

(96) 山岳トンネルにおける空洞および周辺岩盤の地震時挙動
—境界要素法を用いた地震観測のシミュレーション—

間組技術研究所 正会員 山 口 靖 紀
間組技術研究所 正会員 辻 田 満
間組技術研究所 正会員 ○ 脇 田 和 試

1. まえがき

岩盤内空洞の地震時安定性を論ずる場合には、空洞の地震時挙動と周辺岩盤の挙動の関係を観測データの分析およびシミュレーションによって把握し、空洞の地震時挙動を定量的に予測する必要がある。しかしながら、現状では不明な点も多く、この種の問題を明らかにするための観測データも不足している。

筆者らは国鉄と共同で実施している伊東線新宇佐美トンネルにおける地震観測データに基づいて空洞および周辺岩盤の地震時挙動の検討を行い、空洞の変形は周辺岩盤の挙動に左右され、空洞の地震時ひずみは周辺岩盤の粒子速度と強い相関を示すことを明らかにしてきた^{1)・2)}。

筆者らはさらに、境界要素法による動的解析手法を用いて地震観測結果のシミュレーションを行った。本報では、まず定常応答解析より得られた空洞の変形モードの分析結果を述べる。次に過渡応答解析結果と観測結果の比較より、空洞および周辺岩盤の地震時挙動について述べる。また解析手法の妥当性についても言及する。

2. トンネルの概要と観測方法

伊東線新宇佐美トンネルは延長 3000mの単線トンネルで、内空断面は内径6mの円形断面でコンクリート覆工厚は30cmとなっている。主な観測は山の被り厚さが約260mの山岳中央部100m区間で実施している。観測区間は主に変質玄武岩で構成されており、疎密波速度 V_p およびせん断波速度 V_s はそれぞれ 2.3~3.2km/sec および 1.1~1.6km/sec となっている。図-1に地震観測計器全体の配置図を示し、図-2にトンネル覆工部に取り付けたひずみ計および岩盤内に埋設したひずみ計の配置図を示す。なおトンネル覆工部は 12mピッチに打ち継ぎ目が設けられており、S-1~S-8とS-9~S-10は異なるエレメントに取り付けられている。

加速度計はサーボ型(SA-355)で、測定振動数範囲は 0.1~30Hz、最小分解能は 0.01galである。また、ひずみ計は差動トランス型で、トンネル覆工部(DS-100)、岩盤内(DIS-300)とも測定振動数範囲、最小分解能はそれぞれ 0.1~30Hz, 0.03×10^{-6} となっている。なお加速度計A-1~A-8の測定成分はX, Y, Zの三成分である。ここでX方向はトンネル軸方向(N13°23'35"E), Y方向は軸直角方向(S75°36'25"E), Z方向は鉛直方向である。

地震波の集録はデジタル地震波集録装置(SAMTAC-120D-64)で行っている。集録装置の入力フィルターはDC~30Hzであり、サンプリング時間は10m sec(100Hz)となっている。

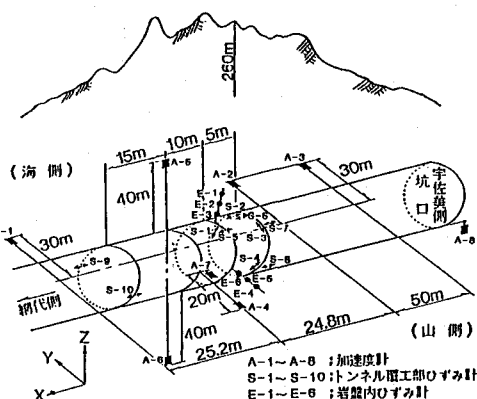


図-1 地震観測計器配置図

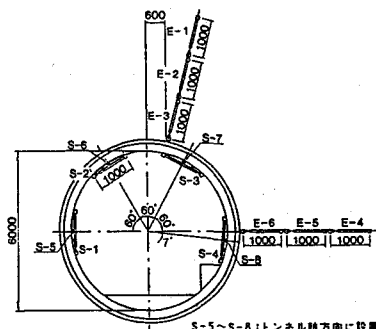


図-2 トンネル覆工部および岩盤部ひずみ計配置図(網代側から見た断面)

