

(16) 地下空洞の地震時安定性に関する研究
— 地震時空洞周方向ひずみと軸方向ひずみ —

(株) 間組 技術研究所 正会員 ○新井伸夫
(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

Study on the Stability of Underground Structures during Earthquakes
- Circumferential Strain and Longitudinal Strain during Earthquakes -

Nobuo ARAI, Technical Research Inst., Hazama-Gumi, Ltd.
Mitsuru TSUJITA, Technical Research Inst., Hazama-Gumi, Ltd.
Kazushi WAKITA, Technical Research Inst., Hazama-Gumi, Ltd.

Abstract

The simplified method for estimating the circumferential strain of a cavern from the particle velocity in rock during earthquakes was proposed. This method was based on the ratio between the circumferential strain of the cavern and the strain in rock obtained from the harmonic wave analysis by the boundary element method. From the comparison between the estimated strain calculated by this method and the strain observed at the Shin-Usami Tunnel along the JR's Ito line, the adequacy of this method was suggested.

And the relation between the circumferential strain and the longitudinal strain observed at that tunnel was also clarified.

1. まえがき

岩盤内空洞の地震時安定性を評価するためには、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。

筆者らは、JR伊東線新宇佐美トンネルにおいて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地震観測を実施し、観測データの分析および境界要素法を用いた応答解析から、空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内粒子速度の関係を明らかにしてきた。^{1)、2)}

本報は、これまでに得た関係に基づいて地震時空洞周方向ひずみの予測フローを提案するとともに、新宇佐美トンネルでの観測データについて、周方向ひずみと軸方向ひずみの関係の解明を試みたものである。

2. 空洞周方向ひずみの予測

2.1 空洞周方向ひずみの予測方法

ここで提案する地震時空洞周方向ひずみの予測フローを図-1に示す。図に示すようにここで提案する手法は3つのステップからなっており、それぞれのステップが簡便な方法で成り立っている。

<ステップ1>

対象地震の規模とサイトまでの距離が与えられたとき、その地点の地表での地震動最大値を予測する式は、すでに数多く提案され実用に供している。そこで、このステップは、従来提案されている推定式の中から最

も妥当であると考えられるものを用いることで、ある程度の精度で達成できるものと判断する。つまり、次ステップ以降使用する地盤内の粒子速度最大値(v_{max})は、対象地震とサイトの距離(R)、地震の規模(M)等の関数として表現しようとする。

$$v_{max} = F(R, M, \text{etc.}) \quad \dots(1)$$

ただし、従来の推定式は、ここで取り扱うべき地中での地震動ではなく地表での地震動最大値を対象にしており、さらに大地震の震源近傍での値を扱うには適していないものが多い。よって、推定式を使用し評価を行う際には、予測式の適用限界をよく知って判断を行わなければならない。

<ステップ2>

地盤内の粒子速度とひずみが良い比例関係にあることはすでに指摘されており、その値(γ_{max})は、粒子速度(v_{max})をそこでの弾性波速度(V_{max})で除したものとしておおよそ表現しようのものであると言われている。例えば、鉛直方向伸縮ひずみは、鉛直方向の粒子速度を地盤のP波速度で除したものととして、せん断ひずみは、水平方向の粒子速度をS波速度で除したものととして表現される。

$$\gamma_{max} = \frac{v_{max}}{V_{max}} \quad \dots(2)$$

ただし、この関係は、理論的には、地震波が進行波(入射波)か後退波(反射波)のどちらか一方で表現されると見なす場合にのみ成立するものであるため、反射波が入射波と同程度に存在すると考えられる地表近くの領域に適用することはできず、よって、その適用条件も地中深い地点などに限られる。

<ステップ3>

地中構造物は、地震時には周辺地盤と一体となって変形するため、地下空洞のひずみは周辺地盤のひずみと良い比例関係にあることが予想される。そこで、調和波入力による定常応答解析によって対象空洞に関する空洞周方向ひずみと地盤ひずみの比を周波数に依存しない定数として一度求めておけば、地震に関係なく空洞部のひずみが予測可能になると考えられる。

その際、定常応答解析には境界要素法を用いる。これは、被りが大きい空洞を対象にした場合、有限要素法では自由度数が膨大になり解析が実用状困難になってしまうからである。

