

切羽安定のためのケーブルボルトの支保効果について Study on Support Effect of Cable Bolts for the Stability in a Tunnel Face

天野 悟*・木梨秀雄**・土原久哉***・渡辺和憲****・二宮康郎*****

Satoru AMANO, Hideo KINASHI, Hisaya TSUCHIHARA, Kazunori WATANABE, Yasuo NINOMIYA

Recently, cable bolts have been used to reinforce the stability in a tunnel face. However, the support effect of the cable bolts installed in the tunnel face has not been made clear quantitatively. The field measurements concerning the axial force in cable bolts and ground movement in the tunnel face followed by the excavation were carried out. In order to evaluate the measurement results, three-dimensional numerical simulation using finite difference method was also performed. This paper will quantitatively examine the behavior of the tunnel face caused by the excavation and the support effect of the cable bolts installed in the tunnel face by comparing both results of field experiments and numerical experiments.

Keywords : cable bolts, tunnel face stability, field measurements, three-dimensional numerical analysis, support effect

1. はじめに

最近、切羽崩壊が懸念されるようなトンネルにおいて、切羽鏡に対して長尺のケーブルボルトを打設して切羽の安定を確保しようとする試みがなされてきているが、そのように切羽に打設されるケーブルボルトの支保効果については、定量的には明らかになっていないのが現状である。

今回、大阪府道路公社阪奈トンネルの本坑と換気坑の間にケーブルボルト軸力計や地中変位計等を設置し、掘削に伴う切羽挙動および切羽ケーブルボルトの挙動を原位置で計測した。あわせて、これらの挙動を評価するため、三次元の有限差分法による数値解析を実施した。

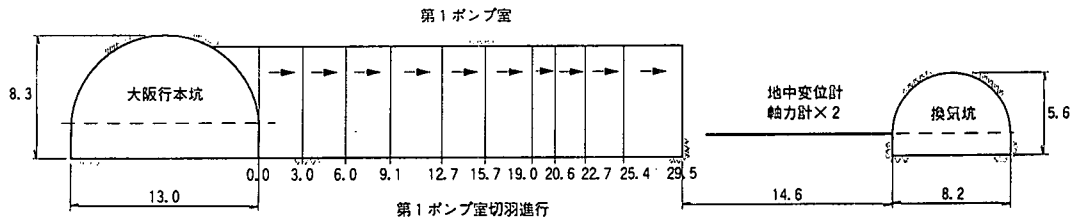
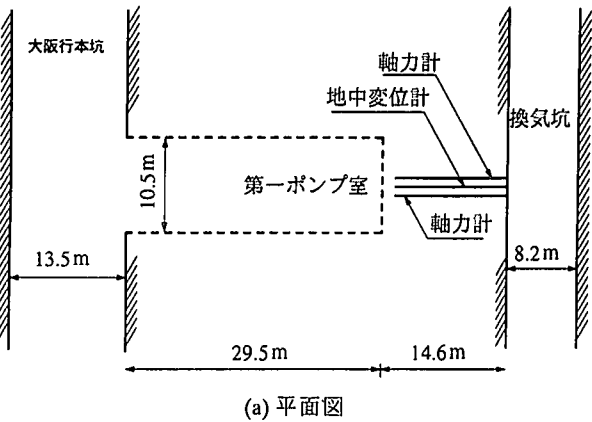
本報告は、原位置で測定された計測結果を三次元の数値解析によってシミュレーションすることにより掘削に伴う切羽挙動および切羽ケーブルボルトの作用機構について定量的に検討を行ったものである。

* 正会員 (株)大林組 土木技術本部技術第二部
** 正会員 (株)大林組 技術研究所土木第四研究室
*** 正会員 (株)大林組 土木技術本部設計第二部
**** 第二阪奈トンネル工事共同企業体
***** (株)大林組 土木技術本部企画部