3. 境界要素法による動的応答解析

近年、境界要素法を岩盤内空洞の波動伝播問題に適用することの有用性が議論されている³⁾。境界要素法における要素分割はモデル境界上のみでよく、本観測サイトのように空洞の径6mに比べて地表面までの被り厚さが260mと非常に大きい場合でも、空洞周辺岩盤をほぼ均質とみなせば、空洞部と地表面においてのみ要素分割を施せばよいことになり、空洞部形状の詳細なモデル化が可能になる。また、境界要素法は無限領域を取り扱うことができるため、入力基盤面および側方境界の設定が不必要となる。今回は当社で開発した境界要素法を用いた動的応答解析プログラム(DCAVERN)を採用した。このプログラムはまず境界要素法を用いて、振動数一定の調和波を入射波とする定常応答解析を行い、伝達関数を求める。次に入力波として用いるランダム波をフーリエ変換し、入力波のフーリエスペクトルを求める。このフーリエスペクトルに、定常応答解析で得られた伝達関数を乗じ、ランダム波に対する過渡応答のフーリエスペクトルを求め、これを逆変換して応答の時刻歴を求める。なお対象材料は等方な線形弾性体であり、材料の内部減衰は考慮していない。

ところで本観測サイトにおける空洞に対する地震動の入射方向は、地震動の主軸の検討によりほぼ鉛直方向に規定し得ることが明らかとなっている¹⁾。

このことを踏まえ、解析モデルに対する入力地震動としては空洞下方40mの点で観測された加速度記録の上下動成分を疎密波として鉛直方向に与え、同じ点の水平成分をせん断波として鉛直方向に与えることとした。なお加速度記録としては、1983年8月8日に神奈川・山梨県境で発生したマグニチュード6.6の地震の際の観測記録を用いた。

空洞境界は中間節点を持つアイソパラメトリック要素で分割し、分割数は覆工部外側、内側とも30とした。

4. 調和波入力による定常応答解析

現在までの観測記録においては空洞のひずみの支配的な振動数領域は0.2~2Hzとなっている。1Hzの調和波(振幅1m)を疎密波およびせん断波として鉛直方向に入射した場合の空洞の変位分布形状をそれぞれ図-3および図-4に示す。また、空洞のひずみ分布形状をそれぞれ図-5および図-6に示す。これらの変位およびひずみは、調和波入力に対する複素応答振幅の実数部と虚数部の両者で示した。また、これらの図における上段(a)は地表面を空洞の260m上方に上方境界として設けた場合の変位あるいはひずみ分布であり、下段(b)は上方境界を考慮しない場合の変位あるいはひずみ分布である。これらの図より(a)、(b)とも大きさの差はあるがほぼ同様の分布傾向を示すことがうかがえる。

本解析における変位とひずみの実数部、虚数部は、それぞれ入射波の腹が入射位置(空洞下方40m)を通過した場合および入射波の節が入射位置を通過した場合を示すものである。

