

(20) システムロックボルトの岩盤補強効果に関する基礎的実験

国鉄鉄道技術研究所 土屋 敬
 " 松本 吉雄
 大成建設技術研究所 ○川崎 宏二

1. まえがき

ヨーロッパではロックボルトを主体とする NATM が、鋼製支保工を主とする従来の工法に取って替ううとしてあり、我国でもこの工法が急速に導入されている。NATM の特徴は、単にロックボルトと吹付けコンクリートを用いるという工法的なものではなく、観測を重視した岩盤力学的考察を施工にフィードバックするところにある。ミューラー教授も、NATM は単なる工法でなく、観測原理 *Observing Principle* であるとしている。しかしこの *Observing Principle* の根幹となるべき「なぜロックボルトが大きな地山補強を發揮するか？」が明確にされていない。我々はこの点の解明が必要不可欠であると考え、一連の実験的、解析的研究を実施中である。本報告は、その中の最も基礎的な小型模型実験に関するものである。

2. 実験の方法

2.1 実験概要

地山作成に当り、粘着力 C が卓越する枝料 (A 地山)、逆に内部摩擦角 ϕ が卓越する枝料 (C 地山) 及び中間的な枝料 (B 地山) を見出すために、各々数種類の配合試験を実施した。そのうち、今回は、B 及び C 地山の枝料で作成した模擬地山ブロックを用いて破壊試験を実施した。破壊試験は、図-1 に示すような概念に基いて、試験条件及び供試体寸法を決定した。ブロック破壊試験の他には、枝料試験 (地山、ロックボルト) 及びロックボルトの引抜き試験を行った。

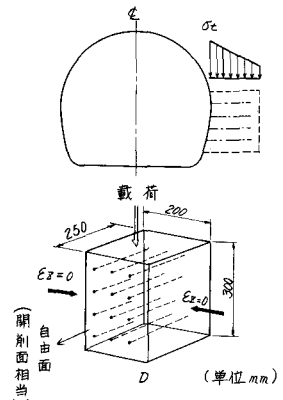


図-1 供試体寸法及び概念図

2.2 使用枝料及びその試験

(1) 地山の配合

A 地山の枝料については、カオリンを主枝料としてセメント、水を添加することによって、 $\phi = 7 \sim 8^\circ$ 、 $C = 6 \text{ kg/cm}^2$ 程度のものが得られた。B 及び C 地山の枝料については、配合を表-1 に示す。三軸試験は、UU 条件、軸方向載荷速度 $= 0.5 \text{ mm/min}$ 、側圧 $= 5, 10, 20, 30, 50 \text{ kg/cm}^2$ の 5 ケースについて実施した。

表-1 模擬地山枝料の配合

B 地 山							C 地 山						
配 合					測定結果		配 合					測定結果	
普通ポルトランドセメント (kg)	フライアッシュ (kg)	細骨材 (乾粉) (kg)	水 (kg)	W/C (%)	フロー (sec)	容 重 (kg/d)	珪 砂 (kg)	普通ポルトランドセメント (kg)	水 (kg)	W/C (%)	フロー (mm)	容 重 (kg/d)	
70	700	900	350	45.5	80	1.966	120	90	90	30	57	190	2.030

(2) ロックボルト及びベアリングプレート

ロックボルトには、 $\phi 3 \text{ mm}$ の真ちゅう総ネジボルト、ベアリングプレートも真ちゅうとし、 $13 \times 13 \times 3$ 又は $25 \times 25 \times 3$ の板の中心に $\phi = 3.2 \text{ mm}$ の孔を有するものを用いた。

2. 3 ロックボルトの引抜き試験

図-2に示す如く、中心付近に付着部分を設けた供試体を用いた。B地山については付着長 $l = 3, 6, 9 \text{ cm}$ で試験を行った。

2. 4 アロック破壊試験

図-1に示した概念に従い、平面歪に近い状態で破壊試験を実施した。この状態は、 $\phi 22 \text{ mm}$ のボルト4本よりなる変位拘束装置によって作り出した。載荷は、インストロン試験機(50 ton)又はオルゼン型100 ton万能試験機によって行い、最大荷重に達するまでは 0.2 mm/min. 、以後は 1 mm/min. の一定変位速度とした。計測を実施したのは、鉛直及び拘束面の水平変位(100 mmダイヤルゲージ)、地山の水平変位(リンク型変位計)、拘束ボルトの軸力(歪ゲージ)であり、一部の供試体については、ロックボルトの水平変位と軸力も計測した。尚、端面拘束を減ずるために、供試体の上下及び拘束を受ける両側面には、テフロンシートを挟んだ。試験を実施した供試体の一覧を表-2に示す。

