

65度傾斜角を有する石炭層の坑道破壊メカニズムについて

Mechanism of the destruction to the underground tunnels of the coal seam with angle of inclination of 65 degrees

(株)砂子組	正会員	金子 弘幸	(Hiroyuki Kanako)
(株)砂子組	正会員	山元 康弘	(Yasuhiro Yamamoto)
(株)砂子組	正会員	近藤 里史	(Satoshi Kondo)
(株)砂子組	正会員	田尻 太郎	(Taro Tajiri)
(株)構研エンジニアリング		牛渡 聡	(Satoru Ushiwatari)

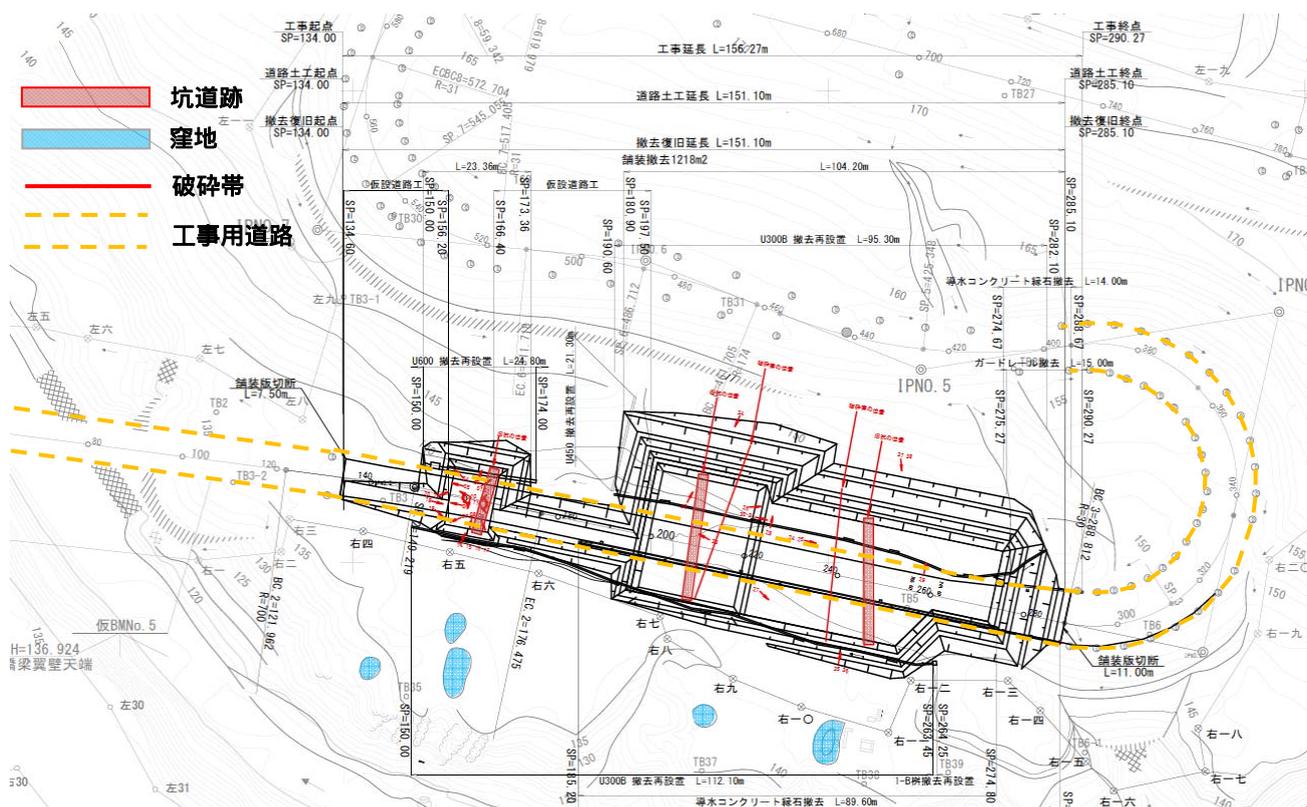


図 - 1 掘削範囲

1. はじめに

一般国道452号沿線は、昭和初期から炭坑が掘られ始め、薄い石炭層を狙って集中的に坑道が掘られていた箇所である。文献によると坑道は4×4m程度で支保工には木材を用いた。当時の炭坑夫の方達が健在であるため、坑道位置はある程度は図面上で確認できる。

