

(10) 吹付けコンクリートとロックボルトにより補強された切取斜面掘削時の安定性について

日本鉄道建設公団 木村 宏

On Temporary Stability of the Cut Slope before Reinforcing with Shotcrete and Rockbolts

Koh KIMURA. Japan Railway Construction Public Corporation

Abstract

The soil structure reinforced with shotcrete and rockbolts has been often applied as a temporary wall in the hilly districts. The reinforcement has an advantage of the good efficiency of cut and construction. The author had an opportunity to utilize the soil structure as an temporary wall for the cut and cover method in the field. Moreover, the failure of the wall during excavation arose in his presence because of the worse soil condition than they expected. The experience enabled him to observe and record the whole process of the failure.

The paper deals with the knowledges through the experience about the failure mechanism of the soil structure. The mechanism proved to be considerably different from the failure mechanism after the completion of the soil structure. Beside, it has been clear that three factors which are the local collapse in the exposed area before reinforcement, the size of the block excavated at a time and its boundary condition on both sides play an important role for the failure.

1. はじめに

切取斜面の一時的あるいは恒久的安定をはかる目的で、吹付けコンクリートやロックボルトを用いた斜面安定工がソイルネイル工法、ソイルウォール工法、TOP工法等と呼ばれて実用化されるようになってきている。このような中、ロックボルトや吹付けコンクリートの補強効果をどのように斜面安定工の設計の中に取り入れるかをテーマとして、安定解析手法や安定性の評価方法等に対する研究が模型、実物大実験や施工実績を通して進められている。

筆者は、開削工事の仮土留工として吹付けコンクリートとロックボルトを用いる機会を得、さらに、予想を越える劣悪な地質に遭遇し、仮土留を含む斜面の崩壊を経験した。この経験は、この種の斜面安定研究に用いられている斜面崩壊の考え方や模型、実物大の破壊試験の破壊過程とは大きな相違が見られ、そのメカニズムの中に、掘削から土留支保工施工までのいわゆる施工時の安全管理に対して重要な示唆が含まれていることが判明した。

本文では、この経験から得られた知見と掘削施工時の斜面崩壊のメカニズムについて考察し、吹付けコンクリートとロックボルトを用いた仮土留工施工時の安全管理のための考え方を示す。

2. 斜面崩壊の発生した事例

(1) 概要

本事例は、住宅造成予定地に宅地の造成に先立って構築されたボックストンネルの施工過程に生じたもので、施工現場の平面図および地質縦断図等は、図1と図2に示すとおりである。ここでは、通常、親杭横矢

板、切梁、腹起しを用いた仮土留工を用いるところ、一分の勾配で堀込み、10 cm厚の金網入りの吹付けコンクリートと3～4.5 mのロックボルトにて土留を行う設計となっていた。また、図1のA、Bで示した所は、掘削時および構築時に使用する目的で設けた拡幅部(A)、スロープ(B)であり、崩壊はこれらから終点方の両側の斜面で生じた。

(2) 地質状況

当初の地質調査(図1の試すいNo1)によれば、このトンネル区間は地山であり、この地域に広く分布するローム層と凝灰質粘土層に覆われた均等係数の小さな砂層を主体とする洪積層であった。しかし、掘削中および斜

