

## (22) 和泉層のゆるみ現象

京都大学工学部 島 昭治郎  
 " " 谷 本 親伯  
 " " 西 原 晃  
 " " ○ 刈 谷 敬三  
 " " 岸 田 豊

### 1. 結 論

土木地質の分野では、弾性波伝播速度を利用することが多く、とくにトンネルやダム基礎岩盤の地質調査では、最も重要な調査方法であり、我国では広く普及している。かみりの広がりを持ったき裂を含む原位置岩盤の性質を表すパラメータとして有用なものであるが、き裂を含む原位置岩盤における弾性波の伝播挙動は、岩盤中の応力状態、き裂の頻度、き裂面での岩塊の接触状態など種々の条件によって変化する。原位置で測定された弾性波速度と採取したコアの弾性波速度との相違を一つのパラメータとして、き裂による不連続性を総合的に表示することが行われたり<sup>1), 2)</sup>あるいは、高圧荷重下での岩石試料に関する弾性波速度の変化に関する研究がなされている<sup>3), 4)</sup>。さらに、き裂の頻度と弾性波速度との関係を検討したものもある<sup>5)</sup>。

我々の研究では、室内実験として従来あまり試みられなかった載荷方向での弾性波速度の変化、き裂を含むモデルを利用した弾性波速度と応力状態との関係、き裂の頻度や接触状態が弾性波速度に及ぼす影響等を検討した。これらの室内実験で得られた知見に基づき、和泉層に行った現場測定結果と、き裂の頻度を主たる要因として整理し、ゆるみ現象を解析した。

### 2. コアの弾性波伝播挙動(室内実験による解析)

鳴門地区よりφ76のビットにて採取されたボーリングコアの中から岩区AおよびC<sup>6)</sup>の砂岩を選り、端面にエゲ精度を1/100として長さ10cmおよび4cmの試料を準備した。測定方法は、図-1に示すように、いくつかの試験片を重ね、上下端にビエツ素子(打田製)を接着し、鉄製リングを介して荷重を変化させ、載荷方向の弾性波の速度を測定可能なものである。

試料を直接接触させた場合、濾紙を用いて人工的にき裂の幅を変化させた場合、さらにき裂面が浸潤している場合について、応力レベルと弾性波速度( $V_{pc}$ )との関係を求めた。図-2は、岩区Cより採取した砂岩について得たものである。荷重の変化に伴う伝播速度の著しい変化が認められる。

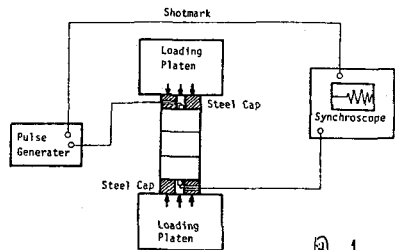


図-1

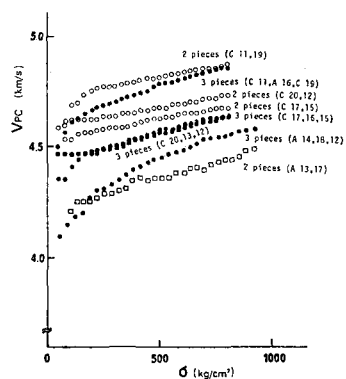


図-2 き裂を含む試料の弾性波速度と応力との関係

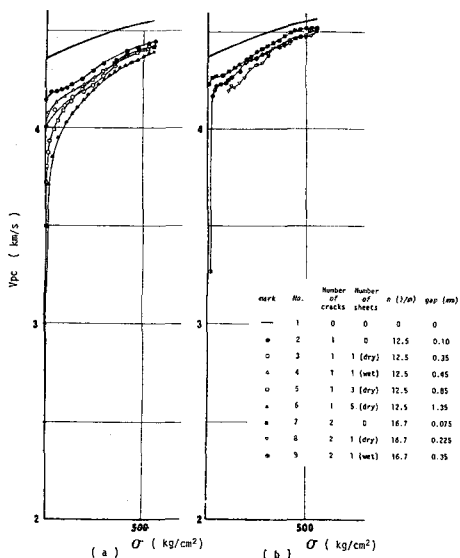


図-3 種々のき裂状態に対する  $V_{pc} - \sigma$  関係

可なり、き裂の無い状態では、 $0 \sim 500 \text{ kg/cm}^2$  の範囲で、 $100 \sim 200 \text{ m/sec}$  程度の変化を示したのに対し、き裂の存在下では、特に  $0 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$  の範囲での変化が大きく、 $0$  付近では約半分の程度に減少する。(図-3)

