

熊谷組 正会員 北原正一
熊谷組 正会員 上野正高

1. 緒言

切取面の土留工を設計するに当たって、従来採用されている基本的な考え方には、切り面を仮定し、切り面上部の土塊を安定させる方策と、土圧係数を用い深さに比例して増加する土圧に対抗する方策とがある。断層や、亀裂が切り面となるような場合でなくても、又、均一な地質であっても、切り面を仮定する方法が、かなり行われており、筆者等は、此の2つの考え方に矛盾を感じてきた。電算機を用いて均一な地質における地山内応力を有限要素法で計算し、モールクーロンの破壊条件を適用してそれらの安定を解析すると、切取自由面の附近が最も不安定で、その部分を早期に全面接着のロックボルトや、熔接金網入り吹付コンクリート等で防護すれば、他の工法に比し、比較的安価に、土留出来ることを究明し、稲城砂層地区において高さ18.35mの垂直切取りに、長さ5mのロックボルトと、厚さ10cmの吹付コンクリート（熔接金網入り）を主とする土留工を採用し、工期的にも、経済的にも、極めて勝れていることを実証した。ここでは、その要点を述べ、詳細は別途発表する。

2. 従来の土圧の考え方

2-1 切り面

クーロン円の理論において、剪断破壊を生ずる最も危険な面は、最大主応力面に対し、 $\pi/4 + \phi/2$ であることが示されている。

そのため、垂直切取面の安定に対し、図-1に示すような切り面で、剪断破壊が起るものと仮定して、アースアンカー等により、三角土塊Aを、安定した地山Bに定着させA部の落下を防ぐ工法が採用されている。

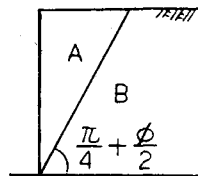


図-1 切り面の仮定

2-2 土圧係数による土圧

図-2においてA, B, C, の各点における力関係を考える。ABC面には垂直荷重 γH (γ : 比重, H : 高さ)がかかっており、切取面のAは、ポアソン比に基づき切取面側に膨らむ。此の膨らみに抵抗する応力が、一般に土圧と言われているもので、テルツアギー等が主張し、ポアソン比に基づく土圧係数 K を用い $K\gamma H$ で表わされている。

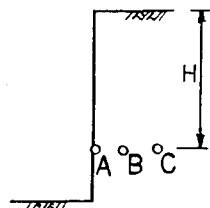


図-2 土圧の概念

3. モールクーロンの破壊基準内に、土の内部の応力を規制する新工法

図-2において、A点が上部の土の自重によって外に変位するが、 H が小さい内は、自立する。 H が大きくなるにつれ変位は進み、或る高さ H になると破壊する。その状態は、概ねその土の一軸圧縮破壊と言え、図-3の円-1で示される。此の破壊を防ぐためには、図-2のA点に拘束圧を与え円-2の状態にするか、地山を改良し、粘着力 C を C' に増大することによって、モールの破壊包絡線を $\tau = C' + \tan \phi$ として、円-1から離す状態にする必要がある。

垂直に切り取った壁面Aでは、最小主応力 $\sigma_{Amin} = 0$ であり、B, C では、 $\sigma_{Cmin} > \sigma_{Bmin} > 0$ である。模式図で画くと概ね図-4のようになる。垂直応力は最大主応力、水平応力は最小主応力となる。最大主応力がほぼ一定であるので、最大主応力と最小主応力の差が大きい程安定度

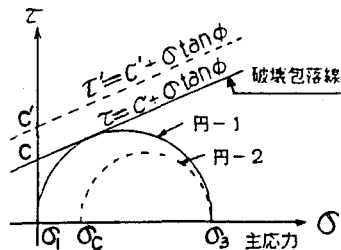


図-3 モールクーロンの破壊条件

は小さい。即ち、壁面より奥にいく程安定度は高くなる。即ち、迂り面に仮定された点では、ほぼ同じ垂直応力を受けている壁面に近い部分より安定度が高い。図-5に示すように壁面のAが破壊し崩落するとAの上部が崩壊し、続いてB部が破壊する。そして壁面の破壊が続き、安定した斜面が形成される迄破壊は進むと思われる。従って壁面に近い不安定の部分を安定させれば全体が安定する。