2. 切羽ケーブルボルトの原位置計測

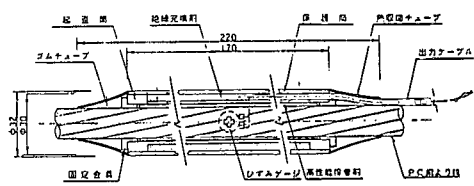
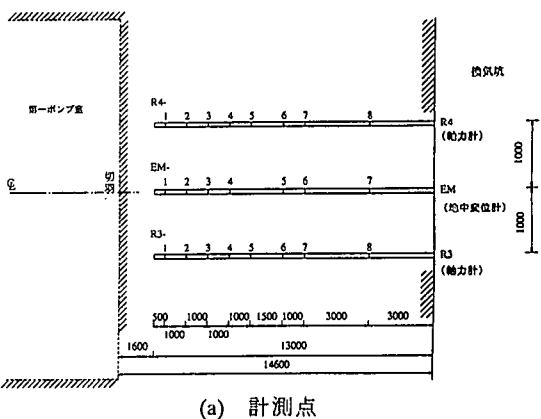
2.1 原位置計測概要

掘削に伴う切羽前方地山と切羽ケーブルボルトの挙動について原位置での計測概要とその結果について以下に記す。実施場所は大阪府と奈良県に跨る第二阪奈有料道路・道路建設工事阪奈トンネルである。地山は全体的に新鮮な硬岩地山で、閃緑岩とそれを取り囲む花崗岩が分布しているが、計測位置は土被り約 100m で若干の風化部分と岩盤不連続面が発達している。原位置計測の概要は図 2.1 に示すように既に掘削が終了した大阪行本坑と換気坑があり、大阪行本坑側壁から延長 29.5 m の第一ポンプ室の掘削が予定されている。第一ポ



(a) 平面図
(b) 断面図
図 2.1 計測概要 1

ンプ室掘削前に換気坑側壁から第一ポンプ室掘削予定断面内へ向かって軸力計を取り付けた PC 鋼線 19 本よりを用いたケーブルボルト 2 本 (L=13m, $\phi=17.8\text{mm}$) を打設し、地中内変位計 1 本 (L=13m) をそれと平行に埋設した。ケーブルボルトの定着材は IBO ドライモルタルを使用した。また、換気坑側壁での絶対変位の計測も行った。ケーブルボルト軸力計と地中内変位計の測点を図 2.2(a) に示す。R3,R4 の軸力計付きケーブルボルト 2 本 (合計 16 測点) と EM の地中内変位計 (7 測点) である。また、計測は PC 鋼より線が対象のため軸力計の構造を図 2.2(b) に示すようにひずみゲージをボルトの素材へ直接貼り付けず、ボルトに生じるひずみを起歪筒によって間接的に計測した。さらに、定着材と付着しないようにゴムスリーブで被覆した。これによってケーブルボルト表面の研磨加工は不要となり、高い防水性が得られ、打設時の計器破損を防ぐことができた。



(a) 計測点
(b) ケーブルボルト軸力計
図 2.2 計測概要 2

2.2 地中内変位計測

図 2.3(a) は地中内変位の各測点と第一ポンプ室切羽の離れに伴う地中内変位の変化を示したものである。切羽との離れが約 15m (1.4D、D: 第一ポンプ室の掘削径) になると EM-1,2,3,4 の変位が立ち上がり始めていることから、掘削の影響が切羽前方 15m の領域まで及んでいることがわかる。当初の変位増分は少ないが切羽との離れが 7m 付近 (0.7D) になると傾きが変わり、EM-1,2 において急激な変位増分がみられた。一方、図 2.3(b) は地中内変位の経時変化を示したものである。この図から変位増分の大きい EM-1,2 と EM-3, 4、およびほとんど変位がみられない EM-5,6,7 の 3 系列の挙動に分けて考えられることから、この 3 系列の境界に地山挙動を支配する 2 面の不連続面が存在すると考えられる。なお、換気坑側壁の絶対変位は、ほとんど認められなかった。