池田は、トンネル内での弾性波速度測定と岩盤状態を調査し、 $100$  未満の地味でのデータに基づく割れ目指数  $k$  (原位置調査のようにき裂を含んだ状態での伝播速度  $V_p$  の対り伝播速度  $V_{p0}$  に対する比、 $V_p/V_{p0}$  に定義) と岩盤状態について報告している。<sup>5)</sup>  $k$  は割れ目の多少、割れ目の風化状態を表わす指標と考えられ、 $1\text{m}$  あたりの割れ目の数  $n$  とき裂頻度  $\eta$  として表わすならば、図-4 のような関係が認められる。我々の実験は、 $\eta = 12.5, 16.7$  に相当するもので、これを池田の現場調査結果と比較すると、図-5 のようになった。同一の  $\eta$  に対しかなり高い  $k$  を示す。また、我々の実験結果からは、図-6 に示すように、荷重がほとんど零、可なり掘削面のごく近傍では、 $\eta$  が変化しなくとも、き裂の幅や充填物の状態、乾湿の程度によっても  $k$  が異なることが分る。

### 3. 原位置調査結果における割れ目指数の変化

#### (1) 斜面掘削の場合

$45^\circ$  の傾斜角を有する、いわゆる流れ盤の状態にある砂岩・頁岩の互層岩盤の法面掘削を5段階に分けて  $20\text{m}$  掘り下げ、初期状態と掘削後の状態について弾性波探査を実施したところ、図-7 のような結果を得た。掘削法面および掘削ベンチには、自由面より  $3 \sim 7\text{m}$  の深さに、掘削前の初期状態における弾性波速度が半減する領域が認められている。この現象をき裂の頻度との関係から考察する。掘削に伴う速度低下の原因としては、応力状態の変化、既存のき裂の開口および新たなき裂の発生の三者が考えられる。表-1 に岩盤が1層および2層について、P波速度被り厚から算出した上載荷重、割れ目指数および割れ目指数から

