

(44) テンションボルトの作用効果の評価法に関する研究

佐賀大学 理工学部 正会員 ○ 石橋 孝 治

1. はじめに

一般にNATMにおいては、ロックボルトが支保工として単独で用いられることはほとんど無く、吹付けコンクリートと併用され、両者の複合作用のもとでトンネルの安定化が図られるが、施工実績の増加に伴い各種の計測記録が蓄積・分析されてきたことや、ロックボルトと吹付けコンクリートの支保機構やその設計法に関する研究が盛んに行われてきたことによって、NATMで使用される支保メンバーの役割が次第に明瞭になってきた。ロックボルトの効果のみについて考えれば、支保としての寄与の程度が吹付けコンクリートに比べ小さいことや、地山の種類（硬岩、軟岩、土砂）によってその役割が異なってくること等が明かにされてきている¹⁾。そこで本研究では、ロックボルトの“アーチ形成効果”²⁾に着眼し、ロックボルトのアンカーとしての支保能力を人工的に高めるために、プレストレスのメカニズムによって地山に圧縮応力を導入し、地山内の拘束条件を変化させるテンションボルト^{3), 4)}に着目した。地山の移動とこれを抑制しようとするロックボルトの相互作用によって、地山のおかれている拘束条件が変化する結果、地山内に支持力が改善された領域が誘導されるが、これを一体化して連続したアーチ状の構造体を形成するのがロックボルトによるアーチ形成のメカニズムであり、本研究は地山内でのアーチ形成をつかさどる拘束条件の変化を評価する一つの方法について、模型実験を行って検討したものである。

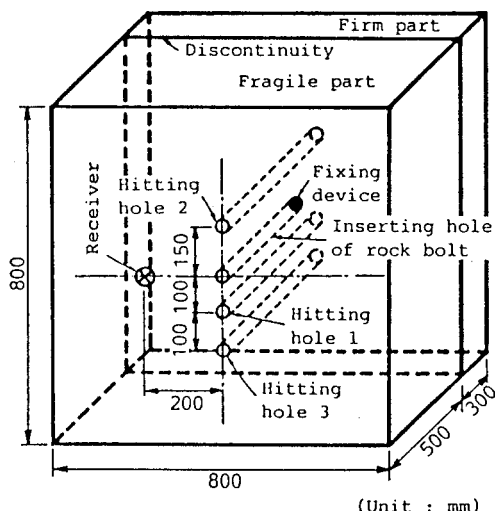
2. 模型実験の概要

2.1 岩盤模型供試体について

本実験で用いた岩盤模型供試体の形状と寸法を図-1に示す。本実験では均質な岩盤を想定する場合と、緩んだ領域の存在を想定する場合の2ケースについて実験を行った。前者の場合にはセメントモルタルのみを用いて模型供試体を製作し、後者の場合には図-1に示すように緩み領域に相当する部分（厚さ500mm）はs/aが極端に小さいポーラスなコンクリートを、堅固な岩盤に相当する部分（厚さ300mm）は一般的な配合のコンクリートを用いて製作した。表-2に岩盤模型材料の物理的性質を示す。本実験ではテンションボルトとしてD16の異形鉄筋を使用し、両端をネジ加工してロックボルトのモデルとした。模型供試体の中央には予め直径22mm、深さ600mmのロックボルト挿入孔を設け、孔底にはロックボルトの先端固定治具を埋設しておいた。また、供試体の中央からそれぞれ100, 150, 200mm離れた位置には、予め直径が22mmの模型供試体を貫通する殴打孔を同一直線上に列べて配置した（図-1参照）。

2.2 実験方法について

同一材料において、等しい距離を伝播する弾性波の速度は、伝播方向に任意の大きさの応力が導入されると速くなることが知られている。本実験ではこの性質を利用して、ロックボルトへのテンション導入に伴う定着端と加力端との間の応力変化を評価することを試みた。本実



(Unit : mm)

Fig.1 Schematic of model specimen.

験では、弾性波の波源を各殴打孔の任意の位置の孔壁に取れるよう、殴打孔の内壁に脱着自在のくさびを製作して用いた。一方、受信器は殴打孔列の軸と供試体中央で直交する直線上の供試体中央点から200 mm離れた表面に取り付けた（図-1参照）。本実験では、波源を100 mm間隔で移動させ、各殴打

Table 1 Physical properties of mortar and concrete.

