

北陸地方南部の地殻構造について

——手取川ダム砕石発破および琵琶湖発破——

松村 一男・見野 和夫・渡辺 邦彦

竹内 文朗・平野 憲雄

ON THE CRUSTAL STRUCTURE IN THE SOUTHERN PART OF HOKURIKU DISTRICT

——QUARRY BLASTS AT TEDORI RIVER
AND BIWAKO EXPLOSIONS——

By Kazuo MATSUMURA, Kazuo MINO, Kunihiko WATANABE
Fumiaki TAKEUCHI and Norio HIRANO

Synopsis

Since 1975 several tons of quarry blasts have been detonated many times at Tedor river in the southern part of Ishikawa Prefecture. On the other hand, in October 1978 four explosives were blasted in the northern part of Shiga Prefecture for the purpose of the investigations of the basement of Lake Biwa. The crustal structure along the profile from Tedor river to Lake Biwa was investigated using the seismic waves generated by those explosions.

A gap in travel times about the middle of the profile shows that a granitic layer may be divided into two parts. At the southern part of the profile a granitic layer is descend northward with a dip of 2.3° and the velocity of this layer is 5.85 km/sec. At the northern part the dip angle of a granitic layer is 2.5° and the velocity is 6.05 km/sec.

1. は じ め に

北陸・中部地方から近畿地方にかけての地域は、大きくみれば、琵琶湖を中心とする近畿三角帯を狭んで東西に古生層基盤である美濃・丹波山地、南北に領家帯、飛騨帯という、100km 程度の規模のブロック構造としてとらえることができる。各ブロックの境界やその内部には、北西―南東、および北東―南西の両方向に横ずれ、縦ずれ両活断層系が密度高く発達し、それに関連して地震活動度も非常に高い。それ故、地殻構造の複雑性が推定され、いく度かの爆破観測によってその解明が行われてきた。例えば、花房一倉吉¹⁾、御母衣²⁾、渥美一能登³⁾、日本海沖等の各爆破観測が行われ、種々の地殻構造モデルが提唱され、当該地方の地震活動の解析等に用いられてきた。北陸微小地震観測所においてもこれらの地殻構造モデルを総合した形の、いわゆる北陸モデルを用いて震源決定その他の解析を実施している⁴⁾。

こういった、地殻構造や地震活動の資料が蓄積されるに伴い、また、微小地震観測所のテレメーター化による観測・解析能力が向上するにつれて、より詳しい地殻構造に関する情報が必要となるに至った。そのため、一般工事、砕石等の発破も利用され、主として地殻上部の微細構造に関する資料が得られつつある。

北陸地方では、石川県手取川において、手取川ダム建設工事が開始され、1975年秋より、その砕石発破が行われ、北陸、上宝、犬山観測所等の微小地震観測網でも、その記録が得られるようになった。そのため、この砕石発破を観測して、周辺地域の地殻上部構造に関する情報を得る計画がなされ、電源開発株式会社、および前田・青木共同企業体の協力を得て、1978年夏、手取川爆破観測グループ（京都大学および名古屋大

学のメンバーよりなる)による共同観測が実施された⁹⁾。この観測は、発破点を中心として、放射状に測線を設定して行われた。この共同観測および結果の全容については別稿に示す。

手取川爆破観測と時期を同じうして、1978年10月に、京都大学理学部附属琵琶湖古環境実験施設の事業として琵琶湖北湖の上部構造を調査するため、琵琶湖の東西両岸で各2発の発破が行われた。そこで、この機会を利用して、上述の手取川爆破観測のうちの、琵琶湖方面への測線に対する逆測線観測を中心として、これら計4回の人工地震の観測を行った。

この両測線観測の結果として、石川県南部から琵琶湖に至る地方の地殻上部構造を求めたので、ここに報告する。

2. 観 測 概 要

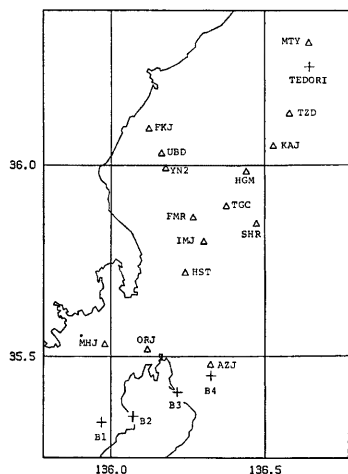


Fig. 1. Location of shot point (+) and observation stations (Δ).

