

ロックボルトの作用効果について

ON MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCK-BOLT

山 本 稔*

By Minoru YAMAMOTO

1. はじめに

最近、富みに新オーストリアトンネル工法¹⁾とよんでロックボルト工を主体としたトンネル工法が着目されるようになった。この傾向はわが国だけでなく、アメリカ大陸やヨーロッパ一円においても同様である。ロックボルト工法の最大の特徴は、在来のトンネル工法が掘削した地山を荷重の発生源として捕え担い式支保工によって支持したのに対し、地山に打ち込んだロックボルトの助けを借りて地山自体を積極的に支保材として利用するところにある。いいかえれば、ロックボルトの作用効果によって地山が本来有している土圧支持力の発現をねらうものであり、塑性流動しやすい土圧の大きいトンネルの施工に適用できることが広く認識されるようになったところに関心を引く源があると思われる。

ロックボルトは経験的に使用され始め、その効果が結果的に認められて普及するようになったもので、工法としては経験が先行し、理論的裏づけが遅れている現状にある。新オーストリアトンネル工法はロックボルトの作用効果を活用した工法であるが、ここにおいてもロックボルトに対する認識が必ずしも明確とはいえず、工法の理解や適用の仕方に手探りの域から出ないところを残す要因になっていると思われる。ロックボルト工の適用に当たって、いまだに多くを経験に頼らざるをえないのはこの間の事情を物語るものといえよう。これは、ロックボルトの作用効果に対する従来の認識が抽象的な把握にとどまって具体的な取扱いに結びつきにくいいため、的確な応用が図れないところに本質的な原因があると思われる。

このような思考に基づき、従来補強効果とよんで利用しているが、抽象的な把握にとどまっているロックボルトの作用効果についてその実体を多少とも明確にし、ロ

ックボルト工の設計と施工に反映したいと思い、筆者は、補強効果の本質がロックボルトの自己つり合い作用による地山のブロック化にあるとし、これを簡単にブロック化効果と呼称して補強効果の内容を具体的に把握する概念として利用するよう提案する考えである。そして、説明に当たっては作用効果に関する在来分類と対比してブロック化効果の立場を明らかにするとともに落し戸の実験を用いた実証的手法によってその本質を具体的に把握し、ブロック化効果をロックボルトの作用効果の1つとして位置づけたいと考えている。また、落し戸の実験結果に関する類推から、ロックボルトの実用面に対する考察も若干つけ加えたいと思う。

ひるがえって、筆者の提案は、補強効果がもつ一側面だけを強調する結果に終る恐れもなしとはしない。しかし、ロックボルトの作用効果に関する実証的手法による究明が、少なくともその具体的な認識に役立つことは指摘してはばからない。

2. 作用効果の概念的考察²⁾

ロックボルトはもともとボルトの本質である締めつけ効果を期待して使用し始めたものである。この効果は、トンネルの掘削面を保持する意から、表層の岩塊を基岩にくくりつける場合に吊り下げ効果、また層状岩盤を締めつけて重ねばりと同様に挙動させることをねらう場合にはり形成効果とよんでいる。これらの作用効果は直観的で理解が容易である。しかし、ロックボルトの利用が広まるにつれて作用効果に対する認識も深まり、直観的なものから抽象的なものへと展開し、トンネルの支保理論を支える効果として着目されるようになった。キーストーン効果、圧縮帯理論さらに進んで補強効果などよばれているものがこれにあたる。これらの概念は、トンネルを支保するに当たって地山の強度を直接利用する点から同列に置くことができると考えられる。そのため、

* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科

ここには簡単に補強効果で代表し、この内に包含して取扱うことにする。

トンネル周辺の地山が岩質は堅硬であるが、き裂が発達しており、掘削に伴って地山の局部的な脱落や崩壊が考えられる場合、ロックボルトの設置によって地山の相対変位を拘束し、ロックボルト回りの地山を一体化して互いにせり持たせ、早期に自然アーチを完成してトンネルを支保する効果は、キーストーン効果あるいは圧縮帯理論で説明できる補強効果に相当すると解釈することができよう。地山が締まれば、締めつけ式ロックボルトでも作用効果が期待でき、通常は吹きつけコンクリート工の併用などによる掘削面の保護や補強なしにすむ場合が多い。これに対し、岩質が次第に軟弱化し、トンネルを支保しない限り、周辺の地山は塑性的あるいはレオロジー的挙動を呈して流動する場合、ロックボルトと吹きつけコンクリートの併用工によって応力の再配分を図り、地山の流動を抑制してトンネル周辺に新たな応力のつり合い状態を作り、自然アーチや保護ゾーンを形成して地山を安定に導くことを期待したロックボルトの補強効果も指摘することができる。新オーストリアントンネル工法の理論的根拠はこの効果に基づくものである。ロックボルトとしてはもはや締めつけ式の使用は望めず、全面接着式が適することになる。この補強効果は、先に述べたものと一見相違するように見えるが、吹きつけコンクリートの協力を得てロックボルト回りの地山が一体化し、相対変位が拘束されて互いにせり持つために得られた結果であるとすれば、同じ作用効果であると解することができる。相互の違いは、応力の再配分による力のつり合いによって地山の安定化を図る必要性から、吹きつけコンクリート工を補助手段として利用し、ロックボルト回りの地山が一体的に挙動できるようにした点にあるにすぎない。

ロックボルトの補強効果に関する上述の考察において、筆者は特に地山の一体化を重視し、これを強調する意からブロック化効果と呼称して作用効果を再認識し、補強効果をめぐる在来の不明確な概念を払しょくするとともに設計理論へ応用の途を開きたいと思う。ここに提案するブロック化効果とは、ロックボルト回りの地山を一体的に挙動させるに必要なロックボルトの力学的現象に与えた呼称である。一体化を図るにはロックボルトとその回りの地山とは内部的に力のつり合い状態になければならないが、この状態を具現するに用いる手段を問題にしないことによって補強効果の統一した解釈を試みたわけである。筆者は先にブロック化効果に言及する機会³⁾があった。しかし、そこではキーストーン効果や圧縮帯理論に代わる名称として用いたにすぎなかったが、このように広く解釈した方がよいと考える。