	Mortar	Concrete	
		Firm part	Fragile part
Compressive strength f^1_c (kgf/cm ²)	173	155	86
Velocity of longitudinal wave V_p (km/s)	3.21	3.67	2.50
Unit weight γ (g/cm ³)	2.10	2.27	2.07

位置から受信器までの弾性波の到達時間を計測した。殴打回数は一点につき20回とした。ロックボルトの加力端側には、模型供試体との間に90×90mmの支圧板を挟んでセンターホール型ロードセルを設置し、ロックボルトに導入するテンション量を測定した。本実験ではロックボルトモデルの材質的な制約から、導入するテンション量は2 tonまでとした。

3. 実験結果と考察

3.1 殴打孔の感度について

本実験では、受信器の位置を固定したことにより、各殴打孔について弾性波速度試験を行って、予め各殴打孔の感度を調べた。図-2に各殴打孔から得られた弾性波の到達時間と殴打位置の深さの関係を示す。弾性波の到達時間は、殴打深さが深くなるにつれて大きくなる傾向を示している。同図中に破線で示した曲線は、岩盤模型供試体と同一材料で製作した10×10×40cmの材料試験用供試体に対して、超音波試験器を用いて計測した弾性波速度値を用いて、殴打孔3（供試体中央から200 mmの位置に設けた殴打孔）について直接波が到達するものと仮定して算出した関係である。定量的に到達時間に大きな差があるものの、実験により得られた関係は同図中の破線で示した曲線と相似な関係を示しており、受信器は直接波を受信しているものと推察される。到達時間の定量的差異は、用いた弾性波測定器（OYO PS-1）の不感距離を短縮するために行った改造によるものである。本来ならば改造後の特性に従って補正すべきであるが、前述したように改造後の特性によっても相似な関係が得られたことから、テンション導入に伴う拘束条件の変化を評価するには支障を来さないと考え、ここでは補正を行わないこととした。以下に殴打孔3から得られた結果について報告する。

3.2 均質モデルの場合

図-3に均質岩盤を想定した場合の弾性波の到達時間と殴打深さの関係を示す。テンションの導入に伴って弾性波の到達時間が短くなっており、ロックボルト周辺の岩盤模型供試体内に応力が付加されたことを明確にうかがい知ることができる。特に加力端付近においては、弾性波の到達時間が著しく短くなっている。これは図-4に示した有限要素解析（軸対称問題としての解析）による最大主応力の分布の計算結果に示されるように、加力端付近の岩盤模型供試体内に高い応力が発生することによるものである。一方、

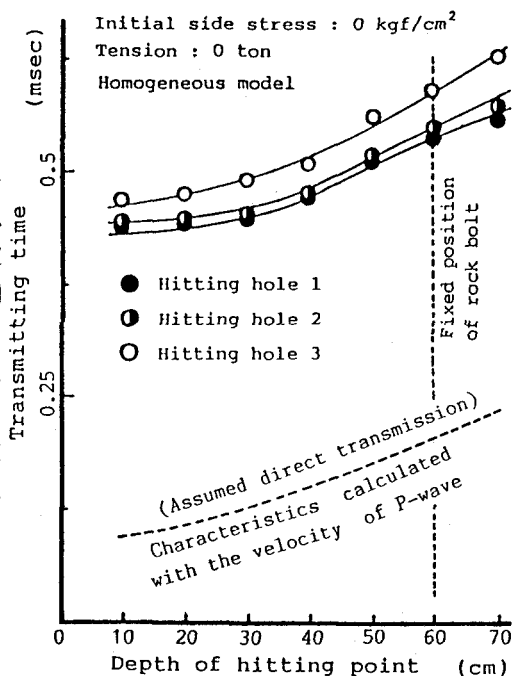


Fig.2 Changes of the transmitting time of P-wave depending on the depth of hitting point.

固定端付近に関しては導入テンション量が2 tonの場合に弾性波の到達時間が著しく短くなっている。これは殴打孔3の場合、弾性波の波源の位置が遠いため、弾性波の伝播経路においてテンションの導入に伴う付加応力の影響が遅れて及ぶためである。