本論文は、縦横無尽に掘られた坑道上を工用重車両が通ることから、上載荷重に対する坑道の挙動を、スライダ要素を用いた2次元FEMで確認したものである。

文献によると、人工の空洞で50m以上の深い深度の空洞の場合は、地下水で満たされるので土圧に対する抵抗力が強いが、石炭採掘のように広範囲の総ばらし採掘が行われた場合は短期間で潰れ、地表沈下が引き起されるといわれている。

当該地区の陥没事例の調査結果では、深度20mまでの浅い空洞がほとんどで、特に15m以内の深さの場合が多い。炭層が薄い場合、高さ50cm程度の坑道で採掘していた例もある。空洞の上に分布する地盤の強度は陥没の

危険性に大きく影響するが、強度の大きな地層（支持層）が空洞の上に厚く分布していれば、浅い空洞でもなかなか陥没しないとされている。

今回の事例ではボーリング調査だけでは空洞の影響が明確にならなかったことから大規模な掘削を行って地層を調べた。その結果、基盤岩は砂岩が主体の砂岩泥岩で、地殻変動により石炭層は65度の層理面を形成するとともに、砂岩には開口亀裂があり強風化の破砕帯も見受けられた。

本論文は、これらの物性を考慮し2次元FEM解析で弱層としての石炭層と破砕帯にスライダ要素を入れ、坑道の潰れ方をシミュレートしたものである。

2. 地質踏査結果および現場状況

図-2に示すように当該地区の地層は砂岩を主体とした砂岩泥岩を基盤岩として、ほぼ数mおきに炭層と破砕帯が互層をなし、約65°の同斜構造となっていて、破砕帯は崖錐堆積物と同種の礫質土からなっている。発見

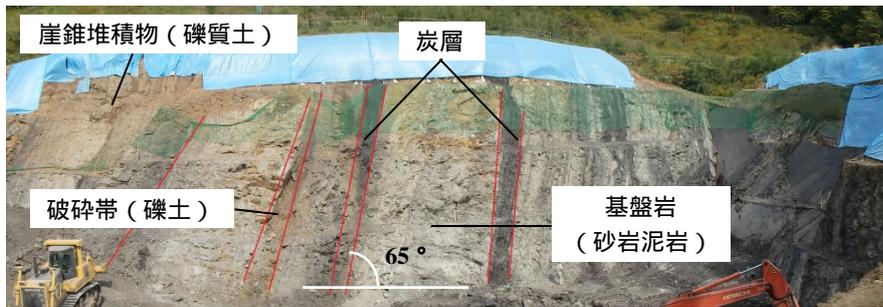


図 - 2 炭層および破碎帯



図-3 坑道跡

された坑道跡の幅は、いずれも 0.5～1.5m 規模で崩落後の状態と考えられる。既往のコア試験では基盤岩の一軸圧縮強度は 1 Mpa であり、ブレーカー掘削が容易でない程強固だが褶曲の影響で開口亀裂がある。炭層、礫質土については手で容易に割裂可能な脆性が見られた。

3. 解析モデルおよび岩盤物性値

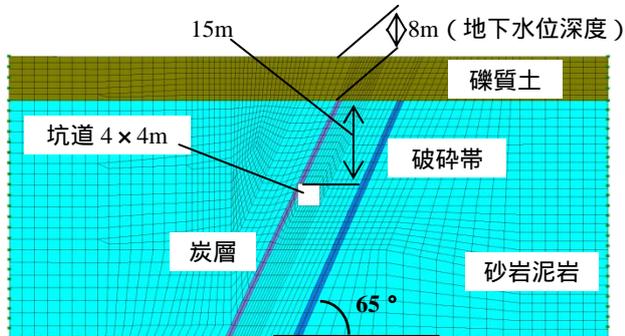


図 - 4 解析モデル

図-4に解析モデルを示す。層構成は既往のボーリング結果と現地踏査により崖錐堆積物の礫質土の厚さを 8 m 坑道は 4×4 m、岩盤厚 15m とした。地下水位深度は 8 m で、地下水の影響は物性値で調整する。炭層および破碎帯には 65° の傾斜を持たせ、境界条件は左右側面で水平方向、底面で鉛直方向拘束である。スライダ要素を用いる場合、境界部への応力変化の伝播が大きいいため、左右方向に 12D (D=4m)、鉛直方向に 8D の余裕を持った解析領域とした。炭層と破碎帯の厚さは 1 m および 2 m である。

