

(27) 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について —

間組技術研究所 正会員 山 口 靖 紀
同 上 辻 田 満
同 上 ○脇 田 和 試
同 上 新 井 伸 夫

1. まえがき

近年重要構造物を岩盤内空洞に立地する検討が各方面で進められている。しかしながら、その地震時挙動を論ずる場合の観測データに基づいた現象の把握は十分に行われているとは言えない。そこで著者らは日本国有鉄道・伊東線新宇佐美トンネルにおいて国鉄と共同で地震観測を実施し、そのデータを用いて空洞および周辺岩盤の地震時挙動について検討を進めている。¹⁾

本報ではその内、観測地震動の主軸と三成分特性について報告するものである。空洞および周辺岩盤の地震時の安定性を検討する場合には地震動を三次元的に把握する必要がある。そのためには観測地震動に基づいて地震動の主軸および三成分特性を明らかにすることが重要な課題となる。

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静岡県伊東市の日本国有鉄道伊東線・来宮～伊東間に新設される延長3000mの単線トンネルである。トンネル内空断面は内径6mの円形断面でコンクリートの覆工厚は30cmである。地震観測区間は坑口より約1500m入った100m区間で山の被り厚さは220～260mである。観測区間は主に変質玄武岩で構成されており、P波速度 V_p およびS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。また一軸圧縮強度は70～163kgf/cm²の間にある。図-1に新宇佐美トンネルの概要と観測区間を示す。

地震観測は宇佐美側坑口（加速度計1台）と観測区間（加速度計7台、トンネル覆工部ひずみ計10台、岩盤内ひずみ計6台）で実施している。図-2に地震観測計器配置図を示す。なお加速度計A-1～A-8の測定成分はX, Y, Zの3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（S76°36'25"E）、Z方向は鉛直方向である。加速度計はサーボ型（SA-355）で測定振動数範囲、最小分解能はそれぞれ0.1～30Hz、0.01galである。測定レンジは岩盤内で±30gal坑口で±100galに設定した。

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10msec（100Hz）となっている。計測装置はトンネル下端より下方40m位置に設置したA-6加速度計の三成分の内の1つが0.3galを受感した時に起動するように設定した。なお記録は遅延装置によってさらに3秒前にさかのぼって行われる。

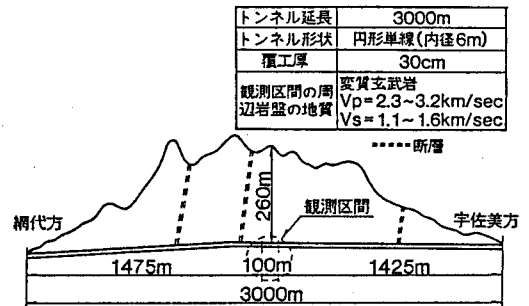


図-1 トンネルの概要と観測区間

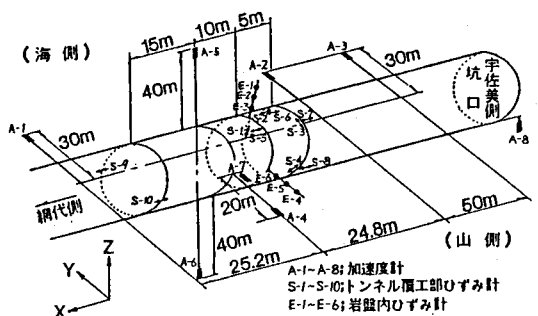


図-2 地震観測計器配置図

3. 観測記録の概要

1983年7月より地震観測を開始して1年3ヶ月を経過した時点で15個の地震を観測した。図-3に観測地震の震央位置を示し、表-1に観測記録の一覧を示す。また観測波形の一例として1983年8月8日に集録した地震における岩盤内(A-4)の加速度波形のX, Y, Z成分を図-4に示す。

4. 観測地震動の主軸

三次元的な動きを呈する地震動を互いに直交する相関の無い三つの振動方向に分解したとき、その三つの振動方向は地震動の主軸と呼ばれ、それぞれ振動エネルギーが最大、中間、最小になる軸となる。

観測計器によって得られた地震動加速度の三成分(鉛直および水平二成分)より上記三つの主軸およびその主軸に関する観測値のバラツキの程度を求めることによって観測地震動の特性を三次元的に把握することができる。つまり最大主軸方向を把握することによって地震動の振動エネルギーが最大になる方向と観測地震動の三成分(鉛直および水平二成分)の方向の関係が明らかとなり、その主軸に関する観測値のバラツキの程度を把握することによって、観測地震動の三成分(鉛直および水平二成分)が最大主軸方向の振動に支配される度合いが明らかとなる。

