

## 2枚落し戸の実験からみたロックボルトの挙動

### BEHAVIOR OF ROCKBOLTS FOUND IN THE EXPERIMENTS OF TWO LOWERING PANELS

山本 稔\*・大野一昭\*\*

By Minoru YAMAMOTO and Kazuaki OHNO

Although the rockbolts are used very often as a main member of supports in NATM, the fact is that there are various understanding of the effects of rockbolts and that there has been no specified way of design. It is because the effects of rockbolts have been recognized mainly through experiences and also because there is no good way of investigation of them.

This study of rockbolts by two lowering panels is a method of examining more positively the mechanical properties of rockbolts presented by our authors, following the previous study by one lowering panel. This series of the experiments by two lowering panels were made to examine the mechanical properties of a group of rockbolts while the experiments by one lowering panel were made to examine the effects of a rockbolt.

This report describes the behavior of rockbolts found through the experiments of two lowering panels including theoretical consideration. And it also describes our view of design of rockbolts.

#### 1. はじめに

トンネルの支保構造として利用されるロックボルトの力学的役割については、NATMの発展過程<sup>1)~3)</sup>が示すように、ロックボルトの経験的使用が理論的研究に先行した関係からいろいろな見解<sup>4)</sup>があり、その力学的性質に対する理解が地山によってまちまちであるのが実状である。これはロックボルトが地山と相関して複雑な挙動を呈するために統一の見解を示しにくいことにもよるが、またロックボルトの本質に関する実証的研究が難しく、的確な検証手法が欠如していることにも原因があると思われる。

1枚の落し戸に1列のボルトを取り付けて行った実証的研究<sup>5)</sup>が塑性地山に対するロックボルトの力学的性質を究明する有力な手段として利用できることは、すでに指摘したとおりである。この研究を通じてロックボルトの作用効果は、自己つり合い作用に基づく地山の一体化効果として説明することができた。この作用効果によれば、ロックボルトはトンネル周辺の地山を一体的に保ち

ながら地山とともに変位し、地山の応力再配分と地山が本来有する支持力とによってトンネルを自動的に安定化の方向に導くこと、また、内的につり合いながら地山を支持できるために変形能の大きい支保工を形成できるなど、トンネルにおけるロックボルトの基本的挙動を容易に説明することができる。しかし、この研究ではロックボルト群によるトンネルの支保機構の解釈が抽象的にとどまるため、そこにおいてロックボルトが受け持つ力学的役割を具体的に把握しようとするれば、改めて実証的研究が必要である。

トンネルの支保工をロックボルトによって形成するには2つの条件が満たされなければならない。その1つは、トンネルの掘削面に打設した個々のロックボルトがそれぞれ独立に地山を一体化する条件であり、他の1つは、ロックボルトを打設した地山が全体として安定する条件である。1枚の落し戸による既報の研究<sup>5)</sup>は第1の条件を究明する手段として有効であったが、第2の条件の検討にはロックボルトが群としてトンネルの周辺地山を安定化するメカニズムの究明が必要である。6枚の落し戸板を用いたアーチ型トンネルの模型実験<sup>6),7)</sup>はこの立場から実施したものであり、砂のような塑性地山に掘削する土被りの浅いトンネルを対象に考究している。しかしながら、このような実トンネルをじかに模した模型実験

\* 正会員 工博 東京都立大学教授 工学部土木工学科  
(〒158 世田谷区深沢2-1-1)

\*\* 正会員 佐藤工業(株)中央技術研究所土木研究部  
(〒243-02 厚木市三田47-3)

では現象が複雑にすぎない限りがあり、ロックボルト群が受け持つ役割を本質的に究明するには実験条件を単純化する方が有利である。

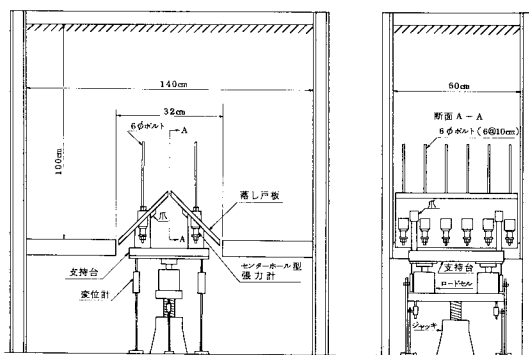
2枚落し戸の模型実験<sup>(註1)</sup>は、それぞれ1列のボルトをもつ2枚の落し戸板を並列して行う実験で、トンネルの天盤を横断面2本のロックボルトで支保する場合に対応する。2本は群の最小単位である。したがって、2枚落し戸の実験は群として挙動するロックボルトの力学的性質を調査する最も単純なモデルである。これが研究対象としてこの実験を取り上げた理由である。次に実験と結果概要について述べるが、モデルの性質上ここには研究の主眼をロックボルト群による支保機構の探究に置くことにする。また、この研究成果を普遍する試みとしてさらに実トンネルにおけるロックボルトの挙動についても推論し、参考に供することにする。

## 2. 実験装置および実験計画

### (1) 装置と基本概念

実験槽は内のり寸法140×110×60 cmの鋼製砂箱で、その床底面には奥行全長にわたって32×60 cmの矩形の穴があいている。この穴には等大2枚の落し戸板が自由に降下できるように挿入される。砂箱の床底面には厚めの合板を張り、落し戸の降下変位に伴ってすき間から砂が漏れるのを防ぎやすくし、また正面には一部に厚板ガラスをはめ込み、砂と落し戸の移動が観察できるようにしてある。

落し戸板は厚さ約10 mmのアクリル樹脂板製で、その長手方向の中心線には6本のボルトがピッチ10 cmで取り付けられている。実験にあたって2枚落し戸のス



図一 実験装置

注1) 下記に一部報告されている。

山本 稔・大野一昭・山田 稔：ロックボルトの基礎実験—2枚落し戸の実験，土木学会第35回年次学術講演会，Ⅲ-265，昭和55年9月。

山本 稔・大野一昭・山田 稔：2枚落し戸によるロックボルトの実験，土木学会第36回年次学術講演会，Ⅲ-226，昭和56年10月。

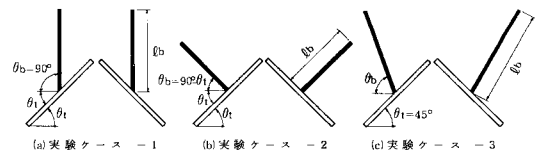
パンは砂箱の穴幅に合わせて一定としたから、落し戸板は傾角によって幅が異なったものになっている。