境界要素法による解析で得られたひずみの比(α)を前ステップで得た地盤ひずみ(γ_{max})に乗じることで、目的とする空洞周方向ひずみ(ϵ_{max})が推定できる。

$$\epsilon_{max} = \alpha \cdot \gamma_{max} \quad \dots(3)$$

2.2 予測手法の適用性の検討

新宇佐美トンネルで観測された空洞覆工部ひずみの値と前述の手法により推定した値を比較することで、提案した予測手法の妥当性の検討を行った。

まず、境界要素法を用いて「空洞周方向ひずみと地盤内ひずみの比」(α)を求めた。この「ひずみの比」(α)は、空洞の径(D)と入力波の波長(L)の比(D/L)で表わされる無次元化振動数の他に、覆工の厚さ(d)と空洞の径(D)の比(d/D)および地盤と空洞覆工の剛性比に依存すると考えられる。ここでは、地盤と空洞の剛性比が一定の状態を考え、覆工がない空洞について(D/L)を変化させて得られたひずみの比(α_1)

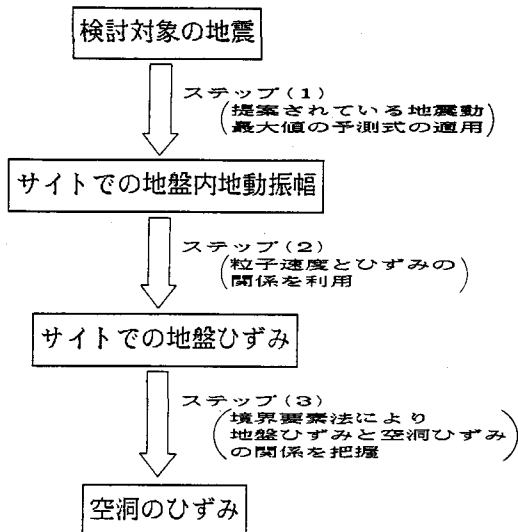


図-1 空洞周方向ひずみの予測フロー

と、覆工厚と空洞内径の比(d/D)に依存するひずみの比の低減率(α_2)とにより、 α を式(4)のように表わした。

$$\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad \dots(4)$$

新宇佐美トンネルを模擬した円形空洞について、空洞の位置が地表に対し十分に深いと想定し、無限岩盤(等方均質)中に覆工を持たない空洞が存在するモデルを解析して上述の α_1 を得た。その結果を図-2に示す。ここで、煤質の減衰は0としており、P波速度、S波速度は、それぞれ2250m/sec、1200m/secとした。また、これまでの観測結果の検討により、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が明らかとなっているため、側壁のひずみについてはP波入力の解析結果から求まる岩盤内の鉛直方向伸縮ひずみに対する比を、またクラウン部のひずみについてはS波入力の解析結果から求まる岩盤内せん断ひずみに対する比を検討した。この結果から、空洞の径に比して波長が長いときには、ひずみの比はほぼ一定であることがわかる。

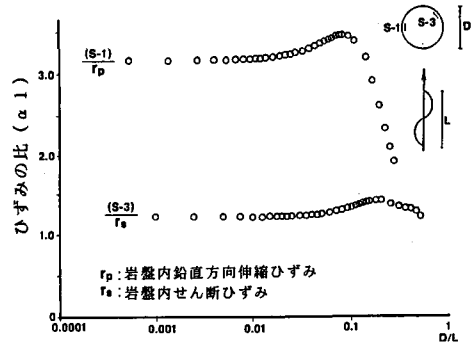


図-2 遠方岩盤内ひずみと空洞周方向ひずみの比

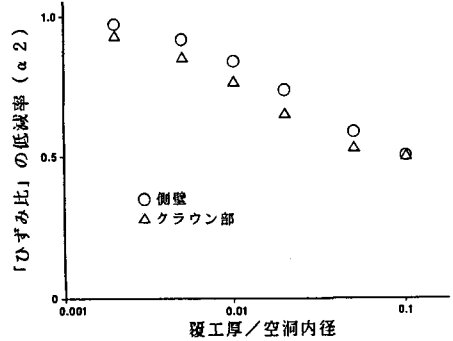


図-3 覆工厚と「ひずみ比」の関係

さらに、覆工のある円形空洞について、空洞の内径と覆工厚の比を変化させ、 α_1 が一定となる領域のレベルがどのように推移するか、その影響の度合(前述の α_2)を検討した。その結果を図-3に示す。ここで、覆工のせん断弾性定数は、 $2.2 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$ とした。この図から、ここで採用したモデルのように覆工の剛性が周辺岩盤の剛性よりも大きいときには、空洞の径に比して覆工の厚さが大きくなると覆工上のひずみは小さくなる傾向にあることがわかる。