図-3において、モール円が破壊包絡線に接しない範囲即ち壁面が自立する部分（一般に上部）は、風化による劣化と崩壊を防ぐ為、掘削後なるべく速かに金網入り吹付コンクリート及び全面接着ロックボルトを施工する。

モール円が破壊包絡線と接し又は交差する場合は原則として掘削後壁面は破壊する。然し、掘削面を小さくすると、掘削面の上部の防護された部分、両側の未掘削部分と既防護部分、及び下部の未掘削部分の四周の安定部が、小断面の掘削部の壁面の安定に良い影響を及ぼすので、速かにロックボルト、溶接金網、吹付コンクリートを施工することにより、壁面を破壊することなく支保することが出来る。

更に安定度の小さい部分では、図-6の如く、設計掘削面の前に押さえ土塊を残しておき、全面接着ロックボルトを先行させて打設し、残土を取除いた後直ちに溶接金網を掘削面に当て、ロックボルトに固定した後吹付コンクリートを施工し、その上から更にロックボルトの座金を固定する。深い掘削を行う時には、図-7の如く、事前にH鋼の如きものを穴に入れコンクリートで固めておけば、掘削面の崩壊に抵抗し、或いは崩壊しても小範囲に留めることが出来る。これは、トンネル工事で屢々用いられる先行ルーフパイプと同じようなものである。

4. 応力の解析と実施例

垂直切取面の支保工を設計するに当り、行われた一つの方法を述べる。先づ、有限要素法により無支保の場合の応力状態を調べ破壊する部分を見出す。次に全面接着ロックボルトの長さを破壊部をカバーする長さとして、吹付コンクリート厚さを10cmとして、各部の応力を解析し、モールクーロン条件を満足する安定度を検討し、ロックボルトの長さ、本数、吹付コンクリート厚、溶接金網枚数等を検討する。

東京工科大の6号館の垂直根切を例に説明する。現地は稲城砂層で、地質調査から判断して粘着力 $C = 0.31 \sim 0.94 \text{ kg/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 25^\circ$ と推定し、最大深さ19.3mの垂直掘削について有限要素法を用い応力解析を行った。先づ無支保の状態を図-8に示す。図の部分、モール円において破壊包絡線を越す部分、即ち破壊する部分である。