ボルトは全面接着式ロックボルトに似せるために全長にわたってウィットウォースねじを切ったφ6の鋼棒である。ボルトは図一のように特製のセンターホール型張力計と半球面ワッシャを介し、ナットで両側からゆるく締めて落し戸板に取り付ける。ボルトと落し戸板の間には遊びがあり、ボルトは落し戸板に対してヒンジ結合に近いと考えられる。

地山材料は乾燥した水道用汚過砂で、砂の粒径は1~2 mm、均等係数は1.47である。また、実験過程で数度のサンプリングを行い、砂の単位容積質量と内部摩擦角を測ったが、その結果はそれぞれ $\gamma_d=1.6\sim 1.8\text{ g/cm}^3$ 、 $\phi=40\sim 45^\circ$ である。なお、内部摩擦角は一面せん断試験による値である。

落し戸板は支持台に載せて砂箱に据え付ける。支持台の鉛直反力は2台のロードセルによって、落し戸の降下変位は支持台に取り付けた変位計によって図一のように計測する。なお、落し戸板には爪が付けてあり、落し戸板の位置を規制するのに利用する。

上述のように実験装置を構成すれば、落し戸板はそれ自体で地山を支持できず、ボルトと協力して初めて地山の支保機構が形成されることになる。2枚落し戸の実験は、このような見地からボルト群による地山の支保機構を追求する実証的手段として計画したものであるが、この種の実験に関する報告はいまだ見当たらない。これは



図二 実験ケース

表一 実験条件

(a) 実験ケース - 1										(c) 実験ケース - 3				
$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$
0	16	20	24	28	32	36	40	46	16	24	28	32		
0	2C	2C	2C	2C	2C	2C	2C	2Sc	2Sc	0	1C	2S	2S	2S
15	2C	2C	2C	2C	2C	2C	2Sc	2Sc	15	1C	2S	2S	2S	
30	2C	2C	2C	2C	2Sc	2Sc	2Sc		30	1C	2S	3S	2S	
45	2C	2C	2C	2Sc	2Sc	2Sc			45	—	—	—	—	
60	2C	2C	2C	2Sc	2Sc	2Sc			60	1C	2S	3S	2S	
									75	1C	2S	2S	2S	
									90	—	—	—	—	

(b) 実験ケース - 2									
$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$	$\frac{b}{D}$
0	16	20	24	28	32	36	40	46	
0	—	—	—	—	—	—	—	—	
15	—	2C	2C	2C	2C	2Sc	3Sc	2Sc	2Sc
30	—	2C	2C	2C	2Sc	3Sc	2Sc		
45	—	2C	2C	2Sc	3Sc	2Sc			

注：表中において

数字；同じ実験の実施回数

C；落し戸が崩落した実験

S；落し戸が自立した実験

S<sub>c</sub>；落し戸の自立が繰り返

された実験

既報<sup>5)</sup>と同様に研究の目的が明確でない限り模型実験に意義が認められないことによると思われる。

## (2) 実験条件

実験は落し戸板の傾角  $\theta_0$ 、ボルトの長さ  $l_b$  およびボルトの設置方向角  $\theta_b$  をパラメータとし、図-2に示す3種の実験ケースと  $l_b$  とを組み合わせた表-1の実験条件について実施する。表中の数字は同一実験の繰返し回数である。

実験条件はすべて落し戸の支間中央に対して対称であるから、力のつり合いは鉛直方向の成分についてだけ考えればよい。実験ケース-1はボルトを鉛直方向に設置する場合であり、ボルトの軸力が力のつり合いに占める役割を考察するのに有利である。実験にあたってはこの点に着目し、ケース-1を主体として行う。実験ケース-2はボルトを落し戸板に直交して設置する場合であり、通常使用するロックボルトの打設方向に合わせたものであるが、ケース-1と対比して  $\theta_b$  の影響を調べるのに用いる。実験ケース-3は  $\theta_0=45^\circ$  に固定した場合で、ケース-2を補足して  $\theta_b$  の影響を詳細に検討するのに用いるが、さらにケース-2とともにその実験結果がケース-1に対する力学的解釈に従って説明できる可能性を追求するのに利用する。なお、実験計画にあたってケース-1に主眼を置くことにしたのは、ボルトのせん断力を直接計測する適当な手段がないし、また土圧を計測して推測するには精度に問題があるため、ケース-2と-3が現象の基本的調査に適さないと判断したことによっている。

## 3. 実験概要

### (1) 実験手順

図-1を参考にし、落し戸板の設置から実験終了までの手順を説明する。

a) ボルトを取り付けた落し戸板を支持台に載せ、さらにロードセルを付けたジャッキの上にこれを置く。落し戸板の位置が砂箱の穴に合うようにし、落し戸が自由に上下できることを確かめた後、落し戸板を仮止めて動かさないようにする。

b) 落し戸板と穴とのすき間から砂が漏れないように薄手の軟らかい不織布で目張りする。不織布は落し戸の降下変位によって引張られないように余裕をとっておく。また落し戸板の突き合せ面については、ケース-1の場合すき間は適宜でよいが、ケース-2と-3の場合には1mm以上のすき間を残して互いにせり持たないようにする。この突き合せ面にはいずれのケースにおいても砂がかみ込まないようにカバーを掛ける。

c) 砂は  $\gamma_d=1.7\text{ g/cm}^3$  を目標に約1mの落下高さで少量ずつ自然落下させ、深さ1mまで層状に詰める。

d) 砂詰めを完了した後、ボルトを止めている落し

戸板下側のナットをゆるめて張力計の応力を解放する。張力計の0点を設定して再びナットをゆるく締めてボルトを固定する。

砂詰めによって支持台はわずかであるが沈下するから、その上に載っている落し戸も移動してボルトには張力が発生する。上の操作はこの張力を解放するものである。一方、この操作によって支持台の反力はふえるが、この状態の支持台反力が計測の初期値で、このとき落し戸の降下変位は0とする。