各発破点および観測点分布を Fig. 1 に示す。4回の琵琶湖の発破を西からそれぞれ shot B1, B2, B3, B4 とする。手取川ダム 碎石発破の観測は既述したように1978年5月～8月にわたって発破点を中心に放射状に100点以上の観測点で実施されたが、Fig. 1 には今回解析に用いた観測点のみが示されている。

琵琶湖発破 shot B1 地点が、手取川ダム碎石発破観測のうちの、手取川ダムから大浦 (ORJ) にむかう測線の延長点に位置するので、琵琶湖発破 shot B1, B2 の観測は、手取川ダム碎石発破観測の場合と同じ測線上の同じ観測点で実施した。ただし測線上の観測点のうち谷口 (TGC)、東原 (SHR) 両観測点については手取川ダム碎石発破観測だけが実施された。

琵琶湖発破 shot B3, B4 の観測は、shot B4 地点から西北西方向の測線上で、浅井 (AZJ)、大浦 (ORJ)、美浜 (MHJ) の3観測点で、北北西方向の測線上で今庄 (IMJ)、文室 (FMR)、米岡 (YN2)、牛房谷 (UBD)、福井 (FKJ) の5観測点で観測を実施した。

観測点のうち AZJ, MHJ, IMJ, KAJ, FKJ の5観測点は北陸微小地震観測所のテレメーター観測点である。

各発破点および各観測点の座標については Table 1, 2 に示す。

Table 1. Location of shot points.

Explo.		Latitude	Longitude	Height
Tedori	T1	36° 15' 25.2''	136° 38' 47.5''	350m
	T2	36 15 5.8	136 38 46.5	400
Biwako shot	B1	35 19 40.1	135 58 5.1	196
	B2	35 20 38.5	136 4 21.6	85
	B3	35 24 23.5	136 12 58.4	85
	B4	35 26 58.1	136 19 31.5	214

Table. 2. Location of observing stations.

Code	Observation Point.	Latitude			Longitude			Height
MTY	Mitsuyano	36°	19'	2.6''	136°	38'	37.5''	310m
TZD	Tanizuido	36	8	0.6	136	34	50.8	785
KAJ	Katsuyama	36	2	55.2	136	31	41.3	300
HGM	Higashimata	35	58	51.2	136	26	26.0	180
TGC	Taniguchi	35	53	27.8	136	22	33.2	335
SHR	Suhara	35	50	41.1	136	28	23.3	600
IMJ	Imajo	35	47	53.4	136	18	10.0	240
HST	Hashidate	35	43	2.0	136	14	34.5	240
AZJ	Azai	35	28	38.0	136	19	26.0	370
ORJ	Ooura	35	31	1.7	136	7	10.9	140
MHJ	Mihama	35	31	50.2	136	58	44.2	260
FKJ	Fukui	36	5	38.9	136	7	24.0	90
UBD	Ushibodani	36	1	46.7	136	9	52.3	10
YN2	Yoneoka	35	59	23.2	136	10	43.3	90
FMR	Fumuro	35	51	40.9	136	16	6.6	220

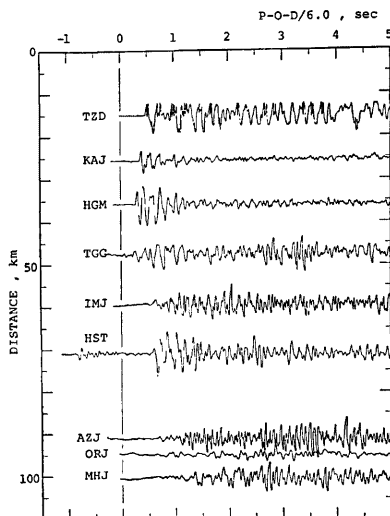


Fig. 2. Seismic record sections obtained from quarry blasts at Tedor

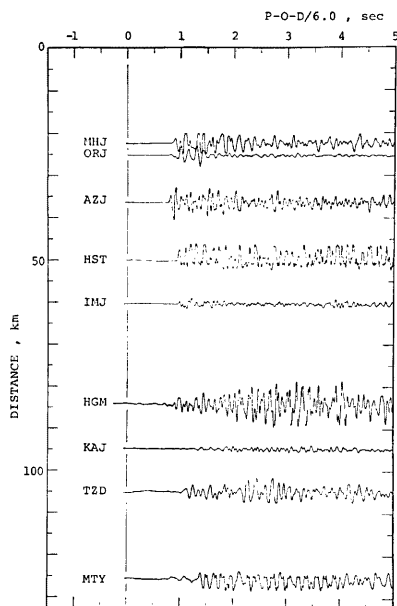


Fig. 3. Seismic record sections for shot B1.

