

(28) 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空洞ひずみと岩盤内粒子速度の評価 ——

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

1. まえがき

岩盤内空洞の地震時安定性を論ずるためには、空洞および周辺岩盤の地震時挙動を観測結果や解析により把握し、空洞の地震時ひずみを定量的に予測する必要がある。しかし、現状ではこの問題には不明な点が多く、各所で観測、解析の両面から検討がすすめられている。

筆者らは、現在までに、東日本旅客鉄道株式会社および(財)鉄道総合技術研究所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覆工部のひずみ挙動の検討を行い、空洞の地震時ひずみは周辺岩盤の粒子速度と良い比例関係にあることを明らかにした¹⁾。また、境界要素法を用いた地震観測結果のシミュレーションによっても空洞および周辺岩盤の地震時挙動の検討を行ってきた²⁾。

今回はさらに、境界要素法を用いて、解析モデルに地表を考慮した場合(半無限)、しない場合(無限)について定常応答解析を実施した。本報は、それらの解析により得られた空洞覆工部周方向ひずみと周辺岩盤の粒子速度の関係を観測結果と比較することによって、地震時の空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内粒子速度の関係を評価したものである。

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、コンクリート覆工厚は30 cm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、粗密波速度 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、岩盤内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。

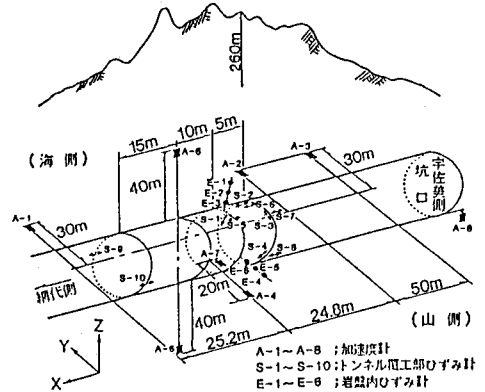


図-1 地震観測計器配置図

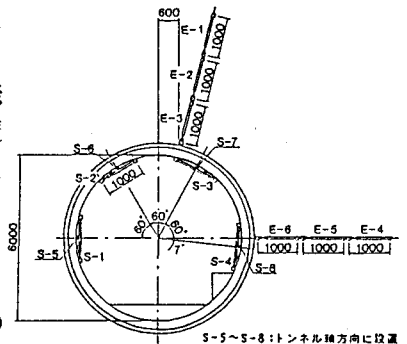


図-2 トンネル覆工部および岩盤部ひずみ計配置図

1983年 7月より実施している観測により、1987年12月現在、1984年 9月、1987年 5月の伊豆半島東方沖群発地震を含む79個の記録が得られている。

3. 空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内ひずみの比

岩盤内の粒子速度と岩盤内のひずみがきわめて良い比例関係にあることは、理論、観測の両面から指摘されている^{1), 3)}。また、地盤あるいは基盤上での最大粒子速度を地震の規模とサイトまでの距離をもとに予測する式が数多く提案されており、それらの式が各種構造物の地震時安定性を評価する際頻繁に使用されている事実から、対象地震に対して岩盤内の粒子速度を予測しうる可能性のあることが考えられる。これらのことから、種々の大きさの岩盤内空洞について、覆工部ひずみと周辺岩盤内におけるひずみの比を明らかにすることによって、対象地震による空洞覆工部ひずみを簡便な方法で推定しうると考えられる。

ここではまず、境界要素法を用いて調和波を入射波とする定常応答解析を行い、空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内ひずみの比の把握を試みた。

解析に際し空洞は、観測を行っている新宇佐美トンネルを模擬し、内径6m、覆工厚30cmとした。対象材料は等方弾性体とし、内部減衰は考慮していない。また、岩盤の P波速度、S波速度をそれぞれ 2250m/sec、1200m/sec とした。

