

岩盤のゆるみ領域に関する調査の試み

藤原 紀夫 平間 邦興
丸山 誠 吉岡 尚也
畑 浩二

An Attempt at Investigation on Loosened Zone of Bedrock

Toshio Fujiwara Kunioki Hirama
Makoto Maruyama Hisaya Yoshioka
Koji Hata

Abstract

The loosened zone around a tunnel caused by excavation in a cracky rock of medium hardness (mainly chert) is subjected to four investigation methods—elastic-wave test, borehole jack test, borehole pulse-wave test, and borehole TV system. The investigations are made for the two side walls of the tunnel. It is shown that the loosened zone caused by tunnel excavation extends 2.0 to 3.5 m into bedrock.

概要

割れ目の多い中硬岩（チャートを主体とする岩盤）にトンネルを掘削したときのトンネル周辺地山のゆるみ領域の把握を、(1) 弾性波探査、(2) ボーリング孔内荷重試験、(3) ボーリング孔内超音波パルス試験、(4) ボアホールテレビ観測、の四つの現位置調査方法で試みた。調査位置はトンネルの両側壁部分を対象とした。その結果、トンネルの上半部分を掘削したことによる岩盤のゆるみ現象が側壁から 2.0～3.5 m 程度の深部までおよんでいることが判明した。

1. まえがき

岩盤内部には岩石の自重、造山運動などによって受けた 1 次地圧が存在する。このような岩盤中にトンネルを掘削すると、トンネル周辺の地山は応力の再配置を伴うためにゆるみ現象が発生する。このゆるみ領域については多くの実験式や経験式が提案されている。しかし、応力再配置に伴って生じたゆるみ領域が広範囲にわたればトンネル支保工および覆工コンクリートに予期せぬ大きな荷重が作用することになり、強いては崩壊といった事態も考えられる。したがって、トンネル地圧の発生機構やその大きさを事前に把握しておくことは、支保工の建て込み時あるいは覆工コンクリートの打設時の適否の判定に役立つものと思われる。

そこで今回は割れ目の多い中硬岩におけるトンネル掘削に伴う周辺地山のゆるみ領域の把握を試みるために、各種の現位置調査を実施した。以下、ここで採用した測定方法とその調査結果について述べるとともに、岩石コ

アによる室内試験結果および F.E.M. 解析結果の概要について示す。

2. 調査方法とその解析

2.1. 現位置調査

実施した現位置調査の種類および測定断面を図-1 に示す。測定はトンネル横断面に対してほぼ左右対称の 3 本のボーリング孔を利用した。なお、弾性波探査については、ボーリング孔を中心に縦断方向の側壁 2 測線で実施した。以下に実施した現位置調査方法の概要を示す。

2.2. 弾性波探査

人工的に弾性波を発生させ、縦波や横波の屈折伝播状況によって地質構造を推定する方法である。測線の設置概念図と使用機器を図-2 に示す。左右測線の長さはそれぞれ 30 m ずつとし、センサーの設置間隔は原則として 1.0 m としたが、補助観測点も適宜設置した。発破孔は孔径 2～3 cm、深さ 20～50 cm 削孔し、振源は瞬発性の電気雷管を使用した。また、観測記録はすべてデータ

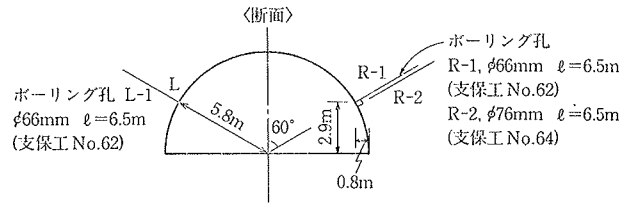
レコーダで収録し、弾性波の伝播時間より走時曲線を求める。得られた走時曲線をもとに、解析速度層断面図を作成し、岩盤の弾性波速度を把握することにより、その深度分布を測定することができる。なお、磁気テープ記録の初動走時が極端に短く、波動も高周波領域と考えられるため、走時解析するにはテープを高速度再生して解析する必要がある。

