

(7) 岩盤内深部における地震動の三次元特性と空洞の地震時挙動

— 新宇佐美トンネルにおける観測事例 —

間組技術研究所 正会員 山口 靖 紀
 同上 ○辻 田 満
 同上 脇 田 和 武
 同上 新 井 伸 夫

1. まえがき

近年、原子力発電所などの高い耐震性が要求される重要構造物を岩盤内空洞に立地しようとする検討が進められている。このような、地下立地に際して要求される耐震安全性を検討するためには、まず観測データに基づいた現象の把握が必要となる。しかし、この種の研究の歴史は浅く観測事例も少ないことから、岩盤内深部での地震動特性や空洞の地震時挙動について十分に明らかにされているとは言い難い。

そこで、筆者らは昭和58年7月より日本国有鉄道伊東線・新宇佐美トンネルにおいて地震観測を実施し、岩盤内深部（地下260m）に建設された地下空洞が地震時にどのように挙動するのかを調査してきた。観測を開始してから約1年半を経過し、群発地震（1984年9月伊豆半島東方沖群発地震35個）を含む50個の地震が観測されている。本報では、現段階まで得られた知見を取りまとめ、岩盤内深部（地下260m）における地震動の三次元特性と空洞の地震時挙動について報告するものである。

2. 観測概要

観測トンネルは静岡県伊東市に新設される延長3000mの単線トンネルである。内空断面は内径6mの円形でコンクリートの覆工厚は30cmである。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約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。

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-1に地震観測計器配置図を示し、図-2にトンネル覆工部ひずみ計の配置図を示す。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（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）で測定振動数範囲は0.1～30Hzである。また、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（100

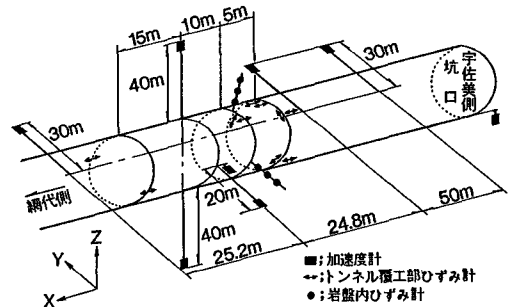


図-1 地震観測計器配置図

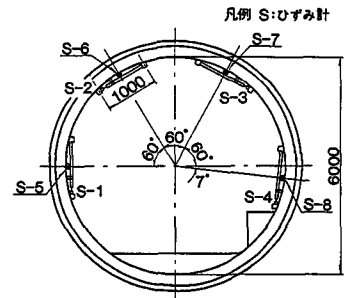


図-2 トンネル覆工部ひずみ計配置図（観測区間より見た断面）

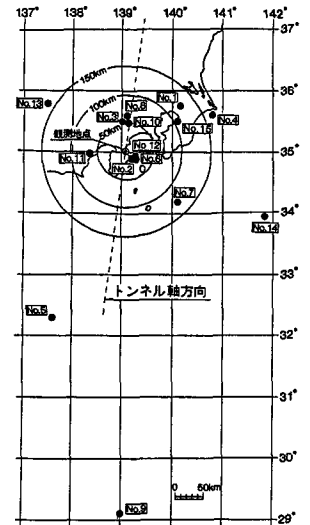


図-3 観測地震の震央位置

Hz)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加速度計の三成分内の1つが0.3 gal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。1983年7月より地震観測を開始して1年半を経過した時点で50個の地震を観測した。図-3に観測地震の震央位置を示す。また、観測波形の一例として、1983年8月8日に集録したNo.3地震における岩盤内(A-4)の加速度波形を図-4に示す。

3. 地震動主軸と波動伝播

岩盤内深部(地下260m)における地震動を三次元的に把握する目的でまず観測地震動の主軸を求めた。なお、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 主軸I・・・時間tで変動する主軸(共分散が最大, 中間, 最小となる主軸)、② 主軸II・・・固定した主軸(全エネルギーを最大, 中間, 最小とする主軸)を用いた。¹⁾