地表面を考慮しない(無限岩盤中に空洞が存在する)場合の、P波入力、S波入力のそれぞれに対する空洞側壁(S-1)、クラウン部(S-3)の周方向ひずみ、空洞から水平方向へ100m離れた遠方岩盤内のひずみおよびそれらの比を表-1に示す。側壁のひずみは P波の上昇による伸縮変形に起因するものが、クラウン部のひずみは S波の上昇によるせん断変形に起因するものがそれぞれ支配的であることから²⁾、P波入力の解析結果については側壁のひずみと岩盤内の鉛直方向の軸ひずみの比を、S波入力の結果についてはクラウン部のひずみと岩盤内せん断ひずみの比を検討した。図-3は、ひずみの比を、空洞の径(D)と入力波の波長(L)の比(D/L)に対してプロットしたものである。ここで Lは、P波速度、S波速度と入力波の周波数から換算して求めたものである。この図から、

- ① 波長に比して空洞の径が小さいときは、ひずみの比は一定である
- ② 波長に比して空洞の径が大き

表-1 定常応答解析(地表なし)の結果(入力振幅1cmに対するひずみ)

freq. (Hz)	P - wave (x 10 ⁻⁶)				S - wave (x 10 ⁻⁶)			
	S-1	S-3	遠方 γ_{zz}	S-1/ γ_{zz}	S-1	S-3	遠方 γ_{yz}	S-3/ γ_{yz}
0.2	10.36	4.14	5.60	1.85	0.03	6.75	10.50	0.64
0.5	25.91	10.35	14.00	1.85	0.08	16.88	26.20	0.64
1.0	51.84	20.70	27.99	1.85	0.19	33.77	52.42	0.64
1.5	77.78	31.05	41.99	1.85	0.37	50.68	78.64	0.64
2.0	103.75	41.40	55.98	1.85	0.62	67.61	104.84	0.64
2.5	129.76	51.76	69.97	1.85	0.93	84.58	131.02	0.65
3.0	155.80	62.12	83.95	1.86	1.32	101.58	157.20	0.65
3.5	181.88	72.48	97.92	1.86	1.78	118.63	183.36	0.65
4.0	208.01	82.84	111.87	1.86	2.30	135.72	209.48	0.65
4.5	234.18	93.21	125.81	1.86	2.90	152.86	235.62	0.65
5.0	260.41	103.58	139.75	1.86	3.56	170.05	261.78	0.65
6.0	313.02	124.35	167.64	1.87	5.11	204.59	314.26	0.65
7.0	365.87	145.13	195.60	1.87	6.94	239.38	367.12	0.65
8.0	418.97	165.94	223.70	1.87	9.06	274.43	420.38	0.65
9.0	472.32	186.78	252.01	1.87	11.47	309.74	473.78	0.65
10.0	525.93	207.65	280.47	1.88	14.17	345.34	526.66	0.66
11.0	579.80	228.56	308.99	1.88	17.17	381.23	578.24	0.66
12.0	633.94	249.52	337.36	1.88	20.46	417.42	627.84	0.66
13.0	688.32	270.52	365.40	1.88	24.05	453.90	675.36	0.67
14.0	742.95	291.58	392.95	1.89	27.94	490.70	721.64	0.68
15.0	797.81	312.69	419.97	1.90	32.14	527.79	768.48	0.69

表-2 定常応答解析(地表あり)の結果(入力振幅1cmに対するひずみ)