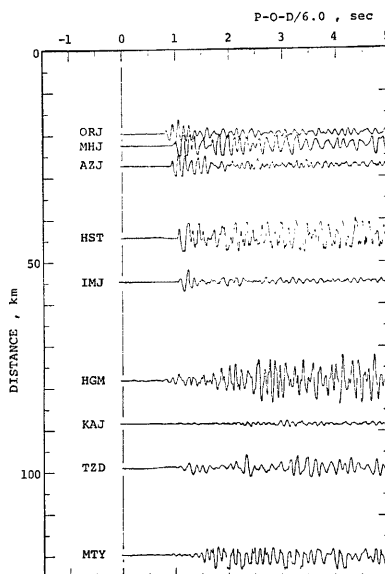


Fig. 4. Seismic record sections for shot B2.

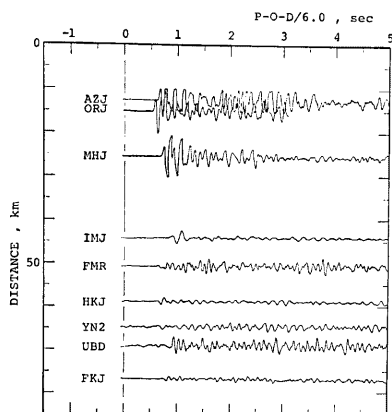


Fig. 5. Seismic record sections for shot B3.

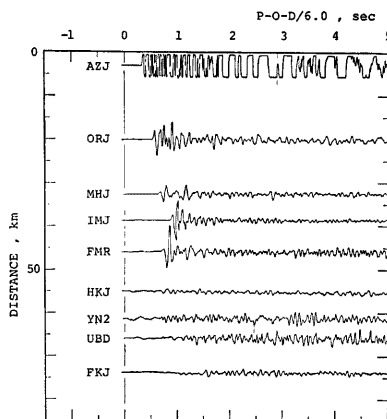


Fig. 6. Seismic record sections for shot B4.

Table. 3. Travel times for quarry blasts at Tedorí.

Code	Δ	Azimuth	Origin time	P	P-O	$\Delta/6.0$	H. C.	P-O- $\Delta/6.0$
TZD	14.93 ^{km}	S23.3°W	11 Jul. 18 ^h 27 ^m 55.80 ^s	58.75 ^s	2.95 ^s	2.49 ^s	0.10 ^s	0.35 ^s
KAJ	25.45	24.7	11 Jul. 18 27 55.80	60.44	4.64	4.24	0.04	0.36
HGM	35.81	31.2	5 Jul. 12 28 46.73	52.97	6.24	5.97	0.02	0.25
TGC	47.36	31.0	27 Jul. 18 30 23.81	31.93	8.12	7.89	0.04	0.19
SHR	48.34	18.9	31 Jul. 18 36 05.73	14.17	8.44	8.06	0.08	0.30
IMJ	59.60	31.3	5 Jul. 18 28 46.73	57.05	10.32	9.93	0.03	0.36
HST	70.08	31.3	13 Jul. 18 33 09.44	21.69	12.25	11.68	0.03	0.54
ORJ	94.35	30.3	4 Jul. 12 33 47.27	63.58	16.31	15.73	0.02	0.57

Table. 4. Travel times for Biwako explosions.