いうまでもなくブロック化効果は、筆者が在来の概念である補強効果を再認識するために新たに与えた名称であるから、これによってロックボルトの作用効果を把握するにはさらに説明を要することはいうまでもない。新オーストリアントンネル工法への応用を考慮し、砂を用いた落し戸の実験によって実証的説明を行い、ロックボルトの作用効果としてブロック化効果の認識とその設計理論への応用を図ることにする。

3. 落し戸の実験

塑性地山中のトンネルとして乾燥砂中のトンネルを例とし、施工を可能としてその支保について考える。流動する地山は、ロックボルトと吹きつけコンクリートの併用工によって支保できるものとする。このとき、ロックボルトを中心として吹きつけコンクリートを区分けし、簡単のため区分けした境界を通じて吹きつけコンクリートは応力を伝達できないとする。区分けした境界で吹きつけコンクリートの肉厚が0となっていると考えればよい。このようにして区分けした吹きつけコンクリート部分を簡単にパネルとよぶ。この仮定のもとでは、吹きつけコンクリート層のみでは地山の荷重を支持できないことは明らかである。しかし、各パネルは、掘削面を被覆するとともに背面に作用する土圧をロックボルトを介して地山に伝達し、自己つり合い状態を作り出すことができるならば、吹きつけコンクリートのパネルは、ロックボルトを中心とその回りの地山とともに一体化し、1つの固まりとして挙動できるであろう。これが先のブロック化効果である。そして、この説明が正当であるならば、ロックボルトを配設した落し戸にあっては内部的な力のつり合いによって落し戸の降下が停止すると考えられる。筆者は、この想定のもとに落し戸の実験を計画し、ロックボルトの作用機構を明らかにするよう試みることにした。なお、手許にある資料ではロックボルトを配設して行った実験はまだないようである。これは、研究目的が明確でない限り、実験に意義が認められないことによるものと思われる。

(1) 実験概要

破碎の極度に進んだ地山を表現する意と理論的考察の便を考え、地山材料として乾燥した相馬標準砂を用いた。また、ロックボルトとしては外径約6mmの全長にわたってねじを切ったボルトを用いた。ねじによって砂との摩擦を大きくし、全面接着式ロックボルトに似せる手段とした。図-1は実験装置である。砂箱は周囲を山形鋼で補強した木製箱で、底板の中央部には穴が明けられてあり、その中に18cm×54cmの矩形の落し戸が入る

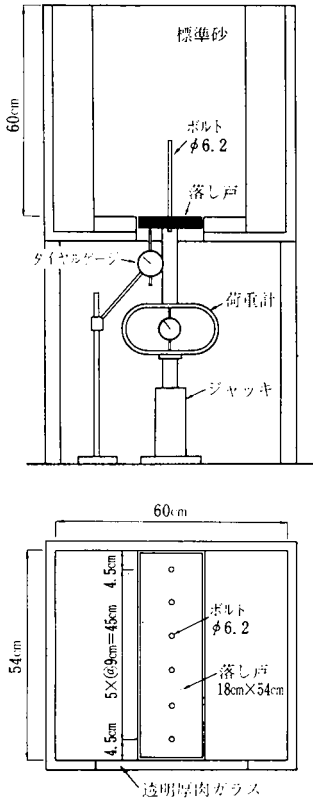


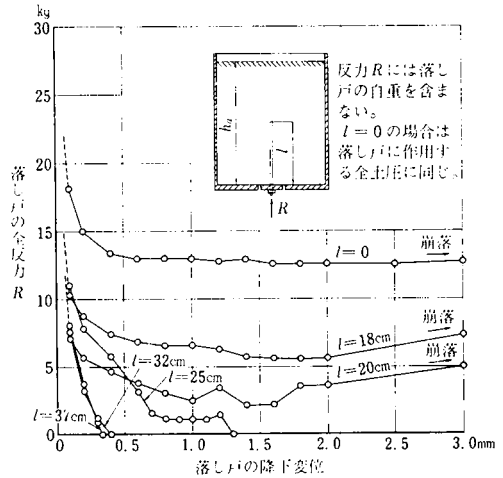
図-1 実験装置

薄いスポンジを張りめぐらしてある。また、砂箱の正面には厚板ガラスを取りつけて砂の移動が観察できるようにした。

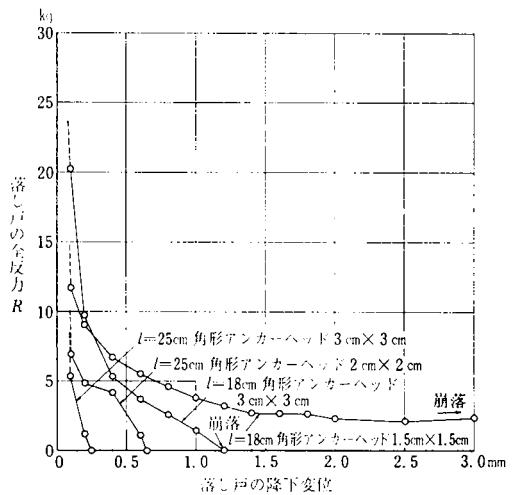
標準砂の粒径は 0.8~1.0mm で、真比重は 2.65 である。砂箱に対する砂の詰め方は、1mm メッシュのステンレス製砂通しを通して標準落下高 50cm で一様に詰める場合と落下高を 0 として詰める場合の 2 種類とした。簡単のために前者を密詰め、後者をゆる詰めとする。単位体積重量 γ_d は、密詰めの場合 $\gamma_d=1.63 \text{ g/cm}^3$ 、ゆる詰めの場合 $\gamma_d=1.38 \text{ g/cm}^3$ である。実験に当たって砂の詰め込み高さはすべて底板から 57cm とした。ボルトは、既述したボルトについて埋め込み長さを 18, 20, 25, 32, 37cm の 5 種に変えたものの外に 18, 25cm の長さについてはそれぞれ 2 種の正方形アンカーヘッドをつけたものを密詰めの場合の実験に用いた。また、アンカーヘッドのない長さ 31, 37cm のボルトについてはゆる詰めの場合について実験した。実験は砂が密詰めで落し戸にボルトを用いない場合を含めて全体で 12 ケースである。

