

ロックアンカーの引抜き破壊モード

蛭子清二*・オメル アイダン**・河村精一***・
川本朧万****

ロックアンカーの破壊機構の解明を目的に原位置引抜き実験および拡底形式を含めた模型引抜き実験を実施した。その結果から、ロックアンカーには引張部とアンカー体の内部に形成される境界面の破壊、拡底形式アンカー模型では地盤の強度に依存した逆円錐形状の破壊面が認められた。ここでは、ロックアンカーを中心に拡底形式アンカーも含めて、破壊モードを影響要因と関連付けて統一的に分類し、破壊の発生過程に関する解釈を示す。

Key Words: rock anchor, pull-out test, finite element analysis, observation, classification of failure modes

1. 緒言

ロックアンカーはテンドン、グラウトおよび岩盤から構成される構造物で、円柱形状をなすアンカー体は引張部のテンドンを介して外部の構造物と連結される¹⁾。ロックアンカーに引抜き荷重を加えて行くと、最大荷重経験後にアンカーは耐荷力を失い破壊に至る。このようなアンカー構造全体の破壊を支配する破壊面の発生位置は引張部とアンカー体との2種類に大別される。引張部のテンドンの破壊は人工材料の引張破壊であり、破壊モードと耐荷力を容易に知ることができる。一方、アンカー体の破壊に関しては、その構造と形状、構成材料、岩盤、アンカー体内部に形成される境界面の強度・変形特性および引抜き荷重の作用位置といった多くの影響要因が存在するため、これらに依存した複数の破壊モードの発現が予想される。ロックアンカーの設計においては、評価の容易な引張部のテンドンで破壊が発生するように、アンカー体の構造決定、特に従来の実績から定着長が余裕を持って設定されているのが実情であろう。このため、実務で使用されているロックアンカーを極限にまで載荷したとしても、最初に引張部のテンドンが破断するため、アンカー体に発現する破壊現象を知ることが困難である。

Littlejohnのレビュー²⁾によると、ロックアンカーの設計においてはその破壊モードとして、①テンドンの破断、アンカー体内部に形成される境界面の破壊、すなわち②テンドン/グラウト間と③グラウト/岩盤間の破壊および④岩盤の破壊を考慮する必要があるとしている。

そして②と④に関する事例が少ないため、アンカー体については③のグラウト/岩盤間境界面の破壊が支配的に発生するとして、この面のせん断強度と岩種との関係が示されている。このようなアンカー体と岩盤間境界面の破壊を認めた上で、アンカー体および周辺岩盤挙動の数値解析^{3),4)}や理論モデルの提案^{5)~9)}が行われてきた。また、Aydanら^{10)~13)}はアンカー体に形成される境界面にも配慮した有限要素モデルや理論モデルを提案している。しかし最近の動向として、テンドンの周囲に防食用シースを配置して、従来の仮設から本設構造物へとアンカーの利用目的が変化している。このため、テンドン径に対してグラウト径が従来よりも相対的に大きくなり、アンカー体に発現する破壊モードも異なってくるのが考えられる。

ロックアンカーの破壊に影響を及ぼす要因と破壊モードとの関係を知ることは、ロックアンカーの破壊機構を解明しこれを合理的な設計へと結び付けるための重要な要素となる。本研究では、原位置引抜き実験および拡底形式を含めたアンカー模型の引抜き実験、さらにこれらをモデル化した有限要素解析を実施する。その結果から、ロックアンカーを中心に拡底形式アンカーも含めて、これらの破壊モードを影響要因と関連付けて統一的に分類し、その発生過程に関する解釈を示す。

2. 円柱形式ロックアンカーの破壊モード

(1) ロックボルト模型の引抜き実験

a) 実験の概要

川本ら¹⁴⁾、アイダン^{15),16)}は図-1の模式に示す3軸セルを用いてロックボルト模型の引抜き実験を実施した。模型の岩石部分には、整形の容易さおよび均質・等方な力学的な性質を示すことに配慮して、直径12cm、高さ20cmの大谷石を使用した。これの中央部を軸方向に50mm径で削孔し、孔内に鋼棒をモルタルで定着した。こ

*正会員 工修 (株)奥村組技術研究所地盤研究室主任研究員 (〒300-33 つくば市大砂 387)

**正会員 工博 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科

***正会員 工修 中部電力(株)土木建築部火力原子力開発グループ

****正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科

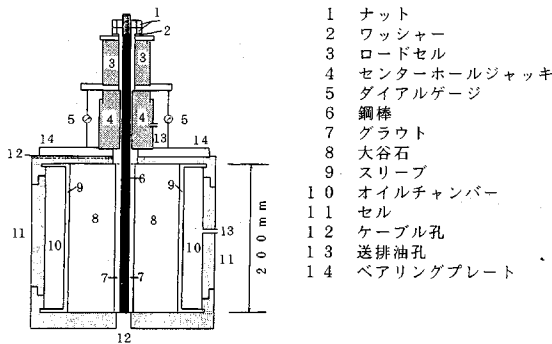


図-1 3軸セルの模式

表-1 模型引抜き実験の要因

要因	水準
削孔径 (モルタル径) (mm)	50
鋼棒径 (mm)	13, 19
拘束圧 (MPa)	0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
鋼棒表面の形状	異形鉄筋, 丸鋼

表-2 大谷石とモルタルの強度・変形特性

強度・変形特性	大谷石	モルタル
1軸圧縮強度 σ_c (MPa)	11.0	14.7
引張強度 σ_t (MPa)	1.5	1.3
粘着力 c (MPa)	3.0	3.0
内部摩擦角 ϕ (度)	37	43
ヤング率 E (MPa)	1800	3800

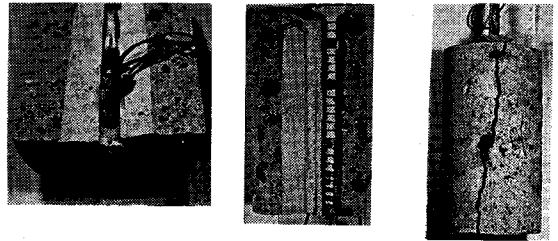
の模型を3軸セルの中に設置し、ボルト軸に直角な方向に一定の拘束圧を加えた状態で鋼棒に引抜き荷重を加えた。実験要因を表-1に、大谷石とモルタルの強度・変形特性を表-2に示す。

b) 模型の破壊状況

ロックボルト模型の破壊状況を写真-1に示す。これを分類しその発生条件を整理すると次のようになる。

① 鋼棒の抜け出し

鋼棒とグラウト間の境界面で破壊が発生して鋼棒が抜け出した破壊モードである。これは丸鋼を使用した全ての模型で発生した。異形鋼棒を使用した模型では鋼棒径が13mmの場合、すなわち鋼棒径とグラウト径との比が0.260で鋼棒径が19mmの場合の比0.380よりも小さくて、相対的にグラウト径が大きな場合に発生した。境界面の破壊状況は丸鋼ではグラウトがほとんど損傷を受けずに滑らかな表面であるのに対して、異形鋼棒では鋼棒リブ間凹部のグラウトが削り取られ丸鋼に比較して粗い表面であった。



(a) 鋼棒/グラウト間境界面の破壊

(b) 割裂破壊

写真-1 模型の破壊状況

② グラウトの抜け出し

グラウトと大谷石間境界面で破壊が発生し、鋼棒とグラウトが一体となって抜け出した破壊モードである。これは、鋼棒径が19mmの異形鋼棒を使用した模型でグラウト径が相対的に小さな場合に発生した。

③ 模型半径方向の割裂破壊

模型中心軸を通る鉛直面でグラウトと大谷石を2分する半径方向の破壊である。これは異形鋼棒を使用した模型で拘束圧が0MPaの場合にのみ発生した。この破壊は単独で発生したのではなく、上述した①、②の境界面の破壊モードが発生した模型に併発して認められた。

以上の観察結果から、境界面の破壊がその面の表面形状、これを構成する両側の材料および拘束圧に依存した見掛けのせん断強度と境界面の位置におけるせん断応力の集中の程度から決まることが分かる。

