

六甲地殻変動観測坑における、地震探査による 弾性波速度分布の測定

狐崎 長琅・後藤 典俊・竹内 文朗

MEASUREMENT OF VELOCITY DISTRIBUTION BY SEISMIC EXPLORATION IN THE OBSERVATIONAL ADIT OF ROKKO CRUSTAL MOVEMENT

By Choro KITSUNEZAKI, Noritoshi GOTO and Fumiaki TAKEUCHI

Synopsis

In the observational adit of Rokko crustal movement, out of phase of the earth tide between both sides of the fault zone were observed with extensometer by Tanaka and others. To analysis this problem, it is necessary to obtain elastic constants. So authors carried out seismic exploration and measured the velocity distribution of P and S wave in the adit.

序

山陽新幹線六甲トンネル工事のための横坑を利用して、地殻変動観測が行われている。¹⁾ この観測においてあらわれたいくつかの問題点に手がかりを与える目的で、著者らは坑内の弾性波速度分布を測定した。

ここでの地殻変動観測は、活断層および付近の破碎帯付近のひずみの分布、時間的変化の測定をし、それが地表および地中の構築物におよぼす影響、あるいは断層そのものの動きを知ることを目的としている。一般に、地殻変動の観測では、断層や破碎帯をさけているが、田中らは上記の目的で、あえて破碎帯付近の観測を行い、興味深い研究を行っている。^{1), 2)} 彼らは当初から現象の複雑さを予想し、伸縮計、傾斜計など多数の計測器を設置して観測をはじめたところ、一直線上の伸縮計の観測において、断層の南側と北側で地球潮汐の位相が逆転するという現象があらわれた。さらに、断層の中央の伸縮計は、その中間の位相のおくれを示した。とくに断層と直角方向の伸縮計の潮汐の振巾には、断層の南と北で計器の精度を上まわる振巾の差がみられた。²⁾ これらの現象は、これまでの地殻変動観測の常識ではみられなかったことであり、観測計器を設置した付近の岩盤の特性以外には原因が考えにくい。

筆者らは、田中らに相談を受け上記の問題を解くための資料を得るため、坑内で弾性波探査を行い、P波およびS波の速度分布を測定した。観測坑の中央に、ほぼ垂直な面をもつ断層破碎帯が横断しており、断層面と垂直方向、平行方向とで速度値の異方性が認められた。

測定場所および測定方法

観測坑は兵庫県神戸市灘区鶴甲2丁目1番2号、大阪新幹線工事局、御影工事区、鶴甲斜坑内の横坑である。横坑内の測量基準点は斜坑の坑口（標高約190 m）より水平距離270 m、標高差60 mの地点にあり、この上の地表は標高約240 mで山の斜面をなしている。したがって測定地点は地表下約110 mである。密度 2.6 g/cm^3 の岩石を仮定すると、かぶりによる土圧は、約29 barである。一方間隙水で岩石が飽和しているとし、さらに間隙が相互につながり合っており、いわゆる有効間隙をなしているとする、土圧は18 barとなる。結局20~30 bar程度の鉛直地圧をうけているとみなされる。観測坑のほぼ中央に破碎帯が横断しており湧水