実験に当たっては落し戸の降下速度を 1mm/分程度とし、多少の変更はあったが、降下変位が 2mm に達するまでは 0.1mm, 2mm 以上については 1mm の変位

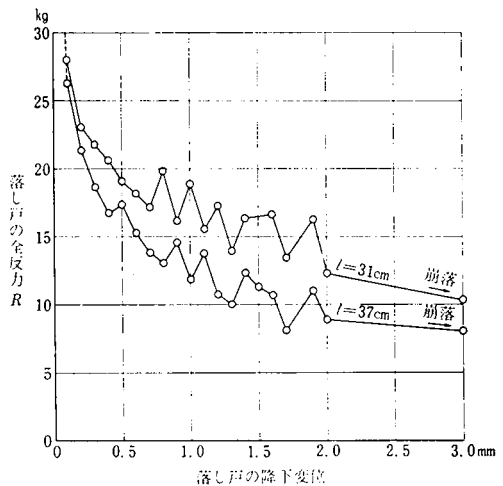
ようになっている。落し戸は剛性の大きい木製板で、その長手方向の中心線上には 6 本のボルトが各パネルの面積を等しくする配置で板に直交して固定されている。ボルト 1 本の受持ち面積は $18 \times 54/6=162 \text{ cm}^2$ である。各パネルを長手方向に連続させたのは現象を二次元化するためである。落し戸は荷重計を介してジャッキで支持し、落し戸を支持するために必要な反力が落し戸の降下変位とともに計測できるようになっている。落し戸と底板の間隙に砂が流入するのを防ぐために落し戸の側面には



(a) 砂は密詰めでアンカーヘッドをつけないボルトの場合



(b) 砂は密詰めでアンカーヘッドをつけたボルトの場合



(c) 砂はゆる詰めでアンカーヘッドをつけないボルトの場合

図-2 ボルトを配設した落し戸の全反力と降下変位の関係

の増加ごとに落し戸を支持する反力の計測を行った。そして、落し戸の反力が0となって落し戸が自立する場合には逆に荷重を落し戸に加え、ボルトが抜け出して落し戸が崩落する荷重を計測した。

(2) 実験結果と考察

実験結果は 図-2 および 表-1 に示すとおりである。ボルトを取りつけない場合の落し戸の挙動は従来数多く実施されてきた実験^{4)~6)}と同じであり、図-2 (a) のように、落し戸の反力は落し戸にわずかの降下変位を与えることによって急激に減少し、一定値に近づくことを示している。これに対してボルトを配設して実験すると基本的に現象は同様であるが、落し戸の反力は、ボルトの埋め込み長さの増加とともに減少するがある長さまでは0にならず、最小値を過ぎると再び増大してボルトを取りつけない場合に近づく傾向になる。そして、最小反力に達するまでの降下変位は、またボルト長さの増加とともに小さくなる。このような現象は、図-2 に共通した傾向であり、ボルトの引抜き抵抗によって落し戸の反力が軽減する結果であると考えられる。ボルトの埋め込み長さを長くし、また、アンカーヘッドを大きくすることで落し戸の反力が減少するのはこのためであろう。また、ボルトの定着力が破壊すると力学的にはもはやボルトの存在する意味がなくなり、急速にボルトのない場合に近づく傾向もこれによって説明できよう。さらに 図-2(a) と (b) から明らかなように、ボルトの埋め込み長さがある大きさ以上になると落し戸の反力は0になり、落し戸は自立すること、そしてボルトの長さをいっそう大きくすると、落し戸が自立するまでの降下変位がさらに減少することなどもこの考察の裏づけとなる。なお、図-2 (c) の場合に落し戸が自立できないのは、砂がゆる詰めのためにボルトの定着力がまだ不足していたことによると思われる。

表-1 に自立した落し戸の崩落に必要な荷重を示す。ここにおいてもボルトの埋め込み長さとアンカーヘッドの寸法が大きくなるほど崩落に必要な荷重が大きくなっていることは先の指摘を説明するものといえる。図-3

表-1 自立した落し戸の崩落に必要な荷重

砂の状態	アンカーヘッドの有無または寸法 (mm)	ボルトの埋め込み長さ (cm)	崩落に必要な荷重 (W_1)、落し戸とボルトの自重1.4 kgを含む (kg)
密詰め $\gamma_d = 1.63$ g/cm ³	なし	25	3.9
		32	22.0
		37	46.7
	角形 20×20	25	22.0
		18	1.4*
角形 30×30	25	30.3	

* 落し戸が自立した後、自然に崩落

は表-1の結果のうちアンカーヘッドのない場合について図示したものであるが、これから落し戸が自立に必要なボルトの最小長さは約 23 cm と推定される。後述するように、この長さは力のつり合いから落し戸の自立の条件を定めるのに重要な意味も持っている。

ボルトを取りつけない落し戸の実験において降下変位がある程度進んだ場合の砂の移動状況は写真-1 のようであるが、既報の実験でよく知られているように直接領域の存在は明瞭である。また、ボルトを配設することによって自立した落し戸にさらに載荷して崩落させた後の様子は、おおよそ写真-2 から状況を知ることができる。写真-2 を写真-1 と比較

