

(14) 岩盤内構造物の地震時挙動

大成建設 株式会社 横山正義 杉原 豊 浜田政則
泉 博允 石田 修

1. はじめに

岩盤内の構造物は、一般に地上に建設される構造物に比較して、耐震性に優れていると経験的に言われているが、地下貯油槽や地下原子力発電所などの重要構造物の岩盤内立地が実用化されるためには、岩盤内での地震波動の性質および建設される構造物の地震時挙動について、定性的かつ定量的な検討が必要であると考えられる。このような観点から釜石市郊外の岩盤トンネルにおいて、これらの岩盤内構造物を想定して、トンネル覆工の地震時ひずみとトンネル周辺岩盤の加速度の測定を主とする地震観測を実施している。本研究はこれらの観測結果にもとづき、トンネル覆工ひずみと岩盤ひずみの関係に着目して考察を行なったものである。さらにこの考察にもとづいて、岩盤内構造物の耐震設計法を提案した。

2. 観測手法

トンネルの横断面、縦断面ならびに観測計器の配置を図1～図3に示す。全長4670mのうち、観測を実施しているのは、釜石側坑口より約600m入った95mの区間である。この区間での土被りは110～135mである。トンネル周辺岩盤は一軸圧縮強度540～2250kg/cm²、せん断波速度2.7～3.6km/s（いずれもコア試験）の安定した粘板岩から成り、湧水は少ない。観測計器は、サーボ型加速度計と差動トランス型ひずみ計を使用している。加速度計はほぼ地表と見なせる坑口に1台、他の4台をトンネルを取り囲むように岩盤の中に設置した。ひずみ計はトンネル覆工の軸方向ひずみおよび横断面周方向のひずみを測定する。

3. 観測結果と考察

53年4月に観測を開始してから、主要な11個の地震を記録した。これらの地震の諸元を表1に示す。

3.1 記録の最大値による検討

図4～図9は観測された記録の最大値について整理したものであるが、これより以下のことがわかる。

- (1) 坑口の加速度は、トンネル周辺岩盤で測定された加速度の約2倍の値を示す。(図5)
- (2) トンネル周辺岩盤のみならず坑口においても、上下動と水平動の加速度の大きさの比率はほぼ1:1である。(図6)
- (3) トンネル覆工のひずみは、岩盤加速度10galに対して 1×10^{-6} 程度であるが、加速度と比較的比例関係にあるもの(S7, S10:図7)とそうでないもの(S9:図8)とがある。
- (4) 加速度記録を積分して得た速度と覆工ひずみ(S1:図9)はデータが少ないが比例関係にあると考えられる。

3.2 覆工のひずみとトンネルの変形

ここで検討の対象とした地震(IST06)は、本観測点で良好に記録された最大のもので宮城県沖地震の余震の1つである。マグニチュードは5.8、観測点からの震央距離は105kmである。この記録の加速度およびひずみ波形、スペクトルを図10～図13に示す。これより以下の考察が可能である。

- (1) 岩盤内の各測点で得た加速度の波形は、位相、最大値ともきわめて類似しており、トンネル周辺の岩盤はほぼ同様な挙動をしていると考えられる。この傾向はY、Z軸方向の加速度についても同様である。また坑口部(A4)の加速度は、岩盤の約2倍の大きさであり、特に短周期成分の増幅が著しいことがわかる。(図10)
- (2) 同一断面上の各位置で測定されたトンネル軸(X)方向ひずみ波形は互いに良く類似しており、トンネルは軸方向に一樣にひずんでいると考えられる。(図11)
- (3) 周方向ひずみは、その波形の位相およびスペクトル形状から、アーチ部45°のS7, S10のグループ

と、クラウンおよび側壁でのひずみのグループに別けられる。S7およびS10はトンネルの鉛直軸を是んで対称の位置にあり、両者の波形は位相が反転して類似していること、スペクトル形状が似かよっていることから、図14(a)に示すような逆対称の変形をしていると推定できる。(図12)

- (4) S6, S11の側壁のひずみ波形は位相が類似しており、最大値もほぼ等しい。さらに、クラウン部のひずみS9は位相が反転して類似していることから、図4(b)に示すような対称な変形をしていると考えられる。(図13)

3.3 覆工のひずみと岩盤のひずみ

実測したトンネル覆工のひずみ記録から、地震時にトンネルは図に示す変形をしていると考えられる。そこで、このような変形をおこさせる岩盤のひずみを、以下の仮定を設けて加速度記録をもとに算定した。