本報では、観測記録の内マクニチュード5以上の4地震(No.3, No.4, No.5, No.9)を選んで、これらについて主軸と主軸回りの観測値のバラツキを検討した。図-5および図-6に主軸IIの方法で求めた岩盤内(A-4)における観測地震動の加速度, 速度, 変位の固定主軸と震央方向を示し、表-1に各固定主軸方向の振動の全エネルギー $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$)の各々の比 $\lambda_2/\lambda_1, \lambda_3/\lambda_1$ を示す。また、図-7に同一データに対し主軸Iの方法で求めた時間tで変動する主軸の内、地震No.3の加速度の主軸を示す。なお、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。なお、図-5および図-6に示す固定主軸IIは互いに180°の差異を持つ2通りの角度で表現すべきであるが、ここではそのうち一方で示してある。

従来、地震動の固定した主軸については、最大主軸と震央方向が良い対応を示すという報告²⁾および中間主軸と震央方向が良い対応を示すという報告^{1), 3)}がある。しかし、今回の岩盤内深部における検討からは、震央方向に比較的近くなるのは最大主軸, 中間主軸のどちらの場合も考えられ、必ずしもどちらかに規定できないと言える。ただし、固定した最大主軸および中間主軸は岩盤内深部においても従来の報告^{1), 2)}同様、ほぼ水平面上に規定できると言える。また、表-1に示すように岩盤内では最大主軸回りのバラツキが大きく、その観測三成分(鉛直および水平二成分)が地震動の支配的な振動方向に影響される度は小さいと考えられる。さらに、時間tで変動する主軸Iの結果より、地震動の主軸は地震動の継続時間を通して一定とは言えず、地震動が三次元的に複雑な性質を持っていることが判る。これは、観測地点に地震動が達するまでの伝播経路中の地質, 地形の変化、あるいは観測サイトにおける波動の反

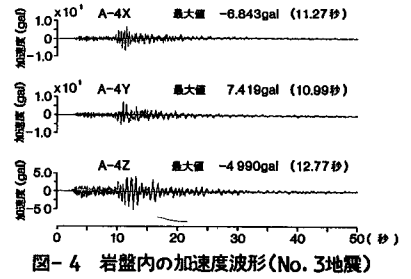


図-4 岩盤内の加速度波形(No.3地震)

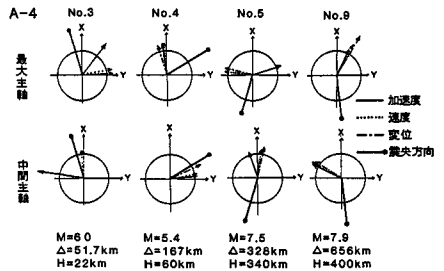


図-5 固定した主軸IIの水平面における方向

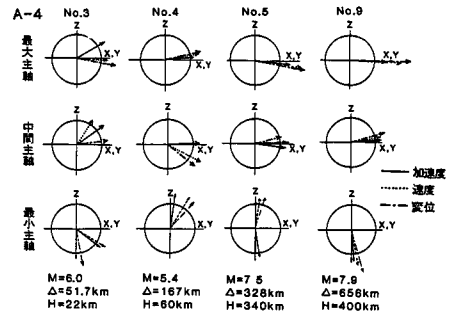


図-6 固定した主軸IIの鉛直面における方向

表-1 主軸Iにおける全エネルギーの比

地震No.	加 速 度		速 度		変 位	
	λ_2/λ_1	λ_3/λ_1	λ_2/λ_1	λ_3/λ_1	λ_2/λ_1	λ_3/λ_1
3	0.76	0.63	0.70	0.45	0.26	0.17
4	0.58	0.48	0.64	0.53	0.67	0.33
5	0.93	0.86	0.61	0.40	0.43	0.23
9	0.43	0.24	0.40	0.20	0.55	0.26

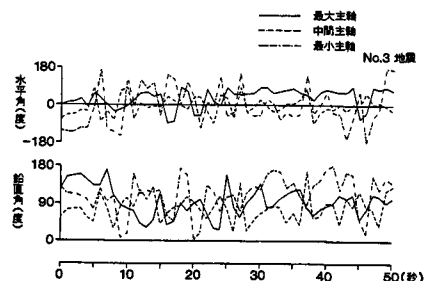


図-7 時間tで変動する主軸I(No.3地震)

射・屈折の影響を受けるためと考えられる。

観測波形より地震動の初動および主要動が得られていると判断できるNo.3地震における時間tで変動する主軸Iより、初動部で最大主軸の鉛直角が 180° に近く、主要動以降では 90° を中心に大きく変動していることと、本観測サイトでは実体波が卓越していると考えられるところから、初動部では疎密波(P波)が、主要動部ではせん断波(S波)がほぼ鉛直方向に上昇していると考えられる。