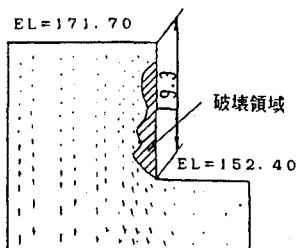


図-8 無支保時の破壊領域

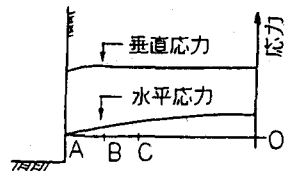


図-4 切取面背後の応力分布

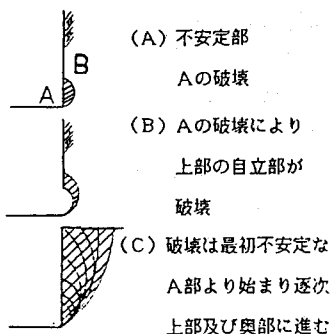


図-5 切取部の破壊の進行

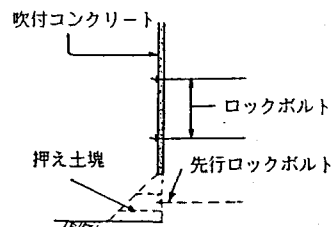


図-6 先行ロックボルト

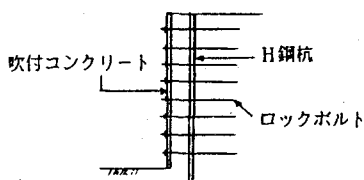


図-7 H 鋼 杭

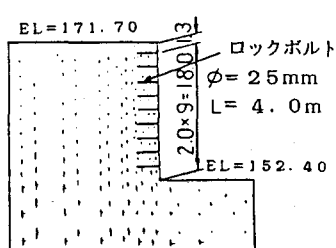


図-9 全面接着ロックボルト
施工時応力状態

次に全面接着のロックボルトを此の破壊部分をカバーするように4mの長さで、深さ2m毎に設置することとし、吹付コンクリートを無視した応力解析を行った。図-9に示すような要素では、破壊は生じない結果が出た。ロックボルトの軸力は、図-10に示すように、最大で5.37tであった。然しロックボルトは壁面では点であり、壁面の殆どの部分の最小主応力は0であるので、金網入り吹付コンクリートをロックボルトに固定して壁面に拘束力を与え、最小主応力を増大させて、破壊を防ぐ必要がある。

ロックボルトは引抜試験等により $\phi=24$ mmのUNアンカーでは、10tの軸力迄耐えられるので、上部で3.0mに1本、中間部で2.25mに1本、下部で1.0mに1本とした。又、施工時の安全を考慮し、壁面後方1mの部分に、2.0m間隔にH-150のH鋼杭を予め埋め込んだ。(図-11 設計図)

実際は、施工中の昭和60年6～7月に梅雨時の度重なる豪雨に遭遇し、安全のため、ロックボルトの長さを5mとし、又下部に土丹層が出現したため、その部分はロックボルトの間隔を広めた。図-11は、最終設計図である。なお地形、地下水の状況からディープウェル等は用いず、部分的な湧水に対し濾過膜と塩ビ管等で集水排水した。(写真-1 土留完成写真) 変位は主として施工段階毎に起こる。

図-12において、A部は自立する区間で、施工中は掘削部に弾性変形が生ずるのみであり、吹付コンクリートとロックボルトで防護されている部分である。B部が掘削されると、上部の土の重さにより、B部は上部から圧縮され、外側に膨らみ、その分が水平方向に変位する。それに伴ってA部も、僅かながら垂直方向と、水平方向に変位する。B部が防護され、その下部が掘削されると同様の変位がB部以上において生ずる。これらの変位は自立出来ない部分でも同様である。上述したH鋼杭や、先行ロックボルトにより変位はかなり低減されるが、0にはならない。実際に現場に設置した地中変位計の記録によると、変位は殆ど施工中におき、防護工が完了し施工を中止した後は、間もなく変位はなくなっている。この現場では、上から4mの位置に設置した地中変位計は、5.1cmの壁面の水平変位を示した。

5. 従来土留工の考え方との相違

迂り土塊なり、ポアソン比に基づく土圧なりに対し、その全荷重をアースアンカーや、擁壁等で、対抗するのが従来の土留工の考え方である。然し、上述の新しい工法では、自立部分の土圧は0と考え、風化対策のみを行い、自立出来ない部分に対しては、モール円が破壊円包絡線より、下方に来るような拘束圧を与えることによって、安定を計ることを原則とし、その拘束圧は、例えば土圧係数を0.3とすれば $0.3\sigma_3$ より小さな σ_2 を与えればよいことになる。(図-13)