落し戸に作用する土圧の合力は鉛直方向の成分をもつにすぎないから、ボルトに応力が発生しない限り、支持台反力は合土圧につり合う。ボルトに張力が発生すれば、その合力の鉛直成分を合土圧から差し引いたものが支持台反力につり合うことになる。なお、支持台反力の計測には落し戸板の自重は除去されているが、ボルト張力の計測値には自動的にその影響が入ることに注意する必要がある。

e) 落し戸の降下変位は支持台の平均変位で測る。落し戸板はボルトの配置線のまわりに回転変位を許容しながら降下すると考えられるから、計測される変位はボルト位置における落し戸の降下変位に相当すると判断される。なお、ボルトを設置しない場合には落し戸板には回転変位が生じないが、計測変位の解釈は同様である。

f) 落し戸の降下変位、支持台反力およびボルト張力の計測は、d) で設定した初期値から始め、落し戸の降下変位約0.2mmの増加を目安として計測する。そして、落し戸が自立するかまたは降下変位が5mm程度になるまで計測を継続する。落し戸の降下速度は1mm/minを標準とし、計測にあたっては一時的に降下を停止する。

g) 落し戸の自立は支持台反力が0になることによって知ることができる。落し戸が自立した後、逆にジャッキをせり上げて落し戸板を再び支持台で支持する。そして、所定の計測を行いながらナットをゆるめ、たとえば図-5のように大部分のボルト張力を解放する。以後の実験操作は、f)と同様である。再び落し戸が自立すれば、続いて同じ操作を繰り返す。このような操作は、自立機構の究明をはじめ実験の信頼性を検証するのに役立つ。ただし、ケース-3については繰り返しの操作は行わない。

### (2) 実験経過

実験は上述の手順に従って実施した。実験にあたっては現象の再現性を調べる意から同一実験を少なくとも2回行った。そして、計測した支持台反力またはボルト張力の極値について相対誤差を調べ、その差異が15%を超える場合にはさらに同じ実験をもう1回追加した。実験にあたって設けたこの管理規準は、ボルトに付けた張力計の計測誤差を考慮して仮に定めたものである。張力

計の計測誤差にはボルト軸力の偏心による影響が大きいと思われる。表-1において実験回数を示す数字に続く記号のうちCは落し戸が崩落、Sは落し戸が自立したことを表わしている。また記号SにはさらにサフィックスCを付けたものがあるが、これは先の実験手順g)による繰り返し操作を意味している。

既述したボルトの張力は端部を除いた8本について計測するのを標準としたが、これは単に計測機器の都合による処置にすぎない。このため、ボルトの全張力は8本の計測値の合計を1.5倍して求めた。これに対して一部の試験では検証のために12本の全ボルトについて張力を計測し、両者を比較したが、その差異は数パーセントに収まっていた。壁面効果の影響は、落し戸幅32cmに対して奥行を60cmにすることにより相対的に軽減できたと思われる。

ガラス窓からの観察によれば、落し戸周辺の砂の移動は全実験で同様であり、鉛直方向に近い。ケース-1の実験についてはボルトの方向が鉛直のため、落し戸の鉛直方向に対する力のつり合いに問題がなく、特に説明することはない。ケース-2と-3の実験においてボルトが鉛直方向から傾く場合には、砂はボルトに斜交して移動することになるから、ボルトには曲げが発生すると思われる。この結果、落し戸の鉛直方向の力のつり合いに水平土圧とボルトのせん断力が影響することになる。先にケース-1の実験に主体を置くことにしたのはこのためである。なお、ここに落し戸の力のつり合いにボルトのせん断力が顕著に影響する例としてケース-3における $\theta_b=0$ の実験を挙げる事ができる。この場合 $l_b \geq 24$ cmにおいて落し戸は表-1のように自立する。しかし、同じ実験条件でボルトの代わりにアンカーヘッド付きの針金を用いた別の補足実験では、落し戸は自立していない。これは明らかにボルトのせん断抵抗が落し戸の自立に関与することを示している。

#### 4. 実験結果

図-3~9は実験結果の例である。他の実験についても結果はこれらと同様な傾向である。既述のように、支持台反力には計測開始にあたって多少不明確なところが残っている。図において支持台反力を降下変位初期において省略してあるのは、この点を考慮したものである。ボルトの有無にかかわらず、2枚落し戸の反力は、落し戸板に作用する合土圧に落し戸板の自重を加えたものと与えられるとする。ボルトがない2枚落し戸の実験では支持台反力が合土圧に相当し、初期地山応力として全土被りの土圧からゆるみ土圧に至る応力再配分過程の合土圧が、これによって表示される。いま、2枚落し戸の実験においてこの合土圧がボルトの存在に影響を受けない

とすれば、ボルトがない2枚落し戸の実験における落し戸の反力は、ボルトによって支持されなければならない。図-3はこの意図に基づいて示したものであり、図-4~9に併記して後の理論的考察に利用する。

図-3で特に $\theta_b=0$ の場合は既報<sup>8),9)</sup>と研究対象が同じである。いま村山教授の研究を用いて落し戸の合土圧を求めれば、 $\gamma_a=1.6$ g/cm<sup>3</sup>、 $\phi=44^\circ$ に対して36.8kgである。実験結果は降下変位が1mmの位置で30.2kgであり、理論値に比してやや小さい。しかし、土圧の発生機構は本質的に同じであるから、比較は実験結果の信頼性に対する判断資料として役立つと思われる。

次には2枚落し戸にボルトを付けた場合について実験結果から直接考察できる挙動について説明する。

##### (1) 実験結果全般について

表-1から明らかなように、どの実験ケースにおいてもボルトが長くなると落し戸は自立できるようになる。図-4, 6, 8は崩落した場合、図-5, 7, 9は自立した場合の例であるが、両者の違いは支持台反力によって明白である。自立する場合に行った繰り返し操作においては一度自立すると何回も自立できること、また、自立時のボルト張力はほぼ同じ大きさになっていることがわかる。これは落し戸の自立条件が降下変位の大きさによって極端に変わらないことを示すとともに実験の信頼性を裏付けるものである。