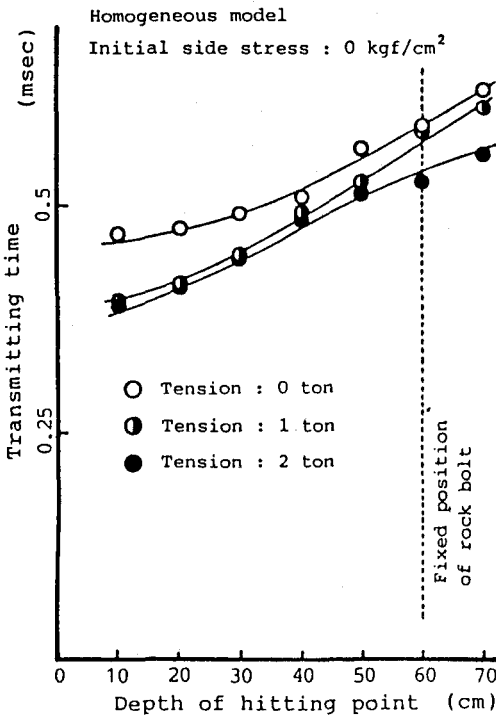


Fig.3 Changes of the transmitting time of P-wave depending on the depth of hitting point. (Hitting hole 3)

3.3 不連続面を設けたモデルの場合

1) 側面初期応力を導入しない場合

図-5は不連続面を設け側面初期応力を付加しない場合の弾性波の到達時間と殴打深さの関係を示したものである。ノーテンションの場合、深さ500 mm以遠より弾性波の到達時間が急激に遅くなるという結果を与えており、深さ500 mmの位置に存在する不連続面の影響を明瞭に反映している。これはトンネル半径方向に弾性波速度試験を行うことによって、トンネル掘削に伴う周辺地山の状況変化の把握が可能となることを示唆するものである。また、ロックボルトにテンションを導入すると、導入テンション量の増加に伴い弾性波の到達時間と殴打深さの関係は均質岩盤の場合の关系到漸近している。このことから、ロックボルトにテンションを導入することにより、脆弱な部分が堅固な部分に締め付けられることによって、不連続面の接触状況が改善され両者が一体化される過程を確認することができる。したがって、この特性を利用すればロックボルトへの必要導入テンション量を判断することができると共に、脆弱な部分と堅固な部分との一体化の評価・判定ができるものと考えられる。

2) 側面初期応力を導入した場合

図-6は不連続面を設け側面初期応力を付加した場合の弾性波の到達時間と殴打深さの関係を示したものである。図-6の関係は側面初期応力を付加しない場合の关系到(図-5)とほぼ同様な傾向を示しているが、全体的に弾性波の到達時間が遅くなる傾向を示している。これは一方向側面からのみの載荷であるために、ポアソン効果によって殴打孔の軸方向に岩盤模型供試体が引張された状態となるためである。ロ

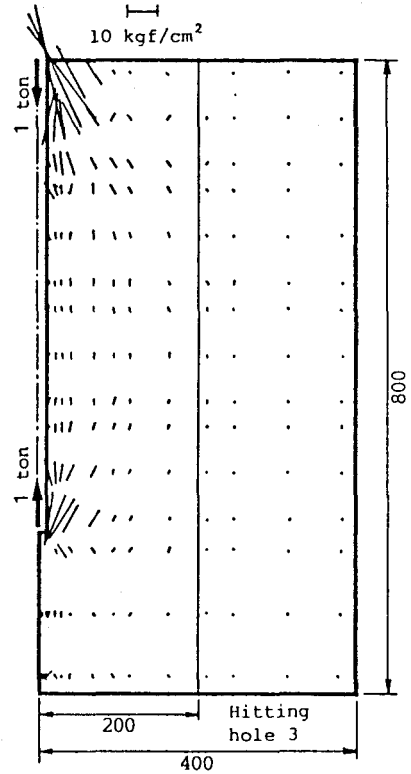


Fig.4 Distribution of maximum principal stress calculated by F.E.M.

ックボルトにテンションを導入すると、導入テンション量の増加に伴い弾性波の到達時間と殴打深さの関係は均質岩盤の場合の関係に漸近する傾向を示しているが、側面初期応力を付加しない場合に比べて、漸近の程度は遅くなっている。このため、トンネル周辺の地山がおかれている初期応力状態を考慮すれば、かなりのテンションを導入することが必要となる。供用されているロックボルトの材質（降伏点応力：約 3720 kgf/cm²）を考えれば、土被りの大きいトンネルや地下空洞の建設においては、高いレベルのテンションを線状支保材に導入することができるPS工法が有効となる。