freq. (Hz)	P - wave (x 10 ⁻⁶)				S - wave (x 10 ⁻⁶)			
	S-1	S-3	遠方 γ_{zz}	S-1/ γ_{zz}	S-1	S-3	遠方 γ_{yz}	S-1/ γ_{yz}
0.2	0.54	2.92	1.00	0.54	0.01	1.67	6.76	0.25
0.5	11.99	5.02	12.96	0.93	0.05	8.54	24.42	0.35
1.0	40.34	13.93	41.00	0.98	0.13	33.94	90.06	0.38
1.5	73.36	29.04	72.84	1.01	0.12	47.12	123.22	0.38
2.0	119.07	35.02	118.06	1.01	0.39	29.95	71.32	0.42
2.5	130.88	49.91	130.66	1.00	0.85	36.17	91.08	0.40
3.0	131.81	47.93	133.50	0.99	0.96	97.82	269.04	0.36
3.5	101.24	36.22	103.65	0.98	0.60	134.80	371.50	0.36
4.0	25.69	25.19	37.62	0.68	1.02	102.68	290.28	0.35
4.5	49.63	21.47	44.47	1.12	2.10	3.70	28.18	0.13
5.0	163.88	40.55	149.69	1.09	2.37	124.59	312.86	0.40
6.0	321.74	107.69	329.28	0.98	1.99	219.61	559.22	0.39
7.0	340.51	112.73	346.16	0.98	5.64	77.07	220.92	0.35
8.0	144.64	55.15	149.73	0.97	0.74	320.59	839.56	0.38
9.0	199.30	68.03	197.63	1.01	10.97	56.62	34.84	1.63
10.0	514.45	186.02	517.78	0.99	3.91	372.96	1006.98	0.37
11.0	584.67	222.80	594.70	0.98	14.81	241.33	485.60	0.50
12.0	325.06	126.32	334.36	0.97	12.19	369.25	1039.24	0.36
13.0	201.30	36.74	194.39	1.04	26.79	486.66	1053.74	0.46
14.0	620.17	276.07	696.82	0.89	63.49	70.62	981.56	0.07
15.0	833.29	299.20	832.24	1.00	13.47	605.77	1369.22	0.44

なると、ひずみの比も大きくなる傾向を持っている

ということが分かる。波長が空洞の径に対して十分大きければ、空洞側壁の周方向ひずみと岩盤内鉛直方向軸ひずみの比はほぼ1.85、クラウン部の周方向ひずみと岩盤内せん断ひずみの比は0.65である。

次に、地表を考慮した（半無限岩盤中に空洞が存在する）場合の同様な解析の結果を表-2、図-4に示す。地表面が存在する場合には反射波（下降波）が入射波（上昇波）と干渉しあって岩盤の変形挙動に影響を与える。ここでは内部減衰を考慮していないためその影響は顕著に現れ、出力点の地表面からの深さと波長の関係によってはひずみが全く0となる周波数も存在する（例えば波長の1/4の長さが出力点の深さに一致する場合）。図-4中解が不安定なように見える点はそのような周波数の付近での計算結果である。しかし、そのような特殊な周波数以外の解はほぼ安定していると考えられ、その値は、空洞側壁周方向ひずみと岩盤内鉛直方向軸ひずみでほぼ

1.0、クラウン部の周方向ひずみと岩盤内せん断ひずみでほぼ0.4となっている。

以上、上述した解析のそれぞれのケースは、

解析において内部減衰を考慮していないことから、地表を考慮しないケースは、きわめて空洞が深部にあるかあるいは媒質の減衰が大きい状態に、地表を考慮したケースは、きわめて空洞が浅部にあるかあるいは媒質の減衰が小さい状態に、それぞれ対応していると考え（ $\times 10^{-5}$ ）えられる。

4. 空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内粒子速度の関係

空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内粒子速度の関係について、定常応答解析結果と新宇佐美トンネルでの観測結果を比較した。定常応答解析結果については、岩盤内のひずみがOwenの式（ひずみは粒子速度を弾性波速度で除した値として表せる）に従うとして岩盤内粒子速度を逆算し、その値に対して空洞覆工部のひずみをプロットした。また、岩盤内の観測点としてはA-7を取り上げ、観測ひずみはその点での速度振幅のY方向成分およびZ方向成分最大値に対して整理した。その結果を図-5および図-6に示す。