模型半径方向の割裂破壊は次のような過程で発生したと考えられる。異形鋼棒とグラウト間の境界面では、両材料が弾性変形した後に、図-2の模式に示すように、リブの凹凸形状に沿ったグラウトのすべりが発生する。境界面のグラウトは半径方向外側に変形するため、見掛け上グラウトの内周面に内圧が作用する場合と同様な状況となり、半径方向に体積膨張(ダイレイタンス)が発生する。以後、材料のせん断破壊に起因するダイレイタンスと区別する意味で、境界面のすべりに起因する体積膨張を幾何学的なダイレイタンスと呼ぶことにする。幾何学的なダイレイタンスは拘束圧が無い場合に大きく発生し、円周方向に誘起される引張応力から模型を2分する破壊面が形成される。3軸セルの外周面円周方向に貼付したひずみゲージの測定値と異形鋼棒の変位との関係を引抜き荷重と関連させて示すと図-3のようになる。同図から、3軸セルの外周面には円周方向の大きな引張ひずみが発生しており、鋼棒とグラウト間の境界面において幾何学的なダイレイタンスが発生したこ

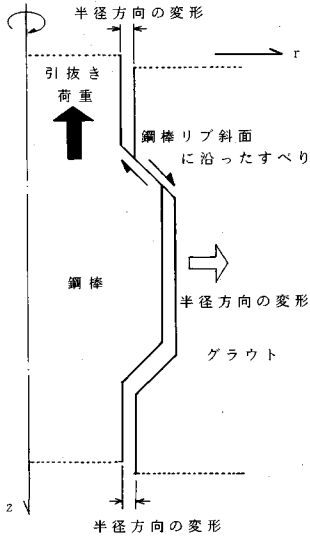


図-2 境界面の幾何学的なダイレイタンス

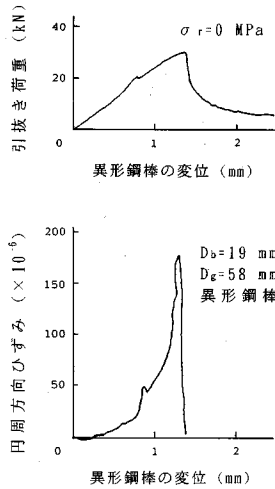


図-3 3軸セルの円周方向ひずみ

とを示している。ここで示した割裂破壊は鉄筋コンクリートの分野で異形鉄筋に沿ってコンクリートに発生し構造物の表面まで進展する縦ひびわれ¹⁷⁾に対応している。ロックボルト模型の場合には、これがコンクリートに相当するグラウトを越えて大谷石に及んでいる。

以上のように、ロックボルト模型ではアンカー体の内部に形成される境界面においてせん断破壊が発生し、これが模型の全体破壊を支配する破壊面となっていることが分かる。一方、模型半径方向の割裂破壊は境界面における幾何学的なダイレイタンスに起因して発生することから、境界面にせん断破壊が発生する以前に発現することが予想される。このため、割裂破壊は最大引抜き荷重に至るまでの荷重～変位関係の剛性低下等の非線形性に寄与しているものと思われる。なお、模型に発現した破壊モードは(2)に後述するロックアンカーの原位置引抜き実験において、定着長の小さな試験体に認められたものと良く対応している。したがって、ここで述べた破壊挙動に関しては、大谷石を用いたことで特徴的に現れたものではなく、均質・等方な岩盤に定着されたロックアンカーの挙動を示していることが予想される。

(2) ロックアンカーの原位置引抜き実験

a) 実験の概要

地質状況の異なる砂岩および花崗岩岩盤を対象にして、ロックアンカーの原位置引抜き実験を実施した¹⁸⁾。実験要因、水準配置等の概要を表-3に示す。以後、実験場所をそれぞれ砂岩地区、花崗岩地区と呼ぶ。

試験体はテンドン軸回りに対称な構造をなし、中心軸を通る鉛直断面で示すと図-4のようである。テンドン

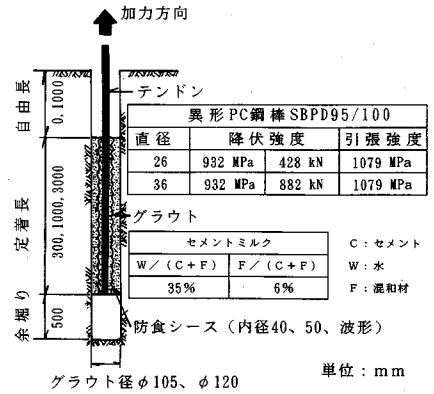


図-4 試験体の構造と使用材料

表-3 原位置実験の概要

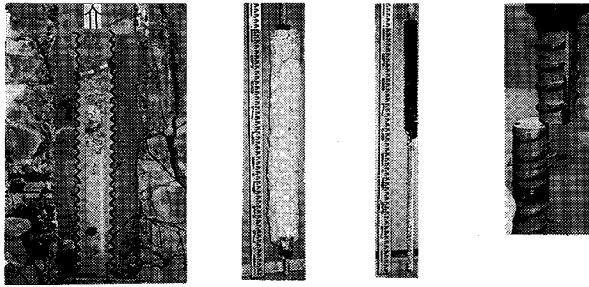
実験場所	岐阜県南濃町	奈良県都祁村		
主要な岩種	砂岩	花崗岩		
岩級区分*1	C _M ~D	B~C _H		
岩盤の変形係数*2 E _r (MPa)	74~1475	1011~5699		
アンカー体定着長 l _a (cm)	30, 100, 300	300		
テンドン径/削孔径 D _t /D _h (mm/mm)	26/105, 36/120	26/105		
試験体数	D _t /D _h	26/105	36/120	36/120
	l _a =30	3 (3)*3	3 (3)*3	0
	l _a =100	3	3	0
	l _a =300	3 (39)*4	3	3

*1: 電中研式岩盤分類
*2: ボーリング孔内載荷試験の上下限值
*3: 防食シースの無い試験体数
*4: 自由長の無い試験体数3, 繰返し載荷用試験体数6, 群アンカー用試験体数12, 実基礎用試験体数18

には異形 PC 鋼棒を使用し、これを回転打撃式の削岩機で掘削したアンカー孔に定着した。グラウトには無収縮材を混和したセメントミルクを使用した。また、ポリエチレン製の波形防食シース管をテンドン材の周囲に配置した。グラウト材、シース材の力学特性を表-4に示す。

b) ロックアンカーの破壊モード

実験終了後の試験体には、写真-2に示すように、4種類の破壊モードが観察された^{18), 19)}。これらの破壊モードを実験場所と定着長別に整理して表-5に示す。同表から、ロックアンカーの破壊モードがテンドン材の破断と前述した模型実験と同様なアンカー体内部に形成される境界面の破壊の2種類であることが分かる。破壊モードと定着長との関係を見ると、定着長が300cmの場合にはアンカーを定着した岩盤の種類にかかわらず必ずテンドンが破断した。これに対して定着長が30cmや100cmの短い場合には、次のようなアンカー体内部に形成



(a) テンドン材の抜け出し (b) グラウト/岩盤間の抜け出し (c) 境界面の複合抜け出し (d) テンドン材の破断
 $l_a=30\text{ cm}$ $l_a=100\text{ cm}$ $l_a=100\text{ cm}$ $l_a=300\text{ cm}$
 $E_r=254\text{ MPa}$ $E_r=109\text{ MPa}$ $E_r=177\text{ MPa}$ $E_r=2059\text{ MPa}$
 $D_t/D_g=26/105$ $D_t/D_g=26/105$ $D_t/D_g=26/105$ $D_t/D_g=36/120$

写真-2 原位置実験のロックアンカーの破壊モード

表-4 グラウト材, シース材の力学特性

グラウト材	1軸圧縮試験	ヤング率 E_{e0} (MPa)	10118	
		圧縮強度 σ_c (MPa)	61	
	破壊ひずみ ϵ_f (%)	0.836		
グラウト材	3軸圧縮試験	粘着力 c (MPa)	ピーク	8.86
			残留	2.38
		内部摩擦角 ϕ (度)	ピーク	57
			残留	61
圧裂試験	引張強度 σ_t (MPa)	3.08		
シース材	素材引張試験	降伏応力 σ_y (MPa)	24.5	
		降伏ひずみ ϵ_y (%)	10	
		破断応力 σ_f (MPa)	27.5	
		破断ひずみ ϵ_f (%)	800	