なお調和波入力による動的応答解析で得られる空洞の変位およびひずみは0.2~2Hzにおける1Hz以外の振動数に対しても同様な分

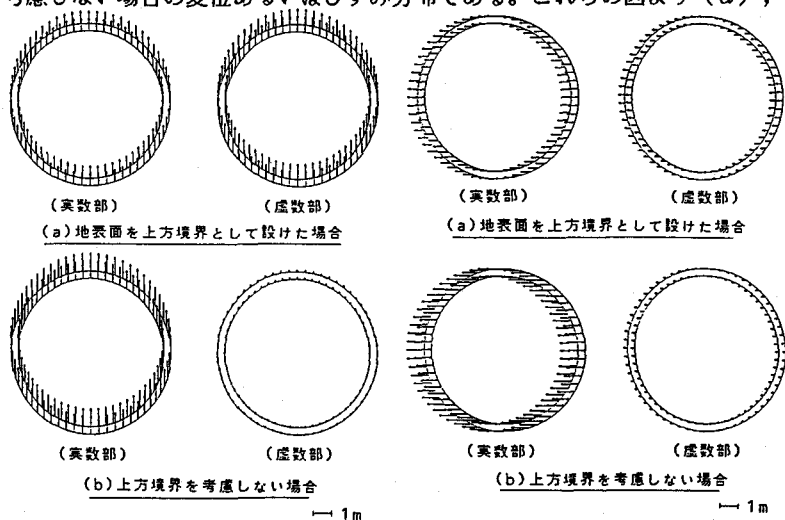


図-3 定常応答解析における空洞の変位分布形状(疎密波入力, 1Hz, 振幅1m)

図-4 定常応答解析における変位分布形状(せん断波入力, 1Hz, 振幅1m)

布形状になる。

図-3および図-4より、空洞は波長の長い疎密波およびせん断波の上昇に支配され、マクロ的にみればほぼ剛体的に挙動することがうかがえる。また、図-5および図-6のひずみ分布より、空洞は疎密波の鉛直方向への上昇に対しては一次の伸縮モードを示し、せん断波の鉛直方向への上昇に対しては一次のせん断モードを示している。

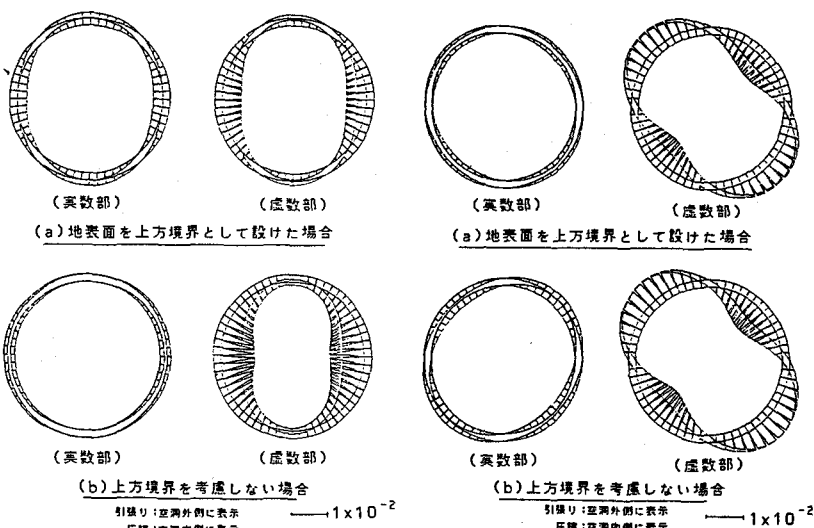


図-5 定常応答解析における空洞円周方向ひずみ分布形状 (疎密波入力, 1 Hz, 振幅 1 m) 図-6 定常応答解析における空洞円周方向ひずみ分布形状 (せん断波入力, 1 Hz, 振幅 1 m)

5. 観測地震動入力による過渡応答解析

周辺岩盤の測点 A-7 の加速度波形およびひずみ計 S-1 ~ S-4, E-4 ~ E-6 で得られたひずみ波形と、解析で得られたそれらに対応する波形を図-7 に示す。またそれらのフーリエスペクトルを図-8 に示す。図-7, 図-8 の解析結果については、空洞上方境界を考えた場合、考えない場合の両者を示した。

これらの図において、空洞上方境界として地表面を考慮した場合、考慮しない場合の両者を比較すると前者の方が波形、周波数特性とも観測で得られる値と良い対応を示している。