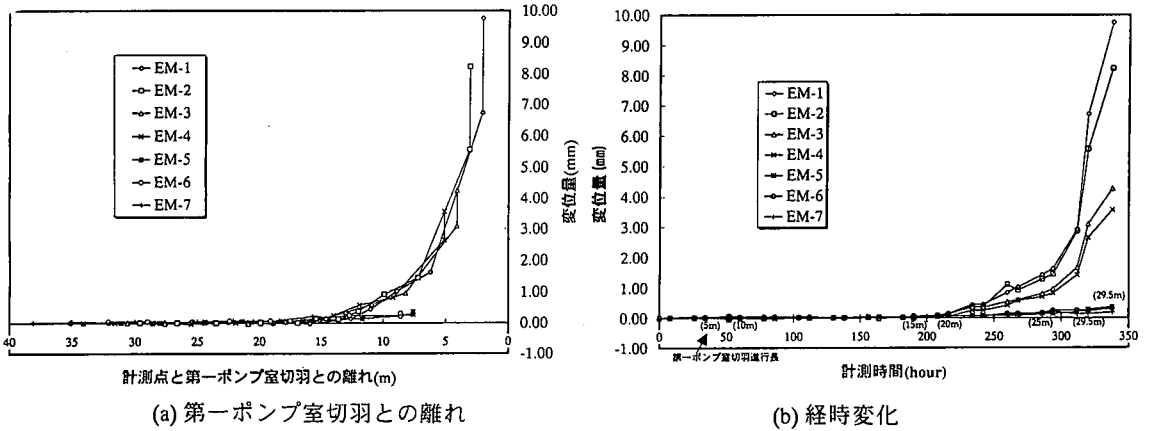


図 2.3 地中内変位計測結果

2.3 ケーブルボルトの軸力計測

図 2.4(a) は軸力計 R3 の第一ポンプ室切羽の進行長に対する軸力分布の変化を示したものである。横軸は第一ポンプ室最終切羽からの距離と測点 No を、縦軸に軸力を示している。切羽進行に伴って測点 R3-2, R3-5 での軸力は徐々に増加し、第一ポンプ室の掘削完了後の軸力は最終的に R3-2 で約 22tf が認められた。同様に図 2.4(b) は軸力計 R4 の第一ポンプ室切羽の進行に伴う軸力分布の変化を示したものである。切羽進行に伴って、測点 R4-4 を中心とした軸力の増加がみられ、最終的に 10tf 近くの軸力が発生した。軸力分布の特徴としては、R3-3, R3-6, R4-5 の測点で局所的に軸力が発生していることから、地中内変位計測結果で示したように掘削に伴う岩盤不連続面の変位に対して、ケーブルボルトがその動きを拘束するように作用しているものと推測される。