表-5 原位置実験のロックアンカーの破壊モード一覧

実験場所	砂岩地区	花崗岩地区
定着長 30 cm	① テンドン周囲の抜け出しモード	—
定着長 100 cm	① テンドン周囲の抜け出しモード ② グラウト周囲の抜け出しモード ③ 複数境界面の複合した抜け出しモード	—
定着長 300 cm	④ テンドンの破断モード	④ テンドンの破断モード

される材料間の境界面で破壊が発生し、破壊面となる境界面内側の構造が一体となって抜け出した。

- ① テンドン/グラウト間境界面の破壊
- ② シース/グラウト間境界面の破壊
- ③ グラウト/岩盤間境界面の破壊
- ④ テンドン/グラウト, シース/グラウト間の2つの境界面の破壊が複合

i 引張部の破断

引張部のテンドンが破断したときの岩盤の変形係数の

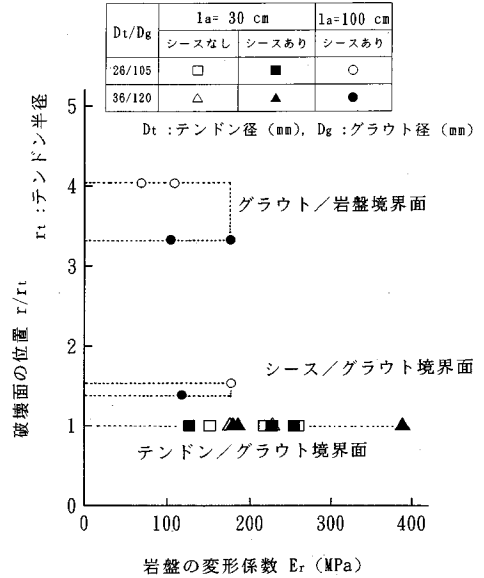
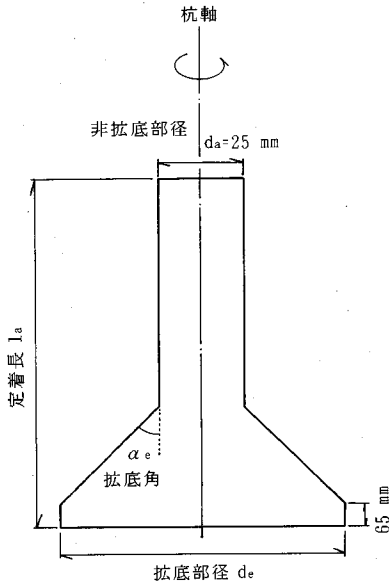


図-5 破壊面の位置と岩盤の変形係数, 定着長との関係

最小値は114MPaであった。このように、岩盤の変形係数が小さな値であっても定着長を300cmにとれば、ソイルアンカーのようにアンカー体の下端部を拡底しなくとも円柱形式のアンカー体で引張部を上回る耐荷力を期待できることが分かる。しかし、グラウトに発生するクラックの観察結果あるいはテンドンの軸ひずみから推定したせん断応力の深度方向分布によると、テンドンが破断する前に必ずテンドン/グラウト間境界面近傍のグラウトに局所的な破壊の発生が認められており、テンドンが破断するモードであってもアンカー体が健全な状態ではないことを示している^{20), 21)}。なお、岩盤の変形係数はボーリング孔内載荷試験と表面波探査を組み合わせた方法²²⁾からそれぞれのアンカー孔ごとに推定した。

ii アンカー体の破壊

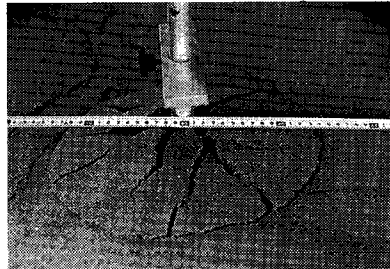
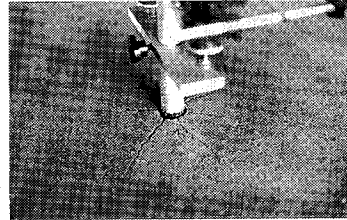
アンカー体に形成される境界面の破壊について、アンカーの中心軸から破壊面までの半径方向の距離と岩盤の変形係数, 定着長との関係は図-5のようになる。同図から、定着長100cmのアンカーでは、シース/グラウト間境界面、あるいはアンカーの中心軸から離れたグラウト/岩盤間境界面の両方で破壊が発生していることが分かる。また、岩盤の変形係数が同じような値であっても、定着長が30cmのアンカーではテンドン/グラウト間境界面、定着長100cmの場合にはシース/グラウト間境界面やグラウト/岩盤間境界面で破壊が発生したことが分かる。これらのことは、境界面に発生するせん断応力の集中やその面の強度が岩盤の変形係数やアンカーの定着長に依存して変化することを示している。一

図-6 模型杭の形状^{20), 24)}

方, テンドンに貼付したひずみゲージの測定結果から, 同一の引抜き荷重に対して岩盤の変形係数が大きな場合あるいは定着長が短い場合に, テンドン/グラウト境界面の推定せん断応力が集中し, 同時にその面の見掛けのせん断強度も大きくなることが認められている¹⁹⁾. したがって, 岩盤の変形係数が小さくて定着長が100cmの場合に, グラウト/岩盤境界面に発生するせん断応力は小さくなるが, それ以上に見掛けのせん断強度が小さくなること, 逆に岩盤の変形係数が大きくて定着長が30cmの場合にテンドン/グラウト境界面で見掛けの強度の増加よりもせん断応力の集中が卓越して破壊が発生したことが分かる.

岩盤の変形係数と境界面の見掛けのせん断強度との関係については, 前述した模型実験の拘束圧と岩盤の変形係数とがテンドン/グラウト境界面のせん断挙動に同じ効果を及ぼすと考えると理解しやすい. アンカー体半径方向の幾何学的なダイレイタンスに対して, 岩盤の変形係数が大きな場合には, 岩盤がこれを拘束する効果が大きいために, テンドン/グラウト間境界面の直角方向に大きな拘束圧が誘起され, 岩盤の変形係数の小さな場合に比較して境界面で大きなせん断剛性と見掛けの強度が発揮されることが考えられる. このことから, アンカー体周辺岩盤の力学特性の評価に際しては岩盤の変形特性を把握する必要があることが分かる.

なお, アンカー体の破壊状況の観察から, ここでは境界面の破壊が巨視的に見てせん断破壊に起因して発生したものと判断した. しかし, 実験終了後に抜け出した試験体切断面のより詳細な観察結果や数値解析による分析から, 境界面近傍のグラウトにはせん断破壊および引張

写真-3 地表面のクラック²⁰⁾

破壊の両方に起因して発生したクラックが認められている^{20), 21)}.

3. 拡底形式アンカーの破壊モード

(1) 砂地盤に定着した拡底杭模型の引抜き実験

ここでは, 中江ら^{20), 24)}の実施した一様な砂地盤における拡底杭模型の引抜き実験結果を引用する. これから, ソイルアンカーにおけるアンカー体の形状および周辺地盤の力学特性と破壊モードとの関係を検討する.

模型杭は, 図-6に示すように, 底部が拡大された軸対称形状をなし, 材質はアルミニウムでそのヤング率が 7.06×10^4 MPaのもが使用された. 実験では1.2mm網目のふるいを通過した淀川産の川砂が使用され, 模型地盤は円筒形の鋼製実験槽(高さ1230mm, 内径1480mm)内に作成された. 模型地盤の物理特性に関する試験結果によると, その内部摩擦角は 36° , 見掛け粘着力は0.98kPaと報告されている.

実験結果によると, 模型杭に引抜き荷重が加わり最大荷重の70~80%のときに, 模型地盤の地表面に写真-3に示すような半径方向のクラックが最初に発生し, これはその後十字形から放射状に進展したとされている. 模型杭が最大荷重経験後, 杭にさらに上方への変位が与えられると, 地表面では放射状クラックの先端部を包絡するように新たに円形のクラックが形成され, その内部の土塊が盛り上がり, 地盤の内部に写真-4や図-7の断面のトレースに示すように, 拡底部上面の外側頂点から逆円錐形状の破壊面の形成が報告されている.