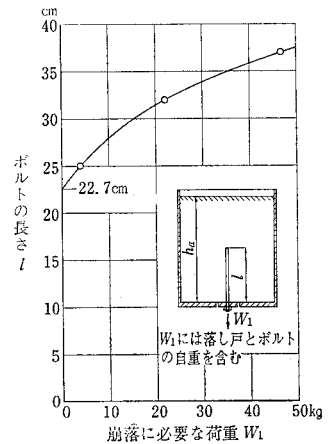
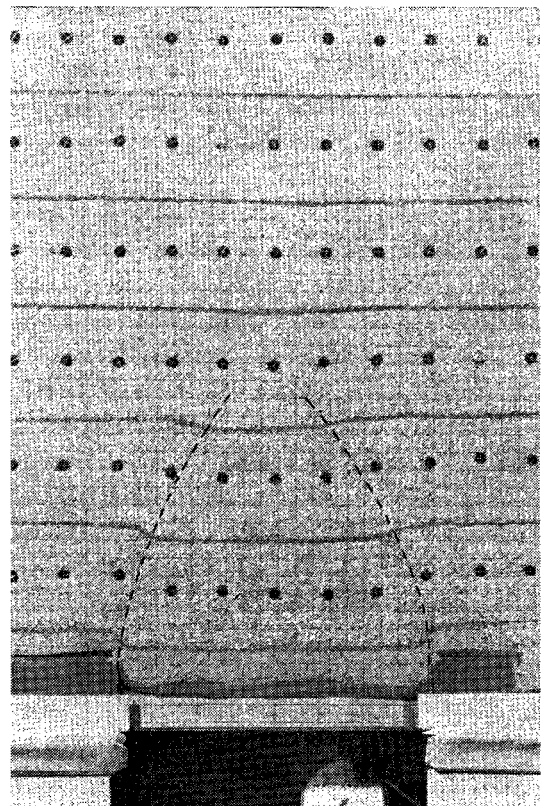
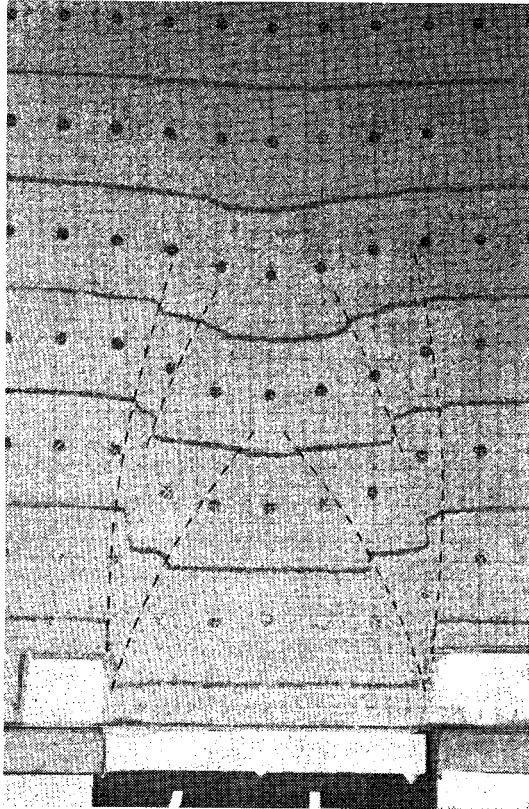


図-3 自立した落し戸のボルト長さと崩落に必要な荷重との関係



砂：密詰め ボルト：なし

写真-1 落し戸に降下変位 10 mm を与えたときの状況



砂：密詰め ボルトの埋め込み長さ：32cm

写真-2 自立した落し戸を載荷によって崩落させた後の状況

し、ここにおいてもボルトの存在に関係なく同じ直接領域が発生するのは明らかである。また、間接領域にはボルトの引抜きに伴う破壊面の発達認められるが、直接領域に含まれるボルト部分は砂と一体的に挙動するため、この部に引抜き抵抗力が現われにくいことを考え合わせ、間接領域に含まれるボルト部分が特に落し戸の自立に関与することを示すものと思われる。

これらの実験結果の考察と既報の研究結果^{9)~11)}に基づき、定性的な推論ではあるが次のような見解に達することができる。

(a) 落し戸に適当な長さのボルトを設置すると、落し戸の背面に作用する土圧はボルトを通じて地山内に導入され、ボルトによる自己つり合い作用が出現する。

(b) このとき、落し戸の背面に作用する土圧の最小値よりボルトの引抜き抵抗力が小さければ、落し戸は降下しつづけ、ついには崩落する。

(c) ボルトの引抜き抵抗力が落し戸の背面に作用する土圧の最小値より大きい場合には、落し戸は背面に作用する土圧がボルトの抵抗力につり合うまで降下しつづけるが、ここにいたって降下は停止し、落し戸は自立する。なお、土圧の最小値として直接領域の重量などから

定まるゆるみ土圧を当てることができる。ゆるみ土圧は、落し戸の幅に対して土被りが大きい場合には、その影響を受けないことがわかっている。

(d) ボルトの引抜き抵抗力が大きくなるにつれて落し戸が自立するに必要な降下変位は減少する。

(e) ボルトの引抜き抵抗力は間接領域に含まれる部分の抵抗力によって定まる。これをボルトの定着力という。

なお、以上の見解を総合して落し戸の自立の機構を次のようにまとめることができる。ボルトの自己つり合い作用によって落し戸、ボルトおよびその回りの砂が一体となって挙動することができれば、一体化した領域はまたその周辺と連続的につながっているから、周辺との間に相対変位は生じえない。したがって、周辺の砂の流動が拘束されている落し戸にあってはついには安定したつり合いに達して自立することになる。既述のブロック化効果とはこのような認識をロックボルトの作用効果としてとらえたものである。