表 - 1

		礫土	砂岩泥岩	石炭
弾性係数	E(kN/m ²)	6,300	500,000	25,000
ポアソン比	ν	0.3	0.2	0.3
粘着力	c(kN/m ²)	30	1,000	100
内部摩擦角	φ(°)	20	38	20
重量	w(t/m ³)	1.8	2.5	1.4
湿潤重量	w'(t/m ³)	2.8	3.5	2.4

表-1 に文献値を参考にボーリング結果および現地踏査から決定した岩盤物性値を示す。湿潤重量は重量に水の重量 1 t/m³ を加えたものである。破碎帯の土質は礫質土と同じと仮定した。

4. 予備解析

炭層および破碎帯の基本挙動を確認するための予備解析として、炭層または破碎帯のみを考慮した自重解析を行った。

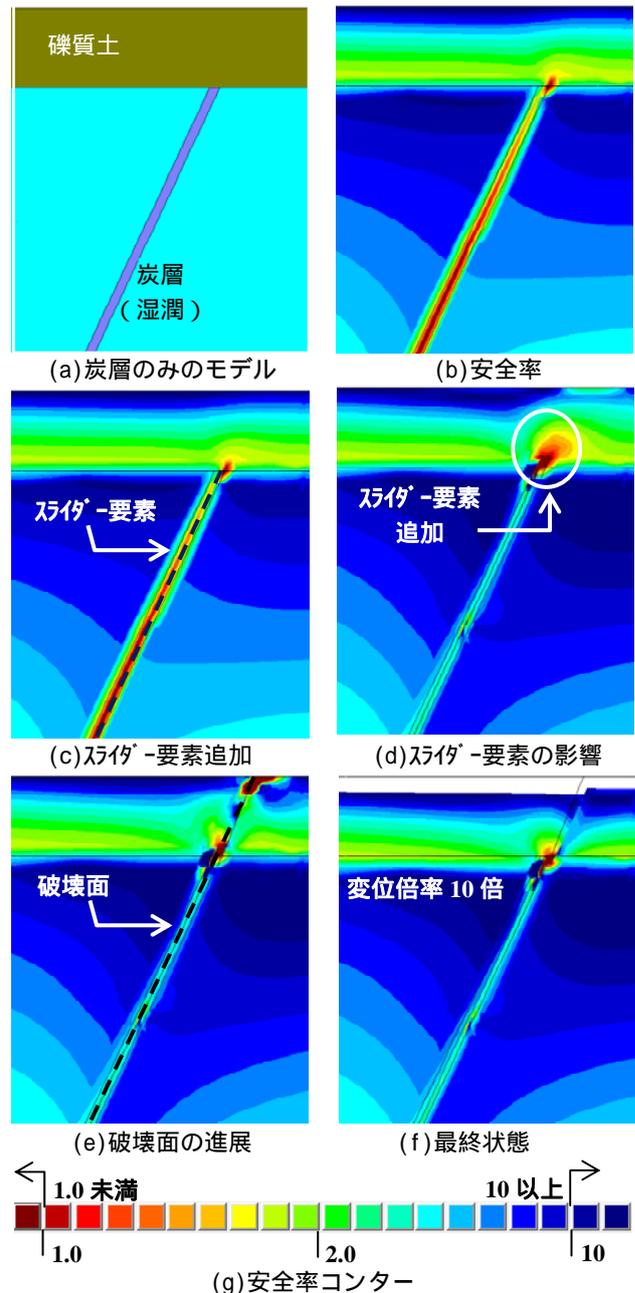


図 - 5 炭層のみの予備解析結果

図-5-(a)のように炭層のみを考慮した自重解析で安全率は同図-(b)のようになる。安全率カウンターを同図-(g)に示すが、安全率の計算では砂岩泥岩は引張破壊せず、炭層および破碎帯(礫質土)の引張強度は 20 kN/m² と