それらの図から観測結果の傾向は、解析の2つのケ

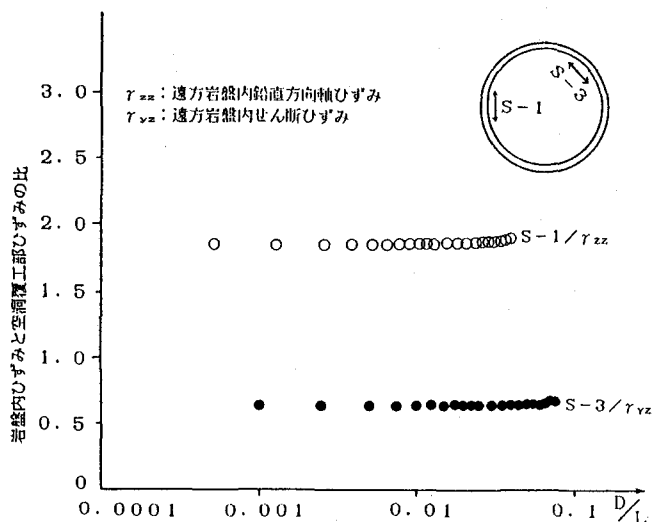


図-3 岩盤内ひずみと空洞覆工部ひずみの比（地表なし）

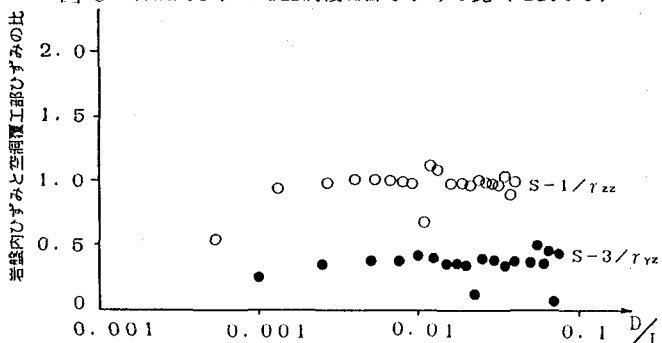


図-4 岩盤内ひずみと空洞覆工部ひずみの比（地表あり）

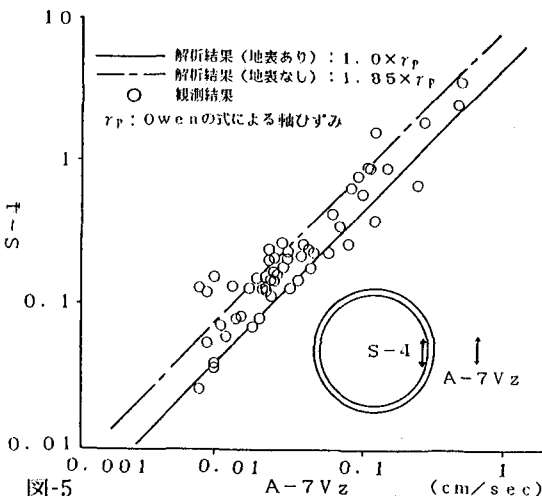


図-5 岩盤内粒子速度と空洞側壁周方向ひずみの関係

ース、地表を考慮した場合と考慮しない場合の中間的 ($\times 10^{-3}$) なものとなっており、その相関の高さから、これらの解析が観測結果をある程度説明しうることがうかがえる。このことから、境界要素法は、シミュレーション手法として十分有用なものであること、さらに、この手法によって対象とする空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内ひずみの比を把握しておけば、岩盤内粒子速度から、ひいては検討対象とする地震に対して、考慮すべきひずみの最大値を推定しうることが明らかになったと考えられる。ただし、上記の結果は、観測結果のシミュレーションをする際には、今後さらに、①地表面の考慮、②減衰の考慮、の2点を検討する必要があることを示唆していると思われる。