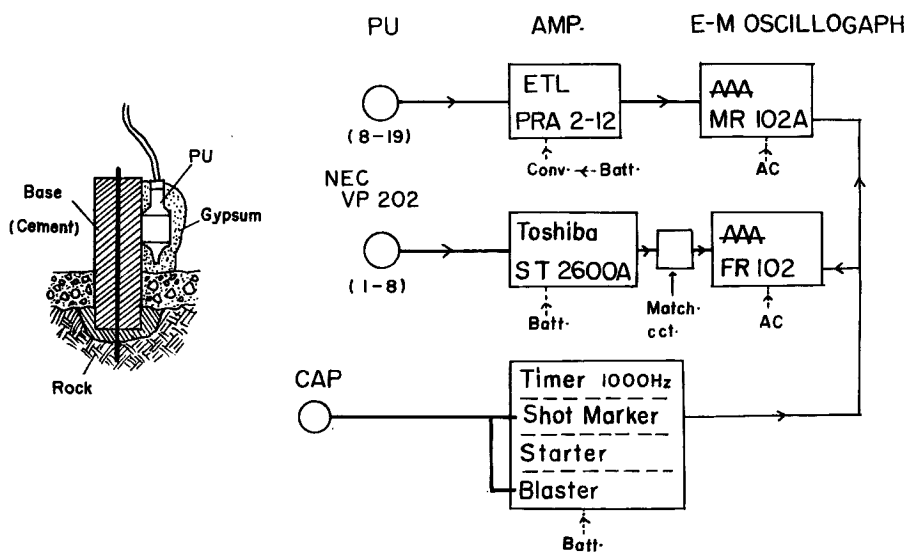


Fig. 1 Block diagram of the experimental instrumentation.

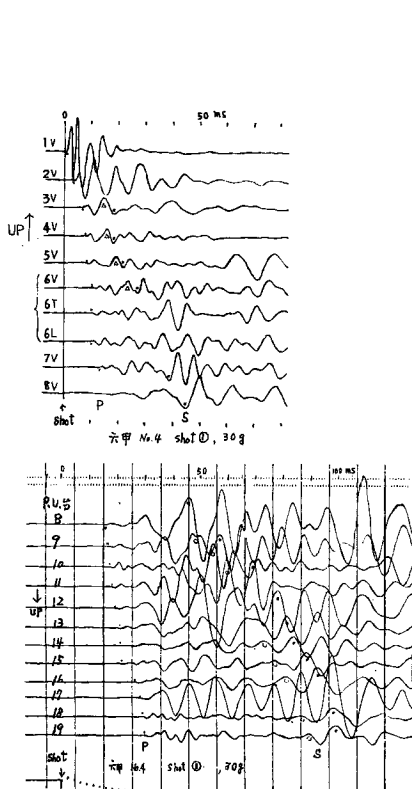


Fig. 2 Example of records obtained by explosion of shot point 1.

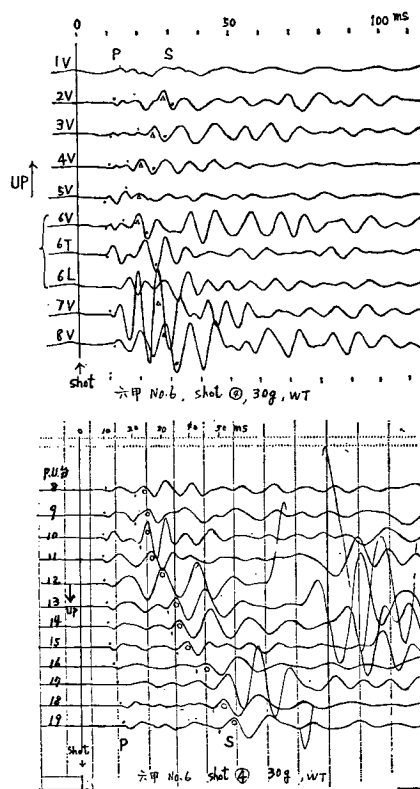


Fig. 3 Example of records obtained by explosion of shot point 4.