落し戸の実験に基づく見解は、また実用的見地から拡張解釈して利用することができる。塑性流動する地山に掘削するトンネルの天盤をロックボルトと吹きつけコンクリートの併用で支保する場合、各ロックボルトを中心として区分けしたパネルを落し戸に見立てるならば、ブロック化効果は、ロックボルトが個々に脱落することなく、ロックボルト群として挙動する条件を与えるものとして位置づけることができる。このとき、使用するロックボルトは全面接着式が適当である。これは、接着剤を介して落し戸の実験におけるボルトと同じ状態にロックボルトを置くことができるからである。ただし、ロックボルトの定着力は、技術の確実性のために引抜き試験結果を参照して接着力から定めるのがよく、落し戸の実験の場合のように摩擦抵抗力に期待すべきでない。トンネルにおけるロックボルト工の挙動を説明する手段としてブロック化効果を利用することは、この考察から明らかであろう。

4. 補足実験——ボルトの引抜き実験

落し戸の実験においてボルトの定着力が間接領域に含まれるボルト部分の引抜き抵抗力によって得られることはすでに指摘したとおりである。この場合、簡単のためにボルト周辺の砂中に円筒状のせん断抵抗面を仮想し、その側面に沿って作用するせん断応力でボルトの定着力を評価するように考えれば、現象は、近似的に砂箱の底板に明けた孔を通して行うボルトの引抜き実験によって置き換えることができよう。落し戸の実験においては写真-2 からうかがわれるように、引抜き破壊時にはボ

ルト回りの砂中に放射状の破壊面が認められるが、この引抜き実験においては底板の拘束によって同様な破壊面は生じにくいと思われるから、類似な現象にすぎないことはいうまでもない。しかし、落し戸に配設したボルトの定着力を近似的に推定する手軽な手段として利用することができる。トンネルの建設現場で実施するロックボルトの引抜き試験は、定着力を評価するためこれと同じ考えのもとに行う試験であり、現場への応用を念頭に置けば、ボルトのこの引抜き実験は適当な処理であるといえる。

ボルトの引抜き実験は、実験条件を整える意もあって図-1の装置をそのまま利用することとし、落し戸が入る底板面の上にもう一枚の底板を装置の底面一杯に敷き、その下側へ落し戸の実験に用いたと同じ落し戸を挿入し砂中にボルトを埋め込んで行くことにする。上側の底板にはボルトの配置に合わせて小孔を明けるとともに砂が流入しないように処置し、ボルトとの間には摩擦力が発生しないようにする。実験に当たってボルトは長さの異なる6種を用い、荷重は落し戸に直接載荷する。砂の詰め方は密詰めに限り、砂の詰め込み高さは一律に底板面から57cmとする。実験の概要はまた図-4中の説明図からうかがうことができよう。

実験結果は図-4に示してある。縦軸の引抜き抵抗力は落し戸に配設した6本のボルトが同時に引抜ける際の最大抵抗力を落し戸の自重も含めて示したものである。ボルトの埋め込み長さが十数cm程度までの比較的短い範囲においては、引抜き抵抗力と埋め込み長さの関係は座標原点を通る直線に近いゆるやかな曲線で近似できると思われるが、これはまた現象の概略がボルトと砂の間

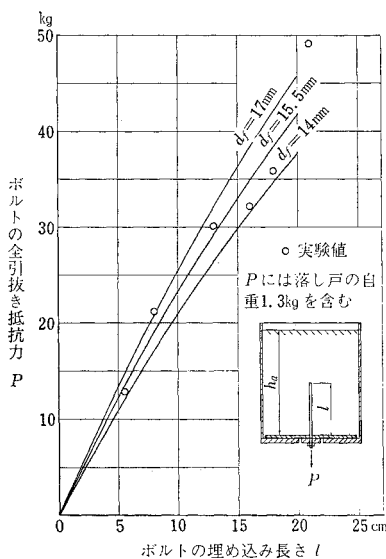


図-4 落し戸に配設したボルトの全引抜き抵抗力と埋め込み長さの関係

の摩擦抵抗によって説明しうることを示唆している。

実験結果を砂の摩擦抵抗力で説明するため、図-5のようにボルト回りに任意の径の仮想せん断破壊面を作り、簡単のためにその上下端面に作用する応力の影響を無視して側面のせん断応力とボルトの引抜き抵抗力との間につり合いを考える。記号は図-5を参照して、

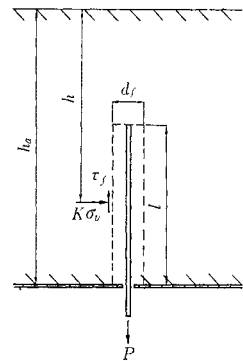


図-5 ボルトの引抜き抵抗力

h : 砂箱に詰めた砂の深さ：全深さ、 h_a : (57 cm)

l : ボルトの埋め込み長さあるいは砂箱の底板面から測ったボルトの座標

n : 落し戸に配設したボルトの本数 (6本)

d_f : 仮想せん断破壊面を作る円筒の直径

P : 落し戸の自重を含めたボルトの全引抜き抵抗力

σ_v : 砂中の鉛直方向土圧、 $\sigma_v = h\gamma_d$

ϕ : 砂の内部摩擦角 (43°)

K : 土圧係数

τ_f : 仮想せん断破壊面に作用するせん断応力：クーロンの強度式を用い、粘着力がないとして $\tau_f = K\sigma_v \tan \phi$ とする。

とすれば、つり合い式は次式で与えられる。

$$P = \int_0^l n\tau_f \pi d_f dl = \int_0^l nK \tan \phi \pi d_f \sigma_v dl$$

$$= n\pi d_f K \gamma_d \tan \phi \left(h_a l - \frac{1}{2} l^2 \right) \dots \dots \dots (1)$$