さらに、図-8に空洞内の鉛直上方40mの測点A-5の鉛直下方40mの測点A-6に対する加速度波形のスペクトル比を示す。これより、鉛直方向への地震動の伝播に関しては、水平振動、上下振動ともスペクトル比におけるピーク位置の振動数は地震によらず一定となっている。また、特に水平振動のピーク位置の振動数については、一次元重複反射理論によって求まる結果と良く一致する。⁴⁾

以上のことより、地震動は個々の観測点でとらえると三次元的に複雑な動きをしているが、その波動伝播は、観測サイト全体領域でほぼせん断波の上昇が卓越していると言ってよいと考えられる。また、図-9に示すように、各観測点の任意の2点間の位相相関もきわめて高いところから、非常に長い波長に支配されていることがうかがえる。

4. 波動伝播と空洞の変形モード

前節で述べたように、岩盤内深部(地下260m)での波動伝播はせん断波の上昇が卓越しているということが明らかとなったが、この事実だけでは空洞および空洞内部に建設される施設の地震時挙動を検討するには十分ではない。

そこで、ここでは前章で明らかとされた波動伝播の面より空洞の変形モードをとらえてみることにする。本観測サイトの場合、 $V_s = 1 \sim 2$ km/secであり、観測結果より地震動のスペクトルの卓越周期が遠距離地震で1~2秒、近距離地震で0.3~0.5秒であるところから、⁴⁾空洞を通過する波長は遠距離で1000~4000m、近距離で300~1000mと試算される。現在観測しているトンネルは内径6mの円形断面であるところから、遠距離で $1/170 \sim 1/670$ 波長、近距離で $1/50 \sim 1/170$ 波長となり、いずれも空洞は1次のせん断モードが卓越することが考えられる。

これを空洞の円周方向のひずみ波形の上から検討するために、観測波に卓越振動数近辺の狭帯域フィルターをかけた波形を図-10に示す。図-10より、S-3ひずみはS-1、S-2、S-4のひずみに対して逆位相になっていることから、トンネルの横断方向では図-11に示すようなせん断変形モードが想定され、波長の長いせん断波の上昇とそれに伴う空洞のせん断変形モードが非常に良い対応がみられる。したがって、空洞の変形だけをとらえれば、せん断波の波長と空洞の大きさでその卓越した変形モードが決定される

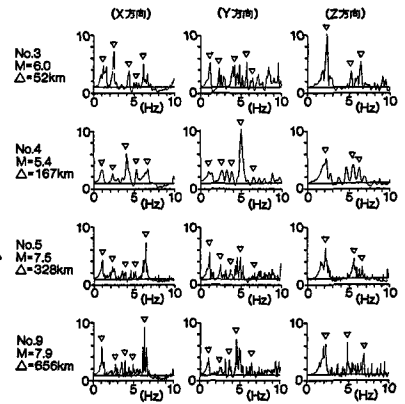


図-8 スペクトル比(A-5/A-6)

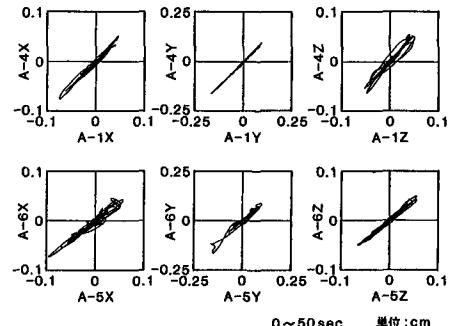


図-9 空洞周辺岩盤における位相相関

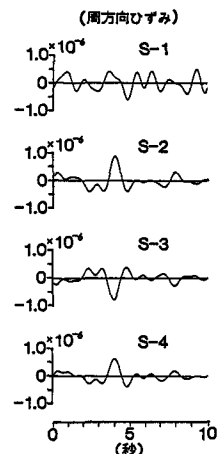


図-10 狭帯域フィルターをかけたトンネル覆工部ひずみ波形(地震No.5)