2.3. ボーリング孔内超音波パルス試験

ボーリング孔（孔径 76 mmφ）内に超音波パルス検知計（写真一）を挿入し、連続的に岩盤状況を把握する調査方法である。この試験装置は本体検知計部、ウルトラソノスコープ部および撮影用カメラ部より構成される。検知計には、ジルコタン酸鉛磁器を振動子とする発振、受振用の2個の探触子（共振振動数 50 kHz）がある。発振探触子から発信した超音波を受振探触子（探触子間距離 11 cm）で受信することにより、両探触子間の岩盤の割れ目状況や超音波速度を測定することができる。探触子は常に孔壁に一定圧力で接触するように、検知計内部のスプリングで調整してある。超音波の波形はウルトラソノスコープで測定し、写真撮影しておいて超音波速度を計算できるとともに、得られた現象波形より孔壁岩盤の割れ目の分布などを推定することができる。なお、超音波速度は両探触子間の平均速度が得られることになる。

2.4. ボーリング孔内載荷試験

この試験装置には、小型の特殊ジャッキと剛性載荷板を内蔵し、荷重と変位の関係から岩盤の性状を把握する方法で、通常の平板載荷試験と原理的には同一である。使用した試験装置の概略図および機械仕様を示したのが図一3である。載荷板に使用する荷重は、手動式のオイルポンプに取り付けられた圧力計と本体に組み込まれた圧力計によって測定される。また、ボーリング孔（孔径 66 mmφ）での載荷板の変位量は、ジャッキ本体から逆流してくるオイル量をビューレットに導くことによってスタンドパイプで測定する。載荷板変位を本体に内蔵し



	適 用 (合計)			No.
	φ66mm	6.5m×2本=13m	19.5m	
ボーリング工	φ76mm	6.5m×1本=6.5m		L-1, R-1 R-2
坑内 P S 波 弾性波探査	側壁2側線 P.V=1.0m	左: 29.0m 右: 29.2m支保	58.2m	支保工 No.48~78
孔内変形試験 (KKT)	φ66mm	左(L-1) 8点 右(R-1) 7点	15点	L-1, R-1
孔内超音波パ ルス式検知機	φ76mm(NX) 連続	6m×1ヶ所=6m	6m	R-2
ポアホール テレビ	連続φ76mm	6m×1ヶ所=6m	6m	

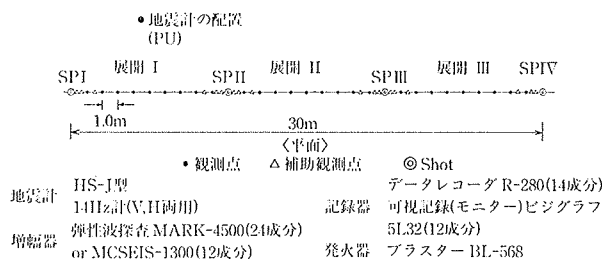
図一1 測定断面図と現位置調査一覧

た変位計で直接測定することもできる。最大加圧力は 330 kgf/cm² である。

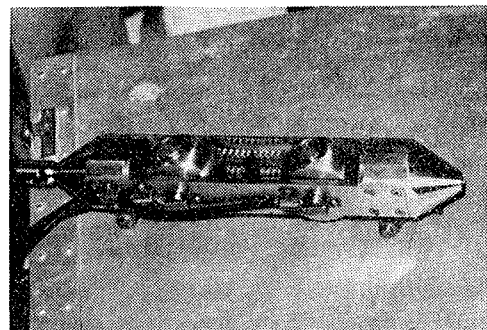
孔内載荷試験の載荷パターンを示したのが図一4である。まず本試験に先立って、載荷板と孔壁の接触程度を確認しかつ密着性を良くするための予備試験を行なった。本試験では、載荷速度一定の単調増加の載荷方式で最大加圧荷重まで載荷した。この載荷および除荷速度は対象となる岩盤によって異なってくる。本試験終了後には、ジャッキを一時引き出し、載荷板と孔壁の接触状況を調べるプレスケール試験を実施し、載荷面積について検証した。プレスケールとは、特殊発色剤を塗布したもので、圧力が作用することによって、発色する材料である。孔内載荷試験より得られる荷重-変位関係の一例を図一5に示す。これより、変形係数 D_K を下記の Goodman 式から算定する。