以上のような実験結果を利用して, 拡底形式アンカーの破壊モードの観点から考察を加える. ここで, 最初に模型地盤の地表面に放射状に発生したクラックは, 円柱

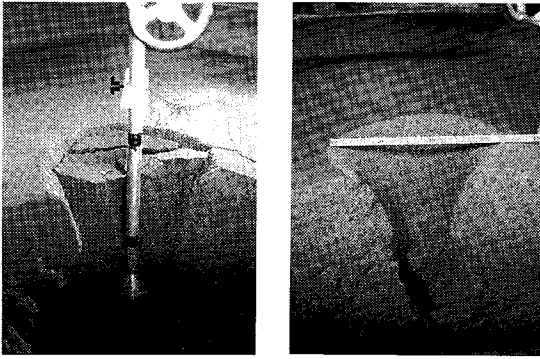
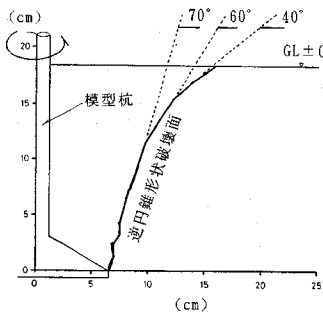


写真-4 地盤に形成された破壊面²⁰⁾



$d_a=25 \text{ mm}, d_c=131 \text{ mm}, l_a=190 \text{ mm}$

図-7 逆円錐形状破壊面の模式²⁰⁾

形式のアンカー体に形成される境界面の場合と同様な機構、すなわち拡底部の上方移動に伴う地盤の幾何学的なダイレイタンスーとこれから円周方向に誘起される引張応力に起因して発生したことが考えられる。写真-4から破壊面の傾斜角を測定すると、最初に拡底部上面の頂点から水平面と約70°で上方に進展する部分とその上方で傾斜角が下方から約60°から約40°に緩やかになる部分との3種類になる。また、破壊面の表面は凹凸が少ない滑らかな状態を呈しているように見受けられる。同様に写真-4から、模型杭上部の非拡底部と地盤間との境界面で破壊が発生した様相、破壊面内側の土塊が逆円錐形状を維持した状態で破壊面に沿って上方へ移動、すなわち土塊が剛体的に変位した形跡、さらに破壊面に沿って地盤にせん断破壊が発生した様相が認められる。

砂地盤の内部摩擦角 $\phi=36^\circ$ から、地盤に圧縮応力場でせん断破壊が発生するときの破壊面と水平面とのなす角度をクローンの破壊条件式から $\pi/4+\phi/2=63^\circ$ と考えると、この値は図-7における破壊面の最初の傾斜角と比較的良好に対応している。したがって、逆円錐形状の破壊面の形成に関して地盤の強度、この場合は内部摩擦角が大きな影響を及ぼしていることが示唆される。次に、破壊面の傾斜角の変化については、逆円錐形状土塊の上

方移動に伴い拡底部と同様な幾何学的なダイレイタンスーによる半径方向の内圧効果の発生が考えられる。このため、破壊面の外側の土塊は土留擁壁背面の土塊が受動状態にあるのと同様な状況となり、破壊面が緩傾斜へと変化するものと推定される。

(2) 模擬地盤に定着したアンカー模型の引抜き実験

粘着力を有する地盤に拡底形式アンカーを定着した場合を想定し、アンカー軸を通る鉛直断面でモデル化した2次元模型の引抜き実験を実施し、地盤の破壊モードを調査した¹⁶⁾。

a) 実験の概要

拡底形式のアンカー体を鉄板で作成し、これを模擬地盤に定着した2次元模型の地表面部分に反力を取ってアンカー体に引抜き荷重を加えた。模擬地盤は硫酸バリウム、酸化亜鉛およびワセリン油を70:21:9の重量比で配合したもので、その力学特性を表-6に示す。

b) 模擬地盤の破壊状況

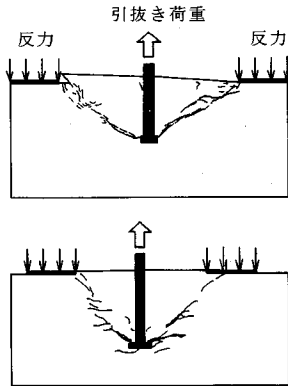
定着長の異なる2つの模型の破壊状況を図-8のスケッチに示す。同図から、いずれの模型においても模擬地盤の破壊が拡底部上面の端部から水平面と約45°をなす方向に発生したクラックに始まり、これが斜め上方に進展して全体的な破壊面が形成されている様子が分かる。破壊面は多数のクラックが集合して形成されているため、その表面は滑らかではなく粗い状態を呈している。

前述した砂地盤の実験と比較すると破壊面の基本的な形状は共通である。しかし、破壊面と水平面とのなす傾斜角とその表面状態の2点に差異が認められる。破壊面の傾斜角は模擬地盤の約45°に比較して砂地盤の方が約70°と大きい。また、破壊面の状態は砂地盤の実験では滑らかであったのに対し、模擬地盤の実験では粗い状態であった。2つの実験の相違は地盤の強度に関して粘着力の大小であり、模擬地盤に比較して砂地盤の粘着力が非常に小さいことである。したがって、2つの実験における破壊面の方向とその表面状態の相違は定着地盤の粘着力の大小に依存していることが考えられる。また、粘着力の小さな砂地盤では破壊面が主としてこの面に沿ったせん断破壊に起因して形成されているのに対し、粘着力を有する模擬地盤では破壊面直角方向の引張応力による割裂破壊に起因して形成されていることが示唆される。

なお、図-8に示した破壊面のスケッチでは、地表面の反力位置が破壊面の形状に影響を及ぼしている印象を与える。しかし、アンカー体の定着長を小さくした試験体の結果から、アンカー軸からの反力位置を定着長の1.5倍以上にとればこの影響を無視できること、さらに定着長を小さくした試験体の場合でも破壊面の傾斜角が大きく変化しないことを確認している。

表一6 模擬地盤の力学特性

1軸圧縮強度 σ_c (kPa)	31.6
引張強度 σ_t (kPa)	12.4
粘着力 c (kPa)	9.44
内部摩擦角 ϕ (度)	28
単位体積重量 γ (kN/m ³)	17.21



図一8 模擬地盤の破壊状況のスケッチ

4. アンカー体周辺地盤の応力解析⁶⁾

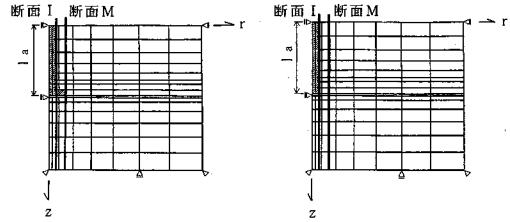
軸対称有限要素解析を実施して、アンカー体の形状、アンカー体と周辺地盤の弾性係数比および引抜き荷重の作用位置と周辺地盤の応力分布との関係を示す。これと前述した原位置実験や模型実験から得られた結果とを合わせて破壊モードを考察する。図一9に要素分割を示す。解析で変化させたパラメータは表一7のようである。解析モデルのアンカー体と地盤との境界を断面I、アンカー体の拡底部を通る鉛直面を断面Mとし、応力の符号は圧縮を正にとっている。

(1) 円柱形式アンカー

円柱形式アンカー周辺地盤の応力分布を図一10に示す。

a) 引抜き荷重がアンカーの頭部に作用する場合

引抜き荷重がアンカーの頭部に作用する荷重条件は摩擦方式⁹⁾の円柱形式アンカーに対応し、ロックボルト模型の実験や原位置実験を想定したものとなる。図一10から、断面Iの上端部で最も大きな応力が発生し、断面Mの位置では応力値が断面Iに比較して小さくその分布形が深度方向に様な傾向を呈していることが分かる。また、アンカー体と地盤との剛性比が $E_a/E_r=10$ で両者に大きな剛性差のない場合は、アンカー体が地盤に対して相対的に剛な $E_a/E_r=100$ の場合に比較して、断面上の同じ位置でより大きな応力が発生している。断面Iの応力の分布形を比較すると、 $E_a/E_r=10$ のときに応力値はアンカー頭部で最も大きくアンカー底部に向かって急激



