覚的に追跡できます。現在、岩盤・地盤の崩落や安定性の解析など、不連続体力学の有力な解析手法となっています。



大深度地下掘削時の安定解析



岩盤斜面崩落シミュレーション

- 岩盤の転倒・滑落解析
- 岩盤の掘削解析
- 不連続性岩盤の安定解析
- 地震応答解析
- 浸透-ブロック連成解析(UDEC)
- 熱-ブロック連成解析(UDEC)

■販売条件

UDEEC・3DEC

- ◆EWS, SUN-SPARC, HP, SONY-NEWS
- ◆IBM-PC/AT及び互換機
- ◆UDEECはソースコードで提供します。
- ◆3DECはロードモジュールで提供します。

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本支社

〒541
 大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
 (06)241-4121 営業担当: 岩崎