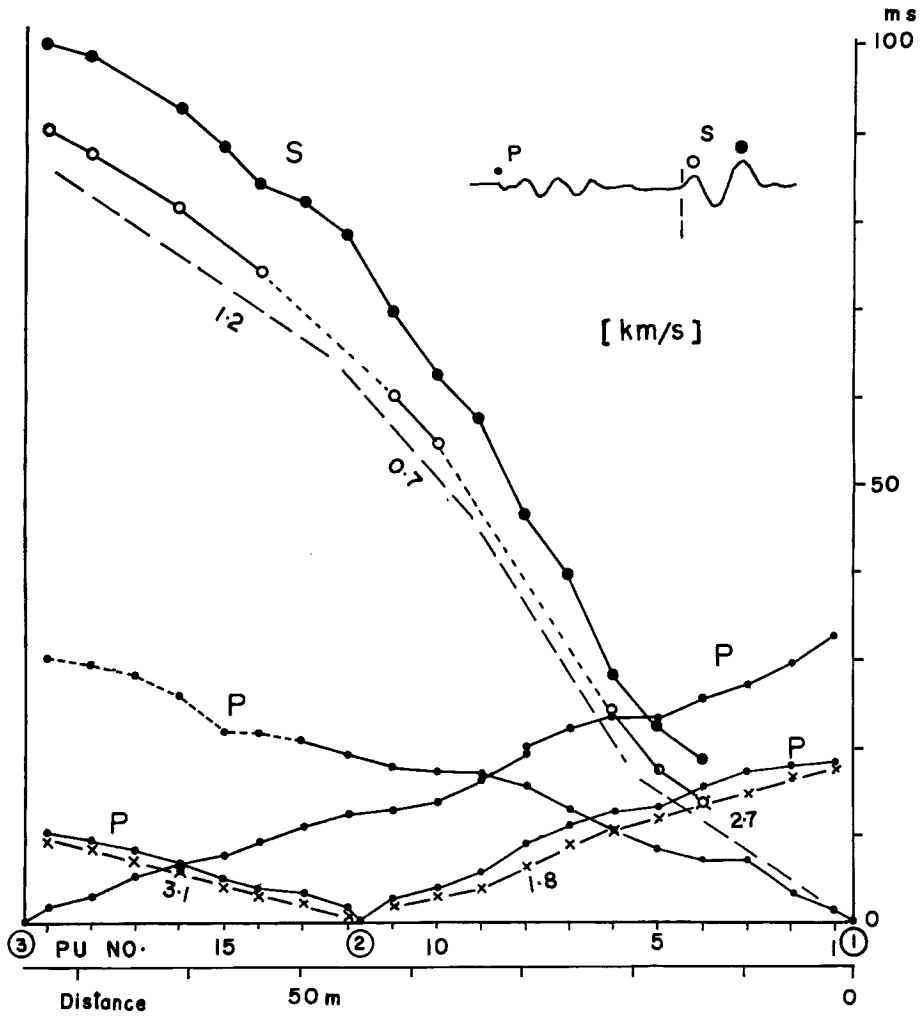


Fig. 4 Distance-traveltime curve of the spread along the adit.

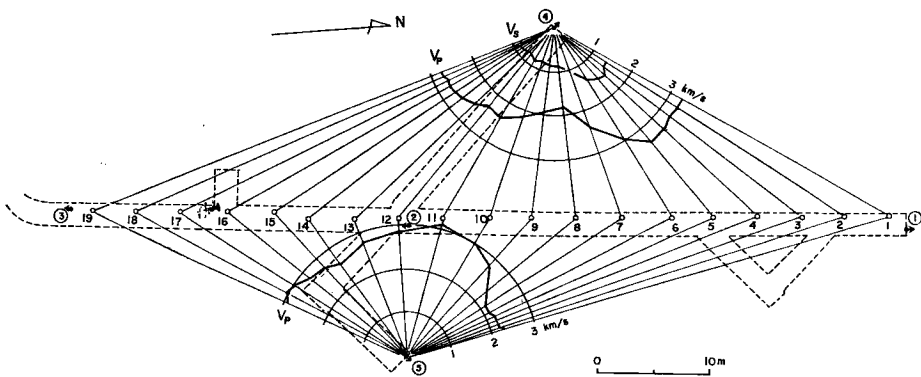


Fig. 5 Location of pickups and shot points and velocity estimation with direction.

している。

坑内には4 m間隔に地殻変動観測用計器のコンクリートの設置台があり、これに石膏で弾性波探査用の受震器を固定した。測定器の接続は、Fig. 1 のフローチャートに示されている。固有周波数 28 Hz の受震器から 12 成分の増巾器 2 台を通して電磁オシログラフ 2 台に記録された。

震源はさく岩機による孔を利用した。深さ 1 m の鉛直孔を予定したが、実際はやむを得ず深さ 0.6 m、傾きが鉛直から 30° 程度であった。これは坑壁周辺の岩盤のゆるみ域をさける上で、また S_{wave}/P_{wave} の振巾比を高める上で不利に働く。発破は、ダイナマイトえのき 2 号、雷管 DS 2 段 (0.2 秒遅れ) を用い、TIMER によって記録器と同期させた。発破孔はすべて water tamping された。Fig. 5 において①～⑤の矢印は発破孔を示し、④と⑤から直線でつながれた丸印は受震点を示す。