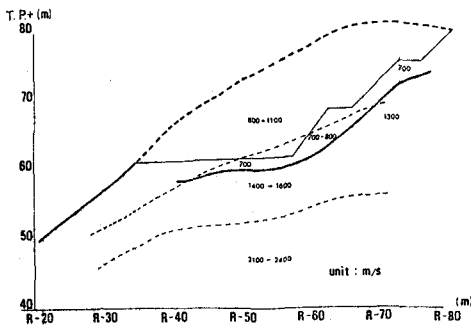


図-7 法面掘削による弾性波速度の変化

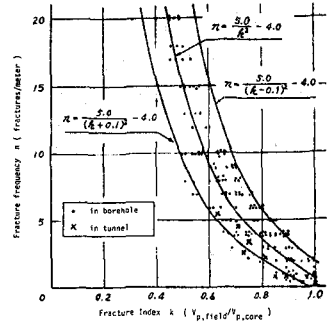


図-4  $\eta-k$  関係 (池田による)<sup>5)</sup>

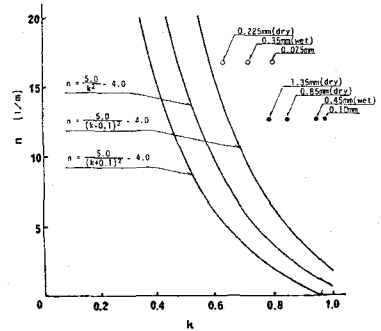


図-5 室内実験結果と  $\eta-k$  関係

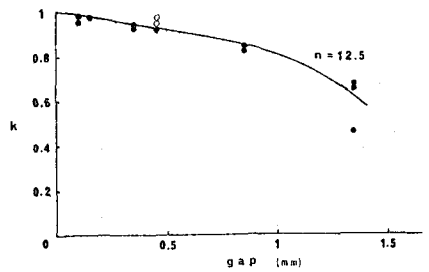


図-6 き裂幅と  $k$

表-1 法面掘削時現場測定結果

| Layer     | Location | STEP 1                        | STEP 2    | STEP 3    | STEP 4    | STEP 5    |           |
|-----------|----------|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1st Layer | Bench    | $V_p$ (m/s)                   | 800-1100  | 500       | 700-800   | 300-700   | 500-600   |
|           |          | $\sigma$ ( $\text{kg/cm}^2$ ) | 0.8-2.4   | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       |
|           |          | $k$                           | 0.19-0.25 | 0.12      | 0.16-0.19 | 0.07-0.16 | 0.12-0.14 |
|           | Slope    | $n$ (1/m)                     | 130-70    | 335       | 190-130   | 1000-190  | 335-240   |
|           |          | $V_p$ (m/s)                   | 800-1100  | 1100      | 700-800   | 400-700   | 600-700   |
|           |          | $\sigma$ ( $\text{kg/cm}^2$ ) | 0.8-2.4   | 0.0       | 0.0       | 0.0       | 0.0       |
| 2nd Layer | Bench    | $V_p$ (m/s)                   | 1400-1600 | 1400-1600 | 1400-1600 | 700-1200  | 500-600   |
|           |          | $\sigma$ ( $\text{kg/cm}^2$ ) | 3.0-5.0   | 2.0-4.0   | 1.5-3.5   | 1.0-3.3   | 0.0-2.5   |
|           |          | $k$                           | 0.33-0.37 | 0.33-0.37 | 0.33-0.37 | 0.16-0.28 | 0.12-0.14 |
|           | Slope    | $n$ (1/m)                     | 40-35     | 40-35     | 40-35     | 190-60    | 335-240   |
|           |          | $V_p$ (m/s)                   | 1400-1600 | 1400-1600 | 1100      | 700-1200  | 700-800   |
|           |          | $\sigma$ ( $\text{kg/cm}^2$ ) | 3.0-5.0   | 2.0-4.0   | 1.5-3.5   | 1.0-3.3   | 0.0-2.5   |

算出したき裂の頻度を示した。応力状態の変化は、最大  $5 \text{ kg/cm}^2$  と考えらるゝが、室内実験でも、 $0 \text{ kg/cm}^2$  のごく近傍での荷重変化が弾性波速度に著しく影響することが確認されている。原位置での目視観察では、き裂面が大幅に風化作用を受け、粘工等の充填物も確認されているので、この奥さらに詳しいき裂面の観察を行い、どのような基準でき裂面の状態を表現するかを検討しないことには、応力状態と弾性波速度との関係は明瞭とならないであろう。今後の課題である。原位置の和泉層については、掘削に伴う新たなき裂の発生程度は比較的少ないと思われるが、掘削方法として発破を使用しており、掘削面より数mの範囲にき裂が発生することは、過去の経験からも予想されることである。しかしながら、き裂の開口と新たなき裂の発生の影響を総合的にき裂の頻度  $n$  の増加として考察してみると、次のようである。表-1の  $n$  は、

$n = 5.0 / \rho^2 - 4.0$  の関係から算出したものである。岩盤が1層については、ベンチ面および法面とほぼ  $1.5 \sim 2.0$  倍の増加を示し、第2層については、 $5 \sim 6$  倍の増加がある。たとえば、 $n = 200$  は、 $1 \text{ m}$  あたり  $200$  本のき裂が存在し、その間隔は平均  $5 \text{ mm}$  とひじょうに細かく破砕された状態に相当する。B, C<sub>1</sub> および C<sub>2</sub> 級岩盤として、弾性波速度から割れ目指数の変化を示すと、表-2のようであり、B級岩盤については、割れ目指数は変化していないが、C<sub>1</sub> および C<sub>2</sub> 級岩盤では、初期状態の  $0.32$  および  $0.42$  が掘削後  $0.12$  および  $0.21$  と半分以下に低下し、き裂の頻度の増加には著しいものがある。したがって、和泉層については、掘削面が完全に無荷重状態になる法面掘削のような場合には、相当著しいゆがみが生ずるものと考えられ、構造物の安定性を検討する上では、ゆがみによる強度の劣化状態を追跡せねばならないであろう。

(2) 海面下多柱基礎掘削の場合

大島門橋側塔多柱基礎 2P-N0.5 ( $\phi 3.6 \text{ m}$ ) の掘削時に実施した孔間弾性波速度測定結果からゆがみの程度を考察した。図-8に示すように、 $\phi 90$  のボーリング孔 N0.1 および N0.6 を発振孔とし、N0.2 孔下受振孔とした。波動の経路と地質状況は、図-9に示すようである。測定結果を表-3