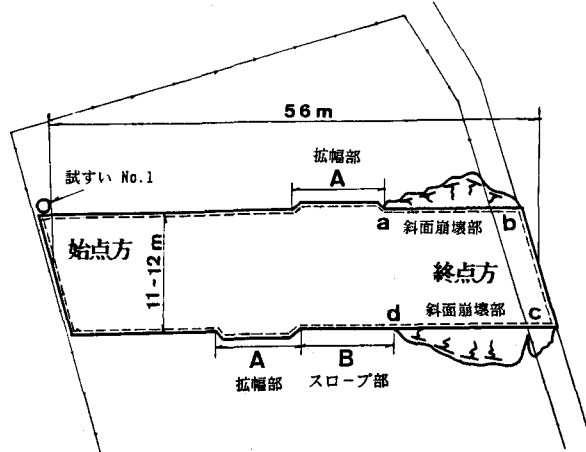


図1 現場平面図

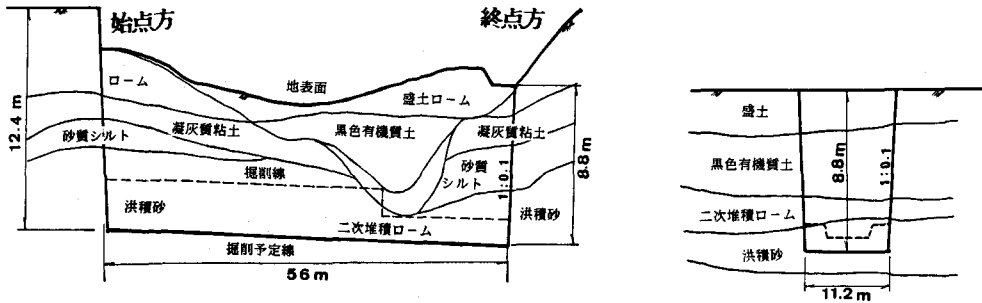


図2 現場地質縦、横断図

面崩壊後の精査の結果、図2のように中央部より終点方に旧河床跡とみられる流路跡が見つかり、二次堆積ロームや黒色有機質土が出現した。このような状況から、この56 m 区間は元々谷地形であったものが盛土をして埋め戻した場所であることが判明した。主たる掘削土(砂質土)の物性は、表1に示すとおりである。

表1 洪積砂層の代表的物性値(試すいNo1 GL-9.0m～9.85m)

(3) 掘削状況

掘削は、延長56 m にわたりB部のスロープを用い、ほぼ均等に1.5 m ずつ掘りさがる手順で進められた。掘削延長は、一日あたりの施工能力によって決められ、一日のうちに、掘削から吹付けコンクリートの施工までが完全に終了するように設定されていた。また、施工能率を考慮して、中央部はのり面付近より一段低く掘削されており、中央部に機械を据えてのり面掘削を行っている(図2参照)。

地山は、掘削当初、自然含水比の状態では、一分の勾配の切取に対しても十分な自立性を有しているが、直射日光に3～4時間照らされ、表面が乾燥することにより自立性が低下し、のり面の小崩壊が発生していた。

(4) 崩壊発生状況

斜面の崩壊は、上から5段目、掘削床付面から3 m ～1.5 m 間の吹付けコンクリート施工中に発生した。

この日は、前日の終点妻部5段目の施工に引き続き、斜面崩壊部の延長約36mを掘削し、図1のa-b間の一次吹付けコンクリート(5cm)を施工していた。5段目に出現している掘削土は、前述の洪積砂である。掘削部分の構造的な特徴としては、aおよびd部分は施工上の拡幅部やスロープとの接点となっており、完全な二次元状態になっているのに対し、bおよびc部分はコーナーを形成し、a-b、b-c、c-dいずれの斜面に対しても三次元効果を発揮しやすい構造となっていることである。崩壊は、図3に示す流れで発生した。まず、a-b部分の一次吹付けコンクリートが完了した5段目でa-b区間のほぼ中間点を中心とする、幾つかの曲面から構成されたブロックの掘削側への分離と抜け出しが発生した。続いて、このブロックの端部(図3のe点)と拡幅部との境界点(a点)の間の部分(5段目掘削部分)が圧壊するように砕けた。

これに先立って、拡幅部との境界点ではa-b部分と拡幅部とが分離するようなクラックが発生していた。この部分の圧壊に伴い、1段目から4段目までの吹付けコンクリートとロックボルトによって補強されたのり面が引きずられるように滑った。さらに、これから約4時間後、同じ形の斜面崩壊がc-d区間の斜面でも発生した。このc-d区間では、既に示したように、d付近(図1のB部分)がスロープとなっていることが、a-b区間のa付近(図1のA部分)が拡幅部となっていることと異なっているが、a点でのクラックの状況から判断すると、a-b区間とc-d区間に構造的な相違は無いと判断される。これに対して、同じ掘削深さとなっている妻部や始点部のり面では崩壊は生じていない。また、掘削・支保の作業中には、図3に示したブロックと同じような抜け出しが、これよりは小規模ながら何度も発生していた。その発生状況を示すと、図4のようになり、抜け出し部分の諸元は、表2のようになる。

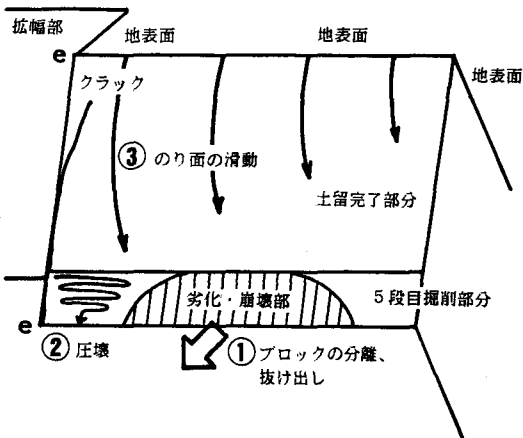


図3 現場における斜面崩壊の進行手順

3. 斜面崩壊事例から得られた知見
2. で述べた斜面崩壊事例から得られた知見をまとめると、次のようになる。

- (1) 掘削・支保施工時の斜面の安定は、図5に示す掘削・無支保部分の局所的な安定性に大きく支配される。
- (2) 図5の劣化・崩壊部の大きさは、地山の特性、図6に示す掘削延長(L)、既掘削部の高さ(h')、掘削高(h)、さらに図7に示す端部の条件(A~Dタイプ)によって変化する。