Shot B1 Origin time 24 Oct. 02^h 01^m 09.34^s

Code	Δ	Azimuth	P	P-O	$\Delta/6.0$	H. C.	P-O- $\Delta/6.0$
MHJ	22.52 ^{km}	N 2.5°E	02 ^h 01 ^m 13.90 ^s	4.56 ^s	3.75 ^s	0.03 ^s	0.78 ^s
ORJ	25.12	33.2	14.27	4.93	4.19	0.02	0.72
AZJ	36.32	62.8	16.15	6.81	6.05	0.05	0.71
HST	49.88	30.0	18.53	9.19	8.31	0.03	0.85
IMJ	60.37	30.2	20.33	10.99	10.06	0.03	0.90
HGM	84.15	30.6	24.04	14.70	14.02	0.02	0.66
KAJ	94.69	32.4	26.05	16.70	15.78	0.04	0.88
TZD	105.18	31.8	27.60	18.26	17.53	0.10	0.63
MTY	125.63	29.1	31.07	21.73	20.94	0.04	0.75

Shot B2 Origin time 24 Oct. 10^h 00^m 09.73^s

Code	Δ	Azimuth	P	P-O	$\Delta/6.0$	H. C.	P-O- $\Delta/6.0$
MHJ	22.38 ^{km}	N-22.4°E	01 ^h 00 ^m 14.38 ^s	4.65 ^s	3.73 ^s	0.03 ^s	0.89 ^s
ORJ	19.68	12.5	13.76	4.03	3.28	0.02	0.73
AZJ	27.19	57.0	15.17	5.44	4.53	0.05	0.86
HST	44.19	20.5	18.06	8.33	7.37	0.03	0.93
IMJ	54.53	22.5	19.87	10.14	9.09	0.03	1.02
HGM	78.12	25.2	23.50	13.78	13.02	0.02	0.74
KAJ	88.38	27.8	25.35	15.62	14.73	0.04	0.85
TZD	98.92	27.7	27.09	17.36	16.49	0.10	0.77
MTY	119.69	25.5	30.53	20.80	19.95	0.04	0.81

Shot B3 Origin time 26 Oct. 02^h 00^m 59.52^s

Code	Δ	Azimuth	P	P-O	$\Delta/6.0$	H. C.	P-O- $\Delta/6.0$
AZJ	13.53 ^{km}	N 51.2°E	02 ^h 01 ^m 2.20 ^s	2.68 ^s	2.09 ^s	0.05 ^s	0.54 ^s
ORJ	15.08	-35.5	2.50	2.98	2.51	0.02	0.45
MHJ	25.56	-57.4	4.47	4.95	4.26	0.03	0.66
IMJ	44.16	10.2	7.72	8.20	7.36	0.03	0.81
FMR	50.69	5.4	8.54	9.02	8.45	0.03	0.54
YN2	64.80	-3.0	10.93	11.41	10.80	0.01	0.60
UBD	69.29	-3.9	11.97	12.45	11.55	0.00	0.90
FKJ	76.75	-6.3	13.06	13.54	12.79	0.01	0.74

Shot B4 Origin time 26 Oct. 01^h 00^m 59.26^s

Code	Δ	Azimuth	P	P-O	$\Delta/6.0$	H. C.	P-O- $\Delta/6.0$
AZJ	3.08 ^{km}	N -2.6°E	01 ^h 00 ^m 0.08 ^s	0.82 ^s	0.51 ^s	0.05 ^s	0.26 ^s
ORJ	20.12	-68.0	3.15	3.89	3.35	0.02	0.52
MHJ	32.70	-73.9	5.31	6.05	5.45	0.03	0.57
IMJ	38.74	-3.0	6.56	7.30	6.46	0.03	0.81
FMR	45.99	-6.4	7.59	8.34	7.67	0.03	0.64
YN2	61.40	-12.5	10.18	10.92	10.23	0.01	0.68
UBO	66.00	-12.8	11.10	11.84	11.00	0.00	0.84
FKJ	73.83	-14.3	12.43	13.17	12.30	0.01	0.86

3. 観 測 結 果

各発破の各観測点の P-time および P-O- $\Delta/6$ 値を Table 3.4 に示す, Table 中 H. C. は標高 0m 以上に P 波速度 4.5km/sec の層があるとして (その下は P 波速度 5.5km/sec) もとめた観測点に関する高度補正值である。なお発破地点の高度に関しては補正は行っていない。

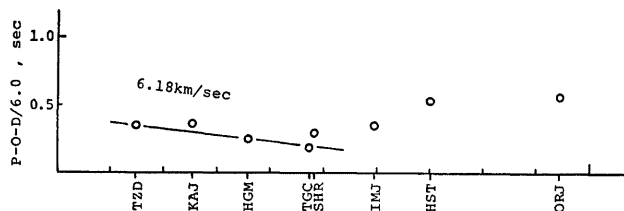


Fig. 7. Plotting of reduced travel times for quarry blasts at Tedorri.