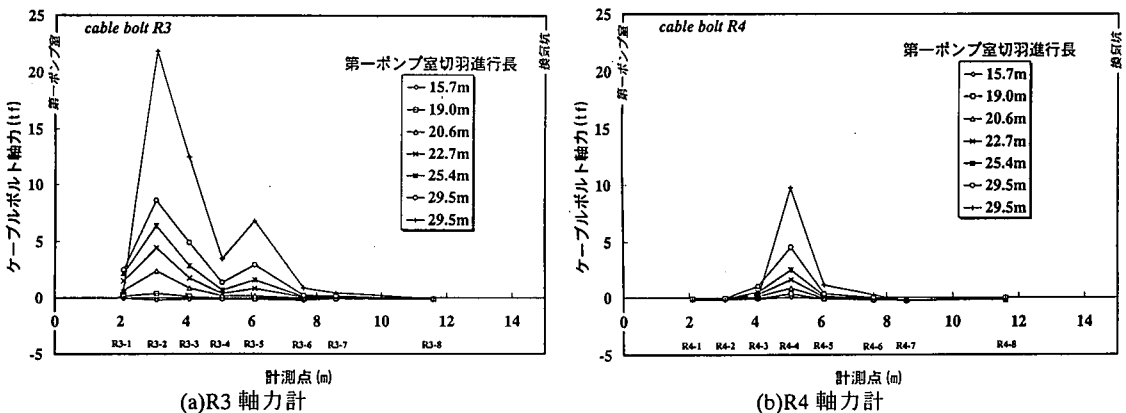


図 2.4 ケーブルボルト軸力計測結果

3. 掘削に伴う切羽挙動の三次元解析

3.1 解析方法

第一ポンプ室の切羽の進行に伴うケーブルボルトの軸力、および切羽前方の地中内変位の原位置計測結果をシミュレーションするために、三次元解析を実施した。この解析では、ケーブルボルトの作用効果を現実に近い形で再現するため、三次元有限差分析コード FLAC3D を使用した。FLAC3D の有する機能の一つであるケーブル要素を用いることにより、ケーブルボルトに発生するせん断力が定着材を介した地山とケーブル材料間の相対変位に比例して発生するものとして解析できる。また、今回の原位置計測の結果から、切羽の前方に不連続面が存在することが推定されたため、FLAC3D においてインターフェイス要素を用いて不連続面を考慮し、別途解析を実施した。なお、FLAC3D における連続体の取り扱いについては通常の FEM と同様であり、その応力・変形挙動についても FEM と等価である。

3.2 解析モデルの作成

解析モデルは、計測地点周辺の 3 つのトンネル、すなわち大阪行本坑・第一ポンプ室・換気坑を考慮して作成した。また、解析メッシュは現場の切羽の進行および地中内変位計測位置に一致するよう作成した。三次元解析モデルの概要を図 3.1 に示す。総要素数は 21,120、総節点数は 23,667 である。ケーブルボルト軸力計は現場計測と同じ位置に設置した。先に、筆者ら¹⁾は岩盤を不連続体としてモデル化し、個別要素解析コード UDEC によりケーブルボルトの支保効果を解析的に検討している。今回の解析は不連続面を FLAC3D が有するインターフェイス要素を用いて解析上考慮し、これを境に地山要素は不連続になり、かつ不連続面の変形および強度特性を考慮した。不連続面の変形に関しては、垂直、およびせん断ばねでモデル化し、強度はクーロン型のスライダーでモデル化した。一方、ここで用いるケーブルボルトのモデルは、UDEC の場合と同じ概念に基づいている¹⁾。すなわち、全面接着型ケーブルボルトの作用効果を再現するために、その延長上には複数の節点を設けている。これらの節点には、地山要素との間に定着材の剛性および付着力を現すせん断バネとスライダーがモデル化される。この結果、定着材と地山の相互作用が考慮され、定着材に作用するせん断力やケーブル上の 2 節点間の相対変位に基づくケーブルボルトの軸力が再現されることになる。今回は、全長 13m のケーブルボルトに 0.1m ごとに節点を配した。今回の解析では、不連続面を考慮しない場合（CASE1）、および考慮する場合（CASE2）の 2 ケースを実施した。

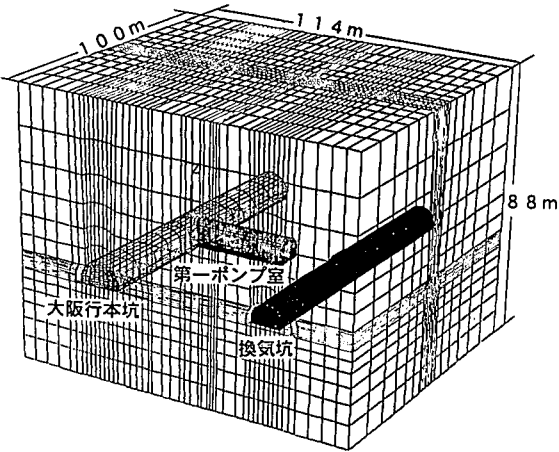


図 3.1 解析モデル図

表 3.1 入力物性値

地 山	弾性係数	1.23GPa
	ポアソン比	0.20
	密度	2,700kg/m ³
鋼 材	断面積	208.4mm ²
	引張強度	1,550kN
	弾性係数	190GPa
定 着 材	せん断強度	1.80kN/m/m
	付着強度	600kN/m
不 連 続 面	垂直剛性	50MPa/mm
	せん断剛性	10MPa/mm
	粘着力	0.1MPa
	摩擦角	50deg.