仮定した。同図-(b)より自重で炭層はほぼ一様に破壊されると想定し、(c)のようにスライダー要素を追加した。

当解析は破壊メカニズムの傾向解析であるため効果を拡大する目的で、スライダー要素の引張およびせん断抵抗は 0 とした。(d)では応力開放により炭層の安全率は向上するが、礫質土への負担が大きくなる。礫質土の安全率低下部へスライダー要素を追加するという解析を繰り返すと破壊面は地表までつながり((e))、最終的な安全率を変位とともに示すと、同図-(f)となる。

破砕帯(礫質土)のみを考慮した予備解析結果も同様となった。

5. 炭層のみの本解析結果

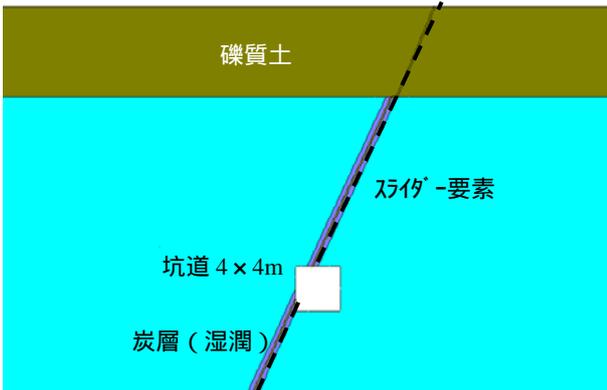


図 - 6 炭層のみのモデル概念図

前節の結果より、炭層の全面と礫質土部分に 65° の傾斜を持つスライダ-要素を入れたモデルで、4x4 m の坑道を掘削した解析結果を、図-7 に示す。安全率コンターは、図-5-(g)と同じで、変位倍率はいずれも 10 倍である。

図示したように、炭層と坑道の交叉位置を、坑道天端左端 右端、側面上部 下部と変化させて解析を行ったが、坑道周辺の安全率に大きな変化はない。また坑道と炭層の交叉部は明確な盤膨れを起こし、局所的に安全率も低下しているが、安全率低下位置はすでに破壊面としてスライダ-要素を入れた位置であり、解析上の破壊進展の定式化は、これ以上行えなかった。

変位状況および局所的な安全率低下から、安定な状態とは言い難いが、解析的に明確な崩壊には至らなかった。

6. 互層を考慮した本解析結果

図-2 に示したように、当該現場の地層は炭層および破砕帯が数 m おきに互層をなす。互層の影響を考慮するモデル概念図を、図-8 に示す。

図-8 の右側のスライダ-要素周辺を炭層とした場合、解析結果は図-9 となり、礫質土と炭層の接触部を除き、安全率は 1 を下回らない。坑道右下の隅角部の安全率はほぼ 1.0 である。