手取川ダム砕石発破の琵琶湖へむかう測線では Fig. 7 に見られるように, $15\text{km} < \Delta < 50\text{km}$ で apparent velocity 6.18km/sec が得られた, $\Delta > 50\text{km}$ では apparent velocity は小さくなり, 初動の走時も少し遅れる傾向が見られる。この測線の逆測線にあたる shot B1, B2 の走時図を Fig. 8, 9 示す。shot B2 の走時は shot B1 の走時に比べてほとんどの観測点で相対的に遅いが, granitic layer からの屈折波が初動として観測されると考えられる $25\text{km} < \Delta < 60\text{km}$ で両 shot とも約 5.8km/sec の apparent velocity が認め

られる。両 shot から各観測点への波動伝播経路の差異が小さいと考えれば、走時の相対的な差は、B1 B2 の shot point の表層構造の違いによるものと推定される。shot B1, B2 の近傍に観測点がないので、2つの shot の相対的走時差は明らかではないが、約5.8km/sec の apparent velocity が得られる25km< Δ <60km で走時差が約0.14秒あるので、shot B2 の走時を0.14秒早く補正し解析を行った。Fig. 10 は shot B2 の走時を補正したのち、shot B1, B2 の走時を重ねて plot したものである。補正後の granitic layer からの屈折波の apparent velocity は5.77km/sec である。 Δ >70km では apparent velocity は少し速く約5.9km/sec であるが60km< Δ <70km で走時が約0.35秒不連続的に早くなっているのが注目される。

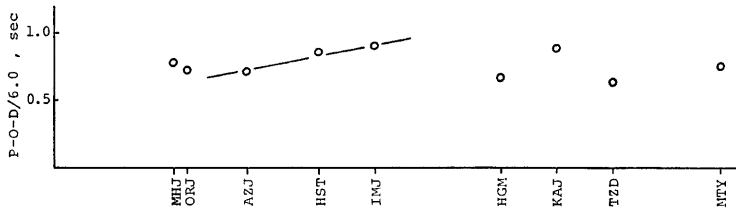


Fig. 8. Plotting of reduced travel times for shot B1.

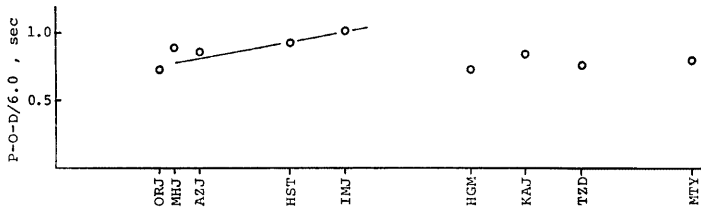


Fig. 9. Plotting of reduced travel times for shot B2.

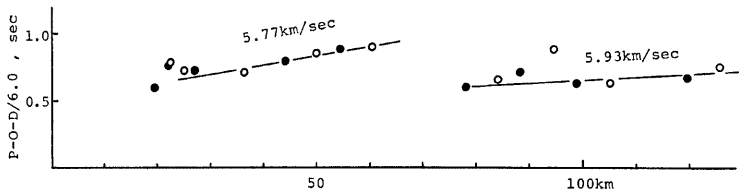


Fig. 10. Plotting of reduced travel times for shot B1(○) and shot B2(●).

shot B3, B4 の走時図を Fig. 11, 12 に示す。shot B4 については得られた記録は振巾が小さく、従って走時のバラつきも大きい。shot B1 と B2 に見られた走時の相対的な誤差は見られないので、そのまま2つの走時を重ねて plot したのが Fig. 13 である。 Δ <25km では apparent velocity は約5.5km/sec で intercept time は約0.2秒である。 Δ >30km ではデータのバラつきが大きいが比較的データの質のよい shot B2 だけに注目すれば、apparent velocity は約5.8km/sec であると考えられる。

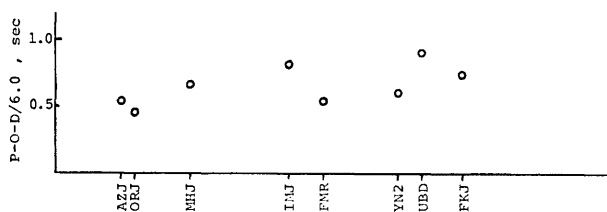


Fig. 11. Plotting of reduced travel times for shot B3.