実験値を用いて式(1)から d_f を具体的に定めるにはまず K を仮定する必要がある。 K は落し戸の問題を取扱うに当たって通常 $K=1$ とおいているようであり⁷⁾、ここにおいても現象は類似すると考え $K=1$ と仮定する。図-4に併記した計算結果は $d_f=15.5$ mm によって実験結果を比較的忠実に説明できることを示している。ボルト径 6.2 mm に対して 9.3 mm 大きい径を用いる必要があるのは、上下端面の応力をせん断応力で丸めた影響もあるとはいえ、ボルト回りにこれと一体的に動く砂の領域があることを意味していると考えられる。なお、式(1)から明らかなように式の運用には Kd_f の値だけで済ませることができるから、ここに K と d_f を別々に定めたのは単に便宜的な処理にすぎないと解することができる。

実験結果に対するこの処理に基づき、落し戸の間接領域に含まれるボルト部分の引抜き抵抗力すなわちボルト

の定着力の算定に当っては、 $K=1$ と仮定するとともにアンカーヘッドをつけないボルトの場合にはその直径に、アンカーヘッドをつけたボルトの場合にはアンカーヘッドの面積に等しい円の直径にそれぞれ 9.3mm を加えた値を直径とする円筒の側面が仮想せん断破壊面を構成するとして計算するものとする。

5. 落し戸の実験の理論的考察

落し戸の実験結果を理論的に説明するに当って、問題を簡単にするために、落し戸がボルトの自己つり合い作用によってつり合いを保つに必要な条件だけを論ずるにとどめることにする。この処置によって変形条件の使用が排除でき、つり合い条件のみの適用ですますことができるから、問題の取扱いは簡明になる。

落し戸に作用する最小荷重すなわちゆるみ土圧がボルトの存在によって影響を受けないと考えれば、その推定には既出の研究成果^{5)~7)}を直接利用することができる。そして、この場合にボルトの挙動をふまえて現象を具体的に把握するには、すでに行った定性的な考察から明らかかなように、ゆるみ土圧が落し戸と一体になって動く直接領域の砂の重量で与えられるとする考え方によるのが好都合である。この立場から、ここには簡単に落し戸の幅を1辺とする正三角形の部分を直接領域としてゆるみ土圧を推定する。この考え方がゆるみ土圧の近似計算に許容できることはすでに明らかであり⁸⁾、表-2に示すように他の計算結果と同じく実験値を説明することができる。また、直接領域に含まれるボルト部分には回りの砂との間に相対変位がないから、この部にボルトの定着力を期待することはできない。実験に用いた落し戸ではボルトの埋め込み長さが $18 \times \sqrt{3}/2 = 15.6 \text{ cm}$ 以下ではボルトに定着力はなく、自己つり合い作用は生じないことになる。

ボルトの埋め込み長さが間接領域に入るまで大きくなると、間接領域に含まれるボルト部分には回りの砂との間の相対変位によってせん断抵抗力が生ずる。これがボルトの定着力であり、自己つり合い作用に役立つ力である。既述のように、この力はボルトの引抜き実験結果を用い推定することができる。図-6はボルトの自己つり合い作用によって落し戸がつり合っている状況を模式的

表-2 落し戸に作用するゆるみ土圧

推 定 法	推定値 (W_2) (kg)
(1) 直接領域を正三角形とみなして計算する場合	12.3
(2) Terzaghi の理論による場合	15.3
(3) 村山の理論による場合	10.3
(4) 実験 (密詰めの場合)	13.0

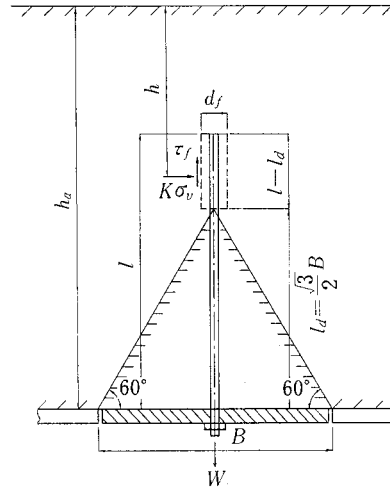


図-6 落し戸の自己つり合い作用

に示したものである。なお、図の間接領域におけるボルトの定着機構については図-5と同じである。記号はボルトの引抜き実験の場合のほかに図-6を参照して、

B : 落し戸の幅 (18 cm)

l_d : 直接領域に含まれるボルト部分の長さ、

$$l_d = \frac{\sqrt{3}}{2} B$$

W_1 : ボルトの自己つり合い作用によって自立した落し戸を崩落させるに必要な荷重 (表-1 参照)

W_2 : 正三角形からなる直接領域の砂の重量で与えられるゆるみ土圧またはその実験値 (表-2 参照)

を用いれば、落し戸が正に崩落する場合のつり合い式は次式で与えられる。

$$W_1 + W_2 = \int_{l_d}^l n \tau_f \pi d_f dl = n \pi d_f K \tau_a \tan \phi \times \left\{ (h_a - l_d)(l - l_d) - \frac{1}{2}(l - l_d)^2 \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに左辺の W_1 にゆるみ土圧を用いたのは、崩落時

表-3 崩落する落し戸とつり合うのに必要なボルトの埋め込み長さ

アンカーヘッドの有無または寸法 (mm)	W_1 (表-1参照) (kg)	ボルトの埋め込み長さ (cm)		
		実験値 (表-1参照)	計算値	
			$W_2 = 12.3 \text{ kg}$	$W_2 = 13.0 \text{ kg}$
なし	0	22.7*	22.9	23.4
	3.9	25	25.6	26.1
	22.0	32	44.0	45.2
	46.7	37	—	—
角形20×20	22.0	25	26.0	26.2
角形30×30	1.4	18	18.4	18.5
	30.3	25	25.0	25.1