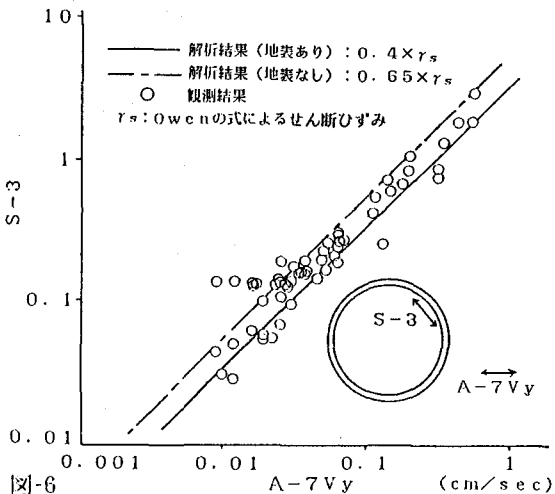


図-6 岩盤内粒子速度と空洞クラウン部周方向ひずみの関係

5. まとめ

境界要素法を用いた調和波入力による定常応答解析の結果、以下の事項が明らかとなった。

- ① 解析モデルにおいて地表を考慮しない場合、波長が空洞の径に対して十分大きければ「ひずみの比」はほぼ一定で、その値は、(側壁周方向ひずみ/岩盤内鉛直方向軸ひずみ) で1.85、(クラウン部周方向ひずみ/岩盤内せん断ひずみ) で0.65である。
- ② 地表を考慮した場合にも「ひずみの比」はほぼ一定の値をとる傾向にあり、その値は、(側壁周方向ひずみ/岩盤内鉛直方向軸ひずみ) で1.0、(クラウン部周方向ひずみ/岩盤内せん断ひずみ) で0.4である。
- ③ 観測結果の空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内粒子速度の関係は、内部減衰を考慮しない解析において、地表を考慮しない場合と考慮した場合それぞれの結果の中間的なものとなっている。

また、境界要素法による解析結果を観測結果と比較することで、岩盤内粒子速度から空洞覆工部周方向ひずみを予測しうることが明らかとなったと考えられる。

6. あとがき

境界要素法による解析をもとに岩盤内粒子速度と空洞覆工部周方向ひずみの関係の評価を試みたが、今後は、境界要素法の解析において内部減衰を考慮した解析を行い、空洞が浅部にある場合や減衰が大きい場合について、詳細な検討をすすめていく必要があると考える。

なお、本観測は、東日本旅客鉄道株式会社および(財)鉄道総合技術研究所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関係各位に感謝いたします。

<参考文献>

- (1) 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 —空洞の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。
- (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 —境界要素法を用いた地震観測のシミュレーション—、第19回岩盤力学に関するシンポジウム、PP.461-465、1987。
- (3) Owen, G. N., R. E. Scholl and T. L. Brekke: Earthquake engineering of tunnels, RETC Proceedings, pp.709-721、1979。

(28) Seismic Behavior of a Rock Tunnel

—Analytical evaluation of the relation between the circumferential strains of the cavern and the particle velocity in rock by boundary element method—

Yasuki YAMAGUCHI

Mitsuru TSUJITA

Kazushi WAKITA

Nobuo ARAI

(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 during earthquakes, earthquake observations have been carried out in the Shin Usami Tunnel of JR's Ito Line, located in Ito City of Shizuoka Prefecture.

In this report, the relation between the circumferential strains of the cavern and the particle velocity in rock was investigated based on both the simulated results by the boundary element method using harmonic waves as input motion and the observed data. But in the simulation, damping effects of the medium were not estimated.

From the investigation, the following results were obtained.

- ① In the case of the simulation using the model that the cavern is in the infinite space, if the input wave length was sufficiently long for the diameter of the cavern, the ratio between the circumferential strains of the cavern and the strains of rock around the cavern were almost constant. And its constant values are about 1.85 for the ratio of the strain at the side wall of the cavern to the axial strain of vertical direction in rock and about 0.65 for the ratio of the strain at the crown of the cavern to the shear strain in rock, respectively.
- ② In the case of the simulation using the model that the cavern is in the half-space, these strain's ratio are almost constant. And the ratio of the strain at the side wall of the cavern to the axial strain of vertical direction in rock is about 1.0, the ratio of the strain at the crown of the cavern to the shear strain in rock is about 0.4.
- ③ The relation between the circumferential strains of the cavern and the particle velocity in rock around the cavern based on the observed data has resemble tendency for analytical results using both the infinite space model and the half-space model. And the relation in the observed data takes the neutral position between the results of simulations by those two models.