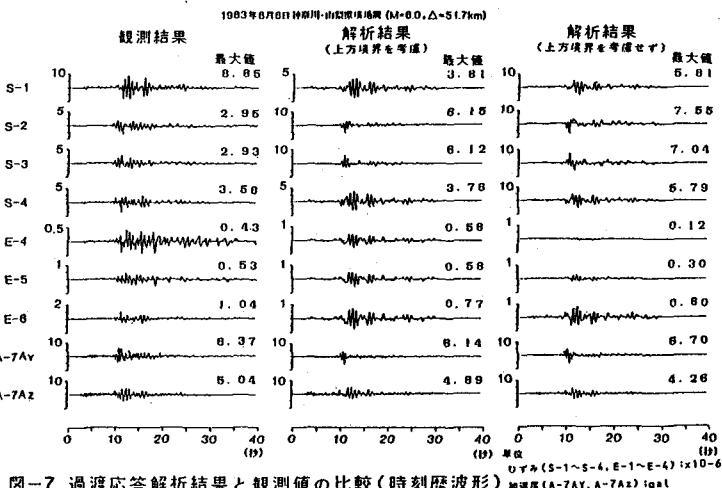


図-7 過渡応答解析結果と観測値の比較 (時刻歴波形) 加振波 (A-7Ay, A-7Az) 1 gal

表面からの波動の反射の影響を受けていると考えられ、解析には地表面を考慮する必要があると考えられる。

表-1 は、空洞および周辺岩盤のひずみの最大値について、観測値と空洞上方境界を考慮した解析値を比較したものである。表-1 には、せん断波を入力した場合の解析結果と疎密波を入力した場合の解析結果を併記した。表 1 より以下の事項がうかがえる。

- ① 空洞のひずみのうちクラウン部 S-2 および S-3 についてはせん断波の上昇による一次のせん断変形によるものが支配的である。
- ② 空洞のひずみのうち、側壁部 S-1 および S-4 については、疎密波の上昇による一次の伸縮変形によるものが支配的である。
- ③ 空洞上方の周辺岩盤の E-4, E-5, E-6 については疎密波の上昇による軸ひずみが支配的である。

なお表-1 に示すように周辺岩盤の加速度 (A-7Ay, A-7Az), 周辺岩盤のひずみ (E-4, E-5, E-6) および空洞ひずみ (S-4) は、解析値と観測値で良い対応を示している。しかし空洞ひず

みのうちS-1, S-2, S-3の最大値については解析値と観測値は良い対応を示していない。この原因については今後明らかにすべきであるが波形特性およびスペクトル特性は良い対応を示しているところから、本解析によって、境界要素法が空洞の地震時挙動を説明する手法として有効であることがほぼ明らかとなったと考えられる。

6. まとめ

空洞の観測ひずみと周辺岩盤の観測地震動の比較検討および境界要素法による動的応答解析より、空洞のひずみと周辺岩盤の挙動について以下の事項が考えられる。

境界要素法による定常応答解析によると疎密波の鉛直方向への上昇によって空洞には一次の伸縮モードが発生し、せん断波の鉛直方向への上昇によって一次のせん断モードが発生する。

また、過渡応答解析から、空洞側壁に発生する円周方向ひずみは疎密波の上昇によって発生するものであり、クラウン部に発生する円周方向ひずみはせん断波の上昇によって発生するものが支配的となっている。

これらの解析結果は観測結果から得られる定性的な傾向と一致している。

以上より空洞の変形は波長の長いせん断波および疎密波の鉛直方向に伴う一次の変形モードに支配され、観測ひずみから推定した空洞変形モードは、これらが重なりあったものになっていると考えられる。また、境界要素法は岩盤内空洞の地震時挙動を説明する手法として有効であると言える。

7. あとがき

今後は、データの蓄積を待ってさらに詳細な検討を行う必要がある。なお本観測は国鉄と共同で実施しているものであり、観測結果の公表を快くお許しいただいた日本国有鉄道東京第二工事局および鉄道技術研究所の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 山口, 辻田, 脇田, 新井: 山岳トンネルにおける空洞および周辺岩盤の地震時挙動—観測地震動の主軸と三成分特性—, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.126~130, 1985年 2月
- 2) 山口, 辻田, 脇田: 山岳トンネルにおける空洞および周辺岩盤の地震時挙動—空洞ひずみと周辺岩盤の挙動の関係について—, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.241~245, 1986年 2月
- 3) 丹波, 小林, 福井, 東: 積分方程式による埋設物周辺の過渡応力の解析, 土木学会論文報告集 248号, pp.4~53, 1976年 4月