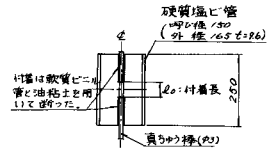


図-2 引抜き試験の供試体

3. 実験結果

3. 1 材料試験及び引抜き試験

(1) 模擬地山

図-4に三軸試験結果を示す。弾性係数は
B地山— 7.400 kg/cm^2 、C地山— 8.700 kg/cm^2

(2) ロックボルト

引張強さ = 272 kg 、弾性係数 = $1.14 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、有効断面積 = 4.92 mm^2 、標点 60 mm の伸び = 5.2%

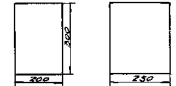
(3) 引抜き試験

B地山の結果を図-5に示すが、引抜き抵抗—付着長が、ほぼ直線で近似される。

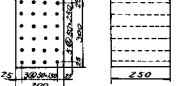
表-2 破壊試験供試体一覧

地山	ロックボルトの径φ(mm)	ベアリングプレート	供試体の記号	備考
B	黒	黒	B-0-0.1	
	黒	黒	B-0-0.2	
	30	黒	B-30-0	
	30	両面1/3	B-30-1	ベアリングプレートは、ボルト径の1/3に相当する寸法で、ボルトの両面に貼付した。
	40	黒	B-40-0	
	40	両面1/3	B-40-1	
	30	黒	B-30-0	
	30	両面1/3	B-30-1	
	黒	黒	C-0-0.1	
	黒	黒	C-0-0.2	
C	30	黒	C-30-0	
	30	両面1/3	C-30-1	
	40	黒	C-40-0	
	40	両面1/3	C-40-1	
	40	両面2/3	C-40-2	ベアリングプレートは、ボルト径の2/3に相当する寸法で、ボルトの両面に貼付した。
	40	両面1/3+1/2	C-40-3	ボルト径の1/3と1/2の寸法で、ボルトの両面に貼付した。
	30	黒	C-30-0	
	30	両面1/3	C-30-1	

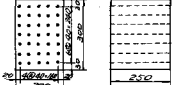
① ロックボルト無し



② ロックボルト有り (50mmピッチ)



③ ロックボルト有り (40mmピッチ)



④ ロックボルト有り (30mmピッチ)

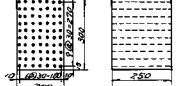


図-3 ロックボルトの配置

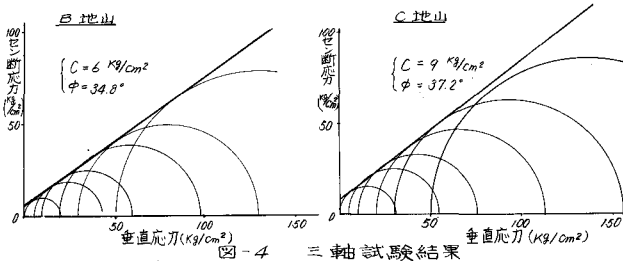


図-4 三軸試験結果

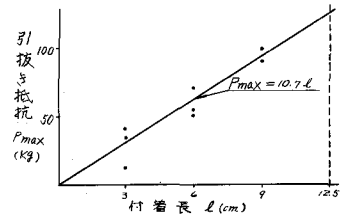


図-5 引抜き試験結果 (B地山)

3. 2 アロック破壊試験

結果の一覧を表-3に、荷重—変位曲線を図-6に示す。載荷中の供試体は、一般的にロックボルトの有無にかかわらず同程度の荷重で降伏し、降伏以後初めて、ロックボルトの本数、ベアリングプレートの有無等によって差異が現われる。ロックボルトの無い場合は、降伏後間もなく破壊に至る。ロックボルト有り、ベアリングプレート無しの場合、地山表面が全体的に押出で、ロックボルトがあたかも潜込むような挙動を

示し、破壊近くなると表面の剥落が甚しくなり破壊に至るが、ロックボルトの破断は見られない。対して、ヘアリングプレート有りの場合は、ヘアリングプレートの部分以外の表面は剥離しながらも荷重は上昇し、最大荷重に達した後、ロックボルトの破断音と共に、0.5mm(ボルト1本の破断)程度の割合で荷重は低下して行ったが、なお大きな残留強度を有していた。