表-2 岩盤区分と  $k$  の変化

| Class          | $V_p$ (m/s) | $V_{pc}$ (m/s) | $k_0$ | $V_p$ (m/s) | $k$  |
|----------------|-------------|----------------|-------|-------------|------|
| C <sub>2</sub> | 1100        | 3400           | 0.32  | 400         | 0.12 |
| C <sub>1</sub> | 1600        | 3800           | 0.42  | 800         | 0.21 |
| B              | 2400        | 3800           | 0.63  | 2400        | 0.63 |

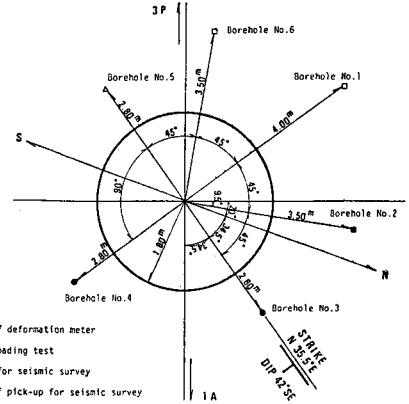


図-8 多柱基礎掘削時の測定点配置

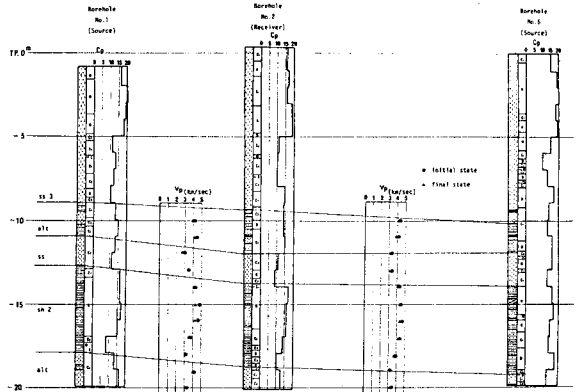


図-9 波動伝播経路と地質

表-3 多柱基礎掘削時弾性波速度測定結果

| No. | Face Position (m) | TP-8,25    |        | TP-11,35 |        | TP-13,48 |        | TP-14,42 |        | TP-15,40 |        | TP-17,35 |      | TP-19,40 |  | TP-20,02 |  | Ref. |
|-----|-------------------|------------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|------|----------|--|----------|--|------|
|     |                   | Date ('78) | Jun.20 | Jun.22   | Jun.23 | Jun.24   | Jun.25 | Jun.26   | Jun.27 | Jun.28   | Jun.29 | Lab.     | Test |          |  |          |  |      |
| 11  | -10.00            | 4140       | 3970   | 3920     | 3970   | 3950     | 4000   | 4230     | 3920   | 4080     | 4000   | 4350     |      |          |  |          |  |      |
| 12  | -11.00            | 4460       | 4460   | 4460     | 4270   | 4390     | 4310   | 4700     | 4330   | 4300     | 4270   | 4350     |      |          |  |          |  |      |
| 9   | -12.00            | 3150       | 3150   | 2990     | 2960   | 2910     | 2860   | 2860     | 2990   | 3010     | 3000   | 4050     |      |          |  |          |  |      |
| 8   | -13.00            | 3450       | 3410   | 3450     | 3410   | 3260     | 3370   | 3300     | 3450   | 3390     | 3450   | 4050     |      |          |  |          |  |      |
| 7   | -14.00            | 4330       | 4300   | 4310     | 4260   | 4260     | 4330   | 4360     | 4360   | 4330     | 4300   | 5000     |      |          |  |          |  |      |
| 6   | -15.00            | 4920       | 4910   | 4920     | 4750   | 4830     | 4860   | 4890     | 4830   | 4460     | 4450   | 5000     |      |          |  |          |  |      |
| 5   | -16.00            | 4750       | 4140   | 4260     | 4360   | 4520     | 4620   | 4260     | 4390   | 4400     | 4330   | 5000     |      |          |  |          |  |      |
| 4   | -17.00            | 3670       | 3900   | 3720     | 3670   | 3670     | 3670   | 3560     | 3580   | 3670     | 3770   | 5000     |      |          |  |          |  |      |
| 3   | -18.00            | 3090       | 3090   | -        | -      | -        | -      | -        | -      | -        | -      | 5000     |      |          |  |          |  |      |
| 2   | -19.00            | 4200       | 4080   | 4080     | 4030   | 4050     | 3970   | 3970     | 4000   | 4000     | 4050   | 4350     |      |          |  |          |  |      |
| 1   | -20.00            | 2680       | -      | -        | -      | -        | -      | -        | -      | -        | -      | 4350     |      |          |  |          |  |      |