後で詳細に論ずるが、図-4と5の場合には支持台反力とボルトの張力の和が落し戸の反力につり合うことは、落し戸板とボルトの配置から明らかである。ここに落し戸の反力は落し戸板に作用する合土圧に落し戸板の自重を加えたものである。いま落し戸の反力がボルトの有無にかかわらず図-3で与えられるとすれば、これから逆に支持台反力を差し引いてボルトの張力を推定する

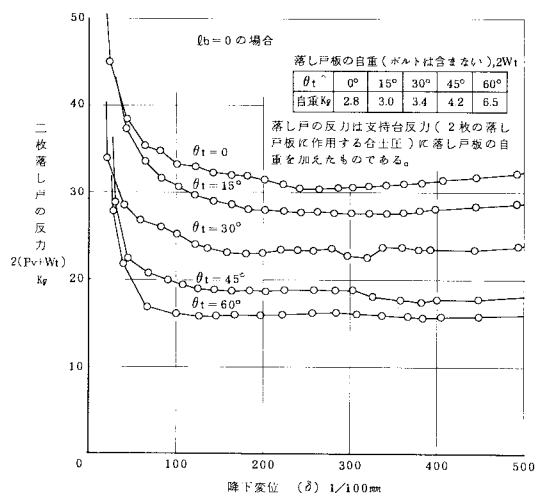


図-3 ボルトのない2枚落し戸の反力と降下変位

ことができる。図中の黒丸はこうにして求めたボルトの張力である。ただし、図-5では簡単のために落し戸の自立時 ( $T_1, T_2, \dots$ ) と繰り返し操作の始点 ( $T'_1, T'_2, \dots$ ) に対応するボルトの張力 ( $S_1, S_2, \dots; S'_1, S'_2, \dots$ ) についてだけ黒丸を示すにとどめている。図はこの処理が妥当なことを示しており、結果として次のように考えられる。

- a) 落し戸板に作用する土圧は、ボルトの存在に影響を受けないか、また受けるにしても事実上無視してよい。
- b) ボルトには使用条件に応じて相応な張力が発生する。ボルトが短く落し戸が自立できない場合、ボルトにはその引抜き抵抗力<sup>2)</sup>に相当する応力が発生する。

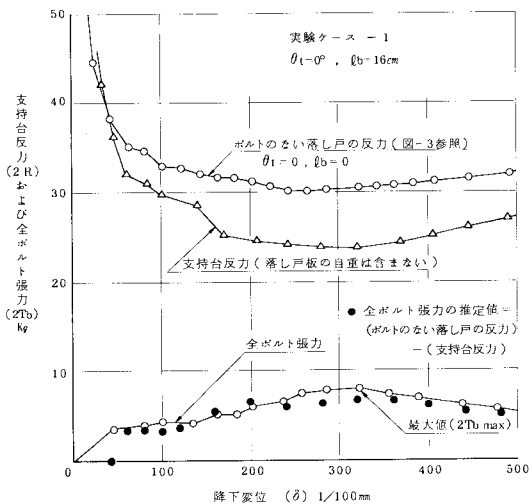


図-4 実験ケース-1の計測結果例, その1

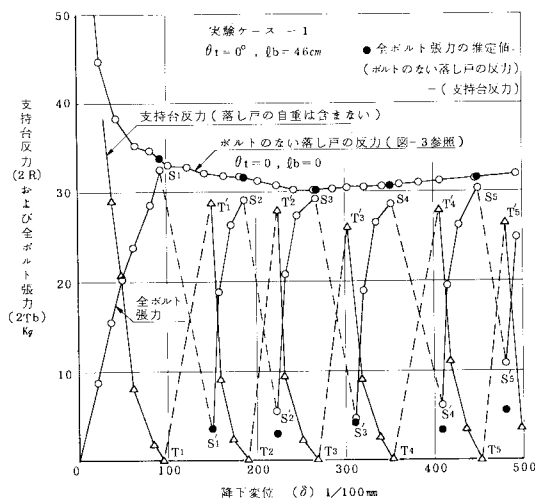


図-5 実験ケース-1の計測結果例, その2

ボルトが長くなって落し戸が自立する場合、ボルトには落し戸板に作用する土圧につり合う応力が発生する。このとき、落し戸の降下変位は地山とボルトの条件に支配される。

この考え方は5. 理論的考察において論理を展開する根拠になっている。図-6-9の黒丸は、この普遍した論理によるボルト張力の推定値である。ここでも考え方の妥当性は明らかである。なお、ここに例示した以外の実験においても結果は同様である。

上の a) と b) の記述は、ボルトの自己のつり合い作用による地山の一体化効果として1枚落し戸の実験<sup>2)</sup>からすでに説明したものであり、落し戸板が2枚またはそれ以上になってボルトが群として挙動する場合にも同じ作用効果の枠内にあることを示している。この事実、