これらを種々の観測地震動において検討すれば、地震動の三成分がどの程度主軸方向に影響され、地震動として鉛直および水平動を設定する際に、主軸に関する相関性をどの程度考慮すべきかが明確となる。

ここでは代表的な観測地震としてマグニチュード5以上の4地震(No.3, No.4, No.5, No.9)を選び、これらについて岩盤内地震動の主軸と主軸回りの観測値のバラツキの程度を検討した。地震動の主軸計算は星谷らによって提案されている相互パワースペクトルを用いる方法のうち、①全エネルギー行列を対角化する主軸(全エネルギーを最大、中間、最小とする固定した主軸)、②時間 t で変動する主軸(時間 t における相互パワースペクトルを最大、中間、最小とする時間 t で変動する主軸)を用いた。²⁾ なおここで全エネルギーは主軸に沿うパワースペクトルを周波数領域および時間領域で積分したものである。

表-2に岩盤内(A-4)における全エネルギー行列を対角化する主軸の水平角および鉛直角を示し、図

表-1 地震観測記録一覧

地震番号 No.	観測年月日	マグニチュード	震源距離(km)	震源深さ(km)	観測値					
					水平最大加速度(gal)		最大ひずみ(μ)		観測方向	
					岩盤内	坑口	掘工	掘工	掘工	掘工
1	1983.7.13	4.2	123.1	73	0.49	1.53	0.07	0.03		
2	1983.7.27	2.9	18.8	15	1.33	0.78	0.20	0.04		
3	1983.8.8	6.0	51.7	22	7.42	15.21	8.84	1.77		
4	1983.12.30	5.4	166.9	60	0.80	2.28	0.41	0.10		
5	1984.1.1	7.5	328.1	340	1.12	2.09	2.22	0.65		
6	1984.1.12	3.3	25.0	10	1.42	2.49	0.35	0.06		
7	1984.2.13	5.3	130.0	90	0.84	1.89	0.30	0.13		
8	1984.2.14	5.3	62.5	20	0.99	2.77	0.87	0.16		
9	1984.3.6	7.9	656.3	400	2.57	2.94	3.10	1.61		
10	1984.6.26	4.6	50.5	20	2.39	3.29	0.62	0.09		
11	1984.8.13	4.8	66.4	21	1.55	4.76	0.44	0.06		
12-1	1984.9.1	3.0	3.3	0						
34	9.16	4.7	23.0	21	15.03		2.86	0.50		
13-1	1984.9.14	6.9	163.6	0	1.89	8.29	1.97	0.54		
13-2	1984.9.15	6.2	167.8	0	1.71	4.29	1.80	0.33		
14	1984.9.19	6.8	278.6	46	2.01	5.31	2.25	0.37		
15	1984.9.26	3.7	19.3	12	5.58	3.38	0.31	0.10		

* 解析に用いている地震

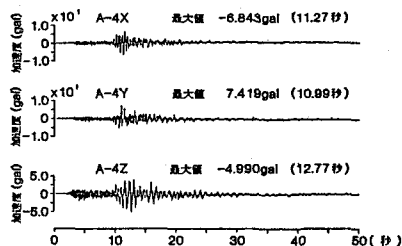


図-4 岩盤内の加速度波形(No.3地震)

表-2 主軸方向(全エネルギーを対角化) 単位:度

地震番号 No.	最大主軸		中間主軸		最小主軸	
	水平角	鉛直角	水平角	鉛直角	水平角	鉛直角
3	37.8	59.0	-79.5	52.6	-25.0	127.2
4	-7.1	84.4	83.2	86.7	-156.8	6.5
5	71.8	96.0	-18.8	96.3	-154.7	171.3
9	25.4	91.4	-64.5	85.4	-81.9	175.2

表-3 主軸方向の全エネルギーとその比

地震番号 No.	主軸方向の全エネルギー(gal ² sec)			全エネルギーの比	
	最大主軸	中間主軸	最小主軸	λ_2/λ_1	λ_3/λ_1
3	3.719	2.842	2.355	0.76	0.63
4	0.031	0.018	0.015	0.58	0.48
5	0.405	0.377	0.349	0.93	0.86
9	2.459	1.061	0.582	0.43	0.24

— 5 に時間 t で変動する主軸の水平角および鉛直角を示す。
 また図— 6 に No. 3 地震における空洞周辺岩盤の各点 (A-1 ~ A-7) における最大主軸の水平角および鉛直角の時間変化を示す。ここで水平角は観測地点における X 軸から Y 軸の方向に向かう角度であり、鉛直角は Z 軸から X-Y 平面向かう角度である。