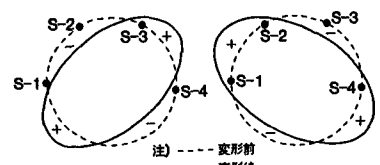


図-11 想定される空洞横断面の変形モード

と考えてよい。

5. 地震動の三成分間の相関

実際に空洞内に建設される建屋やプラントなどの機器配管系の耐震設計を行う場合は、地震動の三成分間の相関を調べておく必要がある。すでに表-1に示したように、岩盤内では最大主軸回りのバラツキが大きいところから、三成分間の相関はかなり小さいと考えられる。ここでは、空洞周辺岩盤の地震動の三方向成分（鉛直および水平二成分）間の相関の度合をもう少し詳しく調べるために、岩盤内（A-4）の加速度の各々の成分間の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）間の相互相関係数の内、No.3地震についてのものを図-12に示す。また、図-13は同一波形のX-Y, X-Z, Y-Z面における初動部（0～9秒）と主要動部（9～20秒）間の加速度波形の軌跡図を示したものである。

これより、観測地震動の三成分の相関は、波形全体としての相互相関係数は最大でも0.2と低く、また軌跡図においてもほとんど無相関に近い動きであるところから、地震動の三成分はお互いにほぼ独立した波動とみなせる。

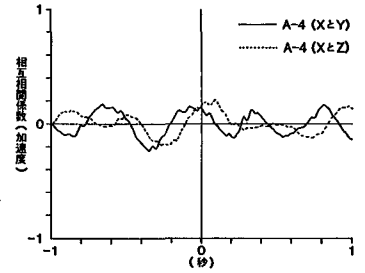


図-12 相互相関係数 (No. 3地震)

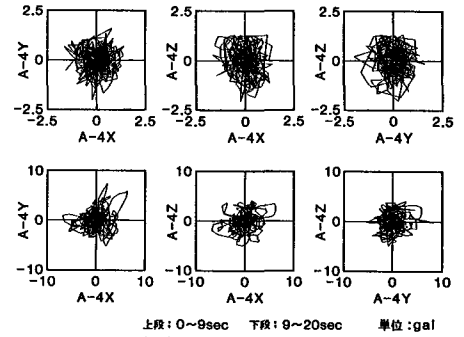


図-13 岩盤内地震動の軌跡図 (No. 3地震)

6. 結論

以上の結果、岩盤内深部（地下260m）における地震動の三次元特性と空洞の地震時挙動についてまとめると以下ようになる。

- ① 固定した主軸Ⅱでみると、岩盤内深部における地震動主軸は、最大主軸および中間主軸ともほぼ水平内に規定できる。しかし、本観測結果からは、震央方向に比較的近くなるのは最大主軸、中間主軸のどちらの場合も考えられ、必ずしもどちらかに規定できない。
- ② 時間 t で変動する主軸Ⅰより、初動部で最大主軸の鉛直角が 180° に近く、主要動以降では 90° を中心に変動していることと、本観測サイトでは実体波が卓越していることを考えると、初動部では疎密波（P波）が、主要動部ではせん断波（S波）がほぼ鉛直方向に上昇する。
- ③ また、各観測点間の任意の2点間の位相相関が高いことと、トンネル覆工部ひずみの位相から判断すると、空洞は非常に長い波長の上昇に伴う1次のせん断変形モードが支配的である。
- ④ 最大主軸回りのバラツキも大きく、地震動の三方向成分の相互相関係数は各々とも最大で0.2と低いところから、三方向成分の波動は互いに独立した波動とみなせる。

7. あとがき

最後に、現在観測を行っている日本国有鉄道・伊東線新宇佐美トンネルでの地震観測は国鉄と共同で実施しているものであり、今回、本観測結果の公表を心よくお許しいただいた日本国有鉄道東京第二工務局、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) 星谷 勝 他：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
- 2) 渡部 丹：3次元強震地動シミュレーション，昭和49年度建築研究所年報，PP.201～206，昭和49年
- 3) 浜田政則 他：岩盤内空洞の地震時挙動観測と考察，土木学会論文報告集，第341号，PP.187～196，1984年1月
- 4) 山口靖紀，辻田 満，脇田和試：山岳トンネルにおける空洞および岩盤の地震時挙動－（その2）観測記録の波形解析（1983年7月～1984年6月）－，間組研究年報－1984，PP.91～106，1984年12月