Note:  $V_{00}$ : Initial value of  $V_p$  (m/sec)  
 $V_p$ : Velocity of primary wave in field (m/sec)  
 $V_{pc}$ : velocity of primary wave in specimen (m/sec)

表-4 掘削による弾性波速度の変化率

| No. | Face Position (m) | TP-8.25    |        | TP-11.75 |        | TP-13.40 |        | TP-14.42 |        | TP-15.40 |        | TP-17.25 |        | TP-19.42 |        | TP-20.03 |        |
|-----|-------------------|------------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
|     |                   | Date ('78) | Jun.20 | Jun.22   | Jun.23 | Jun.24   | Jun.25 | Jun.26   | Jun.27 | Jun.28   | Jun.28 | Jun.28   | Jun.28 | Jun.28   | Jun.28 | Jun.28   | Jun.28 |
| 11  | -10.00            | 1.0        | 0.959  | 0.943    | 0.959  | 0.947    | 0.966  | 0.973    | 0.947  | 0.966    | 0.973  | 0.947    | 0.966  | 0.973    | 0.947  | 0.966    | 0.973  |
| 10  | -11.00            | 1.0        | 1.0    | 1.0      | 0.993  | 0.984    | 0.984  | 0.970    | 0.942  | 0.971    | 0.964  | 0.964    | 0.962  | 0.962    | 0.962  | 0.962    | 0.962  |
| 9   | -12.00            | 1.0        | 1.0    | 0.945    | 0.940  | 0.930    | 0.940  | 0.940    | 0.949  | 0.949    | 0.959  | 0.959    | 0.952  | 0.952    | 0.952  | 0.952    | 0.952  |
| 8   | -13.00            | 1.0        | 0.988  | 1.0      | 0.988  | 0.945    | 0.945  | 0.945    | 0.956  | 1.0      | 0.978  | 1.0      | 0.953  | 0.953    | 0.953  | 0.953    | 0.953  |
| 7   | -14.00            | 1.0        | 0.993  | 1.0      | 0.993  | 0.983    | 1.0    | 1.013    | 1.013  | 1.013    | 1.013  | 1.013    | 1.013  | 1.013    | 1.013  | 1.013    | 1.013  |
| 6   | -15.00            | 1.0        | 0.998  | 1.0      | 0.995  | 0.980    | 0.980  | 0.980    | 0.982  | 0.980    | 0.984  | 0.984    | 0.984  | 0.984    | 0.984  | 0.984    | 0.984  |
| 5   | -16.00            | 1.0        | 0.972  | 0.897    | 0.918  | 0.954    | 0.954  | 0.954    | 0.897  | 0.924    | 0.924  | 0.924    | 0.924  | 0.924    | 0.924  | 0.924    | 0.924  |
| 4   | -17.00            | 1.0        | 0.981  | 0.941    | 0.948  | 0.948    | 0.948  | 0.948    | 0.915  | 0.925    | 0.948  | 0.948    | 0.948  | 0.948    | 0.948  | 0.948    | 0.948  |
| 3   | -18.00            | 1.0        | 1.0    | 1.0      | 1.0    | 1.0      | 1.0    | 1.0      | 1.0    | 1.0      | 1.0    | 1.0      | 1.0    | 1.0      | 1.0    | 1.0      | 1.0    |
| 2   | -19.00            | 1.0        | 0.972  | 0.971    | 0.966  | 0.971    | 0.943  | 0.945    | 0.952  | 0.952    | 0.952  | 0.952    | 0.952  | 0.952    | 0.952  | 0.952    | 0.952  |