全面接着のロックボルトは、鉄筋コンクリート中の鉄筋がコンクリートと粘着し、ボンドストレスを生ずるように、土と粘着して、土が外側に変位

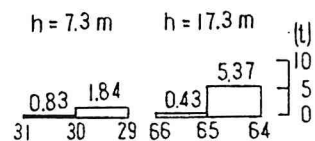


図-10 全面接着のロックボルト応力

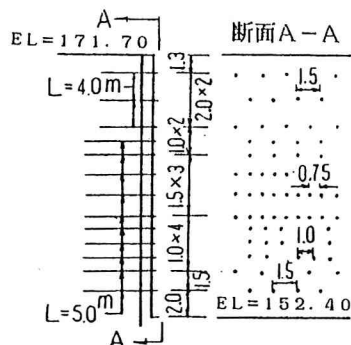


図-11 設計図

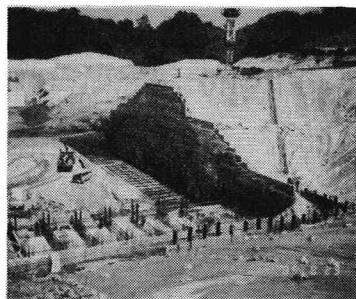


写真-1 土留完成写真

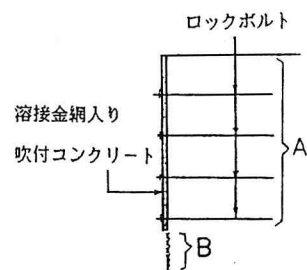


図-12 施工中の変位の発生

しようすることを拘束する。即ち、全面接着のロックボルトは、単独でも多少の拘束力を与え、又、吹付コンクリートを支えて破壊に抵抗する拘束圧を与える。これらが σ_2 となる訳であるが、先述の如く、垂直力に土圧係数を乗じた土圧より σ_2 は遙かに小さくてよい。これは地山の有する C 、 ϕ を有効に利用し、地山に土圧より少ない力を補強することによって、切取面を安定させることを意味している。在来の土留壁の考え方は、土留工作物で、土圧や迂り面に抵抗することである。従って土留工としては、従来のものより、安価になる要素を有している。

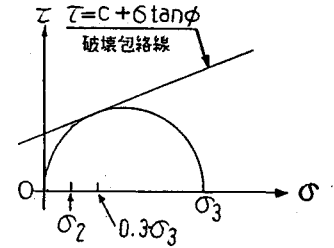


図-13 安定説明図

一軸圧縮強度より大きい応力を受けている壁面に、全面接着のロックボルトを打設し、壁面の安定を図り、また膨らみ出しを防ぐ試みは、近年膨圧を受けるトンネルの切羽の正面や壁面において筆者等は成功している。

また稲城砂層や軟岩のトンネル等において全面接着のロックボルトの引抜き試験を行い、20 t o n以上の引抜抵抗（被りや、深さの浅いところでは、数 t o n）があることも経験している。

6. 変位について

切取面では前述のように必ず上部からの垂直応力により弾性変位或いは塑性変位を生ずる。又、同時に垂直変位を生ずる。これらを最小にするため、前述のような先行垂直杭や先行ロックボルト等が用いられるが、それでも変位を厳密に0にする事は、至難である。

在来工法においても同様である。東京工科大の実例では、H鋼杭の存在を無視した壁面の水平変位計算では、上部から4 mの位置で15 cmであったが、実際には、5.1 cmであった。変形をもっと小さくするためには、垂直杭の間隔を小さくすること、ロックボルトの長さを長く、又間隔を小さくし、先行ロックボルトや、図-6の如き押さえ土工法の等が考えられ、環境と工費を勘案しながら、最適な設計、施工を行う必要がある。

モールクーロンの破壊法則を十分に利用したこの切取面の土留工法は、稲城砂層における16 m～40 mの深さの直径11～12 mの3つの円形立杭の施工実績を経て開発された。

7. 終わりに

モールクーロンの法則は、古典土質力学の基本であり現在も破壊理論の主流として生きている。然し、理論だけで現実に生かされていなかったり、誤って使われていると筆者等には思える点もある。そこで、忠実に切取垂直面に適用して見た所、大変経済的であることが分かった。此の工法と考え方は切取りや盛土及び法面の安定工法に利用出来るばかりでなく、最近多く行われるようになったNATMの設計概念に取入れ合理的なロックボルトや、吹付コンクリートの設計、部分掘削の設計、先行ボルトの設計等に役立つものと思われる。読者各位の御批判、御意見を頂ければ幸甚と思う。

参考文献

- 1) 北原正一：超膨圧トンネルにおけるNATMと岩盤力学的考察
「82' トンネル技術講演会」 1982. 2. 日本トンネル技術協会
- 2) S. MATSUDA, S. KITAHARA: Application of Vertical Forepiling Method to a Large and Peculiar Shallow Tunnel and NATM to a Deep Shaft in the Soft Ground. Proceedings of I Latin American Congress of Underground Constructions 1984.6 International Tunnelling Association

- (42) Theory and new construction method of the earth retaining structures with the application of the Mohr-Coulomb's failure criterion.