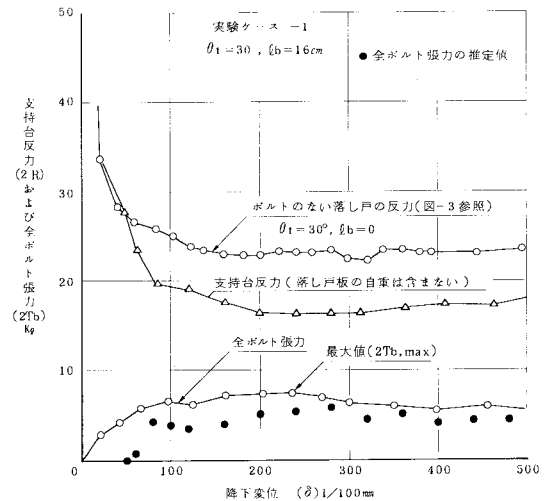


図-6 実験ケース-1の計測結果例, その3

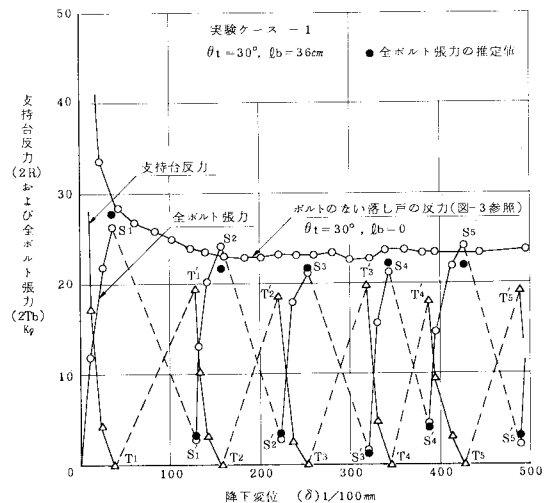


図-7 実験ケース-1の計測結果例, その4

注2) 落し戸とともに剛的に動く地山部分には、引抜き抵抗力が発生しないことに注意する必要がある。

ロックボルトの作用効果の本質を追求するにあたって重要であると考えられる。

(2) ボルトの張力について

2枚落し戸の降下変位に応じて落し戸上方の砂にゆるみが発達するが、このとき移動する砂の主方向は、実験条件にかかわらず鉛直方向に近い。したがって、実験ケース-1におけるボルトの張力発生機構は、落し戸とともに剛体的に変位する地山部分の形状が落し戸板の斜角  $\theta_t$  に関係なく同じようになっている地山に対するボルトの引抜き抵抗力として、張力が発現するものと考えられる。図-10は、この観点から落し戸が崩落する実験についてまとめた全ボルト張力の最大値とボルト長さの関係である。実験結果が図示のように1つの曲線に回帰できることは、上述の推測が妥当であることを裏付けている。

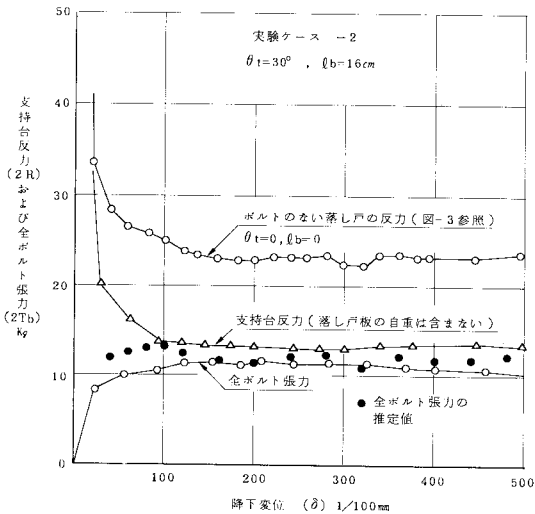


図-8 実験ケース-2の計測結果例, その1

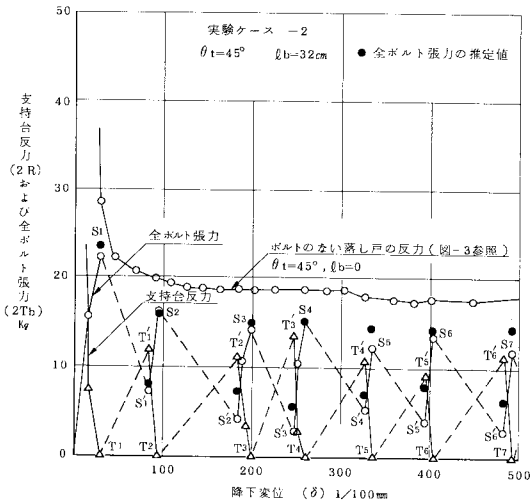


図-9 実験ケース-2の計測結果例, その2

これはまた実験ケース-1に対するボルトの引抜き抵抗力が図-10から推定できることを意味する。先に(1), b)の前半で述べた推論に上の結果が考慮されていることはいうまでもない。

実験ケース-2におけるボルト張力は、たとえば図-6と8からわかるように、ボルト長さが同じであっても実験ケース-1に比して大きくなっている。そして、この傾向は  $\theta_t$  が大きくなるほど顕著である。これは、実験ケース-2の場合には砂の移動方向がボルトと交差するようになるため、 $\theta_t$  が大きくなるほどボルトはゆるみの少ないところに定着される傾向が強まり、引抜き抵抗力が大きくなった結果であると考えられる。図-10に実験ケース-2と-3の資料を除外したのはこのためである。ただし、落し戸板に作用する土圧が実験ケース-2と-3においてもボルトの存在に影響されないことは、(1)で述べたとおりであることに注意する必要がある。相違は、ボルトの地山拘束力の差による降下変位の性状に現われるにすぎない。

(3) ボルトの設置方向について

既述のように、落し戸板に作用する土圧はボルトの存在に影響されないから、土圧の大きさと作用方向とは落し戸によって定まっていると考えることができる。このような条件のもとでは、ボルトが土圧の作用方向に対してある角度内に設置されていれば、土圧とのつり合い関

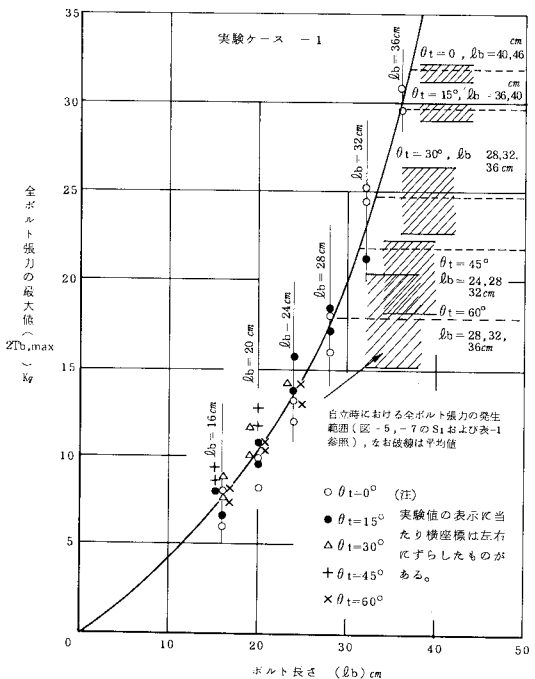


図-10 実験ケース-1における全ボルト張力の最大値とボルト長さとの関係

係から定まるボルト張力には大きな差異がでないことを予測することができる。この推測の妥当性は、次の5. 理論的考察において明確にされるが、このことからボルトの有効な設置方向をボルト張力から判断することは難しいと思われる。