図一9 要素分割

表一7 解析で変化させたパラメータ

パラメータ	水準
アンカー体の形状	拡底形式, 円柱形式
引抜き荷重の作用位置	アンカー頭部, アンカー底部
アンカー体と地盤のヤング率の比	$E_a/E_r : 10, 100$

E_a : アンカー体のヤング率
 E_r : 地盤のヤング率

に低減している。これに対して、 $E_a/E_r=100$ の場合には応力の分布形が $E_a/E_r=10$ の場合に比較して、より様な傾向を呈している。以上のことから、 $E_a/E_r=10$ の場合はアンカー体に形成される境界面上の上部から下方へと順次に破壊面が形成されること、 $E_a/E_r=100$ の場合には境界面で破壊面が同時に形成されることが予想される。

b) 引抜き荷重がアンカーの底部に作用する場合

引抜き荷重がアンカーの底部に作用する荷重条件は支圧方式⁹⁾の円柱形式アンカーに対応する。応力は断面Iの下端部付近で最大となり、アンカー体に形成される境界面の下端部から破壊面が形成されることが予想される。

(2) 拡底形式アンカー

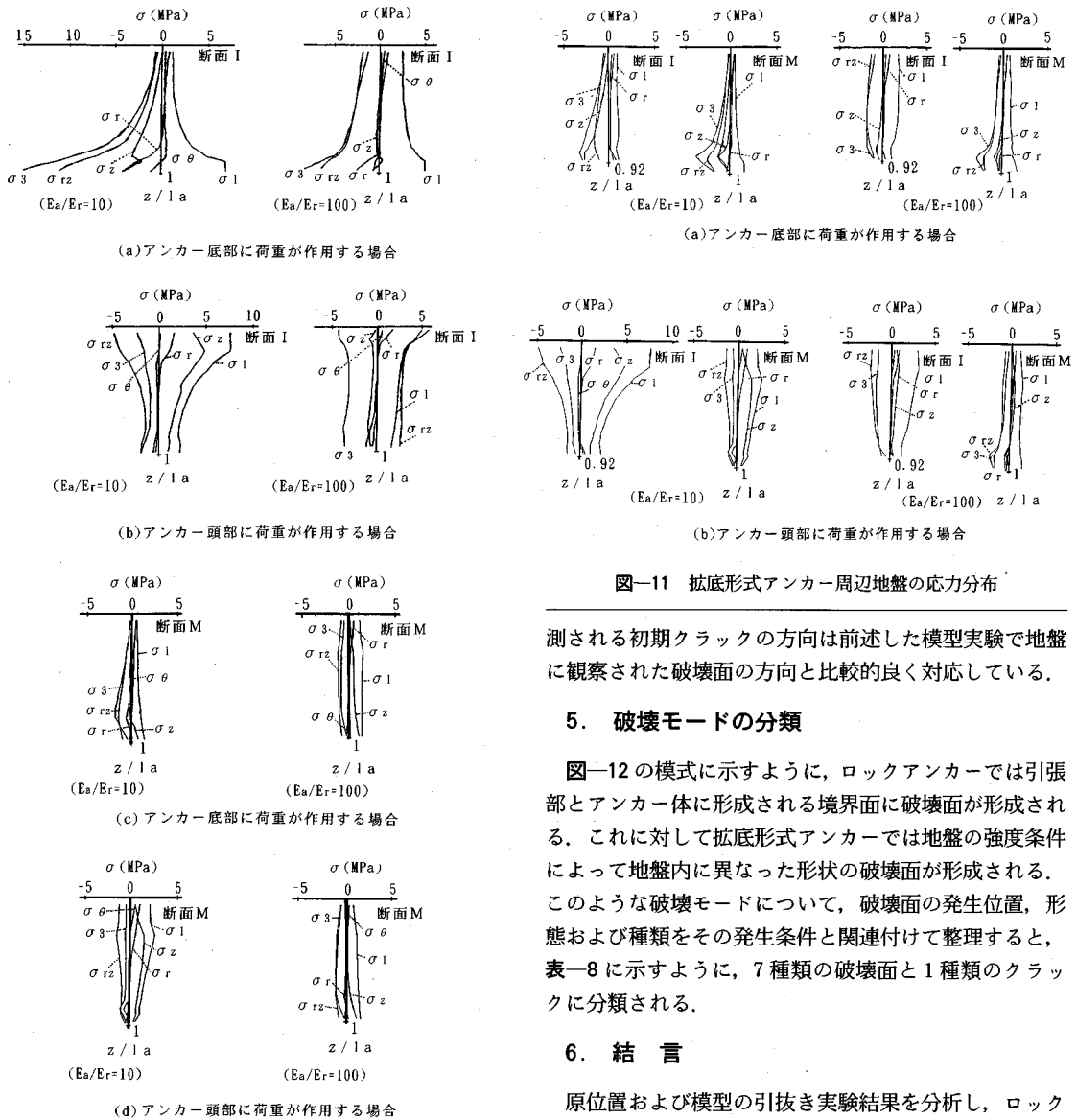
拡底形式アンカー周辺地盤の応力分布を図一11に示す。

a) 引抜き荷重がアンカーの頭部に作用する場合

引抜き荷重がアンカーの頭部に作用する荷重条件は前述した拡底杭模型実験の初期荷重段階に対応している。図一11から、このときの応力の分布形が円柱形式アンカーの頭部に荷重が作用した場合と同様であることが分かる。したがって、アンカー体の非拡底部と地盤間の境界面が破壊した後に、荷重が拡底部から地盤へと伝達される過程が推定される。

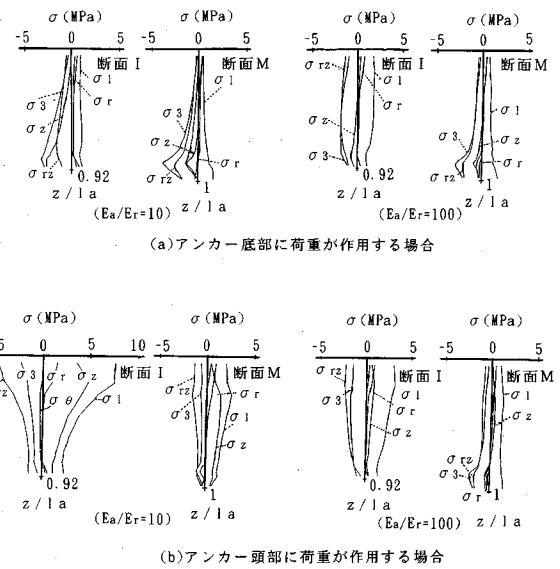
b) 引抜き荷重がアンカーの底部に作用する場合

引抜き荷重がアンカーの底部に作用する荷重条件は支圧方式の拡底形式アンカーに対応する。しかし、解析結果には、模型実験で非拡底部と地盤間の境界面が破壊した後に荷重が拡底部から地盤へと伝達されるときが状況が反映されている。図一11から、応力は断面Mの拡底



図一〇 円柱形式アンカー周辺地盤の応力分布

部上端で最大となり、この付近の地盤に最初に破壊が発生することが分かる。また、アンカー体と地盤との剛性比が $E_a/E_r=10$ の場合に断面 M の拡底部に近い位置の応力が大きく、頭部に向かって低減するが、 $E_a/E_r=100$ では応力は一様に近い分布形を示している。このため、 $E_a/E_r=10$ では拡底部近傍の地盤から順次に破壊が発生するのに対して、 $E_a/E_r=100$ では地盤の破壊が同時に発生することが予想される。拡底部周辺地盤に最初に発生するクラックが水平面となす角度を主応力から推定すると、 $E_a/E_r=10$ では引張破壊に対して 50° 、せん断破壊に対して 70° であり、 $E_a/E_r=100$ では引張破壊に対して 45° 、せん断破壊に対して 60° 程度と思われる。このように予