安定とは言い難いが、解析上の破壊進展の定式化は、これ以上行えなかった。なお変位倍率は 3 倍である。

図-10 は炭層・破砕帯(湿潤礫質土)互層の結果で、このケースでは破砕帯が弱面となり、全体的に安全率が低下し坑道右下の隅角部の安全率も 1.0 を下回る。

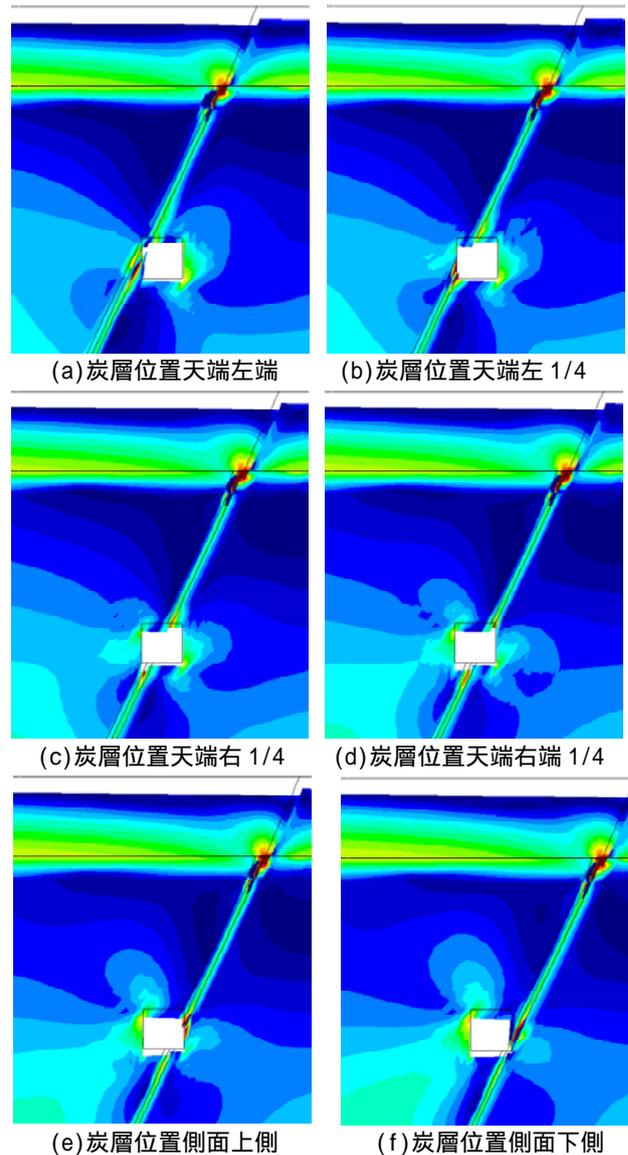


図 - 7 炭層のみの本解析結果

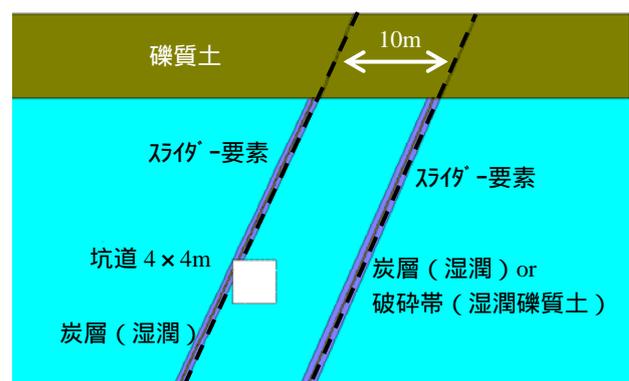


図 - 8 互層モデル概念図

そこで坑道右下隅角部を起点としてスライダ-要素を追加する破壊進展の定式化を行うと、図-11-(a)~(e)となる。破壊面は坑道右下隅角部を起点として上下に進展し、礫質土層につながった後、急速に不安定化し、解析上も明確な崩落となった。

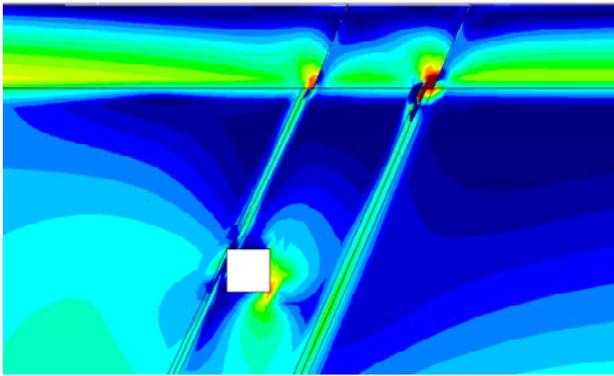


図 - 9 炭層・炭層互層の結果

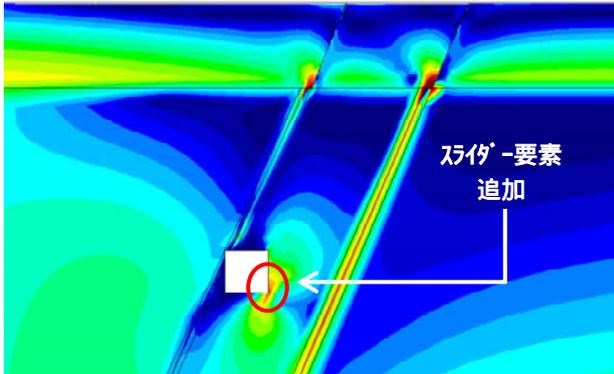


図 - 10 炭層・破砕帯（湿潤礫質土）互層の結果

7. まとめ

坑道崩落の条件を、順解析と逆解析のトライアンドエラーで解析によって検討したが、その結果、石炭層が65°の角度を有している事に加えて、石炭層と破砕帯が数mおきに近接して互層をなし、互層に挟まれた坑道付近から破壊面が発生、進展する事が、坑道崩落の大きな要因となっている可能性がある。