* 推定値 (図-3 参照)

における落し戸の降下変位が大きいのことを考慮してとった処置である。

W_1 として表—1の実験値を、 W_2 として表—2の(1)と(4)の値を用い、式(2)を計算した結果は表—3に示すとおりである。ボルトの埋め込み長さが大きいものは別としても25cm以下の場合には、計算結果は実験値を正しく説明することができる。ボルトの長さが大きい場合に計算値の信頼性が低下するのは、図—4の実験結果からうかがえるようにボルトの定着力を式(1)で計算した影響によると思われる。しかし、この比較を通じて間接領域に含まれるボルト部分だけがボルトの定着力に關与するにすぎないことが実証できたと考えられ、すでに指摘した定性的な見解が定量的にも裏づけできたこととみなすことができよう。特に落し戸の崩落時におけるボルトの作用機構を取り上げることに、ボルトが地山を安定させるに必要な条件を明らかにすることができたことは注目に値しよう。そして、ボルトの定着力を大きくすれば、落し戸はパネルに作用する土圧が最小土圧にまで減少する前に早期につり合いに達して自立し、降下変位がまた減少することも強調すべきことであろう。

6. ロックボルトの設計について

ロックボルトの適用に当っては、まず始めに作用効果を的確に把握する必要があることを指摘し、砂を用いた落し戸の実験を通じて実証的研究を行った。その結果は既述のとおりであり、従来補強効果とよんできた抽象的な認識に代って、独自の立場からロックボルトの自己つり合い作用に基づくブロック化効果を提唱し、ロックボルトの作用効果に具体的な解釈を与えることができた。この見解は砂のような塑性地山を例として得たものであるが、これを破砕した地山の極限の場合として位置づけるならば、塑性地山一般に拡張解釈して適用できることは容易に推察できよう。かかる見地から、落し戸の挙動に関する既述の成果をふまえ、ロックボルトによってトンネルの支保工を設計する場合の指針として次のように提案する。

(a) ロックボルトの長さは、トンネルの横断方向のボルトピッチ D_1 にロックボルトの定着力を確保するために必要な長さ α を加えた $(D_1 + \alpha)$ 以上の長さを有しなければならない。

(b) ロックボルトの強度と定着力は、トンネルの縦断方向のボルトピッチを D_2 として $D_1 \times D_1 \times D_2$ の岩塊を少なくとも保持できる能力を有しなければならない。

(c) 掘削面は、地山がロックボルトと一体的に挙動

できるように必要に応じて保護しなければならない。

これらの提案は、一般に全面接着式ロックボルトを用いるとしてトンネルの掘削面に打込んだロックボルトが、ブロック化効果を発揮する基本的条件として個々に脱落することなく、ロックボルト群として挙動する条件を具体的に規定したものである。(a)において D_1 は落し戸における直接領域の高さを与える近似値に、 α は同じく間接領域における定着長さに相当する。定着長さはロックボルトの引抜き試験に基づいて定める。(b)は直接領域の大きさを設定することによってロックボルトの最小耐力を規制し、(a)と合わせて設計への簡明な適用をねらったものである。(c)はブロック化効果を有効にするための条件で、ロックボルト間の地山が抜け落ちないように工作することを意味し、ベアリングプレートの使用を含めた肌落ち防止工、鋼製支保工あるいは吹きつけコンクリート工などの併用を指している。そして、上の提案に従ってロックボルトを設計すれば、個々のロックボルトは、ブロック化効果を発揮するに必要な最小耐力に対して少なくとも2倍以上の耐荷能力を有すると考えられる。また、ロックボルト工設計指針²⁾によれば、ロックボルトの耐力はボルト長さに応じて大きくする方向になっているが、作用効果に対する認識の欠除による結果であり、(b)のように書き換えるべきであろう。

トンネル周辺の地山が破砕しているが岩質は堅硬で、(b)に示すロックボルトの最小耐力で掘削面を支持するだけでも地山が全体として塑性流動しないことが明らかであれば、上記の指針に基づくロックボルト工は、トンネルの支保工として有効に機能することができると考えられる。この場合には締めつけ式ロックボルトの使用にも検討の余地がある。なお、ロックボルトによる掘削面の拘束はその耐力に応じて定まるから、耐力の大きいロックボルトを使用することによってトンネルを早期に安定させ、掘削面の変位を減少させることもできる。

これに対し、(b)に示すロックボルトの最小耐力ではトンネル周辺の地山の塑性流動を抑制できない場合がある。地山の一次応力に対して強度の小さい軟弱な膨脹性地山のトンネルがその例である。これは、(b)の最小耐力で設計したロックボルトでは地山を安定させるための必要条件は満たすが、十分条件まで満たすことができないからである。このような場合には、単にブロック化効果を発揮するに必要な対策のみでは処理できず、同時にトンネルの安定条件として地山全体の塑性流動の有無を検討しなければならない。筆者は、ブロック化効果の応用としてロックボルト回りの一体化した地山部分をそれぞれ独立したブロックとみなし、石積み構造と同様に処理して地山の安定を論ずることを考えている。ブロック化効果は、この面への応用を期待して提唱した名称でも

ある。また、地山の塑性流動がロックボルト工などによる掘削面の拘束力で抑止されると考えるならば、トンネル周辺の応力の算定は別途行うとしても、地山の安定を論ずる尺度として少なくともブロック化効果に関する既述の成果を利用する途はあると思う。トンネル全体の安定に関する問題は、ここに取扱う範囲を逸脱するために検討を省略する。しかし、改めて論じられなければならない重要な課題である。