図一〇 拡底形式アンカー周辺地盤の応力分布

測される初期クラックの方向は前述した模型実験で地盤に観察された破壊面の方向と比較的良好に対応している。

5. 破壊モードの分類

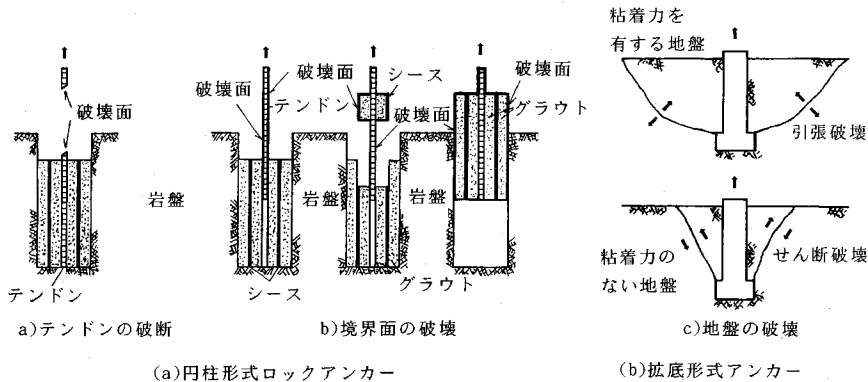
図一〇の模式に示すように、ロックアンカーでは引張部とアンカー体に形成される境界面に破壊面が形成される。これに対して拡底形式アンカーでは地盤の強度条件によって地盤内に異なった形状の破壊面が形成される。このような破壊モードについて、破壊面の発生位置、形態および種類をその発生条件と関連付けて整理すると、表一に示すように、7種類の破壊面と1種類のクラックに分類される。

6. 結言

原位置および模型の引抜き実験結果を分析し、ロックアンカーおよび拡底形式アンカーの破壊に影響を及ぼす要因と破壊モードとの関係を考察した。得られた結果は次のようである。

(1) ロックアンカーの破壊に影響を及ぼす要因には、幾何学的な要因として tendon とグラウトの直径と形状、定着長およびアンカー体に形成される境界面の表面形状、力学的な要因として tendon、グラウト、周辺地盤の強度・変形特性および引抜き荷重の作用位置があり、これらの要因と関連付けてアンカーに発現する破壊面の形態を分類した。

(2) ロックアンカーの破壊モードには、引張部の tendon の破断とアンカー体に形成される境界面のせん断破壊があり、これら破壊面の形成過程、破壊面の発生位置と影響要因との関連性および破壊面の具体的な発生条



(a)円柱形式ロックアンカー (b)拡底形式アンカー

図-12 ロックアンカーおよび拡底形式アンカーの破壊モード

表-8 ロックアンカーおよび拡底形式アンカーの破壊モードの分類

破壊面の発生位置、形態、原因	発生条件、影響要因との関係他	
円柱形式ロックアンカー	(1) 引張部の破壊 ①引張破壊によるテンドンの破断	・ロックアンカーの原位置実験で観察された。 ・定着長 300 cm, 岩盤の変形係数 ≥ 114 MPa のときに発生した。
	(2) アンカー体境界面の破壊 アンカー体に形成される境界面に沿ったせん断破壊から次の境界面が破壊面となる。 ②テンドン/グラウト ③シース/グラウト ④グラウト/岩盤 ⑤②~④の複数の境界面	・ロックアンカーの原位置実験、模型実験で観察された。 ・定着長 20, 30, 100 cm のときに発生した。 ・原位置実験では岩盤の変形係数が大きな場合、模型実験ではグラウト径が相対的に大きい拘束圧が大きな場合にテンドン近傍の境界面が破壊面となった。 ・テンドンが丸鋼の場合は②のタイプの破壊のみが発生した。
拡底形式アンカー	(1) 逆円錐形状破壊面 拡底部上端部を始点とする逆円錐形状の破壊面が地盤に形成される。 ⑥地盤のせん断破壊に起因した破壊面での表面形状は滑らか。 ⑦地盤の引張破壊に起因した破壊面での表面形状は粗い。	・拡底形式アンカーの模型実験で観察された。 ・砂地盤で粘着力が非常に小さい場合に⑥のタイプの破壊面が形成され、これは水平面と約 70° の高角度をなした。 ・粘着力を有する地盤では⑦のタイプの破壊面が形成され、これは水平面と約 45° 以下の低角度をなした。
	(2) アンカー体に形成される境界面の破壊 ④グラウト/岩盤	・拡底形式アンカーの非拡底部アンカー体周囲で④のタイプの破壊面が最初に発生した。
円柱にたて底共ク形通ア式レックアンカー発生し	⑧アンカー体や地盤に形成される半径方向の放射状クラック ・アンカー体に形成される境界面のせん断に伴う幾何学的なダイレイタンスから、円周方向に引張応力が誘起されアンカー体あるいは周辺地盤に半径方向の割裂破壊が発生する。	・ロックアンカーの模型実験ではテンドンが異形鋼棒で拘束圧が小さくときに発生した。 ・ロックアンカーの模型実験ではアンカー体と岩盤、拡底形式アンカーの模型実験では地盤に観察された。 ・ロックアンカーの原位置実験ではアンカー体のグラウトに観察された。

件を示した。

(3) 拡底型式アンカーの破壊過程として、最初にアンカー体と地盤間の境界面でせん断破壊が発生し、その後アンカー体の拡底上端部を始点とする逆円錐形状の破壊面が地盤に形成されることを示した。また、逆円錐形状の破壊面について、地盤の粘着力が非常に小さい砂の場合に破壊面がせん断破壊によって形成され、水平面と約 70° の高角度をなすこと、地盤に粘着力が存在する場合に破壊面が引張破壊によって形成され、水平面と約 45° 以下の低角度をなすことを示した。

(4) アンカー体に形成される境界面がせん断を受けると、境界面の凹凸の乗り越えによって幾何学的なダイ

レイタンスすなわち見掛けの内圧効果が境界面に発生すること示した。また、これから誘起されるアンカー体円周方向の引張応力によって半径方向に割裂クラックが形成されること、さらにこのクラックがアンカーの剛性の低下に寄与していることを示した。

(5) 円柱形式のロックアンカーでは、アンカー体に形成される境界面において、(4) に述べた幾何学的なダイレイタンスが周辺岩盤に拘束されることにより、岩盤の変形係数に依存した見掛けの拘束圧が境界面直角方向に作用する。このような拘束圧が境界面の強度・変形特性およびロックアンカー全体の剛性や耐荷力に大きな影響を及ぼすことを推定した。すなわち、ロックアンカーに対する周辺岩盤の拘束効果を明らかにするとともに、周辺岩盤の力学特性の調査に関しては、その変形特性の把握が重要であることを示した。

謝辞：本研究を実施するにあたり、貴重なご助言を頂いた中部電力株式会社奥美濃水力建設所東側豊二所長、奥田宏明副所長に心から感謝の意を表します。また、貴重な実験データを提供頂いた株式会社奥村組関西支社営業部中江新太郎部長に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，1990。
- 2) Littlejohn, G.S. and Bruce, D.A. : Rock anchors- Design and quality control, Proc. of 16th U.S. Symp. on Rock Mech., pp. 77-88, 1977.
- 3) Coates, D.F. and Yu, Y.S. : Three-Dimensional Stress Distributions around a Cylindrical Hole and Anchor, Proc. of 2nd Cong., ISRM, Belgrade pp. 175-182, 1970.
- 4) 北原義浩・伊藤洋・徳江俊秀・本島睦：大型送電鉄塔のロングアンカー基礎の引抜き耐荷力に関する現地実験と数値解析，電力中央研究所報告，No. 3, 76020, 1997.
- 5) Farmer, I. W. : Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor, Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 12, pp. 347-351, 1975.
- 6) Dunham, R.K. : Anchorage Tests on Strain-gauged Resin Bonded Bolts, Tunnels & Tunnelling, Vol. 8,