$$D_K = \frac{d_0}{2} \cdot \varphi(\nu, \beta) \cdot \frac{4p}{4r} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、4p: 荷重増分、4r: 4pに生じた変位量増分、d₀: 初期ボーリング孔径、φ(ν, β): ポアソン比νと載荷板の載荷曲率βの関数で決まる定数である。今回の調



図一2 弾性波探査測線図と使用機械



写真一1 超音波パルス検知計

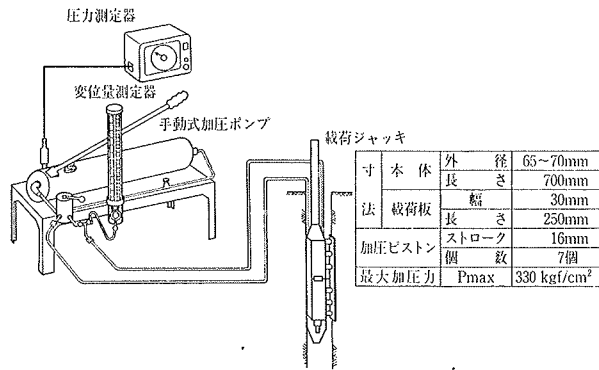


図-3 ボーリング孔内載荷試験装置

査では、 $\nu=0.3$, $\beta=27.5^\circ$ とすると $\varphi(\nu, \beta)=1.115$ が求まり、①式はつぎのようになる。

$$D_K = 0.5575 \cdot d_0 \cdot \frac{\Delta p}{4r} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(2)式を用いて変形係数 D_K の深度分布を求め、その相対的な傾向からゆるみ領域を推定することができる。なお、変形係数 D_K 値には荷重強度に対する依存性があるため、あらかじめ荷重-変位関係の直線部分における荷重範囲を決めておく必要がある。

2.5. ボアホールテレビ観測

ボーリング孔（孔径 76 mmφ）を利用して、特殊カメラでその孔壁を撮影する調査方法で、直接孔壁状況を目で判断することができ、かなり有効な調査方法である。この観測システムは、主にカメラゾンデ部（写真-2）、ケーブル部、モニター制御部およびゾンデ昇降機部などで構成されており、VTR による記録が可能である。また、現地においては、モニターテレビに即時に画面が写し出されるため、必要な位置で連続的に観察することもできる。

ボアホールテレビで観察するには二通りの方法がある。広範囲にしかも短時間に孔壁状況を観察する場合には、ボーリング孔を見下した格好で孔壁全体を観察する方法

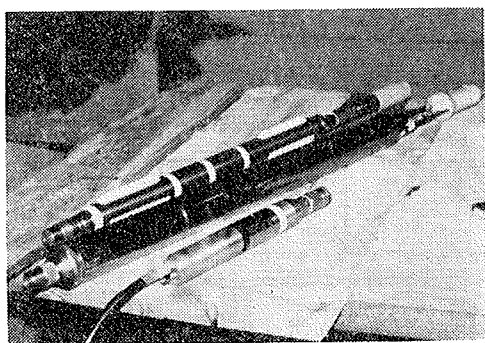


写真-2 ボアホールテレビゾンデ

(全周観察)が適している。また、亀裂の分布状況など細部の観察が要求される場合には、一定範囲の孔壁 360° 部分を詳細に観察する方法（側壁観察）もある。このような観測結果をもとに、孔壁展開図を作成し、亀裂の走向、傾斜やその分布状況あるいは岩盤状況などについて把握し、一連の解析を行なった。