7. おわりに

ロックボルトの作用効果に対する認識の現状を展望し、補強効果に対する在来の認識が抽象的にとどまってトンネルの支保工理論への適用があいまいであるため、これを具体的概念として把握する必要があることを指摘するとともに独自の立場からブロック化効果を定義し、補強効果に代わる具体的概念として用いるよう提案した。これによって塑性地山におけるロックボルトの挙動を解明する基礎は固まったと考えている。ブロック化効果とはロックボルトの自己つり合い作用によってトンネルの掘削面を拘束する応力を地山に還元し、ロックボルトを中心としてその回りの地山が一体的に挙動する力学的現象に与えた呼称である。そして、この認識の妥当性を検証するため、塑性地山の例として砂を用いた落し戸の実験を行い、許容できる解釈であることを実証的に明らかにすることができた。落し戸の実験は、トンネルに作用する土圧の研究に古くから利用され、その成果が各方面で生かされていることは衆知のとおりであるが、ロックボルトの作用効果の説明に奇しくも同じ実験手法が利用できたことはかつ目に値すると思われる。なお、砂を破碎した地山の極限として位置づけるならば、ブロック化効果の適用範囲を塑性地山から一般の地山にまで拡大することも可能であろう。

実施した落し戸の実験は数少なく、ごく限られた範囲のものにとどまっている。しかし、実験はブロック化効果の説明を意図して行ったにすぎないから、実験例の規模によって現象の把握が支障を受けることはないと考えられる。なお、落し戸の実験はここに利用した例にとどまらず、ロックボルトの種々の挙動を究明する手段として応用できる可能性をもっている。これを機会に活用されるよう望みたい。

ロックボルト工によるトンネルの支保理論の構成に当たっては2つの条件が満たされなければならない。1つはロックボルト工によってトンネル周辺の地山が保護され、局部的な崩落がないことである。他の1つはトンネルが究極的に安定しなければならないことである。第1の条件は、ブロック化効果のもつ基本的役割としてロッ

クボルトが個々に抜け落ちることなく、群として挙動することで満たすことができる。しかし、第2の条件は、トンネルの安定問題として改めて考究すべき問題である。筆者は、ブロック化効果の応用としてロックボルトを打ち込んだトンネル周辺を石積み構造と同様にみなし、多ヒンジ構造としてこの種の問題を処理するように考え、多数のボルトを配設したトンネル形状の落し戸の実験を計画し、目下研究中である。ここに付言して今後の課題としたい。

終りにこの研究を通じてロックボルトの作用効果に対する認識が深まり、トンネルの支保理論をはじめ斜面安定への適用など応用面への開発が進むよう願っている。

また、この研究に際して実験は本学大学院修士課程学生 露木延夫（現日産基礎工業KK社員）、学部学生 筒井弘之（現真柄建設KK社員）の両君に負うものである。さらに研究全般にわたっては日本道路公団の関係者ならびに日本トンネル技術協会の協力をいただいた。ここに記して謝辞とする。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会 N.A.T.M 文献調査特別委員会：温泉余土地帯における鉄道トンネルの NATM の適用性に関連する文献資料の調査研究報告書（日本国有鉄道東京第二工務局委託）、社団法人日本トンネル技術協会、昭和51年3月。
この報告書は NATM に関する内外の文献目録と大部分の論文要旨とを収集したものである。文献例のいくつかを参考として示す。
L.v. Rabcewicz : The New Austrian Tunnelling Method, Part I, II, III, Water Power, Nov., Dec., 1964, Jan., 1965.
L.v. Rabcewicz : Stability of tunnels under rock load, Part II, Water Power, July, 1969.
L.v. Rabcewicz and J. Golser : Principles of dimensioning the supporting system for the "New Austrian Tunnelling Method", Water Power, March, 1973.
L.v. Rabcewicz : Theorie und Praxis bei den Untertagearbeiten eines großen Dammbauvorhabens, Rock Mechanics, Suppl. 2, Springer-Verlag, 1973.
岡 行俊：薄肉理論とその応用（1）および（2）、トンネルと地下、第7巻4号、5号、昭和51年4月、5月
岡 行俊・菅原勝彦：新しい覆工の設計方法、土木学会編、地下構造物の設計と施工、土木学会、昭和51年9月。
岡 行俊：NATM の理論—NATM の作用効果に関する新しい機構説明と設計法—、NATM 施工技術講習会テキスト、社団法人日本トンネル技術協会、昭和52年7月。
- 2) 高速道路調査会トンネル施工分科会ロックボルト研究班、ロックボルト工設計指針（日本道路公団委託）、財団法人高速道路調査会、昭和48年8月。
この設計指針は内外の文献を整理し、ロックボルト工の技術指針としてまとめたものである。参考として巻末の文献目録からロックボルトの作用効果に関する従来の考え方にふれた文献例のいくつかを示す。
T.A. Lang : Theory and Practice of Rock Bolting, Trans. SME-AIME, No. 220, 1961.

- L.A. Panek : Design for bolting stratified roof. Trans. SME No. 229-2, 1964.
- N.M. Raju and B. Singh : Roof bolting investigations in Indian mines, Jour. Mines Metals and Fuels, No. 15-5, March, 1968.
- 3) 山本 稔：ロックボルト工の作用効果とその応用，「ロックアンカー・ロックボルト工法の施工技術」講演集，日本プロジェクト・リサーチ，昭和49年。
 - 4) 小野諒兄・真井耕象：乾燥砂層における垂直土圧，土木学会誌，第24巻第5号，昭和13年5月。
 - 5) 村山朔郎：砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧，京都大学防災研究所年報第11号B，昭和43年3月。
 - 6) 村山朔郎・松岡 元：粒状土地盤の局部沈下現象について，土木学会論文報告集，第172号，昭和44年12月。
 - 7) K. Terzaghi : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, 1943, または上記文献 5) 参照

(1977.5.23・受付)