- i) 岩盤のひずみはトンネル空洞の影響のない、いわゆる自由地盤でのひずみとして算定する。
- ii) 見かけ上、鉛直(z)方向に伝ばする波動による岩盤ひずみは、波動が地表面で反射することを考慮する。
- iii) 見かけ上、地表面と平行に伝ばする波動は進行波のみとし、反射・屈折は考慮しない。したがってこの波動による岩盤ひずみは、粒子速度と伝ば速度との比で算出できるものとする。

図14(a)のような変形をトンネルに与える岩盤ひずみを、Z軸下方から伝ばし、かつ水平(y)方向に振動する波動によるものと仮定し、最も下方(A3)で測定されたY方向加速度記録をもとに、重複反射理論により岩盤ひずみ r_{yz} を求めた。重複反射理論によったのは、地表面での反射を考慮したためである。図12(a)(b)に岩盤ひずみ r_{yz} の波形、スペクトルを実測ひずみのそれらと共に示す。 r_{yz} は覆工ひずみ(S7, S10)の約2倍の大きさであるが、位相、スペクトルとも良く一致している。

図14(b)に示すような変形をトンネルに与える岩盤ひずみとして、直ひずみ r_{zz} と r_{yy} が考えられるが、両者が同時に作用しその影響が重ね合わされた結果、側壁やクラウンのひずみが発生する。そこで岩盤ひずみ r_{yy} と r_{zz} を、その割合を変え重ね合わせてみた。図13は両者の割合が0.5 : 0.5の場合である。合成したひずみは実測の覆工ひずみより若干小さいが、位相、スペクトルとも良好に一致している。

ここで算定した r_{zz} および r_{yy} は、それぞれzまたはy方向に見かけ上伝ばし、かつ振動する波動によるものと仮定した。 r_{zz} は r_{yz} と同様の方法で求めたが、 r_{yy} は水平方向に伝ばする波動と仮定して、粒子速度と伝ば速度の比から求めた。

4. 数値解析

以上のように、観測した加速度記録をもとに、地震波動の伝ば方向ならびに振動方向を仮定し、トンネルに変形を与える岩盤ひずみを算定した。そしてこれらの岩盤ひずみとトンネル覆工のひずみの間に、きわめて高い相関性が存在することがわかった。このことは岩盤内構造物も他の地中構造物と同様に、周辺地盤(岩盤)のひずみ(変位)に支配されることを示している。そこで本研究では、地震時の岩盤ひずみを地震時入力とみなして、解析を二段階に別けて検討する手法を用いた。すなわち

- (1) いわゆる自由地盤(岩盤)での岩盤ひずみ r_{yz} , r_{zz} , r_{yy} を重複反射理論などにより算出する。
- (2) トンネルを含めた十分広い領域を有限要素法によりモデル化し、境界から岩盤ひずみに相当する変位を強制入力する。

図15および図16に、そのモデルと上記の解析手法に従って求めた覆工クラウン(S9)のひずみ波形を示す。計算したひずみ波形と実測ひずみは、最大値、位相および波形全体の形状などの点で良好に一致している。

図15に示すようなモデルで境界からひずみ(変位)を入力した場合、一般に空洞表面の覆工には応力集中の効果のため、入力値より大きなひずみが生じる。しかしながら本研究では、前節で述べたように観測した覆工ひずみは算出した岩盤ひずみより小さいという結果を得ている。図15の有限要素モデルでは空洞周辺の岩盤のゆるみ域とクラウン部付近での岩盤と覆工の間の空隙を考慮することにより実測値と合致する結果を得ることができた。

5. あとがき

加速度記録をもとに算定した岩盤ひずみを地震時の入力としてとらえ、有限要素法により岩盤内構造物の地震時挙動をシミュレーションした。そして観測値と良好な一致を示す結果が得られた。したがって、ここで提案した岩盤ひずみの算定法ならび有限要素モデルを使った一連の解析手法は、岩盤内構造物の耐震設計として合理的かつ有用であると考えられる。末筆ながら本研究に対して、多大の御助言をいただいた東京大学生産技術研究所の久保慶三郎教授に深甚の謝意を表します。

参考文献

- (1) 杉原・浜田・横山；岩盤トンネルにおける地震観測，第34回土木学会年次学術講演会講演概要集
- (2) 杉原・浜田・石田；岩盤トンネルにおける地震観測と解析，第35回土木学会年次学術講演会講演概要集