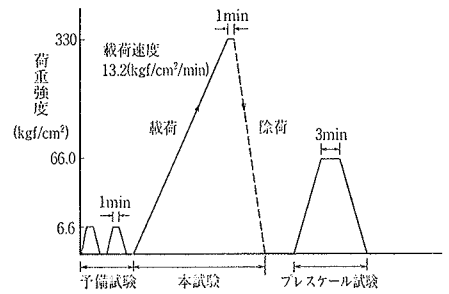


図-4 孔内載荷試験の載荷パターン

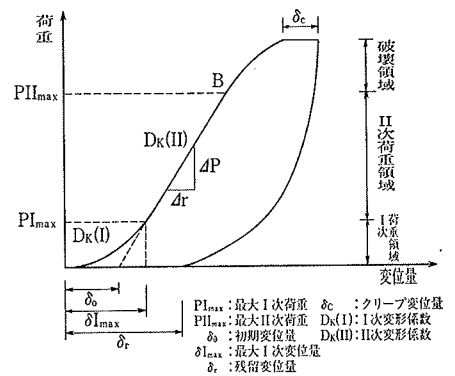


図-5 荷重-変位模式図

3. 現位置調査結果とその検討

実施した各種の現位置調査結果をもとに、トンネルにおけるゆるみ領域について検討してみた。得られた各調査結果の概要を以下に示す。

3.1. ボーリングコア観察

ボーリングコア試料の観察結果の一部を図-6に示す。岩盤状況を総合的に検討してみるとつぎのようになる。

トンネル右側壁岩盤は、全般的に亀裂の多い層状の凝灰岩よりなり、亀裂面では鉄分の沈着により赤褐色を示している。また、深度 2.0~3.0 m 付近から比較的亀裂は少なくなっている模様で、R.Q.D. (Rock Quality Designation) も多少大きく得られている。一方、トンネル左側壁岩盤は、やはり全般的に亀裂の多いチャートよりなり、深度 4.0 m 付近から亀裂は少なくなっている。また、いずれのボーリング孔とも R.Q.D. は 10~20% 程度で、かつ最大コア長なども小さい値が得られていることから、岩盤状況はかなり悪いことが予想される。典型的な亀裂性岩盤の状況を示していると言える。

3.2. 弾性波探査

解析結果より得られる走時曲線および速度層断面を図-7に示す。

解析断面図で明らかのように、当該調査地点はおおむね第1～第3速度層の3層で構成される。その他に、周辺速度に比較して遅い部分を示す、いわゆる低速度帯が検出された。以下、トンネル壁面より順次第1速度層、第2速度層、第3速度層としてその分布状況を示す。

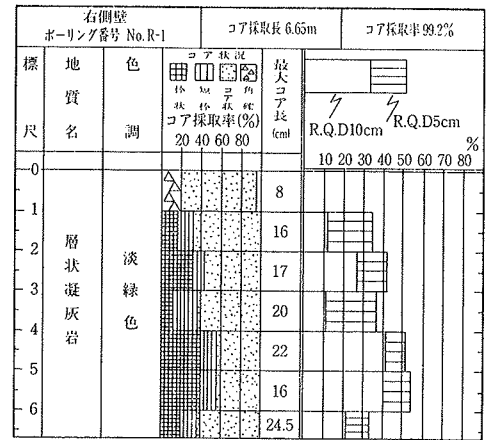
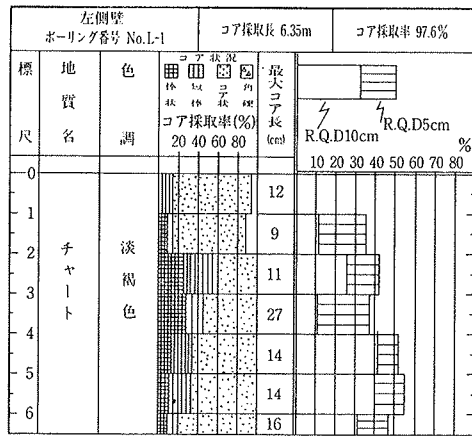