3.3 入力値の設定

解析において、岩盤は弾性体として取り扱った。弾性係数は現場から採取した岩石の一軸圧縮試験の結果を実際の変位量に相当するように低減して設定した。初期地圧は、2.7MPa（土被り100m）の等方応力状態とした。ケーブルボルトに関してはPC鋼線の所定の材料特性を解析の入力値とした。また、定着材の特性についてはケーブルボルトの引抜き試験の結果に基づいて設定した。CASE2における不連続面の変形・強度特性については花崗岩のジョイント試料による室内せん断試験の結果から設定した。解析の入力値の一覧を表3.1に示す。

3.4 解析結果と考察

まず、CASE1の解析結果について述べる。CASE1では、STEP1で本坑および換気坑の掘削を解析後、STEP2においては実施工の掘削ステップにあわせて第一ポンプ室を逐次掘削し、切羽進行に伴うケーブルボルト軸力と切羽前方の地中内変位を解析した。第一ポンプ室切羽の進行に伴うケーブルボルトの軸力分布を図3.2に示す。横軸は第一ポンプ室最終切羽からの距離で、第一ポンプ室の切羽の進行長に対する軸力の変化を示している。図3.2より、軸力は切羽進行に伴い徐々に増大し、第一ポンプ室の進行長が28.5mになると特に増大していることがわかる。最終的な軸力の最大値は6tf程度であり、計測値の22tfに比べかなり小さい。また、軸力分布は、第一ポンプ室側の先端ではほぼゼロとなり、第一ポンプ室最終切羽からの距離が約3mの一箇所で軸力はピークとなり、それ以降の軸力は徐々に減少している。一方、計測では第一ポンプ室最終切羽から3mおよび6mの2カ所で軸力がピークを呈しており（図2.4(a)）、上記の解析結果とその傾向は異なる。これは筆者らが行った不連続面を考慮したケーブルボルト軸力の挙動解析結果¹⁾を勘案すると、本地山も不連続体的にモデル化することによってケーブルボルトの挙動を解析的に再現することができると考えられる。

第一ポンプ室切羽の進行に伴う、切羽前方地山の水平変位分布を図3.3に示す。横軸は第一ポンプ室最終切羽からの距離、縦軸に水平変位を示し、第一ポンプ室切羽の進行長に対する変位分布を示している。掘削に伴い地中内変位が第一ポンプ室側で発生し、切羽進行に伴い変位が徐々に増大することがわかる。変位の最大値は約7mmで計測値（約10mm）より若干小さい。また、換気坑に近づくに従い変位は連続的に小さくなっており、切羽前方地山が連続体的

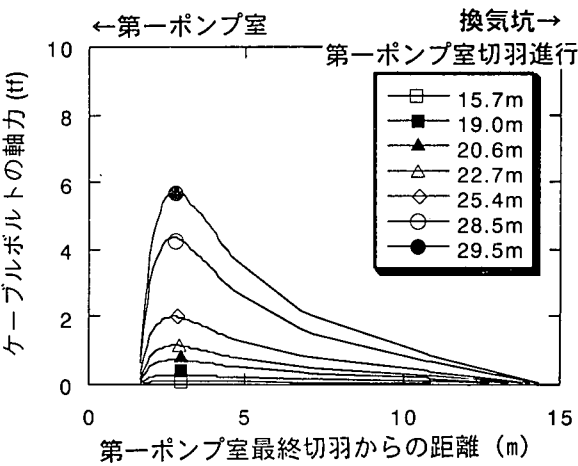


図 3.2 軸力分布解析結果 (CASE1)

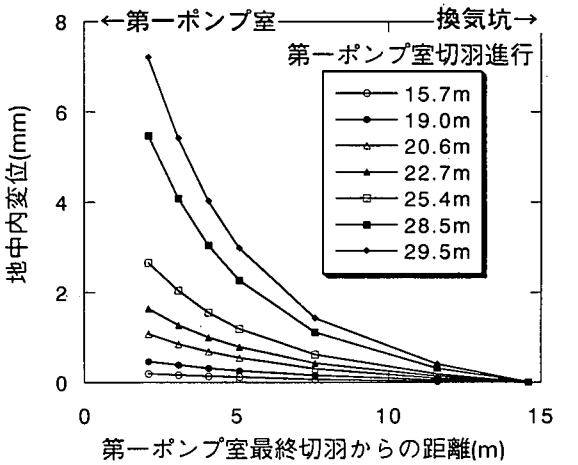


図 3.3 地中内変位解析結果 (CASE1)