実験ケース-3はボルトの効果的設置方向についての調査を意図したものであり、図-11は、実験結果として参考までに示した落し戸の降下変位とボルトの設置方向との関係である。図によれば $\theta_b=45^\circ$ 、すなわち落し戸板に直交してボルトを設置した場合が変位の拘束性にやや優れている。これに対してボルト張力には、図-13からわかるように明確な傾向は認められず、上述の推測を裏付ける結果になっている。このような観点から、ボルトの有効な設置方向をボルト張力の実験結果によって指摘することは難しい。あえて判断すれば、ボルトの設置方向には許容度が大きいといえる。なお、一般的見解としてボルトを引張り材として使用する限り、ボルトは地山のひずみまたは応力の主方向に向けて設置する方が、ボルトにせん断力成分を排除できる点、またこの方向でゆるみ域の幅が狭いと考えられる点などから合理的であると思われる。

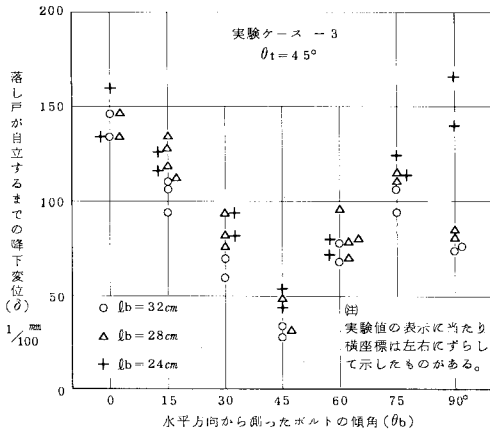


図-11 落し戸が自立するまでの降下変位とボルトの設置方向との関係

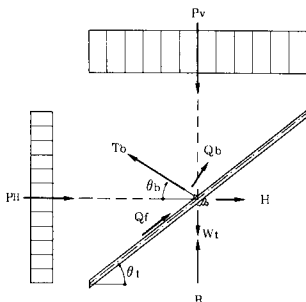


図-12 落し戸板に作用する力のつり合い

### 5. 理論的考察

対称性から片側の落し戸板だけを取り上げ、作用する諸力を示せば図-12のとおりである。この落し戸板に働く合土圧の鉛直成分 $P_v$ と水平成分 $P_H$ 、落し戸板の自重 $W_t$ および落し戸板と地山の間に働く摩擦力 $Q_f$ に対し、全ボルト張力 $T_b$ とせん断力 $Q_b$ 、支持台の鉛直反力 $R$ と水平反力 $H$ とがつり合う。ボルトは落し戸板の中央線上に配置されているし、また落し戸板に対してヒンジのように結合されているから、 $P_v$ と $P_H$ の作用線は、土圧の分布形状にかかわらず、落し戸板の中央を通るし、 $R$ 、 $H$ 、 $W_t$ および $Q_f$ も実験装置の構造から落し戸板の中央を通して作用する。方向力のつり合いを落し戸板に直交する方向とこれに沿う方向について作れば

$$\left. \begin{aligned} (P_v + W_t)\cos\theta_t + P_H\sin\theta_t &= T_b\sin(\theta_t + \theta_b) \\ &+ Q_b\cos(\theta_t + \theta_b) + R\cos\theta_t - H\sin\theta_t \\ (P_v + W_t)\sin\theta_t - P_H\cos\theta_t &= -T_b\cos(\theta_t + \theta_b) \\ &+ Q_b\sin(\theta_t + \theta_b) + R\sin\theta_t + H\cos\theta_t + Q_f \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

$Q_f$ については $\mu$ を摩擦係数として  
 $Q_f = \mu(P_v\cos\theta_t + P_H\sin\theta_t)$   
 式(1)を $T_b$ 、 $Q_b$ について解けば  
 $T_b = (P_v + W_t - R)\sin\theta_b + (P_H + H)\cos\theta_b$   
 $+ Q_f\cos(\theta_t + \theta_b)$   
 $Q_b = (P_v + W_t - R)\cos\theta_b - (P_H + H)\sin\theta_b$   
 $- Q_f\sin(\theta_t + \theta_b)$  } ..... (2)

式(2)を図-4と5の場合に当てはめれば、 $\theta_t=0^\circ$ 、 $\theta_b=90^\circ$ として次の関係式が得られる。

$$2T_b = 2(P_v + W_t) - 2R \dots \dots \dots (3)$$

図中の黒丸はこの式によって求めたものであるが、そのとき $2(P_v + W_t)$ として実験条件が異なる図-3の結果が利用できたことは、ボルトの挙動を究明するにあたってきわめて重要である。

この実証の結果を拡張解釈し、 $\theta_t$ と $\theta_b$ が任意に与えられる場合にも、ボルトの存在が土圧の発生機構に影響しないとして式(2)の適用を試みる。計算にあたって水平土圧 $P_H$ は不明のため、目安として主動土圧係数 $K_a=0.180$ を用いて $P_H=0.180 P_v$ とする。また摩擦係数は $\mu=0.15$ である。さらに落し戸が崩落する図-6と8では簡単のために水平反力 $H=0$ 、落し戸が自立する図-7と9においてS点では $R=H=0$ は自明であるが、S'点では図-6と8に準じて $H=0$ とする。図-6~9の黒丸は、このような条件で計算した結果であるが、図-4と5の黒丸と同様に全体として実験値をよく説明することができる。