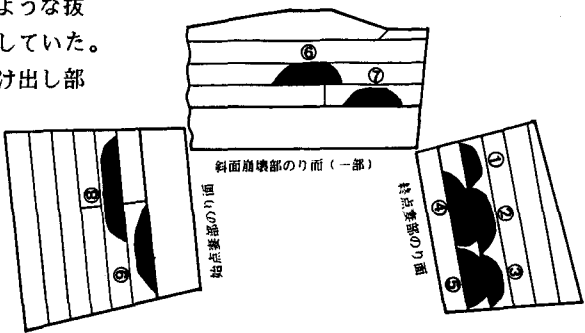


図4 ブロックの抜け出し(劣化・崩壊部)の発生状況

表2 抜け出し部分の諸元

番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
幅 ■	3.0	4.0	3.0	4.3	3.5	4.1	3.5	7.0	6.0
高さ ■	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.8	1.2	1.4	1.0
奥行 ■	0.4	0.5	0.4	0.8	0.5	0.6	0.5	0.4	0.3

- (3) 掘削・無支保部の不安定さの順序は、A~Dの4つのタイプの中では、B D C Eの順であり、劣化・崩壊部の大きさは、L、h'、hが大きいほど大きく、端部の条件からは、B or D、C、Aの順

となる。

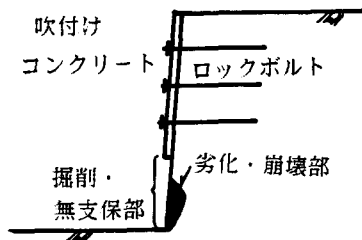


図5 斜面掘削の概念図(1)

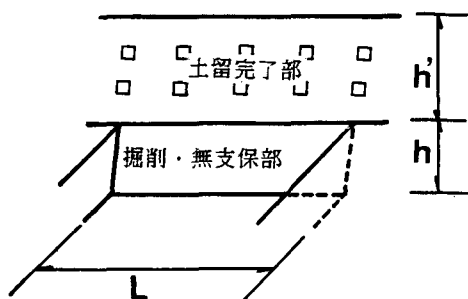


図6 斜面掘削の概念図(2)



- A; 両側の端部共に十分な未掘削部
B; 一方の端部が十分な未掘削部、他方が凸部で自由面
C; 一方の端部が十分な未掘削部、他方が平坦な既掘削部
D; 両側の端部共に平坦な既掘削部劣化・崩壊部の重量荷重の流れ荷重の流れ

図7 掘削部分の端部条件

(4) 劣化・崩壊部は、ブロック状に斜面から剥離し、押し出されるように発生するが、その発生過程の特性は、図8によって示すと、次のようになる。

まず、A～B間にすべり面が発生し、それが上へ進行する。進行する過程でABCで囲まれた部分の自重 W に対して、BC面の引張抵抗およびせん断抵抗(引張抵抗が支配的とみられる)およびAB面の残留せん断抵抗のバランスによって、劣化・崩壊部の形状、規模が決まる。しかしながら、このとき、劣化・崩壊部の高さ(H)は無支保部分の掘削高さ(h)を越えない。

(5) 劣化・崩壊部の三次元的形状は、図9に示すような2～3つの曲面から形成された厚みのある鱗片状を呈している。

(6) 劣化・崩壊部発生後の斜面全体の安定は、図10に示す劣化、崩壊部の両側の地山の強度や支持条件に依存している。

(7) 劣化・崩壊部の寸法等の諸元は、端部の条件(図7のA～D)によらず、掘削幅(L)に対して劣化、崩壊幅は $1/3$ 程度である。また、掘削高さ(h)に対する劣化・崩壊高さ(H)は、その掘削深さや地山状況によって変わり、 $1/3$ 以上となっている。

この崩壊事例の現場では、ロックボルトの打設を吹付けコンクリートの施工に先立って行っていた所で劣化・崩壊部が多く見られたが、この場合、劣化・崩壊高さはロックボルトの打設位置によって決まっており、ロックボルト打設のための削孔が劣化・崩壊高さを支配する要因となっていた。一方、劣化・崩壊部の深さ(図8の d)は、掘削高さ(h)に対して $3/5$ 以下、掘削幅(L)に対しては $1/10$ 以下である。