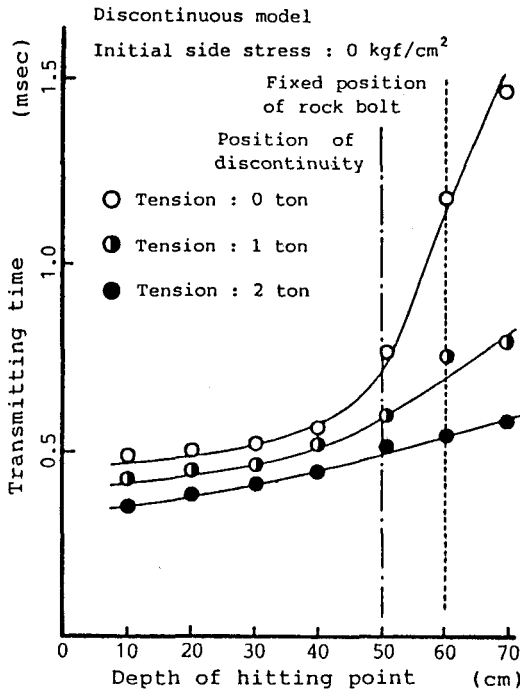


Fig.5 Changes of the transmitting time of P-wave depending on the depth of hitting point. (Hitting hole 3)

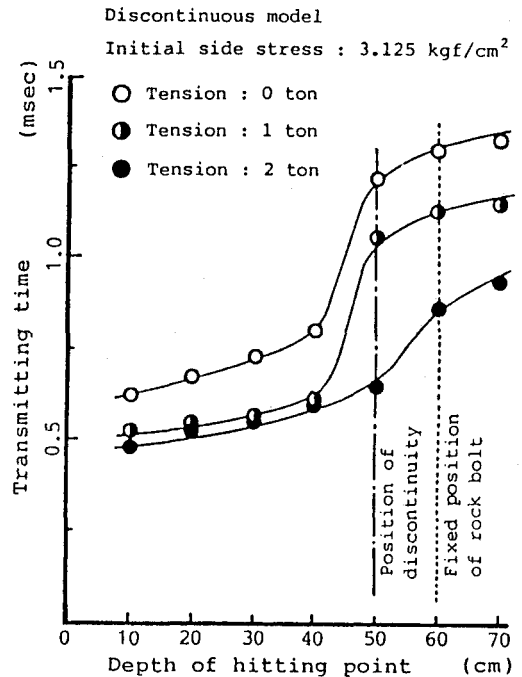


Fig.6 Changes of the transmitting time of P-wave depending on the depth of hitting point. (Hitting hole 3)

4. まとめ

本実験では単純で明瞭に地山の物性が異なる場合のみを取り扱い、トンネル半径方向に弾性波速度試験を行うかたちの模型実験を行って、トンネル周辺地山内の拘束条件の変化を評価する方法について検討を行った。この結果、トンネル半径方向の地山に対して弾性波速度試験を行って得られる結果は、トンネル掘削や支保工の建て込みに伴う周辺地山の力学的な状況変化を把握するための十分な指標となり得ることが明らかになった。そこで、緊張能力を向上するために緊張材としてPC鋼棒を用い、ブロック状の岩盤や複数本のテンションボルトの相互作用について、実験を行い検討を加えている。

参 考 文 献

- 1) 松本嘉司, 西岡 隆: トンネルの力学と覆工の設計方法(5), トンネルと地下, 1987, 12, 25~31
- 2) ロックボルト支保研究委員会: ロックボルト支保法について(1), 日本鉱業会誌, 1977, 3, 57~63
- 3) H.ハベニト著 濱建介ほか監訳: 地山安定のアンカー工法, 鹿島出版会, 1978
- 4) R.Schach, K.Garshol & A.M.Heltzen: Rock Bolting (A Practical Handbook), Pergamon Press, 1979

(44) Model Tests to Investigate the Effectiveness
of Pre-tensioned Bolts in NATM Tunnel

Saga University, Koji ISHIBASHI

ABSTRACT

Concrete spraying, rock bolt driving and the measurement of adjacent ground displacements are the essential factors for stabilization around a tunnel using NATM. The rock bolts driven systematically undertake a part of function to create the ground arch surrounding the tunnel. The author has found that pre-tensioning of bolts largely contribute to development of arching around the tunnel. In this study, pre-tensioned bolts were used. Model tests were carried out to measure the changes of the adjacent ground condition due to the tunnel excavation and to investigate the degree of improvement as a result of pre-tensioning. The model specimens were made of cement mortar and concrete. All specimens were cubic with 800 mm on one side. The effectiveness of transmitting time of the seismic P-wave as index was investigated. From the results of this research work, it was shown that it is possible to accurately predict the changes of the failed zone and degree of improvement in the adjacent ground utilizing P-wave transmission time. It was also found that seismic prospecting in the radial direction of the tunnel is more effective than in the longitudinal direction.