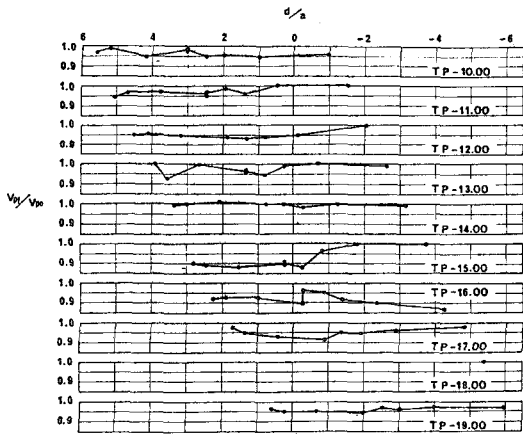


図-10 弾性波速度の変化と切羽の進行

表-5 掘削前後の割れ目指数

| TP (m) | Class                             | V <sub>po</sub> (m/s) | V <sub>pc</sub> (m/s) | V <sub>p</sub> (%) | V <sub>p</sub> (100%) | C <sub>p</sub> | k     |
|--------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|----------------|-------|
| -10.00 | C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>    | 4140                  | 4800                  | 0.90               | 4000                  | A*             | 0.870 |
| -11.00 | B-C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>  | 4480                  | 4600                  | 0.970              | 4200                  | B*             | 0.913 |
| -12.00 | C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>    | 3150                  | 4050                  | 0.777              | 3000                  | C*             | 0.741 |
| -12.00 | C <sub>2</sub> -D                 | 3450                  | 4050                  | 0.852              | 3450                  | C*             | 0.852 |
| -14.00 | B-C <sub>1</sub>                  | 4330                  | 4800                  | 0.941              | 4300                  | C*             | 0.935 |
| -16.00 | B                                 | 4920                  | 5000                  | 0.984              | 4450                  | A*             | 0.890 |
| -16.00 | B                                 | 4750                  | 5000                  | 0.950              | 4330                  | A*             | 0.866 |
| -17.00 | B-C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>  | 3870                  | 4600                  | 0.841              | 3770                  | B*             | 0.820 |
| -18.00 | C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub> -D | 3090                  | 4650                  | 0.743              | -                     | C*             | -     |
| -19.00 | C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>    | 4200                  | 4800                  | 0.913              | 4050                  | A*             | 0.880 |
| -20.00 | C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>    | 3260                  | 4600                  | 0.709              | -                     | B*             | -     |

| Rock Classification               |            |
|-----------------------------------|------------|
| 1                                 | 2          |
| C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>    | 14 (B*)    |
| B-C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>  | 14.75 (B*) |
| C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>    | 12.5 (C*)  |
| C <sub>2</sub> -D                 | 13 (C*)    |
| B-C <sub>1</sub>                  | 11.25 (C*) |
| B                                 | 18.5 (A*)  |
| B                                 | 14 (B*)    |
| B-C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>  | 15.5 (B*)  |
| C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub> -D | 11.5 (C*)  |
| C <sub>1</sub> -C <sub>2</sub>    | 14.5 (B*)  |

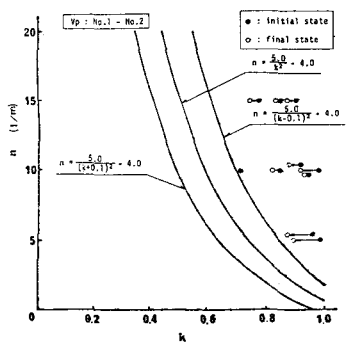


図-11 掘削前後のn-k

に示す。右欄にコアの弾性波速度を示した。この結果より、初期状態の弾性波速度に対する比として、速度変化を求めると、表-4のようになる。大体数%~10%程度の伝播速度の減少が認められる。

多相基礎掘削に伴うゆりみ現象は、一種の立坑と考えれば、大口径ボーリング機の切羽面をなす切羽面の位置と大きさ関係に依存するので、切羽面を基準にして、伝播速度の変化を検討すると、図-10のようになる。また、同図に波動の伝播経路に相当する部分の岩盤区分を表示した。岩盤区分-1は、従来の多く用いられていたA~E分類によるものであり、岩盤区分-2は総合評定法<sup>(2)</sup>による評定である。図-10で見ると、TP-14.00およびTP-18.00地更下除いて、大体切羽の進行に伴う伝播速度の変化が認められ、変形挙動との間にも関連がつかない。掘削前および掘削後の割れ目指数は、表-5に示すように最大8%程度の変化を示している。これをn-kの関係を示す図エにプロットすると、図-11となる。図中の各点nの値は、ボーリングコアの観察に基づき決定したものである。