図-6 ボーリングコア観察結果

(1) 第1速度層 この

速度層の速度値は、発破点付近の直接波の走時より求めたもので ($V_p=0.8\sim 1.2$ km/sec), 全般的に層厚 0.5~1.0 m 程度を示し、欠除している箇所も一部ある。発破の影響が大きい部分と判断される。

(2) 第2速度層 この速度層は、右側壁面の一部を除いて走時曲線も比較的明確に得られている。この速度値は、ハギトリ線および見掛速度の両者より求めた (右側壁面 $V_p=1.3$ km/sec, 左側壁面 $V_p=1.7\sim 2.4$ km/sec) が、全般的にトンネル壁面から 1.0~2.0 m 程度の深度まで卓越している。この速度層までが一応塑性を含めたゆるみ領域と考えられる。

(3) 第3速度層 この速度層は岩盤の最深部に相当し速度値は全てハギトリ線で求めた。速度値(右側壁面 $V_p=4.0$ km/sec, $V_s=1.7\sim 2.5$ km/sec, 左側壁面 $V_p=3.5\sim 4.5$ km/sec, $V_s=1.8\sim 2.0$ km/sec) から判断すると、左側壁面が右側壁面に比較して良好と思われるが、これは地質 (凝灰岩とチャート) の違いによるものと考

えられる。なお、この第3速度層のみに検出されたS速度から動ポアソン比を試みに求めると、 $\nu_d=0.22\sim 0.39$ が得られた。

(4) 低速度帯 弾性波探査において得られる低速度帯とは、周辺速度に比較して局部的に遅い部分を言い、通常ハギトリ線の段違いによってその存在が認められる。一般に、その分布幅、傾斜、速度などについては一義的に決定し難く、その間の見掛速度で表示するのが普通である。通常低速度帯は破砕帯を形成することが多くその場合の破砕の程度は、周辺岩盤の弾性波速度値と比較することによって判断される。特に、左側壁面の低速度帯の一部 ($V_p=2.5$ km/sec) は、地質観察とも一致している大きな破砕帯が存在している。