図-2、-3より、内径6m、覆工厚30cmの新宇佐美トンネルにおいては、側壁で $\alpha_1=3.16$ 、 $\alpha_2=0.59$ となり、クラウン部で $\alpha_1=1.22$ 、 $\alpha_2=0.53$ となる。よって α は、側壁、クラウン部でそれぞれ1.86および0.65となる。このようにして得られた結果を観測結果と比較して図-4、-5に示す。岩盤内粒子速度としては、空洞ごく

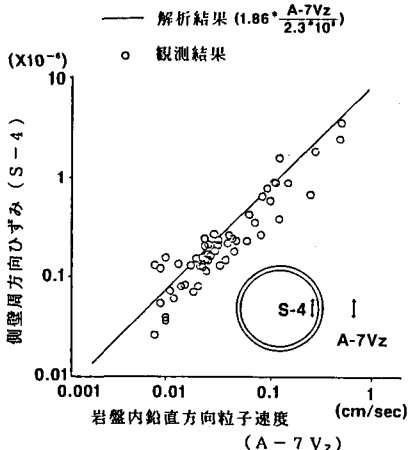


図-4 岩盤内鉛直方向粒子速度と空洞覆工側壁周方向ひずみの関係

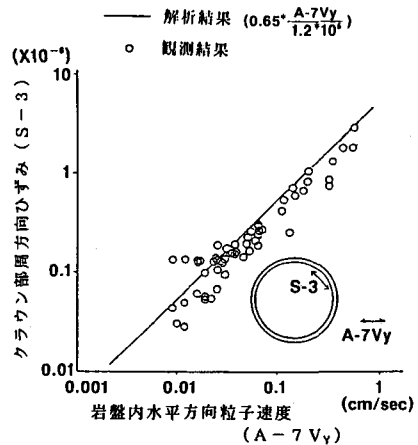


図-5 岩盤内水平方向粒子速度と空洞覆工クラウン部周方向ひずみの関係

近傍の点（観測システムにおいてA-7と称している点）で観測された値を用いた。具体的には、A-7での地震動速度振幅のY方向（空洞軸直角方向）成分およびZ方向（鉛直方向）成分最大値に対して空洞覆工部ひずみを整理した。

これらの図から、予測したひずみは、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、境界要素法によって対象とする空洞の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可能性が明らかになったと考えられる。

3. 空洞周方向ひずみと軸方向ひずみ

地下空洞の地震時安定性を論ずる時、従来は、主に空洞の周方向ひずみについて詳細な検討がなされてきた。一方、軸方向ひずみについては、その値が周方向ひずみよりは小さいことが一般的に認識されてきているものの、具体的にその量や性質を把握するに至っていない。そこで、軸方向ひずみの地震時挙動を把握する第一歩として、新宇佐美トンネルにおける観測結果の範囲で周方向ひずみとの関係の解明を試みた。

3.1 軸方向ひずみの最大値

図-6、-7は、空洞覆工部側壁およびクラウン部での周方向ひずみと軸方向ひずみの最大値を比較したものである。図中、周方向ひずみの予測値とした線は、前述の手法により岩盤内粒子速度から推定した周方向ひずみの値を示している。これらの図から以下のことがわかる。

- ① 側壁部、クラウン部とも軸方向ひずみの観測値は、周方向ひずみの予測値よりも小さい。
- ② 側壁部の軸ひずみ観測値から得た回帰直線（サンプル数22）は、周方向予測値のほぼ1/1.8である。
- ③ クラウン部の軸ひずみ観測値から得た回帰直線（サンプル数19）は、周方向予測値のほぼ1/4.3である。

3.2 周方向ひずみと軸方向ひずみの位相の相関関係

図-8は、側壁部、クラウン部それぞれの点での周方向ひずみと軸方向ひずみの位相の相関関係を示すものである。地震波のP波部分、S波部分それぞれに対し位相相関を検討したが、同様な傾向を示していることがわかる。S-2とS-6の関係が判然としないものの、全体的には周方向ひずみと軸方向ひずみは逆位相を示している。これらは、他の観測記録においても確認された。周方向の変形モードとして、P波進行時は伸縮変形が、S波進行時にはせん断変形が卓越していることは既に明らかにしたが、軸方向の変形はそのような変形に呼応していることが予想される。