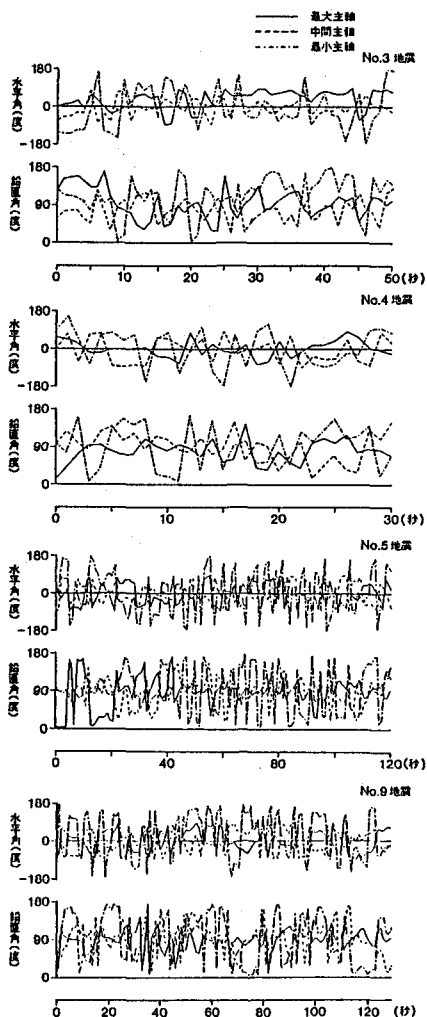
表— 3 に岩盤内 (A-4) における全エネルギー行列を対角化する主軸における各主軸方向の振動の全エネルギー $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$), および全エネルギーの各主軸間の比 $\lambda_2 / \lambda_1, \lambda_3 / \lambda_1$ を示す。最大主軸の回りの観測値のバラツキの程度は $\lambda_2 / \lambda_1, \lambda_3 / \lambda_1$ の大きさを判断でき、 λ_2 / λ_1 あるいは λ_3 / λ_1 が 1 に近ければバラツキが大きく、零に近ければバラツキが小さいと考えられる。これらの図・表より以下に示す事項が明らかとなった。

- ① 図— 5 より地震動の主軸は水平角、鉛直角とも時間による変動が大きく、特定の方向に規定するのはむづかしいことがうかがえる。
- ② 図— 6 より空洞周辺岩盤の各点における最大主軸の時間変動はほぼ等しくなっている。このことより、観測区間における空洞周辺岩盤の各点では地震動は水平方向および鉛直方向にほぼ同位相で振動していると考えられる。
- ③ 従来、地震動の主軸に関しては、地震動の全エネルギーが最大となる軸が水平に近く、その方向は観測地と震央を結ぶ方向あるいはその直角方向に近いと言われているが、^{2) 3)} 今回の観測では、全エネルギー行列より求めた岩盤内の最大主軸は表— 2 より必ずしも震央方向あるいはその直角方向と良い対応を示していない。また最大主軸は No. 3 地震以外はほぼ水平面内にあるといえるが、現段階では必ずしも水平面内に規定することはできない。
- ④ 表— 3 より、どの地震においても $\lambda_2 / \lambda_1, \lambda_3 / \lambda_1$ の値はそれぞれ 0.43 ~ 0.93, 0.24 ~ 0.86 と大きな値を示しており最大主軸回りのバラツキは大きいと考えられる。

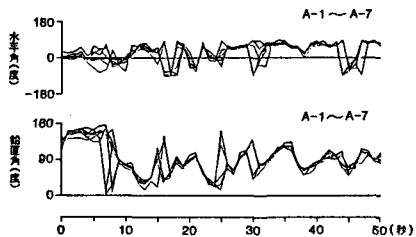
5. 観測地震動の三成分間の相関

空洞周辺岩盤の地震動の三成分 (鉛直および水平二成分) 間の相関の度合を調べるために、No. 3 地震について岩盤内 (A-4) の加速度の各々の成分間のコヒーレンス、相互相関係数および軌跡図を検討した。

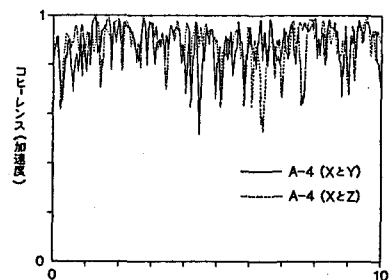
水平二成分 (X, Y) 間、水平成分と鉛直成分 (X, Z) 間のコヒーレンスおよび相互相関係数をそれぞれ図— 7, 図— 8 に示す。また図— 9 に X-Y, X-Z, Y-Z 平面にお



図— 5 主軸方向の時間変化 (A-4)



図— 6 最大主軸の水平角と鉛直角 (No. 3 地震)



図— 7 コヒーレンス (No. 3 地震)