3.3. ボーリング孔内載荷試験

得られた試験結果として、荷重~変位関数の一例を図-8に示す。また、(2)式を用いて算定した変形係数 D_K の深度分布を図-9に示す。変形係数はおおむね D_K

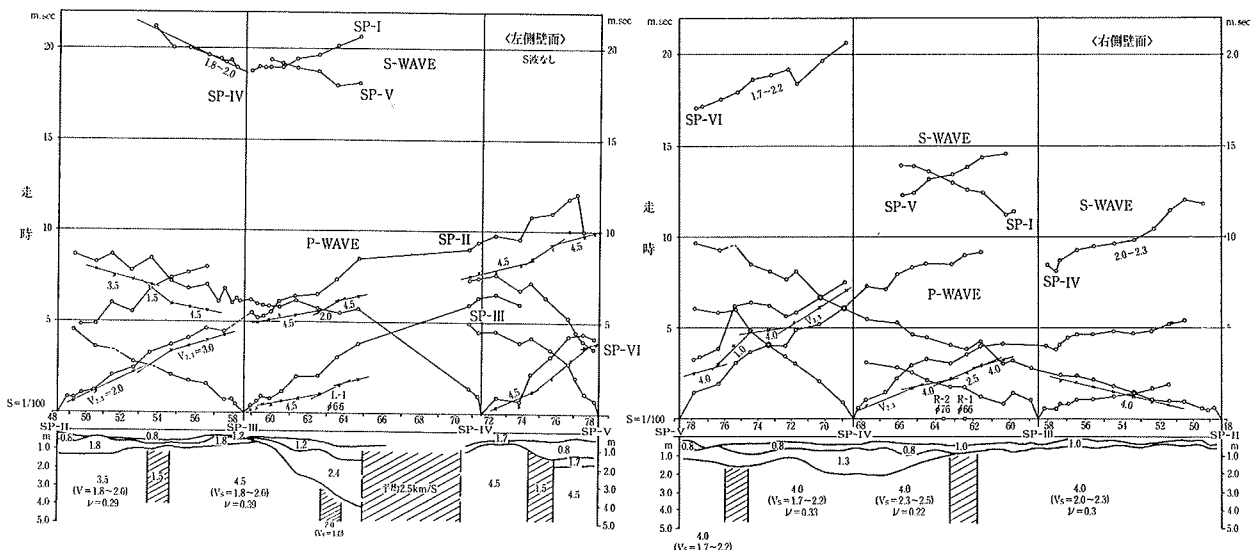


図-7 走時曲線および推定速度層断面図 (弾性波探査)

3,000~20,000 kgf/cm² の範囲で得られている。また、深度が深くなるにつれて徐々に増加し、D_K = 10,000 kgf/cm² 付近を越えると多少のパラッキはあるものの、深度に関係なくほぼ一定値を示すようになる。

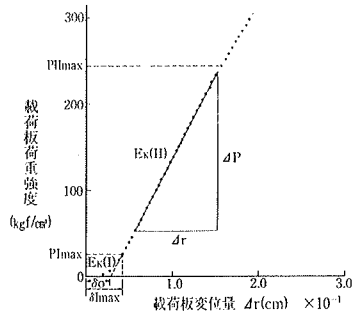


図-8 荷重—変位の一例

したがって、変形係数が D_K = 10,000 kgf/cm² 以上の得られる深度から健全な岩盤と考え、ゆるみ領域は、右側壁では 1.5 m、左側壁では 2.0 m 程度までと想定される。

3.4. ボーリング孔内超音波パルス試験

超音波パルス検知計より得られる現象波形は、主として 3 種類の岩盤状況に分類される。つまり、(1)測定区間に割れ目のまったくない場合、(2)微細な割れ目のある場合、(3)オープンクラックのある場合など、割れ目の分布状況を把握することができる。また、平均音速の深度分布を図-10に示す。

割れ目のない場合 (●印) の音速の平均値は、約 4.0 km/sec であるのに対し、微細な割れ目のある場合 (○印) の音速の平均値は約 3.7 km/sec となり、前者に比べ若干低い値を示している。右側壁での健全な岩盤の弾性波探査結果 4.0 km/sec とほぼ一致している。この試験によるゆるみ領域としては、側壁から 3.4 m 程度と推定できる。

3.5. ボアホールテレビ観測

ボアホールテレビの観測結果より得られた孔壁展開図および撮影写真をもとに、ボーリング孔壁の岩盤状況を開口亀裂、微小亀裂、剝離、および岩片などに分類 (亀裂間隔で 2 mm 程度を境界にして、開口亀裂と微小亀裂

