

(31) 孔間弾性波測定によるグラウチング前後の改良効果の判定について

株式会社 間 組 正会員 世一 英俊
同 上 ○正会員 蓮井 昭則
同 上 正会員 平井 光之
山口大学 工学部 正会員 中川 浩二

On Evaluation of Grouting Effect for Rock-foundation by means of Crosshole Seismic Exploration Technique

H.Yoichi, Hazama-Gumi, Ltd.
A.Hasui, Hazama-Gumi, Ltd.
M.Hirai, Hazama-Gumi, Ltd.
K.Nakagawa, Yamaguchi Univ.

The crosshole seismic exploration technique has been studied using an original prototype equipments. This technique was applied to rock mass to quantitatively estimate the grouting effects.

The following results are obtained:

- This technique was a powerful measure for checking the reinforced effects by grouting.
- Changes of seismic wave velocity were 5 to 14% in V_p , 8 to 25% in V_s , respectively.
- The incremental rate of dynamic elastic modulus was 50% of maximum.
- The smaller the dynamic elastic modulus before grouting was, the bigger the change ratio become.

1. まえがき

地盤中の地質工学的情報を知る方法の1つとして、弾性波調査法は従来から広く行われている代表的な方法である。この弾性波調査法には各種の方法があるが、その中でも複数のボーリング孔を利用し、直接波（透過波）を測定しようとする孔間弾性波調査法（Crosshole Seismic Exploration Technique）が注目を浴びている。最近、医学の分野で開発されたCT（Computer Tomography）技術を弾性波調査結果処理に適用することにより、地盤内部の状況をある程度把握可能になってきたことが孔間弾性波調査法の利用範囲拡大への大きな引金にもなっている。

さて、ダム基礎岩盤に代表される重要構造物基礎等で実施されるグラウチングは、岩盤中の破砕部や亀裂開口部にセメントミルク等のグラウト剤を注入することによって、岩盤の止水性の改良や強度の向上を目的とするものであり、一般に検測孔を用いたルジオンテスト（透水性のチェック）によって効果が判定されている。このルジオンテストによる透水性のチェックは、止水性の改良を目的としたカーテングラウトに対しては直接の効果判定の資料となるが、岩盤全体としての強度向上を目的としたコンソリデーショングラウトに対してはこれに代わる直接的な効果判定の指標が望まれるところである。

著者らは、孔間弾性波調査法のグラウチングによる岩盤改良の効果判定への応用を考え、P波速度値、振幅減衰等の指標についての測定精度の向上を目指して、機器開発や実験測定を行ってきた。^{1) 2)} 今回、グラウト前後での孔間弾性波調査の機会を得、P波、S波についてのデータの処理を行ったのでここに報告する。

2. 調査システム

調査に用いた孔間弾性波システムはボーリング孔径 $\phi 66\sim 76\text{mm}$ 孔間距離最大15m程度を対象としており、著者らが開発してきた3タイプのシステムの内、中区間用孔間弾性波調査システムと称しているものである。³⁾

図-1にシステムの概要を示す。

発振装置はボーリング孔内に挿入後、内蔵の水圧シリンダーによって孔壁圧着、離脱ができる。発振の原理は、発振装置内の金属製小型のハンマーを圧縮空気で装置本体内で移動させ、衝突時の打撃力を発振源としている。発振源の振動の大きさは装置に内蔵された圧電型加速度計(TEAC708:広域型、 10mv/G)でとらえることができる。受振装置は発振装置と同様にボーリング孔壁に圧着・離脱ができる形式のもので、受振センサとしては広域型高感度の圧電型加速度計(TEAC707: 100mv/G 、共振周波数20KHz以上)を用いている。なお、発振装置・受振装置は角ロッドを接続しながら孔内に挿入し、所定の測定位置、ならびに方向で孔壁に固定することができる。写真-1に発振装置・受振装置を示した。

1回の測定で得られる波動は発振源から得られる発振波動、および受振センサから得られる受振波動の2波である。波動は、圧電型加速度計→直流増幅器→フィルター→デジタルストレージオシロスコープを経由しデータ処理のためパーソナルコンピュータにデジタル値として記録される。

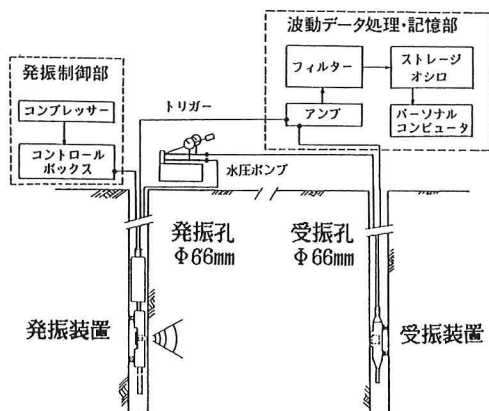


図-1 孔間弾性波測定システム



写真-1 発振（下）・受振装置（上）

3. 調査概要

(1) 調査地点および調査条件

調査地点の地質はある程度亀裂の発達した第三紀火成岩で、ダム基礎岩盤分類によれば岩盤は主としてCH級より成っている。調査地点では、図-2に示すように $\phi 66\text{mm}$ のボーリング孔が鉛直下方に2本、孔間距離3m、深さ15m穿孔されており、このボーリング孔において孔口から深さ方向に0.5~14.5m間をピッチ0.5mで調査した。なお、地下水位は、ボーリング孔口付近にあり、調査期間において大きな変化はなかった。