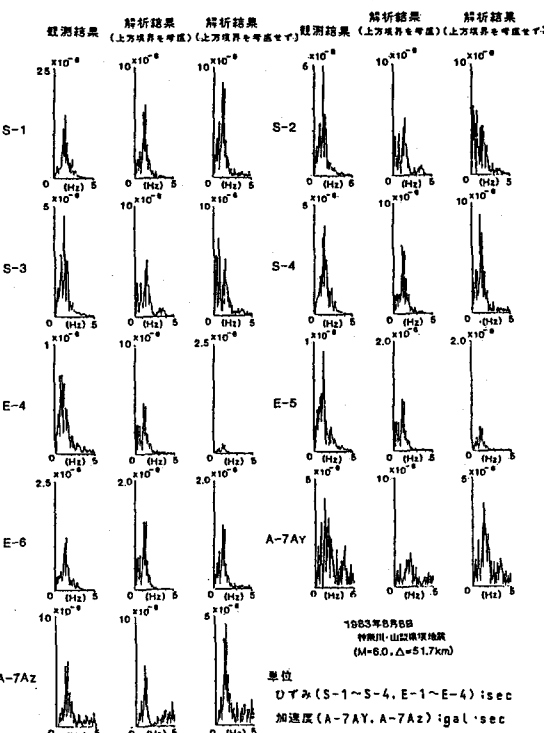


図-8 過渡応答解析結果と観測値の比較 (フーリエスペクトル)

表-1 解析ひずみと観測ひずみの比較

		解 析 結 果 (上方境界を考慮)			観 測 値
		疎密波のみ を入力	せん断波のみ を入力	疎密波とせん 断波を入力	
空 洞 ひ ず み	S-1	3.80	0.05	3.81	8.85
	S-2	0.61	6.13	6.15	2.95
	S-3	0.61	6.13	6.12	2.95
	S-4	3.73	1.55	3.75	3.58
周 辺 岩 盤 ひ ず み	E-4	0.51	0.02	0.58	0.43
	E-5	0.51	0.02	0.58	0.53
	E-6	0.73	0.02	0.77	1.04
	E-4	2.55	0.03	2.66	—
周 辺 岩 盤 加 速 度 (gal)	E-5	2.71	0.02	2.84	—
	E-6	3.19	0.02	3.34	—
	E-4	0.03	3.92	4.06	—
	E-5	0.03	3.92	4.06	—
周 辺 岩 盤 加 速 度 (gal)	E-6	0.02	3.42	3.57	—
	A-7Ay	0.14	6.14	6.13	6.37
周 辺 岩 盤 加 速 度 (gal)	A-7Az	5.0	0.31	4.89	5.04

(96) Seismic Behavior of a Rock Tunnel
-Dynamic Response Analysis using Boundary
Element Method-

Yasuki YAMAGUCHI
Mitsuru TSUJITA
Kazushi WAKITA

(Technical Research Institute, HAZAMA GUMI)

In recent years, new type of structures such as underground power stations, storage caverns for high level radioactive nuclear waste disposal, or oil storage caverns have been planned.

In Japan, for these structures which are to be constructed in the seismic region, reliable seismic design should be achieved based on the observed data.

In order to investigate the behavior of a rock cavern when it is subjected to an earthquake, earthquake observations have been carried out in the Shin Usami Tunnel of JNR's Ito Line, located in Ito City of Shizuoka prefecture.

The boundary element method was employed for simulating the seismic behavior of a cavern. In this simulation, the dynamic response analysis using harmonic wave as input motion and that using random wave as input motion were carried out.

From this simulation, it was clarified that, in the cross section of the tunnel, the strain triggered by the elliptical deformation accompanying the propagation of the primary wave in the upward direction is prominent in the side wall, and the strain triggered by the shearing deformation accompanying the propagation of the shear wave in the upward direction is prominent in the crown.