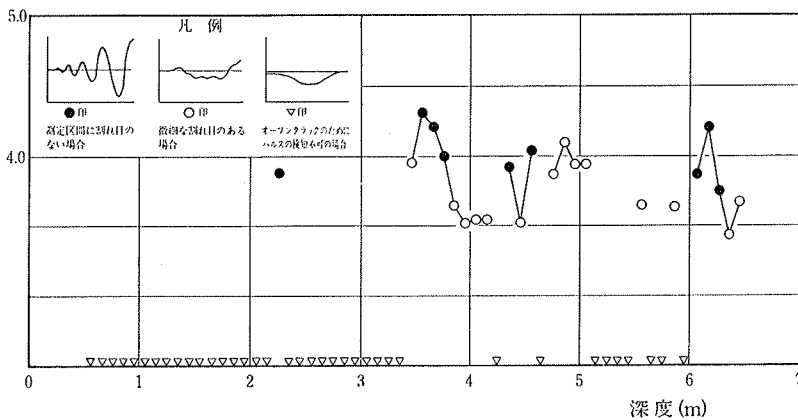


図-10 超音波パルス試験結果

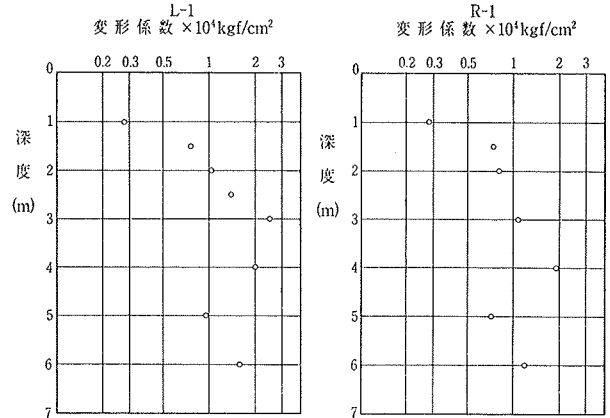


図-9 変形係数 D_K の深度分布 (孔内载荷試験)

とに分けている。) し、それらの分布状況について一連の解析を行なった。

ここでは、開口亀裂面積に注目し、(3)式により補正を加えた換算開口亀裂面積を求めて、その深度分布を図-11に示す。

$$S = \frac{2\pi r}{L_{\text{mean}}} \cdot S' \quad \dots\dots(3)$$

L_{mean}: 亀裂の平均周長 (mm)

(孔壁展開図においてキルピメーターにより測定する。)

r: ボーリング孔径 (mm)

S': 開口亀裂面積 (mm²)

S: 換算開口亀裂面積 (mm²)

これによると、深度 3.5~4.0 m 付近を境にして異った傾向を示していることがわかる。つまり、深度 3.5 m 以浅での結果は、深度 4.0 m、以深のものに比較して大きな間隔

(亀裂間隔) を有している。したがって、テレ

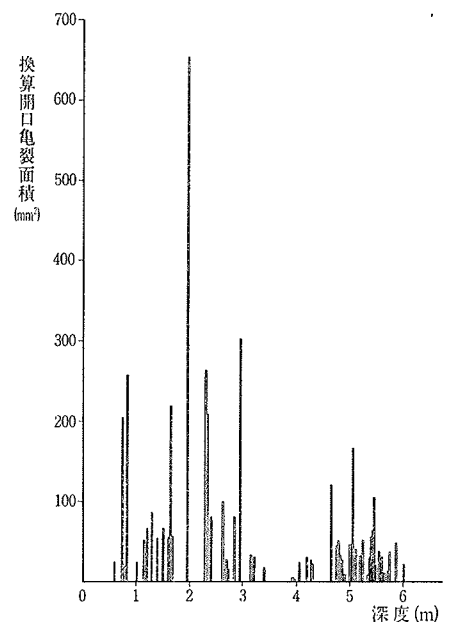


図-11 換算開口亀裂面積の深度頻度分布

ビ観測による結果では、ゆるみ領域は側壁から3.5 m程度と推定できる。また、深度50 cm ほどの亀裂本数(累計)の深度頻度分布によっても同様の傾向が得られている。

4. 室内岩石試験と F.E.M. 解析

4.1. 室内岩石試験

実施した岩石試験は、一軸圧縮試験、圧裂引張試験、超音波速度試験および一面せん断試験で、採取コアの許す限り各種の試験を行なった。得られた試験結果の一部を表一に示し、図-12, 13には変形係数 E_{50} と超音波速度 V_p の深度分布を示した。

岩石試験結果では、典型的な中硬岩で、しかもバラツキの大きいことが判明した。特に、圧縮強度についてはそのバラツキが顕著であった。また、変形係数と超音波速度の深度分布では、多少のバラツキがあるものの、深くなるにつれていずれも大きくなることがわかった。一方、前述した現位置試験結果と比較すると、変形係数は孔内載荷試験結果の5~10倍と大きい値が得られた。また、弾性波速度は深部では $V_p=3.5\sim 4.0$ km/sec とほぼ同程度であるが、ゆるみ領域部分では現位置(弾性波探索) $V_p=1.0\sim 2.0$ km/sec, 室内 $V_p=2.0\sim 3.0$ km/sec の結果が得られ、亀裂分布との相関性が表われていると推定される。