(2) 調査方法

調査は深さ0.5~14.5m間を発振装置、受振装置共に0.5mずつ移動して進めた。各測定位置では発振装置と受振装置の方向を図-3に示すように、

- 発振装置は受振装置の方向に向けて、受振装置も発振装置の方向に向けて測定する。
- 発振装置は受振装置の方向に向け、受振装置は方向を $+90^\circ$ ずらす。
- 発振装置は受振装置の方向に向け、受振装置は方向を -90° ずらす。

以上の3種類の測定を行った。これは、図-3に示したように弾性波波動のX方向成分を測定するもの(a)と、X方向に直交するY方向成分を測定するもの(b)、(c)である。

P波については、(a)のデータにより受振波動の立上がり時間を求め、発振波動のそれと比較して孔間距離とP波走行時間とからP波速度を算定する。一方、S波については、(b)、(c)のデータから位相のずれる位置、

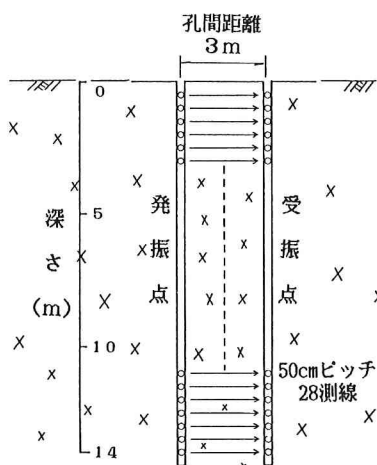


図-2 調査方法概要

および (b)、(c) の合成波から、S波の到達を読み取り、S波速度を算定した。

4. 調査結果および考察

(1) 測定波動について

グラウチング前後における代表的な波形ならびに周波数スペクトルを図-4に示す。グラウチング後では立上がり時間が早くなっている（P波速度が上昇）以外に、受振波振幅が大きくなっており、さらに周波数スペクトルから波動の卓越周波数が13KHz～16KHzへと高い方にシフトしているのもわかる（発振波形の再現性は問題なし）。これからは、グラウト剤が亀裂へ浸入し、固結したことにより伝播速度が向上し、波動が伝播し易くなり、高周波数成分も消散することなく伝播したものと推定することができる。

また、図-5にはP波、S波の立上がり時間の読み取り例を示す。

S波到達の判断については、(b)、(c)の波動を合成することによりP波の影響をできるだけ消去するとともに、(b)、(c)の位相のずれを参考にして行った。P波の影響を十分に消去することができなかったのは、発振装置の孔壁への微妙な圧着状況の違いや波動の岩盤内伝播経路の微妙な違い、受振する方向のわずかなずれがあること、さらに、亀裂等不連続な面を通過した際に発生した反射P波によるものと推定される。なお、受振装置を $\pm 90^\circ$ 回転させて孔壁に圧着する際の微妙なずれも原因しているであろう。

(2) P波・S波速度について

図-6はP波速度についてグラウチング前ならびに後における値を併記したものであり、図-7はS波速度値である。図-6、図-7より以下のことが明らかになった。

- ① P波について、グラウチング後の値はグラウチング前の値に比較して、伝播時間で30～90 μ s程度短くなっており、P波伝播速度 V_p が200～600m/s高くなっている。
- ② S波についても伝播時間で90～300 μ s程度の短縮が観測され、S波伝播速度 V_s が200～600m/s増加している。
- ③ グ라우チング前後における V_p 、 V_s の変化率はそれぞれ、5～14%、8～25%程度となり、平均値としては V_s の変化率の方が大きいことがわかる。

図-8にグラウチング前後の変化をP-横軸、S-縦軸にまとめたものである。グラウチング後の弾性波速度のグループは明らかにグラウチング前のそれとは異なっている。また、特異点は除いて、グラウチング後ではグループのバラツキが小さくなって、 $V_p=4800$ m/s、 $V_s=2700$ m/s付近に集中しているのがわかる。一方、図-9は図-8で示したP・S波速度の関係がグラウチング前後においてどのように変化したかを各測定値毎に整理したものである。この図から、P・S波速度相関関係の変化方向は2つに分類される。1つはP波速度変化よりS波速度変化の方がわずかながら大きい測点群であり、もう1つはP波速度変化がS波速度変化よりかなり大きい測点群である。