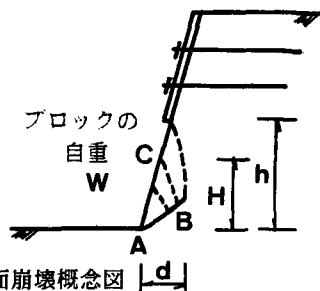


図8 斜面崩壊概念図

(8) 劣化・崩壊部の発生は、掘削高さが一定(1.5m)では、掘削位置が下がるほど多く、しかも規模も大きくなり、掘削深さの影響を受けると考えられる。

なお、ここで得られた知見は、掘削延長としては $L=10\sim 16$ m程度、掘削高さとしては $h=1.5$ mのものに対するものである。

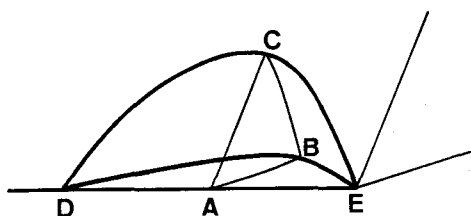


図9 劣化・崩壊部の形状概念図

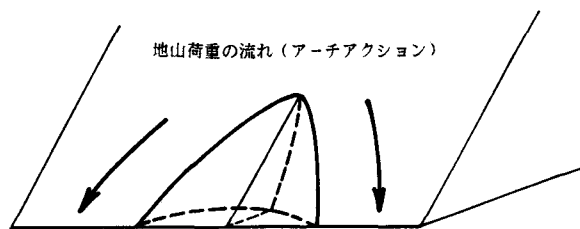


図10 劣化・崩壊部周辺の荷重伝播概念図

4. 掘削・支保施工時の斜面崩壊のメカニズムに対する仮説と安全管理の考え方

以上のことから、掘削・支保施工時の斜面崩壊に至るメカニズムは、次のように考えられる。

掘削から吹付けコンクリート施工が完了するまでの、いわゆる無支保状態では、地山の強度と地山の応力状態によって劣化・崩壊部がまず発生する。この劣化・崩壊部は、掘削幅、掘削深さ、掘削高さ、ロックボルト等の施工状況によってその大きさが異なる。掘削幅や掘削高さが大きく、掘削深さが深く、施工の影響を大きく受ける場合には、大きな劣化、崩壊部が発生する。しかし、この劣化、崩壊部が発生しただけの状態では斜面全体の崩壊は生じない。この劣化・崩壊部が発生すると、劣化・崩壊部の形状に沿ったアーチアクションが地山内に発生し（図10参照）、劣化・崩壊部の上部にある地山からの荷重を劣化・崩壊部の両側のまだ健全な地山で支持しようとする。両側の健全な地山が、この荷重を支えることができなくなったとき斜面全体の崩壊につながる。一般には、掘削幅や掘削高さが地山特性に応じて適正に選ばれ、掘削部分の両側の状況（図7の端部条件）がAの条件となっている場合には、斜面全体の崩壊につながることは少ないと考えられる。このことは、この種の掘削・仮土留施工時の安全管理に極めて重要な示唆を与えてくれる。すなわち、このような斜面全体の崩壊に至らない劣化、崩壊部の発生は、砂質地盤を対象としたこの種の土留工ではしばしば経験されることである¹⁾。したがって、この状態を基準とし、掘削幅、掘削高さ、掘削深さ、端部条件の影響を反映する解析モデルで劣化・崩壊部の形状と大きさを再現することができれば、以後の掘削、仮土留を進める上で、斜面全体の崩壊を発生させないような施工方法としての掘削幅と掘削高さ、端部条件を適切に選択することが可能となり、施工の合理化と安全管理が達成されることが考えられる。

5. おわりに

現在、4. で述べた解析モデルについて鶴飼ら²⁾の研究成果を参考に解析と再現性の検討を行っているが、まだ、公表する段階に達していないことから、さらに検討をすすめたいと考えている。本文では、吹付けコンクリートとロックボルトを仮土留として用いた開削トンネルでの斜面崩壊事例に基づいた崩壊のメカニズムに関する考察とこれを利用した安全施工管理の考え方を示したが、この種の仮土留の利用は今後も大いに進められると考えられるので、ここで述べた内容が実際に施工に携わる方々の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 北原正一、上野正高、植松澄夫、大杉文哉；垂直または急傾斜の切取面の破壊機構とその経済的な土留工の研究、土木学会論文集、第379号／VI-6、pp 65-73、1987年3月
- 2) たとえば、鶴飼恵三、細堀健司；簡易Bishop法、簡易Janbu法およびSpencer法の三次元への拡張、土木学会論文集、第394号／III-9、pp 21-26、1988年6月