4.2. F.E.M. 解析

解析は平面ひずみ問題としてトンネル横断面で行なう。その解析領域は縦45 m, 幅30 mの半断面とする(ただし、要素は4節点および8節点アイソパラメトリ

圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	圧裂引張強度 σ_t (kgf/cm ²)	室内超音波速度 V_p (km/sec)	変形係数 E_{50} (kgf/cm ²)
280~1300	28~100	2.2~4.6	3.9~9.8 ($\times 10^4$)

表一 室内岩石試験結果

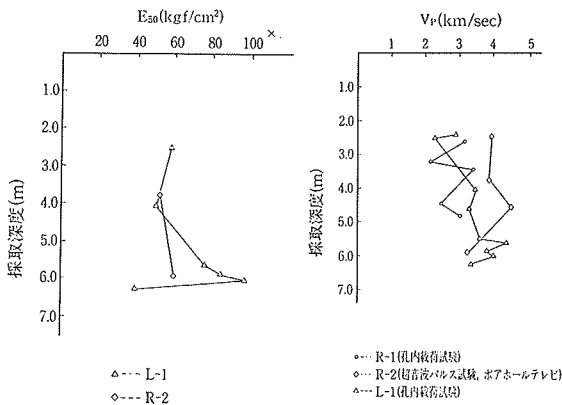


図-12 変形係数の深度分布

図-13 室内超音波速度の深度分布

ックの平面要素で分類し、各要素の降伏の判定はガウスの積分点で行なった。境界条件は両端の水平方向の変位を固定し、底面は水平、鉛直方向とも変位を固定する。降伏面の仮定は以下の通りである。

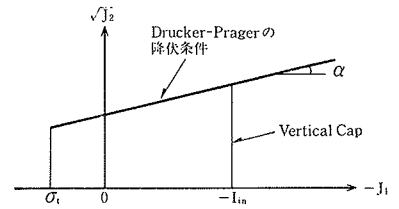


図-14 降伏面の仮定条件

圧縮側では図-14に示したような Drucker-Prager の降伏条件式 ($F = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - k$) に Cap をかぶせる。一方、引張り側については Tension cut-off 材料とする。図において、 J_1 と J_2 はそれぞれ応力の1次と2次の不変量、 σ_t は引張り強度を、 I_{in} は Initial cap position を意味している。解析に必要な入力定数は、主にボーリング孔内載荷試験結果を参考にして決めた。

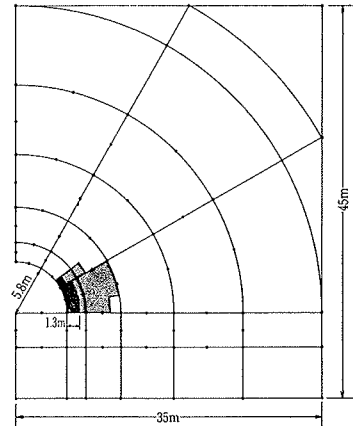


図-15 降伏域の分布

図-15は、トンネル上半を掘削したときに生じる降伏域を黒く塗りつぶして図示したものである。濃く塗りつぶした部分がせん断破壊を生じたところで、薄く塗りつぶした部分が体積減少によって降伏したところである。せん断破壊を生じたところを大義に解釈してゆるみ領域とすれば、濃く塗りつぶしたところがトンネル掘削によってゆるんだ部分と考えられる。

5. あとがき

トンネル周辺地山のゆるみ問題について、以上に述べた調査方法で試みた結果、各種現位置調査結果を適用することによってゆるみ領域をある程度把握することができた。

なお、ここに述べた調査の一部は東北大学工学部小林良二教授の御指導を得た。また、調査にあたり当社土木技術部村井喜一次長以下関係各位、桜井茂夫工事事務所所長以下関係各位に御協力を得た。さらに、川崎地質(株)の御協力も得た。ここに記して感謝の意を表します。