ける0～30秒間の軌跡図を示す。これらの図より以下に示す事項が明らかとなった。

- ① 各周波数成分の相互相関係数となるコヒーレンスは水平二成分間、および水平成分と鉛直成分間ともおおむね0.8以上となっているが、周波数成分によっては0.5程度となるものもある。
- ② 波形全体の相関を示す相互相関係数は、水平二成分間および水平成分と鉛直成分間とも、最大でも0.2程度と低い値を示している。
- ③ 0～30秒間の軌跡図より、地震動は三次元的にかなりランダムな動きを呈する様子がうかがえる。

なお上記①～③は他の地震（No.4, No.5, No.9）についても同様にうかがえる。

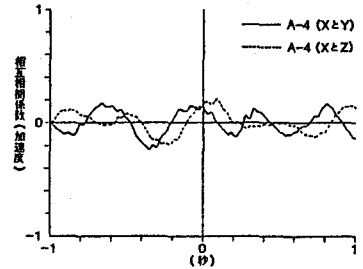


図-8 相互相関係数（No.3地震）

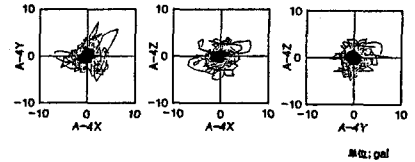


図-9 岩盤内の軌跡図（No.3地震）

6. 考察

空洞周辺岩盤における観測地震動の主軸の検討および三成分（鉛直および水平二成分）間の検討より、周辺岩盤における地震動の特性として以下の事項が考えられる。

- ① 空洞周辺岩盤における地震動の振動エネルギーが最大となる最大主軸の方向は、継続時間内で大きく変動すること、および全継続時間内での平均的な最大主軸回りの観測値のバラツキが大きいことより、空洞周辺岩盤の地震動が震央方向あるいは地震動の主軸といった特定の振動方向に影響を受ける度合は小さいと考えられる。
- ② 観測地震動の三成分の相関はコヒーレンスに見られるように各周波数毎にみるとかなり高い値を示す周波数成分も存在するが波形全体としての相関については相互相関係数および軌跡図より判断して非常に低いと考えられ、三成分とも、ある特定の方向に支配されている度合は小さいと考えられる。
- ③ 空洞周辺岩盤の任意の二点間では主軸の時間変動がほぼ同一であることより、岩盤内の地震動は三次元的にほぼ同位相になっていると考えられる。

以上①～③より現段階までの観測地震の規模では空洞周辺岩盤はほぼ一体となって三次元的にランダムな動きを呈しており、三成分はほぼ独立になっていると考えられる。

7. あとがき

本論文では岩盤内空洞の耐震性を検討する上で重要となる地震動の設定の資料を得るために現段階までの観測地震動に基づいて検討した主軸および三成分間の相関を述べた。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。最後に本地震観測の実施に御指導、御協力をいただいた日本国有鉄道東京第二工事局峯本守次長（現・新幹線建設局新幹線計画課長）、小林進土木第一課長、鉄道技術研究所構造物研究室福田利光室長（現・外務部）、地質研究室吉川恵也室長など関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中村 豊, 朝倉俊弘, 山口靖紀, 辻田 満, 脇田和試: 山岳トンネルおよび周辺岩盤の地震時挙動一観測記録の波形解析（昭和58年7月～昭和59年6月）一, 第6回岩の力学国内シンポジウム, pp.187～192, 1984年12月。
- 2) 星谷 勝, 石橋 裕: 地震動ベクトルの主軸と波形特性, 土木学会論文報告集第268号, pp.33～46, 1977年12月。
- 3) 渡部 丹: 3次元強震地動のシミュレーション, 昭和49年度建築研究所年報, pp.201～206, 昭和49年。

(27) Seismic Behavior of a Rock Tunnel
— Principal Axes and Three Components of Observed Waves —

Yasuki YAMAGUCHI

Mitsuru TSUJITA

Kazushi WAKITA

Nobuo ARAI

(Technical Research Institute, HAZAMA GUMI)

In recent years, new type of structures such as underground nuclear power stations, storage caverns for low 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.

Seismic Behavior of a rock cavern is dominated by the properties of the three components of an earthquake which propagates through the rock around the cavern. In this report, these properties were investigated through the analyses of the principal axes and the correlation among three components of the observed waves. From the investigation, the following results were obtained.

- ① The direction of principal axes tends to change remarkably during the time of an earthquake. And observed values tend to scatter remarkably around the maximum principal axis.
- ② The correlation among three components of the observed waves is very low judging from the crosscorrelation and particle orbits. From these facts, three components of the earthquake in the rock may not be influenced by any specific direction.
- ③ In the rock around the cavern, phase lag between earthquake waves at any points is small.