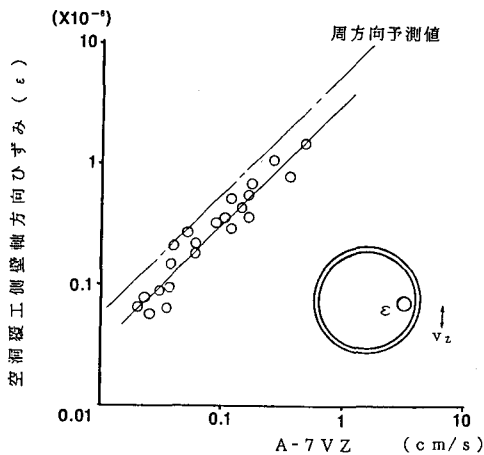


図-6 岩盤内粒子速度と側壁部軸方向ひずみ

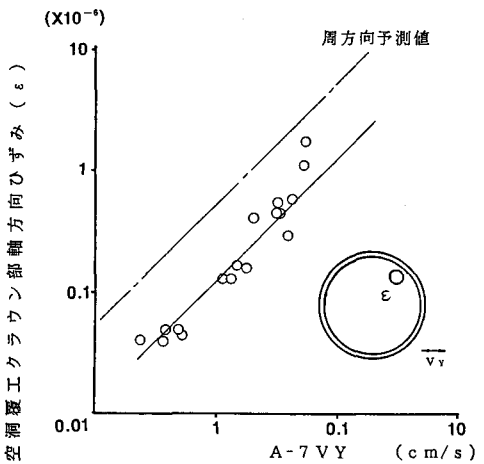


図-7 岩盤内粒子速度とクラウン部軸方向ひずみ

また、軌跡図中に書き入れた直線の傾きは、図-6、-7で得られた周方向ひずみ予測値と軸方向ひずみ観測値の比を示すものである。それらは軌跡の全体的な傾きと比較的良好に対応しており、他の観測記録でもほぼ同一の傾きを示すことを確認した。

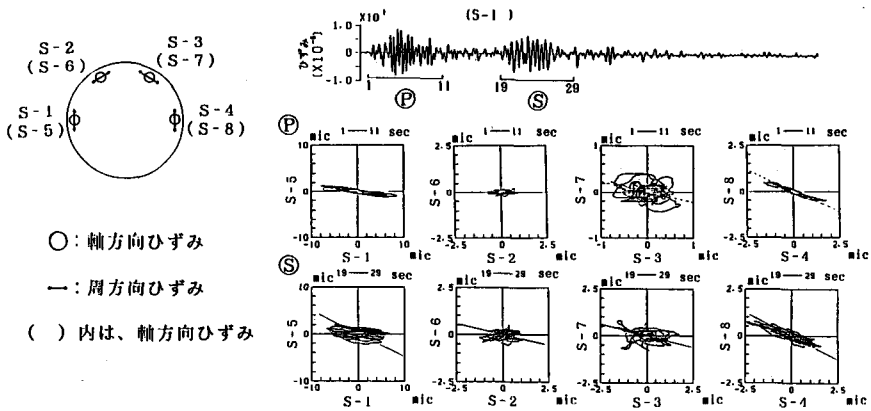


図-8 1986.6.24房総半島南東沖地震の観測記録
周方向ひずみの位相相関 (ⓐ, ⓑはそれぞれP波、S波を示す)

4.まとめ

(1) 空洞周方向ひずみの予測手法

地震時空洞周方向ひずみは、次の3つのステップによって予測できる。

ステップ1：検討対象地震の規模、サイトまでの距離等のパラメータからの、サイトでの地盤内粒子速度最大値の予測。

ステップ2：粒子速度とひずみの関係を利用した地盤ひずみへの換算。

ステップ3：境界要素法解析により得た「地盤ひずみと空洞周方向ひずみの比」に基づき、空洞のひずみを推定。

(2) 空洞周方向ひずみと軸方向ひずみの関係

新字佐美トンネルにおける観測結果について、軸方向ひずみの検討を行い以下の結論を得た。

- ① 軸方向ひずみの値は、周方向ひずみの値より小さく、その比率は地震によらずほぼ一定となる。
- ② 軸方向ひずみと周方向ひずみは、位相が逆転しており、軸方向ひずみは周方向ひずみの挙動に呼応している。

5.あがき

今後は、本報で明らかにした空洞ひずみの予測手法および軸方向ひずみと周方向ひずみの関係を空洞形状や覆工部と岩盤の剛性比の違うケースにも適用し、より一般性を持ったものとし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、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 - 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 -、第20回岩盤力学に関するシンポジウム、pp.136-140、1988。