に挙動していることがわかる。これは、変位分布に不連続的な挙動を示している地中内変位計測結果（図 2.3(b)）とは一致しない。

以上のように、CASE1 の連続体的モデルでは計測結果とその傾向が一致しない。そこで、CASE2 において計測で軸力がピークを呈した 2 力所に前述した不連続面を設定することにより解析を実施した。CASE1, CASE2 の解析結果、および計測結果の掘削完了時の軸力分布および地中内変位分布を図 3.4 および図 3.5 にそれぞれ示す。なお、両図の横軸は第一ポンプ室最終切羽からの距離を示している。図 3.4 より CASE2 で不連続面を考慮したことにより、不連続面と交差する 2 力所で軸力がピークを呈しており、定性的に計測結果を再現していることがわかる。一方、図 3.5 より切羽前方の変位に関しては、CASE2 で不連続面を考慮したことにより計測結果と比較的よく一致している。また、不連続面の存在する 2 力所において変位は不連続となっており、この傾向も計測結果とよく整合している。

4. おわりに

原位置で計測された掘削に伴う切羽と切羽ケーブルボルトの挙動を、三次元解析によってシミュレーションすることによって次のようなことがわかった。

- ①掘削に伴い切羽前方の不連続面で局所的な変位が生じるが、これに対してケーブルボルトには局所的なピークを持つ軸力が発生し、不連続面での変位を抑制するように作用する。
- ②掘削に伴う切羽と切羽ケーブルボルトの原位置での挙動を、ここで用いたケーブルボルトのモデル化によって、不連続面を考慮することにより、三次元の数値解析で再現することができる。
- ③ケーブルボルトには、連続体として挙動する岩盤よりも不連続性岩盤の不連続面で大きな軸力が発生する。このため、変位を抑制するという点では、不連続性岩盤においてケーブルボルトの効果をより期待できる。

謝辞)

原位置計測を実施するにあたって大阪府道路公社 第二阪奈有料道路建設事務所、住友電工(株)には多大な御協力を頂いた。ここに深甚なる謝意を表する。

参考文献)

- 1) 天野・木梨・田中：不連続性岩盤におけるケーブルボルトの支保効果に関する解析的検討，第 5 回トンネル工学研究発表会，1995.11.

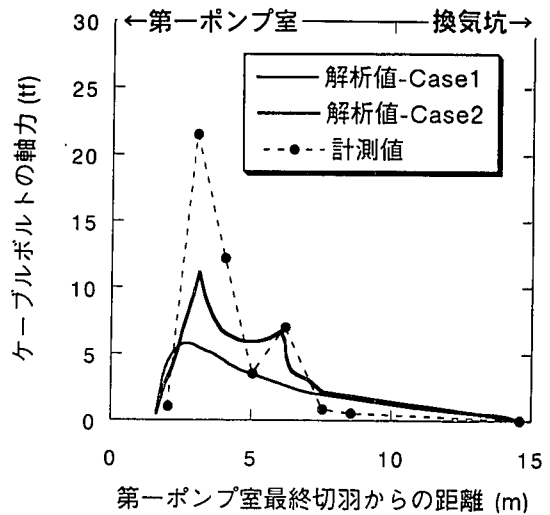


図 3.4 軸力分布解析結果 (CASE2)

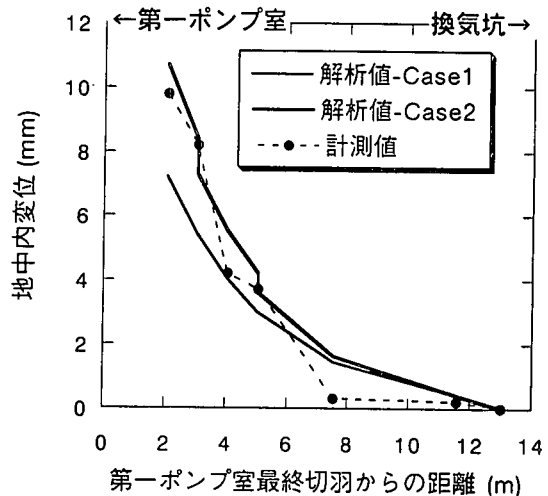


図 3.5 地中内変位解析結果 (CASE2)