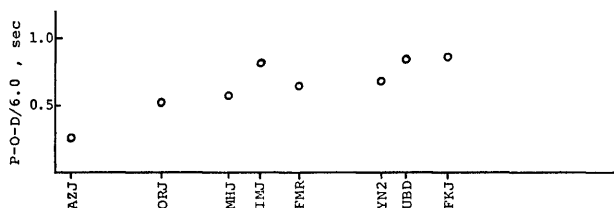


Fig. 12. Plotting of reduced travel times for shot B4.

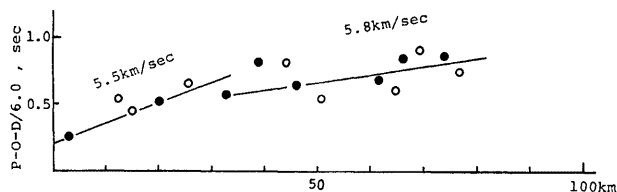


Fig. 13. Plotting of reduced travel times for shot B3 (○) and shot B4 (●).

4. 解析結果

各発破で得られた走時は次の式で表わされる

手取川ダム砕石発破	$T = d/6.18 + 0.45$	($d < 50\text{km}$)
琵琶湖発破 shot B1, B2	$T_1 = d/5.77 + 0.50$	($25\text{km} < d < 60\text{km}$)
	$T_2 = d/5.93 + 0.44$	($d > 75\text{km}$)
shot B3, B4	$T_1 = d/5.5 + 0.20$	($d < 25\text{km}$)
	$T_2 = d/5.8 + 0.37$	($d > 30\text{km}$)

以上の結果から granitic layer の P 波速度と境界面について解析を行った。発破点近傍の観測点が少ないため表層の構造については明らかでないが、shot B3, B4 に見られるように P 波速度 5.5km/sec の層の存在は否定しえないので今回の解析では granitic layer の上の層は P 波速度 5.5km/sec であると仮定して、表層を除いた 2 層について解析を行った。

琵琶湖発破 shot B1, B2 および手取川ダム砕石発破で得られた granitic layer からの屈折波の apparent velocity は差が大きく、この 2 つの値を用いて解析する限り琵琶湖—手取川ダム間 120km の測線上で水平に連続な granitic layer の存在は否定される。また shot B1, B2 の $60\text{km} < d < 70\text{km}$ での走時の不連続から考えても測線中央付近で granitic layer が不連続な構造であることが推定される。

上記 2 つの apparent velocity 5.77km/sec と 6.18km/sec とが観測された地域は同じ測線上とはいえず、

測線中央を境にして、それぞれ南北別々の地域である。構造の解析にあたっては、測線中央より南側の granitic layer の傾きと P 波速度を琵琶湖発破 shot B1・B2 で得られた走時 $T=d/5.77+0.50$ を満たすように求め、測線中央より北側については、手取川ダム砕石発破で得られた走時 $T=d/6.18+0.45$ を満たすように求めた。

Table 5. Velocities of a granitic layer (V_g) and dip angles of the boundary (θ) calculated from apparant velocities (V_a) in the southern and northern parts of the profile.

Southern		Northern	
V_g	θ	V_g	θ
5.80km/sec	0.91°	6.00km/sec	3.57°
5.85	2.32	6.05	2.51
5.90	3.62	6.10	1.51
5.95	4.83	6.15	0.55
6.00	5.96	6.20	-0.36
$V_a : 5.77\text{km/sec}$		$V_a : 6.18\text{km/sec}$	

Table 5. に測線の南北で個々に求められた granitic layer の傾きと P 波速度を示す。次にこれら個々に求められた構造を組合せて走時を計算し、琵琶湖発破 shot B1・B2 で得られた $60\text{km} < d < 70\text{km}$ での走時の不連続および $d > 70\text{km}$ の観測点の走時にも適合するものを求めた。その結果、granitic layer は測線南部では P 波速度 5.85km/sec、傾きは 2.3° で北に向って深くなっており、測線北部では P 波速度 6.05 km/sec、傾きは 2.5° で同じく北に向って深くなっている。南北の境は測線中央より少し南、shot B1 地点から約 55km の所におくのが妥当だと考えられる。境における granitic layer の gap は約 6 km でかなり大きい。(Fig. 14)

上記の構造から求められる走時と shot B1・B2 の観測データを重ねて描いたものを Fig. 15 に示す。

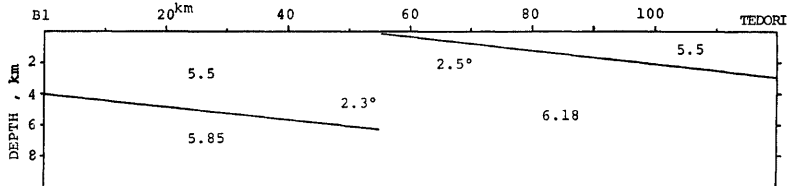


Fig. 14. Crustal structure. Numeral : P-wave velocity in km/sec.