現象に対する解釈の信頼性をさらに追求するため、実験ケース-3において落し戸が自立した実験のボルト張力を計算値と比較したものが図-13である。既述のよ

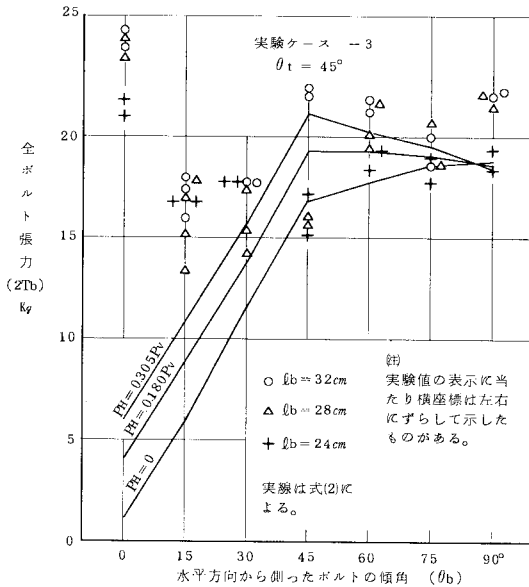


図-13 全ボルト張力とボルトの設置方向との関係

うに、ボルト張力の実験値には設置方向に対して明らかな傾向がなく、 $\theta_b$ が小さくなるにつれてやや減少するようにみえるにすぎない。これに対して計算値も同様な大きさと傾向とを示している。ただし、 $\theta_b < 30^\circ$ で計算値は実験値から急激に遠ざかるが、これはボルトの設置方向の関係からボルトに発生する張力が $P_H$ に影響し、この領域で $P_H$ が急増する可能性があるにもかかわらず、それが計算に反映されていないためであると考えられる。さらに $\theta_b = 0$ の場合には、鉛直方向の力のつり合いはボルトのせん断力に依存しなければならない。実験に用いたボルトは合土圧に対してせん断強度が極端に大きく、そのつり合いの結果として落し戸が自立できたと思われる。ボルトを引張材として利用する実情からみれば、 $\theta_b$ が小さい場合はむしろ例外として取り扱うべきであろう。なお、ここに計算値を正しく評価するには水平土圧 $P_H$ の実測値が必要である。しかし、 $P_H$ の計測は断念したため、図には主働土圧 $P_H = 0.180 P_V$ のほかに $P_H = 0$ と $P_H = (1 - \sin \phi) P_V = 0.305 P_V$ の場合の計算値も参考として示してある。

## 6. 実験結果からみた実トンネルにおけるロックボルトの挙動について

模型実験の結果から特に砂のような塑性地山の実トンネルを対象に若干の考察を試みる。しかし、本質が同じである限り、他の地山条件に対しても拡張解釈することは容易であると思う。

### (1) ロックボルトが受け持つ支保工としての役割について

ボルトが支持する荷重は地山から作用するゆるみ土圧であるという実験結果に着目すれば、荷重支持という点からはロックボルトの役割も鋼アーチ支保工と同じである。ロックボルトが鋼アーチ支保工と本質的に相違するところは、反力を荷重発生源である地山へ直接還元しながら地山を支持するという反力の伝達機構にある。したがって、ロックボルトには明確な支点が存在しないから、ロックボルトは地山を一体的に挙動させるが、地山の變形は拘束できず、地山はそれ自体の力学的性質に従って挙動することになる。これは、著者が先に自己つり合い作用による地山の一体化<sup>3)</sup>としてロックボルトの作用効果を説明した挙動の枠内にあり、地山条件に支配されず常に認められることである。

ロックボルトはその反力を引抜き抵抗力に依存する。したがって、反力は地山との相対変位によるせん断応力としてロックボルトまわりに分布し、集中的に作用することはない。これはロックボルトがもつ支保工としての特徴であり、軟弱な粘性地山を含めた塑性地山の支保工として有用であることを教えるものである。

弾性的に挙動する地山のトンネルにおいては、たとえ地山がブロッキーであっても、ロックボルトはトンネルを安定させるうえで基本的には反力を必要としない。このような場合のロックボルトは地山内の相対変位を拘束し、一体的に挙動させる役割を受け持つことになり、ロックボルトには局部的に応力が発生する。

### (2) ロックボルト工の設計について

実験結果とその考察を踏まえ、ロックボルト工の設計は次の条件によって行うことができる。

- ロックボルトはトンネルの安定化に必要な力がトンネル掘削面を通じて地山に導入できる構造と強度を有すること。
- トンネルの安定化に必要な力は断面形状の同じ素掘りトンネルの安定化に必要な掘削面の力として定めることができること。

この考え方は塑性地山を対象としたものであるが、既述のロックボルトの作用効果に対する見解と同様、地山条件に支配されるところがないから、一般の地山に対しても適用することができる。なお、ロックボルトの設計荷重はb)のように素掘りトンネルの挙動解析によって定まるから、ロックボルト工の設計は簡明になると思われる。

設計手法を具体的に説明する参考として本模型実験に用いたボルトを設計してみよう。2枚落し戸の安定に必要な反力は図-3によって与えられる。これは素掘りトンネルの安定化に必要な掘削面の力<sup>注3)</sup>に相当する。ま

注3) この力を与える図-3は概念的にFenner-Pacher曲線と同じである。



た、図-10は実験ケース-1におけるボルトの引抜き抵抗力<sup>4)</sup>とボルト長さの関係である。例として $\theta_1=0$ 、 $\theta_0=90^\circ$ の場合を取り上げる。図-3から落し戸の安定に必要な反力を $2(P_v+W_b)=35\text{ kg}$ とすれば、5. の式(3)から $R=0$ として全ボルト張力 $2T_b=35\text{ kg}$ が求まる。また、ボルトの所要長さは図-10から $l_b\approx 38\text{ cm}$ と推定される。このボルト長さによって落し戸が自立できることは実験結果から明らかである。一方、ボルトと地山の間に相対変位がないとすれば、落し戸が自立するまでの降下変位は図-3から落し戸の反力 $35\text{ kg}$ に対応する変位として $\delta\approx 0.7\text{ mm}$ である。図-5において $S'_1S'_2$ 、 $S'_2S'_3$ 、…の変位は主としてボルトと地山の相対変位によるものと考えられ、約 $0.4\text{ mm}$ である。図-5においては $l_b=46\text{ cm}$ であるが、 $l_b=38\text{ cm}$ ではボルトと地山の相対変位がこれより大きくなると思われ、地山との相対変位を無視したボルトの設計では信頼性に問題が残る。そこで、自立までの降下変位を $\delta=0.7+0.4=1.1\text{ mm}$ と推定し直せば、図-3から $2(P_v+W_b)\approx 33\text{ kg}$ 、式(3)から $2T_b\approx 33\text{ kg}$ 、図-10から $l_b\approx 38\text{ cm}$ が定まる。したがって、 $\theta_1=0^\circ$ 、 $\theta_0=90^\circ$ の実験条件に対してボルト長さ $l_b=38\text{ cm}$ を用いれば、落し戸は全ボルト張力 $2T_b\approx 33\text{ kg}$ 、降下変位 $\delta\approx 1.1\text{ mm}$ で自立する。これに対応する実験結果として $l_b=40\text{ cm}$ の場合を挙げれば、自立時において $2T_b=31\sim 32\text{ kg}$ 、 $\delta=1.3\sim 1.5\text{ mm}$ である。なお、ここにボルトと地山の相対変位はボルトの引抜き変位相当する。