- No. 6, pp. 73-76, 1976.
- 7) 北角哲・西村正夫：ロック・アンカーと岩盤の相互作用機構に関する基礎的研究，(株) 奥村組技術研究年報，No. 8, pp. 53-76, 1982.
 - 8) Sun, X.Y. : Grouted rock bolt used in underground engineering in soft surrounding rock or in highly stressed regions, Proc. of Int. Symp. on Rock Bolt-ing, Abisko, pp. 93-99, 1983.
 - 9) 松井孝尚・奥山一夫・渡部忠明・山本安崇：岩盤とロックアンカーの摩擦抵抗特性について，第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp. 476-480, 1987.
 - 10) Aydan, Ö., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T. : Load bearing capacity and stress distributions in/along rockbolts with inelastic behaviour of interfaces, Proc. of 5th Int. Conf. Num. Meths. in Geomechs, Nagoya, Vol. 2, pp. 1281-1292, 1985.
 - 11) Aydan, Ö., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T. : REIN-FORCEMENT OF GEOTECHNICAL ENGINEER-ING STRUCTURES BY GROUTED ROCKBOLTS, Proc. of Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formations, Beijing, pp. 732-738, 1986.
 - 12) 川本眺万・アイダンオメル：ロックボルトの支保機構について，電力土木，No. 214, pp. 3-13, 1988.
 - 13) Aydan, Ö., Ichikawa, Y., Ebisu, S., Komura, S. and Watanabe, A. : Studies on interfaces and dis-continuities and an incremental elasto-plastic con-stitutive law, Proc. of ISRM Symp. on Rock Joints, Loen NORWAY, pp. 595-602, 1990.
 - 14) 川本眺万 (研究代表者)：ロックボルトによる岩盤の支保効果に関する研究，昭和59年度文部省科学研究費補助金 (試験研究 (1)) 研究成果報告書 (研究課題番号 58850110), 1985.
 - 15) Aydan, Ö. : THE STABILIZATION OF ROCK ENGI-NEERING STRUCTURES BY ROCKBOLTS, A thesis submitted for the degree of Doctor of Engi-neering at the Dept. of Geotechnical Engineering Nagoya Univ., 1989.
 - 16) Aydan, Ö., Ebisu, S. and Komura, S. : Pull-out tests of rock anchors and their failure modes, Proc. of Int. Symp. on Assessment and Prevention of Fail-ure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul TURKEY, pp. 285-293, 1993.
 - 17) 池田尚治：鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートとの応力伝達に関する研究，土木学会論文報告集，第307号，pp. 85-97, 1981.
 - 18) 蛭子清二・河村精一・Aydan, Ö. : 原位置試験におけるロックアンカーの挙動，第12回西日本岩盤工学シンポジウム講演論文集，pp. 91-96, 1991.
 - 19) 渡辺篤・河村精一・Aydan, Ö.・蛭子清二：原位置引抜き試験で観察されたロックアンカーの破壊モード，土と基礎，pp. 27-32, 1990.
 - 20) 新實佳郎・河村精一・Aydan, Ö.・蛭子清二：ロックアンカーの力学挙動に関する研究，第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 37-42, 1990.
 - 21) Ebisu, S., Aydan, Ö. and Komura, S. : Mechanism of interface failure of rock anchors, Proc. of Int. Symp. on Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, Istanbul TURKEY, pp. 677-685, 1993.
 - 22) Ebisu, S., Komura, S., Aydan, Ö. and Kawamoto, T. : CHARACTERIZATION OF JOINTED ROCK MASS-ES FOR ROCK ANCHORS, Preprints of Int. Conf. on FRACTURED AND JOINTED ROCK MASSES, Lake Tahoe, Calif., pp. 150-157, 1992.
 - 23) 中江新太郎・清水俊久・筒井通剛・堀部秀雄：拡底杭の引抜き耐力に関する実験的研究，(株) 奥村組技術研究年報，第8号，pp. 339-352, 1982.
 - 24) 中江新太郎・清水俊久・筒井通剛：拡底杭の引抜き耐力に関する実験的研究 (第2報)，(株) 奥村組技術研究年報，第9号，pp. 179-188, 1983.

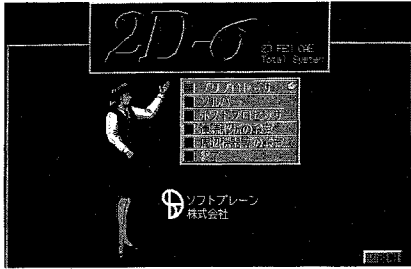
(1994. 4. 20 受付)

PULL-OUT TESTS OF ROCK ANCHORS AND THEIR FAILURE MODES

Seiji EBISU, Ömer AYDAN, Seiichi KOMURA and Toshikazu KAWAMOTO

For the failure mechanics of rock anchors, in-situ and laboratory pull-out tests were carried out. From the tests, various forms of failure of rock anchors were deduced. The failure modes of rock anchors involve interfaces present in rock anchor systems rather than the embedment medium as observed in soil anchors with enlarged bottoms. The failure modes of rock anchors are as follows: 1) Tendon failure, 2) Interface failure (tendon-grout interface, sheath-grout interface and grout-rock interface), 3) Combined interface failure. In this paper, the authors show the failure modes of rock anchors and of soil anchors with enlarged bottoms observed in tests and discuss each failure mode by finite element simulations and finally propose a classification for the failure modes.

パソコン用土木構造解析CAEシステム



■システムマネージャー（動画、音声）

ツーディーシグマ

2D-σ

TOTAL SYSTEM

土木業界で大好評

- ◎道路公団、建設省・通産省の研究機関を始め、ゼネコンやコンサルのユーザーは既に150社以上
- ◎土木学会情報委員会から賞をいただいた(第19回)
- ◎「日経コンストラクション」が特集した(第119号)

詳細資料提供

数日間かかった解析がわずか数十分間で！
だれでも、どこでも、低コストで、簡単に。
斬新なコンセプトで設計のあり方が変わる！

高性能CADを内蔵、全ての情報はCAD図面に直感的に指定。(境界・荷重条件、掘削、盛土、支保等)

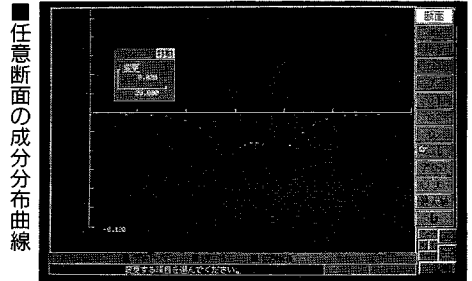
有限要素的な指定は存在しない。システムはCAD上の情報から全てのデータを自動的に生成する。

土木解析に必要な機能のほとんどに対応。(非線形、弾塑性、ジョイント、掘削、盛土、支保、熱応力など)

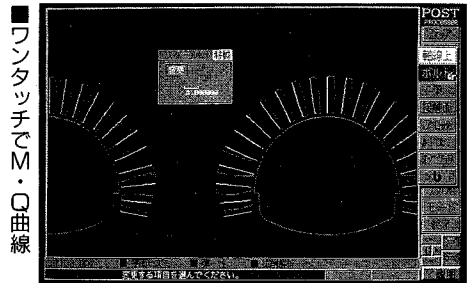
高度なステップ解析機能により、施工中の力学的変化をリアルに再現。(前ステップのデータは自動的に継承されユーザーは図面上で「施工」する感じ)

EWS並みの大規模解析能力と高速演算。(3000節点、拡張可、1400節点の演算はCPU486DXで約2分間)

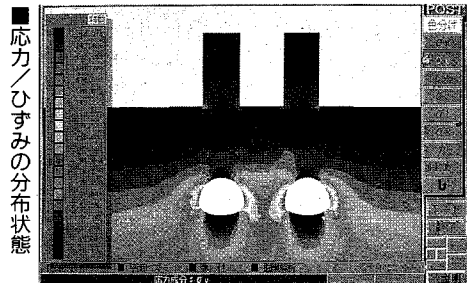
独自のウィンドウシステム、音声サポート、オンラインヘルプ、豊富で高品質な出力など。