得られた記録は Fig. 2, Fig. 3 に示されている。Fig. 3 は発破点④による fan shooting の記録である。測線沿いの発破による走時曲線が Fig. 4 である。破線部分は記録が乱れて初動の出がよくないところである。記録が乱れる原因は 3 つある。受震器設置の不完全、発破孔の不完全、それに媒質の破碎であり、最後のものがもっとも効く。これは伝播についてももちろん効くが、とくに影響が大きいのは、発破点についてである。破碎した岩盤では S 波はきわめて発生させ難い。このような場合、記録をよりよくしようとすると、既述の発破孔の掘り方や受震器設置に気を配らなければならない。

実際の測定を行った期間は 1971 年 7 月 13 日～15 日である。

解析および結果

1) 解析結果を Fig. 7 に示す。カッコで囲んだ速度値は解析上、間接性の度合いの強いものであって、それだけ精度も低い。解析上の仮定によっては全く修正されることもありうる。しかし、記録と地質の全体を考慮した上で、無理のない仮定をおいているので、結果は妥当なものと思われる。記象に全くあらわれない速度値は、図中に記載していない。

2) 速度帯は、I, II, III, IV の 4 層にわかれる。もちろん、局所的な変化はあろうが、ここでは大局的な分類をして、解析のための仮定とした。速度値や境界は試行錯誤して走時に適合させた。// は断層破碎帯に平行、⊥ は垂直方向を表わす。

I 層 $V_{p//}=3.3$ km/s. これは shot 4→PU 台 1～6 の走時から直接求まる。

($V_{p⊥}=2.7$ km/s) shot 1→PU 台 1～6 でもだいたい求まる。

$V_{s//}=1.5$ km/s. shot 4→PU 台 1～6 より直接求まる。

($V_{s⊥}=1.2$ km/s) shot 4→PU 台 7～19 に適合する。

この層は、ほとんど孔隙水の抜けた、乾燥状態に近いものになっていると考えられる。

II 層 $V_{p⊥}=1.6$ km/s. この値は shot 1→PU 台 6～9 によるみかけの速度 1.8 km/s に基づく。

$V_{s⊥}=0.6$ km/s. shot 1→PU 台 6～9 によるみかけの速度 $V_s \approx 0.6$ km/s に基づく。

これは破碎帯としても、異常に低い値である。しかし、この程度の値が shot 4→PU 台 7～9 の走時の説明に必要である。ここは粘土化した上に、かなり孔隙水の抜けた破碎帯である。これを特に、⊥ 方向の速度としたのは、実測に対応する path がほとんど断層面に垂直な方向であったことによる。ただ、あまりに速度値が小さいので、異方性を想定した。しかし、// 方向の値は不明である。あえて無理のない値を入れるなら、 V_s については I と同じく、20% 程度の異方性を想定すればよい。

III 層 $V_p=3.1$ km/s. shot 1→PU 台 10～12 による。精度は低い。

$V_{s⊥}=0.7$ km/s. shot 1→PU 台 10～12 による。

この層は、あらわれている巾が狭いために精度は低い。 V_p については、IV 層と区別する理由はみあたらない。shot 5→PU 台 10～19 の走時は P 波についてしか求められないが、それについては、III 層、IV 層の区別はない。しかし、shot 1→PU 台 9～19 について、はっきりした折れ曲りが S 波について見られるので、無視するわけにはゆかない。この層では、岩層は水で飽和されていると考えられる。 V_s がやはり低すぎるので、

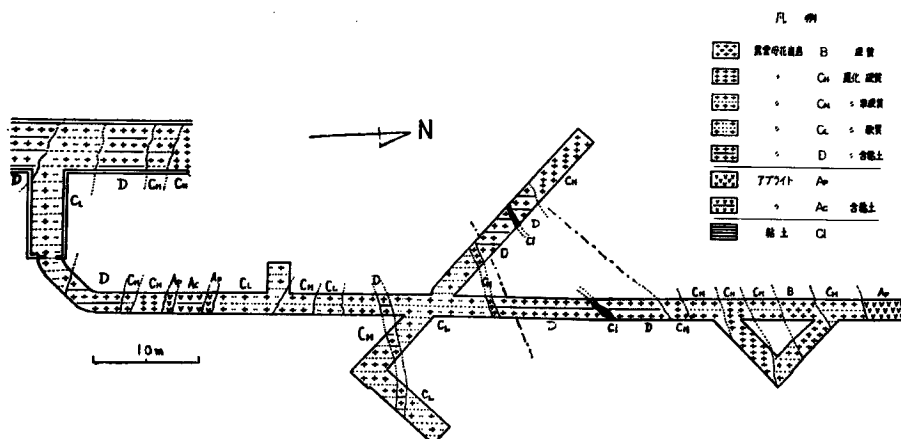


Fig. 6 Classification on the feature of rocks in the adit (after Tanaka and Higashi).