実トンネルにおけるロックボルトの設計も上述の考え方に準じて行うことができる。素掘りトンネルの解析による掘削面の作用力からロックボルトのピッチと設計強度が求まれば、所要のロックボルトは引抜き試験結果などを参考にして定めることができる。このとき、素掘りトンネルの内空変位に対してロックボルトの引抜き変位が小さければ、変位の推定に後者の影響を無視することができる。

弾性的に挙動する地山のトンネルでは、ロックボルトは地山の一体化をねらって用いられる。この場合、ロックボルトは少なくともゆるみ部分が崩落しないように設計する必要がある。なお、トンネルの内空変位を制御する場合には塑性地山におけると同様に掘削面に作用力を与えなければならない。

### (3) ロックボルトの打設方向その他

ロックボルトの作用効果として地山の一体化に着目すれば、地山間の相対変位を有効に拘束する意から、ロックボルトは引張り材として用いる方が有利である。この考え方によれば、ロックボルトは地山の主ひずみの方向に合わせて設置すればよく、掘削面にほぼ直交して打設

するのが一般的である。しかし、模型実験結果が示すように、打設方向にはある程度の幅が許容されると考えられる。なお、ブロッキーな地山ではロックボルトの張力よりむしろせん断力によって地山の一体化を図らなければならない場合もある。

地山の安定化に必要な掘削面の作用力をロックボルトに導入するため、塑性地山のトンネルにおいては模型実験の落し戸板に相当する被覆材が必要である。吹付けコンクリートやベアリングプレートなどがこの目的に用いられるが、ロックボルトを有効に利用するには両者を結合する方がよい。一方、弾性地山のトンネルで掘削面に作用力を導入する必要がない場合には、原則としてベアリングプレート類が不要になることは明らかである。しかし、ロックボルトの作用効果を確実にするほかブロッキーな地山の保護などのためにベアリングプレートは有用である。

## 7. おわりに

ロックボルトはNATMの主要部材として多用されているにもかかわらず、その作用効果に対する認識がまちまちで、設計の考え方にもまだ見解が定まらない実情にある。これは、ロックボルト工が経験に根ざす技術として発展してきたことによるが、その挙動を解明する実証的研究手段が欠けていることにも原因があると思われる。2枚落し戸の実験は、このような観点からロックボルトが群として挙動する場合のメカニズムを実証的に探究するため実施したものであるが、1枚落し戸による既報の研究と同様、この実験がロックボルトの有力な研究手段として利用できることを示すことができた。

先に行った1枚落し戸の実験は、個々のロックボルトがもつ作用効果を実証的に調べる手段であった。この実験を通じて、ロックボルトの本質的な作用効果は自己つり合い作用による地山の一体化にあることを指摘したのは既報のとおりである。2枚落し戸の実験においては、ロックボルトが個々の挙動から群として挙動する場合を対象にしたが、ここにおいても同じ作用効果に支配される挙動として説明できることが明らかになり、作用効果に対する再認識を含め、群としてのロックボルトの挙動を実証的に究明し、所期の成果をあげることができた。特にこの実験を通じて、地山の挙動がロックボルトの存在に関係なく取り扱い得ることを明らかにできたことには着目すべきであると思う。また実験結果に基づいて実トンネルにおけるロックボルトの設計に対しても見解を述べ、実務への応用を試みることもできた。

わが国におけるNATMの普及はめざましく、すでに主たるトンネル工法として認められるまでになっている。本研究がNATMにおけるロックボルトの挙動を追

注4) 脚注2) 参照

究し、さまざまな見解を整理する手掛りとして、また設計手法のモデル化に対する資料として役立つよう願うものである。

終りにこの研究にあたり、実験は佐藤工業（株）研究所において大野一昭が担当し、実験結果のとりまとめと考察は山本 稔が行った。なお、実験にあたっては元佐藤工業（株）社員 山田 稔氏をはじめ、研究所の関係者に負うところが多い。記して感謝の意を表わす次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) ロックボルト工設計指針（日本道路公団委託），昭和48年8月，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，なお，文献目録参照。
- 2) 海峡連絡鉄道の技術に関する文献資料調査報告書（日本鉄道建設公団青函建設局委託），昭和55年3月，日本トンネル技術協会。
- 3) 連載講座 NATM（1）～（21），トンネルと地下，第12巻1号～第13巻9号，昭和56年1月～昭和57年9月。
- 4) 第1回トンネル技術シンポジウム—NATMにおけるロックボルト工—昭和55年11月，日本トンネル技術協会。
- 5) 山本 稔：ロックボルトの作用効果について，土木学会論文報告集，第277号，昭和53年9月。
- 6) 山本 稔：ロックボルトの作用効果と模型実験，トンネルと地下，第9巻11号，昭和53年11月。
- 7) 山本 稔・大野一昭：ロックボルトの基礎実験，佐藤工業（株）技術研究所報，No.5，昭和53年；山本 稔：ロックボルトに関する一考察，トンネルと地下，第10巻8号，昭和54年8月。
- 8) 村山朔郎：砂層内局部沈下部にかかる垂直土圧，京大防災研究所年報第11号B，昭和43年3月。
- 9) Terzaghi, K. : Theoretical Soil Mechanics, John Wiley & Sons, 1943.

(1985.1.17・受付)