総合的に、2P-NO.5地更における岩盤のn-k関係は、池田の調査した結果に比べ、より大きなnの領域に相当することになり、かなり良好な岩盤状態と判断してよいであろう。nの変化も小さく、き裂面の風化や充填物の影響は、ほとんど見られないうので、掘削によるゆりみの程度は小さいものと考えられる。

文献

- 1) 工藤慎一：ダム基礎岩盤の調査，土木技術資料，Vol. 2, No. 3 (1960)
- 2) 若月 奥田 中島：現場および室内試験による岩質判定について，第10回道路会議 掘削課題論文集，日本道路協会 (1971)
- 3) 大見 井上：一軸圧縮下における岩石の弾性波伝播特性，第5回岩の力学国内シンポジウム講演集 (1977)
- 4) 菅原 捷：岩石の圧縮応力と弾性波伝播速度について，第11回岩盤力学シンポジウム，土木学会 (1978)
- 5) 物理探査技術協会：土木弾性波探査法，pp 406-408 (1972)
- 6) 越智 能戸 裕次：岩盤の総合評定に関する一試案，第4回岩の力学国内シンポジウム (1973)

# THE RELAXATION OF TERTIARY SEDIMENTARY ROCK

## --- SEISMIC BEHAVIOR OF IZUMI FORMATION

by Shojiro HATA, Chikaosa TANIMOTO, Akira NISHIHARA,  
Keizo KARIYA and Yutaka KISHIDA

Dept. of Civil Engg., Kyoto University

### SUMMARY

In the excavation of rock mass including many discontinuities such as Izumi Formation, Tertiary alternative layers of sandstone and shale which are heavily fissured in most of cases, the relaxation at discontinuities is considered to influence much to in situ strength characteristics.

Authors had the chance to carry out some field measurements at the construction sites of cut slope for a highway and vertical shaft for the foundation of a suspension bridge which were located closely in the same Izumi Formation. In the both of cases, seismic method was applied for the reasons that it has the outstanding advantages of being relatively cheap and rapid to apply, influencing large volumes of rock and being well experienced in Japan.

The propagating behavior of seismic wave through the rock mass with discontinuities is subjected to the state of 'stresses', 'fracture frequency' ( $n$ ) defined by the number of joints per 1 meter and 'velocity ratio' ( $k$ ) defined by the ratio of primary wave velocity in situ ( or through a cracked model ) to that of intact rock ( without discontinuity ).

The results from the field measurement at the cut slope in which all stresses near the surface were relieved show that the reduction of  $k$ -value are nearly zero for B-class rock and 50 - 70 % for C-class rock. Also, the results from the one around the circular vertical shaft, of 3.6 m in dia. and of 20 m deep around which confining pressure acted in tangential direction, show less reduction such as 5 - 8 % and 3 - 5 % to for B-class rock and C-class rock respectively.

Comparing with Ikeda's equation in the form of  $n = 5.0 / k^2 - 4.0$ , being based on the results obtained at more than 100 sites, the former case indicates very low  $k$ -value and the latter does rather high one under the condition of no variation in fracture frequency, the fact of that was confirmed by visual observation at the both sites.

In the laboratory test using piled specimens, having the dimensions of 4 cm and 10 cm long with 76 mm in dia., sampled from the same sites where the field measurements were carried out, the relations between the directions of loading - propagating, fracture frequency - velocity ratio with some variation of gap in the range of 0.1 mm - 1.35 mm, and stress level - velocity ratio were clarified experimentally.

The following are concluded:

- (1) The change of compression in the lateral direction to wave propagation has little influence to velocity ratio.
- (2) The remarkable decrease of velocity ratio are recognized in the range of 50 to 0  $\text{kg/cm}^2$  at unloading and it reaches at the half of an initial value when the direction of wave propagation agrees with that of compression.
- (3) The variation of velocity ratio is also subjected the interval of gap and lying material at joints.
- (4) The excavation of the vertical shaft by the boring machine with a large diameter did not have any influence to the stability of the shaft, and it was confirmed that no interference by the excavation of an adjacent shaft 4.4 m far happened.