表-3 破壊試験結果一覧

供試体	降伏時			最大荷重時		
	荷重 P_y (ton)	鉛直変位 V_y (mm)	地山の水平変位 U_y (mm)	荷重 P_{max} (ton)	鉛直変位 V_m (mm)	地山の水平変位 U_m (mm)
B-0-0-1	7.49	1.63	0.60	7.49	1.63	0.63
B-0-0-2	7.07	2.41	0.93	7.48	4.56	2.67
B-50-0	7.80	0.92	0.23	13.17	8.35	5.09
B-50-1	7.97	0.30	0.08	27.10	13.33	—
B-40-0	5.96	0.60	0.09	16.54	13.11	7.93
B-40-1	7.25	1.32	0.16	33.92	25.15	—
B-30-0	7.05	1.00	0.10	28.52	28.02	—
B-30-1	7.74	0.74	0.08	68.20	—	—
C-0-0-1	16.05	0.72	0.13	16.63	2.01	1.07
C-0-0-2	17.18	1.09	0.16	17.62	3.05	1.80
C-50-0	16.18	0.82	0.24	26.42	12.82	7.43
C-50-1	16.52	0.85	0.12	37.96	13.15	—
C-40-0	16.37	1.14	0.11	30.93	13.48	4.52
C-40-1	17.60	0.87	0.17	53.80	11.35	—
C-40-2	16.47	0.69	0.07	59.20	18.30	—
C-40-3	(不明確)	—	—	53.33	15.00	—
C-30-0	14.53	0.42	0.09	52.65	—	—
C-30-1	14.93	0.74	0.05	80.00	21.59	—

4. 結果の検討

B及びCシリーズの試験に特徴的な現象を列挙すると、

次の如くである。

- (1) 初期の変形係数は、ロックボルト、ヘアリングプレートの有無等の補強の種類には影響されない。
- (2) 降伏荷重は補強の種類に関係なく、模擬地山が基本的に有する物理的性質によって決まり、補強の効果は、降伏以後の供試体挙動に現われる。
- (3) ロックボルト本数の影響は、最大荷重が本数と共に増加し、最大荷重に至るまでの全変位量も増加する点に現われている。
- (4) ヘアリングプレートの有無の影響は、降伏以後に現われ、降伏以後の変形係数はヘアリングプレート有りの場合が大きく、最大荷重に至るまでの全変位量はヘアリングプレート無しの場合が大きい。

- (5) 破壊後に地山部分を壊し、ロックボルトの状況を観察したが、その一例を写真-1に示す。ヘアリングプレート無しの場合は、セン断面に沿ってボルトに大きな屈曲が見られ、C-30-1の供試体を除き、B、Cシリーズ共に全くボルトの破断は見られなかった。これに対して、ヘアリングプレート有りの場合は、ボルトの曲り変形はほとんどなく、セン断面がボルトを横切る点で破断が見られる。これは、供試体全体にセン断面が生ずる以前にロックボルトと地山との付着が切れていることを示すも

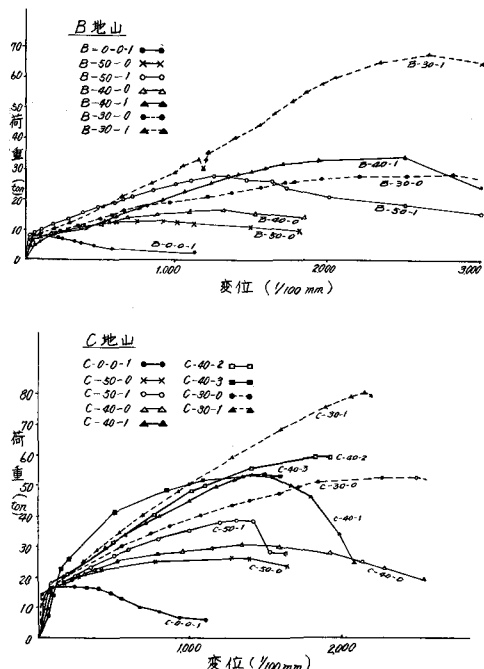


図-6 荷重-変位曲線

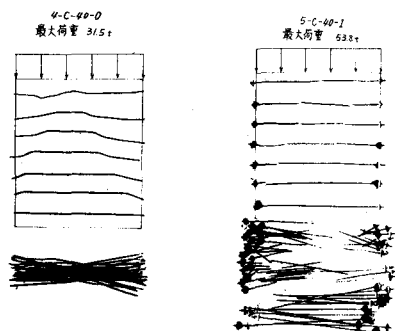


写真-1 破壊後のロックボルトの状況(中央断面)