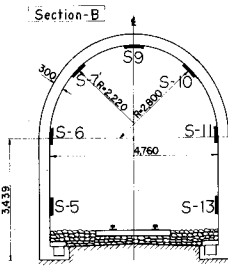


図1 横断面

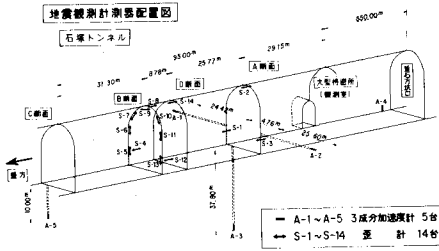


図3 測定配置図

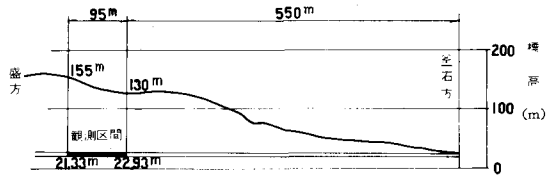


図2 縦断面

観測記録表

| 観測点 | 名称 | 観測年月日 | 震源 | 震源位置 (緯度, 経度) | 震源距離 (km) | 震源深さ (km) | 最大加速度 (100g) | 最大加速度 (1000g) | 最大加速度 (>10°) | 最大加速度 (>10°) | 最大加速度 (>10°) | 最大加速度 (>10°) |
|-----|-------|------------------|--------|-------------------------|-----------|-----------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 19706 | 53.5.13 2:41 | 岩手県沖 | N 40.2° E 142.5° | 4.9 | 12.0 | 5.0 | 3.0 | 1.1 | 0.18/0.49 | | |
| 2 | 19701 | 53.5.16 16:35 | 伊豆半島北沖 | N 40.9° E 141.5° | 2.8 | 19.0 | 5.8 | 2.6 | 1.4 | 0.18/0.38 | 01.8 | |
| 3 | 19702 | 53.6.12 17:06 | 岩手県沖 | N 38.2° E 142.8° | 4.0 | 12.0 | 5.8 | 7.4 | 3.8 | 0.22/0.31 | 観測 | |
| 4 | 19705 | 53.6.12 17:14 | * | N 38° 0' E 142° 1.7' | 4.0 | 12.0 | 7.4 | | | | 本震 | |
| 5 | 19704 | 53.6.12 18:53 | * | N 38° 0' E 141.5° | | | 7.7 | 3.2 | 0.12/0.32 | | | |
| 6 | 19705 | 53.6.14 20:34 | * | N 38.2° E 142.3° | 4.0 | 11.0 | 6.3 | 11.9 | 5.2 | 0.28/0.79 | 本震 | |
| 7 | 19704 | 53.6.21 18:24 | * | N 38.2° E 141.8° | 4.0 | 10.0 | 5.8 | 22.5 | 8.9 | 0.46/0.87 | 03.3 | |
| 8 | 19707 | 54.7.31 18:38 | 伊豆半島北沖 | N 39° 2' E 141.6° | 5.0 | 2.0 | 4.8 | 23.8 | 6.4 | 0.67/0.59 | 01.4 | |
| 9 | 19706 | 53.11.27 8:49 | 伊豆半島北沖 | N 40° 2' E 141.6° | 7.0 | 10.0 | 5.7 | 5.0 | 4.0 | 0.33/0.44 | | |
| 10 | 19708 | 54.1.19 3:17 | 三浦半島沖 | N 38.0° E 142.0° | 3.0 | 13.5 | 6.9 | 14.3 | 7.5 | 0.90/1.0 | 11.8 | |
| 11 | 19710 | 54.1.23 13:58 | 北緯緯度不明 | N 40.2° E 142.2° | 8.0 | 3.0 | 6.9 | 14.5 | 7.1 | 0.32/0.80 | | |