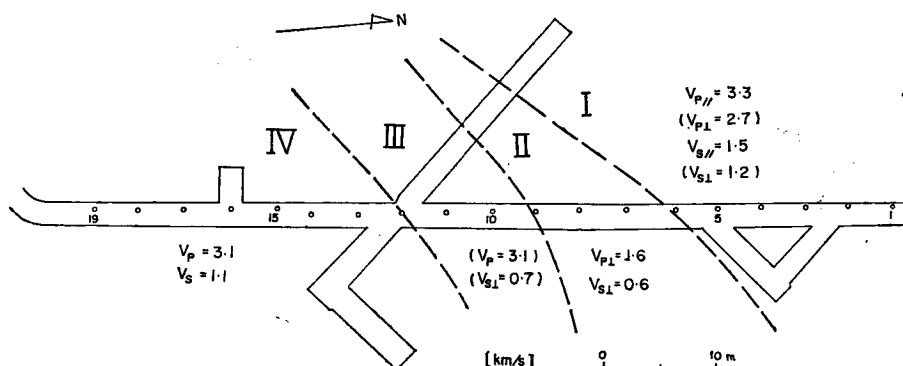


Fig. 7 Result of the velocity measurements in the observational adit of Rokko crustal movement.

これを V_{s1} として異方性を想定するのが適当である。ちなみに、水で飽和されると V_p の異方性はほとんど消えるが、 V_s はそのままである。

IV層 $V_p=3.1$ km/s すべての記象について妥当である。

$V_s=1.1$ km/s shot 1→PU 台12~19による。これは水で飽和された層とみてよい。狐崎の granite 中の実験式³⁾とも一致する。 V_p , V_s ともに特に異方性を想定する必要はないが、 V_s については異方性があるとしてもかまわない。もちろんその時は、Fig. 7の全般に影響が少し及ぶ。

3) 観測坑の岩質はすべて granite である。くわしくはさらに岩石学的な変化がみられるが、さしあたって細分の必要はない。Iの側で水が抜けているのは、この側に100mほど離れて、地表から掘られたボーリング坑中の水位が、測定当時この坑面より、約20mほど低下していた(田中豊氏の話)こととつじつまが合う。もちろんこの方の坑内は乾いている。

4) 解析法 PUはPU台1~19に固定したまま、発破点だけを移動した。PU台1~19の両端の発破の走時から、P波については、はぎとり法により、この坑道ぞいの速度を区分けした。したがってこの測線ぞいの境界位置を変えることはできない。この坑道と交叉する坑道については、PUを置いていないので、直接には境界は求められない。ここでは熊谷組の田中や、京大理学部地球物理学教室の東による地質区分図(Fig. 6)に基づいて第一近似をし、そのあとshot 4やshot 5の走時によって修正した。念のため、Fig. 7

Table 1 Comparison between measured and calculated travel times.

ray path	observed travel time (ms)		calculated travel time (ms)	
	P wave	S wave	P wave	S wave
shot point-PU base				
shot 4 — No. 4	7.5	16.0	7.5	16.5
— No. 2	8.8	23.0	8.5	21.0
— No. 6	6.8	15.3	6.1	13.2
— No. 9	9.0	22.1	8.4	21.05
— No. 13	10.0	32	10.1	31.9
— No. 16	12.3	42	12.5	39.1
— No. 19	16.0	49.5	16.3	46.3
shot 5 — No. 2	18.7		17.1	
— No. 6	12.9		12.3	
— No. 9	6.0		5.5	
— No. 13	4.9		4.4	
— No. 19	10.8		10.1	

について行ったチェックの計算走時を示す。path は直線，境界面は鉛直と仮定した。これらの仮定は，この地質から考えて，不都合ではない。(Table 1)