のと考えられる。

次に、ロックボルトによる補強が最大荷重に及ぼす影響について、地山の三軸試験との関係において考察する。図-7は、図-4に示した地山材料の三軸試験結果を、側圧と軸方向の最大応力とで整理したものである。図-8は単位面積当りのロックボルトの伸び剛性と破壊荷重との関係を表わすものである。本実験の最小補強の伸び剛性 $2.24 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ は、実施工で $\phi 24 \text{ mm}$ の鋼棒をほぼ 65 cm ピッチで配置した場合に相当し、本実験で実施した補強は実際よりかなり大きなものである。図-8において示した推定値は、破壊近くなるとロックボルトには、ベアリングプレート有りの場合は破断荷重、無しの場合は引抜き抵抗力が全体にわたって作用し、供試体にあたかも側面拘束を与えた如き状態になると考え、図-7の側圧に対する軸方向応力の最大値を読み取り推定される破壊荷重として算出したものである。Bシリーズについては、三軸試験による推定値と実験値がベアリングプレートの有無に係わらず、値自体にはかなりの隔りが見られるものの、補強による破壊荷重の増加割合（直線の傾き）は、ほぼ等しくなっている。又、Cシリーズについてもベアリングプレート有りの場合の比較を行うと、推定値と実験値はかなり良く合っている。B、Cシリーズと比較すると、地山の ϕ が大きいCシリーズが同補強に対する破壊荷重の増加割合が大きい。以上、システムロックボルトの補強効果を三軸的な拘束作用として扱うことで、地山の三軸試験結果から、破壊荷重をある程度推定出来ると思われる。

5. あとがき

本実験は、システムロックボルトの効果を確認する目的で、モデルを単純化し、ロックボルト、ベアリングプレート等の補強を実際に施工されている場合よりも過大として実施した。その結果、地山の降伏以後にロックボルトの効果が著しく現われ、本実験の範囲でロックボルト無しに対して最大9倍の破壊強度が得られた。その理由として三軸的拘束効果を取上げたところよく説明出来た。ベアリングプレートも破壊強度の増加に大きく寄与しているが、これも三軸的拘束と考えることによって定量的にも説明出来た。

このベアリングプレートの効果に対しては、実施工の場合、吹付けコンクリートやブロック化した岩が代替的あるいは付加的な役割を果たすことも十分考えられる。現在、NATM FEMプログラムによる対比計算を行っているが、今回対象とした均質な地山の他、今後は潜在的に亀裂を有するような地山を対象としたシステムロックボルトの補強効果についての研究も進めて行きたい。

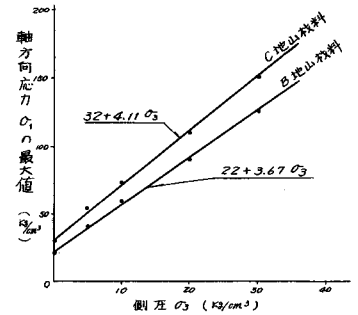


図-7 三軸試験結果

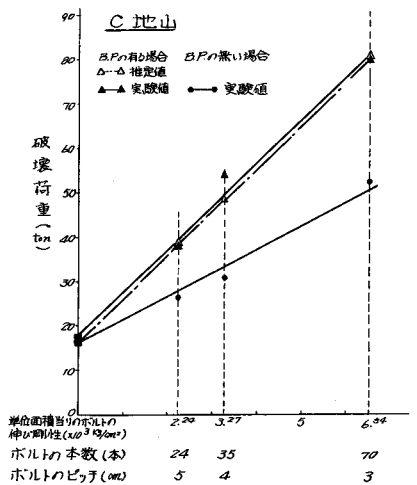
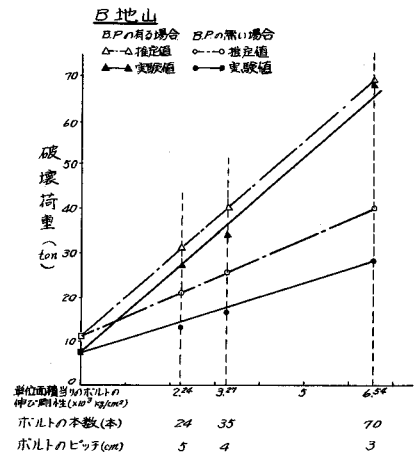


図-8 システムロックボルトの効果

THE EFFECTS OF SYSTEMATIC ROCK BOLTS ON THE REINFORCEMENT OF BEDROCK

Railway Technical Research Institute, JNR

TAKASHI TSUCHIYA
YOSHIO MATSUMOTO

Technical Research Institute, Taisei Corporation

KOJI KAWASAKI

ABSTRACT

In order to recognize the effects of systematic rock bolts used for "New Austrian Tunnelling Method", some experiments have been performed.

The number of rock bolts, bearing plates and types of bedrock model as evaluated by cohesion and coefficient of internal friction have been chosen as factors for the experiments.

The results obtained in these experiments are summarized as follows.

- (1) Reinforcement with rock bolts has no influences on the initial modulus of deformation. The difference between samples with and without reinforcement is clearly observed after yielding of samples and the ultimate load is increased remarkably by rock bolts.
- (2) The increase of ultimate load and modulus of deformation after yielding are changed with the conditions related to the bearing plates.
- (3) It is possible to estimate the effect of reinforcement on the ultimate load by triaxial compression test where rock bolts are simulated as confined pressure.