表1 観測記録

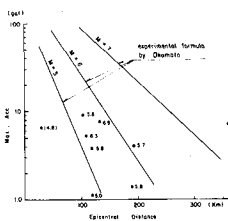


図4 最大加速度

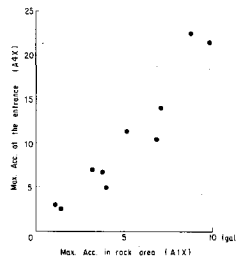


図5 坑口と岩盤中の加速度

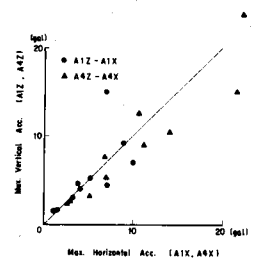


図6 上下方向加速度と水平方向加速度

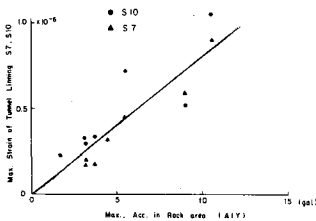


図7 加速度とひずみ (S7, S10) の関係

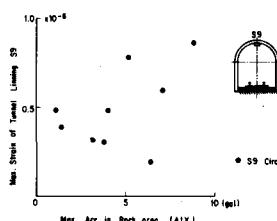


図8 加速度とひずみ (S9) の関係

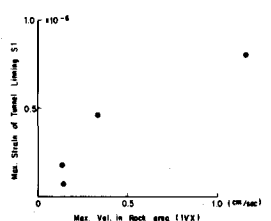


図9 速度とひずみ (S1) の関係

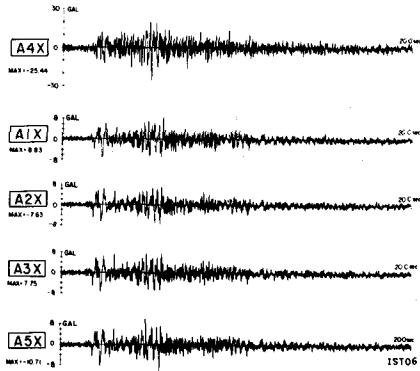


図 10 (a) X 方向加速度 (波形)

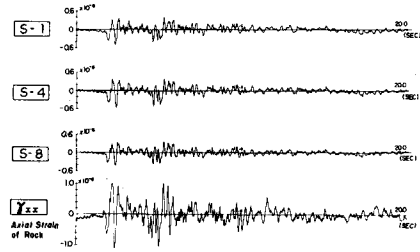


図 11 軸方向ひずみ (波形)

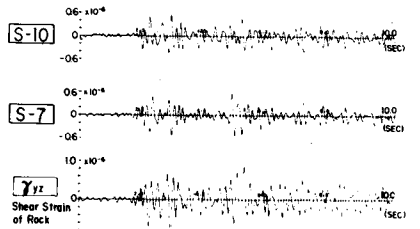


図 12 (a) S 7 , S 10 (波形)

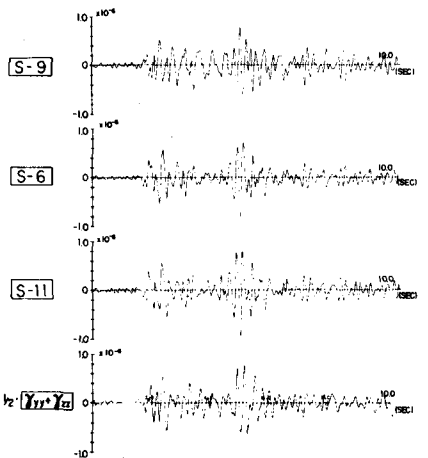


図 13 (a) S 9 , S 6 , S 11 (波形)

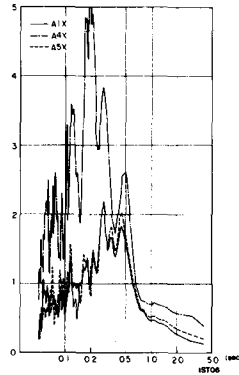


図 10 (b)
X 方向加速度
(スペクトル)

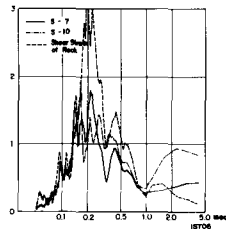


図 12 (b) S 7 , S 10
(スペクトル)

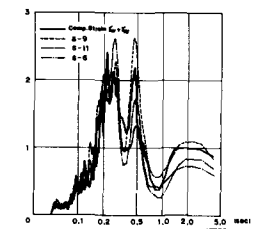


図 13 (b) S 9 , S 6 , S 11
(スペクトル)

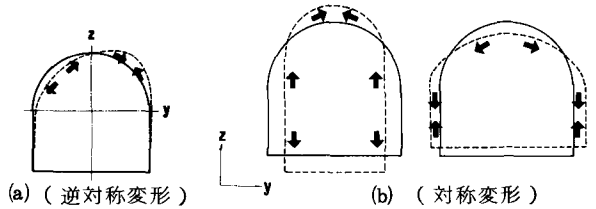


図 14 トンネルの変形

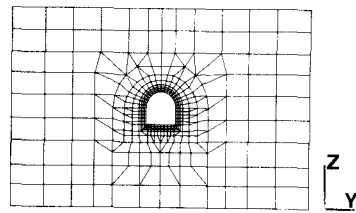


図 15 トンネルの解析モデル図

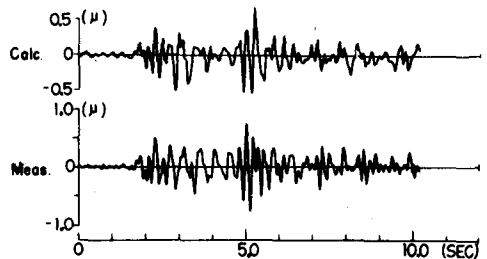


図 16 計算ひずみと実測ひずみ
覆工クラウン (S9)