■任意断面の成分分布曲線

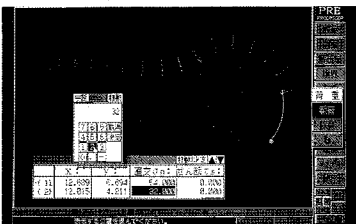


■ワンタッチでM・Q曲線

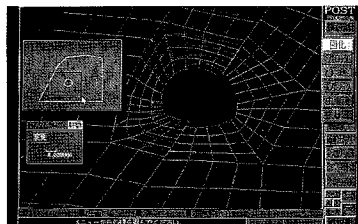


■応力/ひずみの分布状態

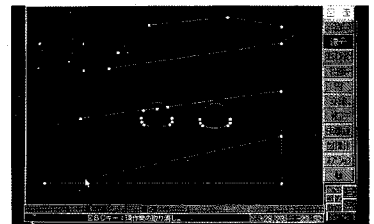
■全ての条件は図面上に直接指定



■断層・弱面の挙動はリアルに再現



■高性能CADで図面を素早く入力



開発・販売



ソフトブレン(株)

お問合せは 03-3592-7659

本社：〒001 札幌市北区北37条西4丁目王陽ビル

Tel 011-736-7009 Fax 011-736-7449

販売代理 株式会社CRC総合研究所

地盤の有限要素法解析ソフト

未来設計企業



世界標準のソフトウェア

Mr.SOIL Ver.3.0 WINDOWS 版

Mr. SOILの新バージョン (Ver.3.0) はWindows*で稼働する強力なシステムに生まれ変わり大モデルも扱えるようになりました。
また、マウスを使ったメニュー形式の導入、画面上での出力が可能になるなどの新機能により、すぐれた操作性をもたらします。

*Windowsは、米国マイクロソフト社の登録商標です。

バージョンアップ項目

入力部

- モデル作成のためのメッシュジェネレート機能。
- モデル図を参照しながら荷重条件、境界条件、材質条件、はり、棒要素のデータをメニュー画面のテーブルにより入力することが可能。

ソルバー部

- 強制変位。
- 解析途中の材質の変更。(薬注施工のモデル化)
- 節点数制限のUP。(約3000節点が可能)

出力部

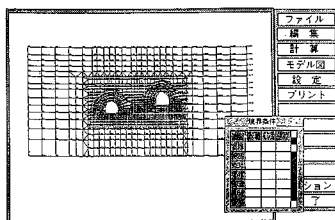
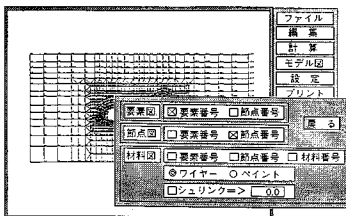
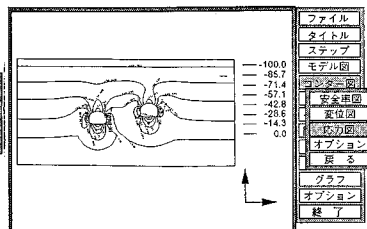
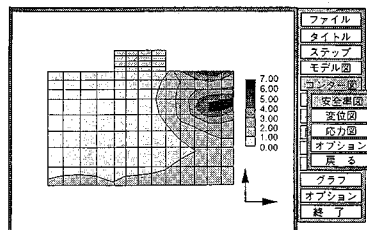
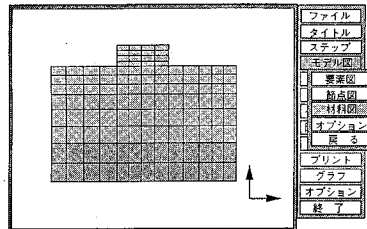
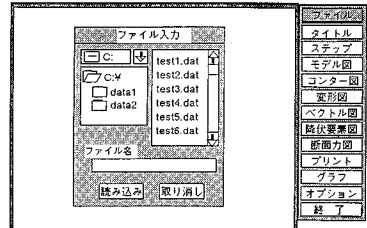
- 線画だけでなく画面塗りつぶし処理が可能。
- マウス入力とメニュー型式による操作性の大幅な向上。

動作環境

CPU 80386 以上 (推奨 80486 以上)
Windows 3.1 以上
メモリ 640Kbyte + 7Mbyte (プロテクトメモリー)
ハードディスク 10Mbyte以上

以上のメモリーは今後、改良により小さくなる場合もあります。

新価格 ¥980,000
(当社比40%オフ)



製品版は、一部異なる場合があります。

株式会社 **CRC総合研究所** 西日本事業部

大阪市中央区久太郎町4丁目1-3
(06)241-4121 担当/村中 一意

地球を切る! 視る! 創る!

未来設計企業
CRC

3次元地質解析システム

GEORAMA

ジオラマ

概要

地質調査で得られたデータを基に、利用者の判断を加味して3次元地質モデルを作成します。この3次元モデルより地質、岩域区分、地下水位等をグラフィック表示並びに作画します。今後この3次元モデルを利用して解析用メッシュ作成等への応用が考えられます。

特徴

- ・走向・傾斜データも考慮できる高度な推定法
- ・複雑な地質体モデルの表現が可能
- ・ビジュアルで豊富な出力機能
- ・図面間での整合性がとれる
- ・操作性の高いシステム

出力図面



ユーザーインターフェースにより、拡がる適用分野

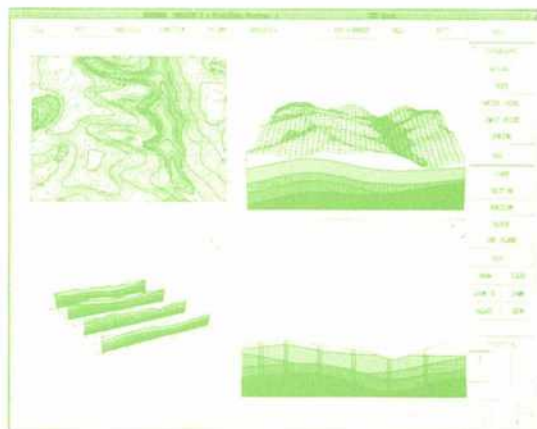
- データベース 土量計算 構造物マッピング
- メッシュジェネレータ プレゼンテーション資料 その他

標準適応機種(EWS)

- ・SONY-NEWSシリーズ*
 - ・Sun-3, Sun4, Sun-SPARCシリーズ*
 - ・HP9000/300, HP9000/800シリーズ*
- *ウィンドウシステムとしてX-Window System, Version 11(X11)が必要です。
(標準以外のものにつきましても御相談に応じます)

㈱アイ・エス・エー	株式会社情報研究所	東電設計㈱
アイサワ工業㈱	㈱新日本技術コンサルタント	東電ソフトウェア㈱
アイトールエンジニアリング㈱	住友コンサルタント㈱	東洋地質調査㈱
アサヒ地水探査㈱	住友建設㈱	勲力・瓦礫開発事業㈱
㈱エイトコンサルタント	石油資源開発㈱	㈱中屋ソイルテック
応用地質㈱	全日本コンサルタント㈱	西松建設㈱
大阪ガス㈱	大成建設㈱	
大手開発㈱	大豊建設㈱	
㈱大林組	㈱ダウ	
㈱奥村組	㈱日本パブリック	
川崎地質㈱	エンジニアリング	
基礎地質	㈱工務店	
㈱	㈱中央開発㈱	㈱開組
㈱	㈱地球科学総合研究所	㈱阪神コンサルタント
㈱	中電技術コンサルタント㈱	ヒロセ㈱
建設省 土木研究所	通産省 地質調査所	フジタ工業㈱
石洋建設㈱	電源開発㈱	㈱富士和ボーリング
佐藤工業㈱	㈱電力中央研究所	北光シオリサーチ㈱
サンコーコンサルタント㈱	東急建設㈱	北海道開発コンサルタント㈱
㈱環境総合研究所	東建地質調査㈱	三井建設㈱
㈱四電技術コンサルタント	東京電力㈱	三菱金属㈱
清水建設㈱		村本建設㈱
		明治コンサルタント㈱

3次元地質解析システム研究会 参加メンバー



GEORAMA Ver. 4.0 リリース開始

土木学会論文集

昭和三十七年五月二十八日 第三種郵便物認可
平成六年十一月十五日・印刷
平成六年十二月二十日・発行
土木学会論文集(毎月)二回(二十日・二十一日発行)

定価 一,五〇〇円(本体価格)・四五六円

株式会社 **CRC** 総合研究所 西日本事業部

〒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
(03) 3665-9741 本社窓口: 菅原