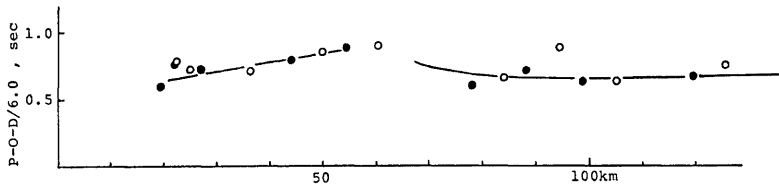


Fig. 15. Theoretical travel time curves calculated from the structure shown Fig. 14 and the observed travel times for shot B1(○) and shot B2(●).

5. ま と め

琵琶湖—手取川ダム間の距離が120km と granitic layer の構造を解析すべき測線としては少し長すぎ、明瞭に得られた apparent velocity が地域的に重ならなかったので精度の高い解析ができなかったが、琵琶湖発破 shot B1・B2 の60km $<4<70$ km で走時の gap が観測されたことは注目に値するし、それによって測線の南北で granitic layer の不連続性が明らかになったことは評価されよう。

測線南部では granitic layer の P 波速度は 5.85km/sec と他地方の一般的値より少し小さく、傾きは 2.3°で北へ向って深くなっている。この値は表層の構造が明らかになれば多小変ると考えられるが傾向が変ることはないと思われる。測線北部では granitic layer の P 波速度は 6.05km/sec で南に比べて少し早い、傾きは 2.5°と南とほとんど変らない。南部と北部の境の granitic layer の gap は約6kmでかなり大きい。

この地域では北陸微小地震観測所のテレメーター観測網により精度の高い地震の観測が行われているが、今後はこれら自然地震を用いた地殻構造の研究も期待され、より詳しい構造が求められると考えられる。

琵琶湖発破の発破点および発破時刻等に関する資料は、京都大学理学部附属琵琶湖古環境実験施設より提供して頂きました。関係各位に深く感謝いたします。手取川ダム砕石発破の観測に際し、多大な御協力を頂いた、電源開発株式会社および前田・青木共同企業体の方々および両発破観測および観測データ処理に協力頂いた、小泉誠氏、松尾成光氏、古川信雄氏に深く感謝の意を表します。

本研究中、構造を求めるための計算は京都大学防災研究所附属防災科学資料センターの FACOM 230-25 を用いて行いました。

参 考 文 献

- 1) Hashizume, M., O. Kawamoto, S. Asano, I. Muramatsu, T. Asada, I. Tamaki and S. Murauchi: Crustal Structure in the Western Part of Japan Derived from the Observation of the First and Second Kurayoshi and Hanabusa Explosions. Part 2. Crustal Structure in the Western Part of Japan, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 44, 1966, pp. 109-120.
- 2) Mikumo, T., M. Otsuka, T. Utsu, T. Terasima and A. Okada: Crustal Structure in Central Japan as Derived from the Miboro Explosion-Seismic Observations Part 2. On the Crustal Structure, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 39, 1961, pp. 327-349.
- 3) Aoki, H., T. Tada, Y. Sasaki, T. Ooida, I. Muramatsu, H. Shimamura and I. Furuya: Crustal Structure in the Profile across Central Japan as Derived from Explosion Seismic Observations, J. Phys. Earth, Vol. 21, 1972, pp 197-223.
- 4) 渡辺邦彦・平野憲雄・岸本兆方: 北陸地方の微小地震活動 (第一報), 京都大学防災研究所年報, 第21号 B-1, 1978, pp 57-67.
- 5) 手取川発破観測グループ: 手取川ダム工事砕石発破観測について (その1) —観測の概要及び北陸・上宝地域の地殻上部構造—, 地震学会講演予稿集, 1978 No. 2 pp 66.