P 波の走時 t_p については，計算値が実測値に比べて， -0.5 ± 0.5 ms であるようにした。S 波については -2.0 ± 2.0 ms である。だいたいこの範囲に収まるように構造を修正したが，数値合せが形式的にすぎて無意味と思われるところでは，誤差がもっと大きくともよいことにした。計算走時に負の差を与えたのは，計算で省略された坑のまわりのゆるみ（低速度層）を考えに入れたからである。

5) 誤差 誤差の要因は次のようになる。

- a) 構造の仮定
- b) よみとり
- c) 実測と計算の差
- d) 局所的な速度変化—特に，坑道周辺の低速度化

解が一義的でない以上，a) の前提が実情に大局的に合っていないければ，ここの議論は根本的にくずれる。しかしその可能性は絶無と言えないまでも高くはない。したがって，a をとりあえず除外する。b については，P 波で ± 0.3 ms，S 波で ± 2 ms には収まっている。c については，4) で記した通りである。d については，PU 測線ぞいのはぎとり走時と実測走時の差が P 波にあるほか，他にこれを示す測定値はない。もし低速度層の速度が，本来の速度の1/2になっているとすると，坑道周辺の低速度化による走時の遅れは，実測とはぎとり走時の差の1/2である。但しこれは坑道にほぼ垂直に入射する波についてである。このことから，低速度層を無視した場合に比べての遅れは，P 波で $0.5 \sim 1$ ms となる。S 波では，この2～3倍である。結局，総合的な誤差は，P 波速度で $\pm 10\%$ ，S 波で $\pm 15\%$ 以内とみてよいだろう。カッコで囲んだところは，構造の仮定という解釈の余地が多く残るので，誤差の表現がしにくい。仮定が妥当であれば，誤差は，上述のものと同じである。各層の厚さ (巾) の誤差も，仮定が妥当なら 1 m $\sim$ 2 m である。

6) 記象の質 S 波が出たのは，shot 1 と 4 だけである。それには次の2つの理由が考えられる。

- a) 発破孔地点の岩質が固いのは，1 と 4 のみ
- b) 孔の向きと指向性

P 波は，どの発破によっても出ている。しかし，shot 4 $\rightarrow$ PU 台 1 $\sim$ 10 では，初動の向きが乱れる。波のまわりこみによって入射が下方からとは限らないからである。shot 1 $\rightarrow$ PU 台 10 $\sim$ 19 では，初動の出が悪い。これは不均質な地層によって波の経路が乱れるためであろう。このために，はぎとりは PU 台 1 $\sim$ 19 の両端の

shot については行わず、その中間の shot 2 と両端間のものに行った。

お わ り に

弾性波探査によって求められた速度値から、観測坑の弾性定数の分布を求め、これを考慮する事によって田中らは、伸縮計の潮汐変化および永年変化の振巾異常、位相のずれを説明する事ができた。

海岸がちかく、垂直層構造をなしているような所では、とくに海洋潮汐の負荷の項が計器の設置地点近傍の弾性定数の影響を大きく受けるという。

坑内の弾性波探査は、工学的な目的で発展してきたが、ここでは地殻変動観測に応用するという一つの試みであった。

この測定を行うにあたり、大阪新幹線工事局御影工事区の方々、および熊谷組の工事関係者の方々に、いろいろと便宜を計っていただいた。

また、この測定の計画、実行に際し、大阪市大の藤田和夫氏にお世話になった。

さらに、京都大学理学部の村上寛史、田中豊、林守孝、同防災研究所の小泉誠の各氏には、測定期間中終止行動を共にして作業に参加していただいた。

これらの各氏に心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中 豊・林 守孝・加藤正明・小泉 誠・藤田和夫：六甲断層破砕帯における地殻変動の連続観測序報，京都大学防災研究所年報，第 15 号，昭 47. 4
- 2) 田中 豊・加藤正明・林 守孝・藤田和夫：六甲断層破砕帯における地殻変動の連続観測第一報，京都大学防災研究所年報，第 15 号，昭 47. 4
- 3) Kitsunezaki, C.: In Situ Determination of Variation of Poisson's Ratio in Granite Accompanied by Weathering Effect and its Significance in Engineering Projects, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ. 15, 1965.