上記メカニズムは、解析上は人工的な坑道の掘削などだけでなく、強い地殻変動を受けている事から、基盤岩中に存在するであろうと考えられる、自然発生的な開口亀裂や弱部に対しても同様と考えられる。

図-1に示したように、現場周辺の沢地形には多数の窪地が存在する。幅の広い断層破砕帯が地下水等により脆弱化して坑道や河川等へ流出した結果、地表面が陥没した可能性が高いと思われる。

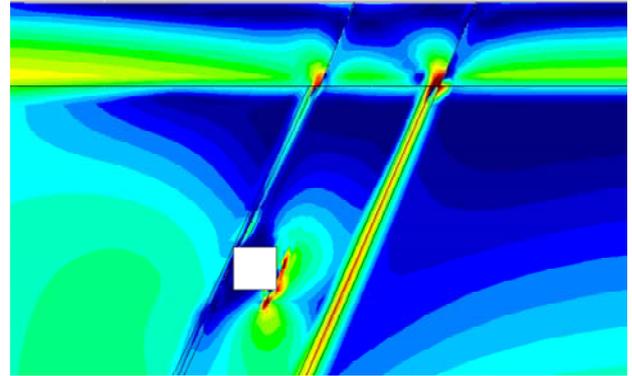
また掘削により発見された坑道跡は全て崩落しており、比較的深度の浅い坑道は、上記の理由から全て崩落し安定している可能性もある。

8. あとがき

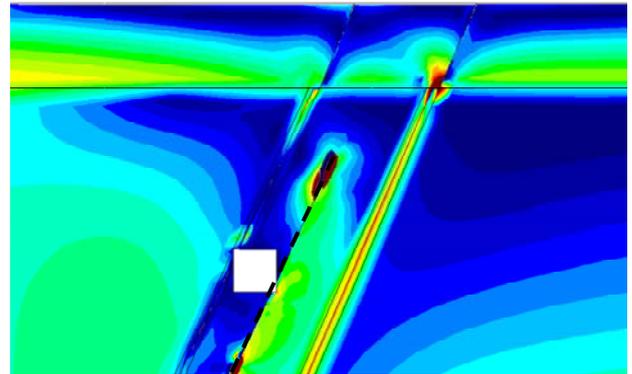
現場を提供して頂いたとともに適切な指導を頂いた札幌開発建設部幾春別川ダム建設事業所の皆様に感謝いたします。

参考文献

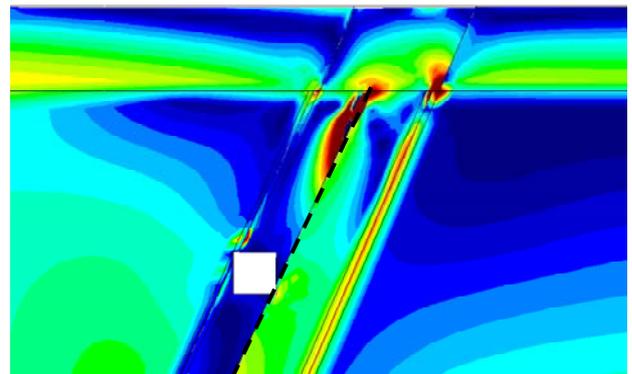
- 1) 地盤陥没の起因となる地中空洞の生成・発達メカニズムとその調査，東京大学生産技術研究所，桑野玲子
- 2) 三笠ジオパーク坑道資料



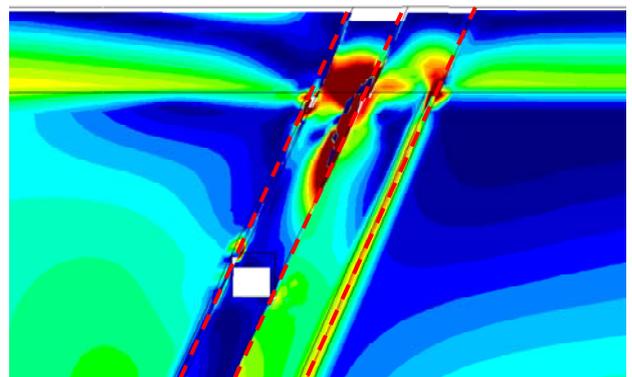
(a)スライダ-要素の影響



(c)破壊面の進展



(d)礫質土に到達



(e)急速な不安定化

図 - 11 破壊面の進展と不安定化