S. KITAHARA
M. UENO
KUMAGAI GUMI CO., LTD.

Two standard design conceptions have been used to be adopted in the design of the earth retaining structures of the cutting surface. One conception is to keep stability of the earth mass over the postulated sliding surface. The other is to retain the earth pressure obtained by multiplying the overburden load by the coefficient of earth pressure, which increase in proportion to the depth. The design method to postulate the sliding surface is prevailed and is considerably adopted even in the case of homogeneous geology or in the case that there is no occurrence of the sliding surface due to the fault or the fissure. However, it seems to be contradictory between them. The study of the stability around the cutting surface which is performed with results of stress condition in the homogeneous ground analyzed by the numerical computer program, FEM, and the Mohr-Coulomb's failure criterion shows that the portion around the cutting exposed surface becomes most unstable. So authors due to their learning and experience has reached to the conception that the early execution of the mortar embedded rockbolts in cooperation with shotcrete with welded steelmesh works effectively to stabilize the unstable zone, in which stress condition of every point remains under the mohr's intrinsic curve, due to the countermeasures. This method is thought to be more economical than the other conventional construction method.

This construction method that the main support members are the mortar embedded rockbolts and shotcrete with welded steelmesh was practically applied to the vertical cutting work 18.35 meter high in the district where the geology was almost consisted of the Inagi sand stratum, and it was consequently verified that this construction method was superior to the other methods both in the work period and in the cost. The geology of the site was silty sand and the cohesion C was $0.31 \sim 0.94 \text{ kgf/cm}^2$, the angle of internal friction was 25° . Checking the stability of the cutting surface by the Mohr-Coulomb's failure criterion, it was recognized that the ground without support member could be stable at a depth of 6 meters from the top. The shotcrete with welded steelmesh (10cm in thickness) and the mortar embedded rockbolts ($l=4\text{m}$, $\phi=24\text{mm}$, 1bolt/3m²) were executed in this portion to prevent the ground from weathering and occurring the collapse caused by the rain. The calculation results showed that the ground deeper than 6m from the top became unstable without support, so some countermeasures were performed such as the installation of H-steel rib piles just behind the excavated surface, and making an exposed face small, and the prepoling of rockbolts through the triangular small ground mass remained in front of the final excavated surface. Consequently the collapse of the face hardly occurred and the retaining work was possible to complete without any trouble by this support system, the shotcrete with welded steelmesh (10cm in thickness) and the mortar embedded rockbolts (5m in length). The rockbolts were placed almost at the rate of one bolt per 1m². According to the data of ground displacement measured by the extensometer set at the portion of 4m below the top, the maximum displacement at the surface became 5.1cm. But there was no problem in the execution.

The Mohr-Coulomb's failure hypothesis which is a fundamental in the classical mechanics is even now put to practical use as the principal failure criterion. However, in the domain of geotechnique it seems that this rule is regarded as only a theory, and has not been made effective use to correspond reality or in the worse case has been misused. Applying this rule to the normal cutting problem faithfully, it is recognized that an economical design can be performed. It is thought that this construction method and conception can be applied not only to the cutting work and the filling work and the stability work for the slope, but also to the design concept of NATM, being the standard tunnelling method lately. A reasonable design of rockbolts and shotcrete will be able to establish by this concept. Also this concept will be applied effectively to the design of excution, such as the partial excavation or forepoling, or pre-setting steel piles.