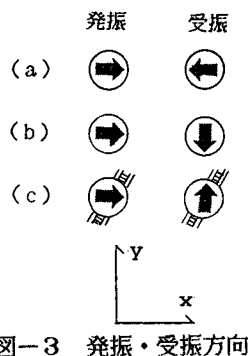


図-3 発振・受振方向

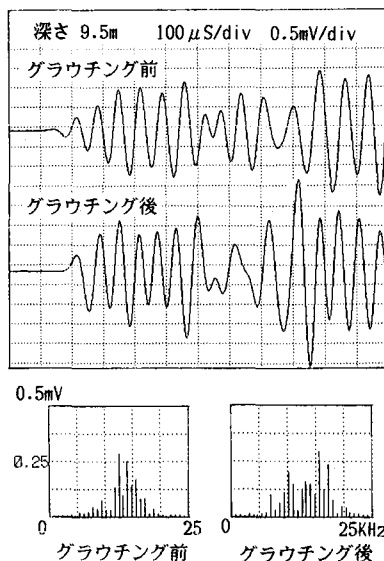


図-4 波形例、周波数スペクトル

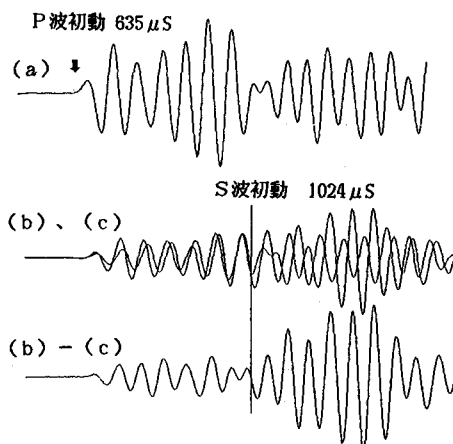


図-5 P波・S波の読み取り例

(3) 動弾性係数 E_d (弾性波速度 V_p , V_s より算出)

弾性波伝播速度 V_p (m/sec)、 V_s (m/sec) と密度 ρ (kg/m³)、動弾性係数 E_d (Pa)、動ポアソン比 ν_d との間には以下の式に示す関係がある。

$$E_d = \rho \cdot V_p^2 \cdot (1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d) / (1 - \nu_d) \dots\dots\dots ①$$

$$\nu_d = (k^2 - 2) / 2(k^2 - 1) \dots\dots\dots ②$$

(ただし、 $k = V_p / V_s$ とする)

測定によって得られた弾性波伝播速度 V_p 、 V_s を③、④式に代入することにより E_d 、 ν_d に変換した。図-10は上記計算によりもとめられたグラウチング前後における動弾性係数 E_d の深さ別分布を示している。図-10によれば、グラウチング前後で明らかに動弾性係数が全体的に上昇し、岩盤が改良されたと読取ることができる。また、グラウチング前に比較的動弾性係数が小さかった(岩盤としては比較的悪かった)部分での改良効果が大きいこともわかる。図-11は上記推察を裏付けるデータであり、図中には概ね右下がりの回帰線を引くことができる。

なお、動ポアソン比についても0.22~0.37とバラツキが大きかった値が、グラウチング後はほぼ0.2~0.3(さらに大半は0.25~0.3)に集中した。一方、P波速度と動弾性係数 E_d 、S波速度と動弾性係数 E_d の関係がそれぞれグラウチング前後でどう変化したかを図-12、図-13に示した。この結果からは、動弾性係数とS波速度との非常に良好な正の相関がみられ、動弾性係数→静弾性係数→岩盤の強度という統計的な関連付けが得られれば、一般にいわれているS波速度と強度との関係を裏付けることにもなっている。

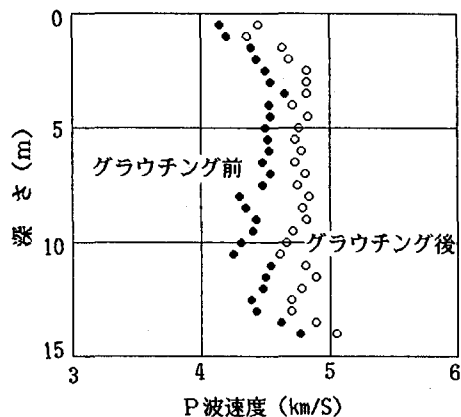


図-6 P波速度分布

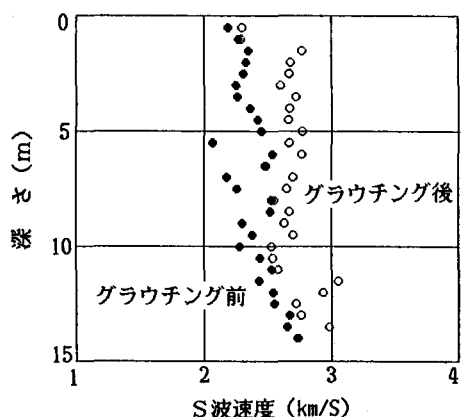


図-7 P波速度分布

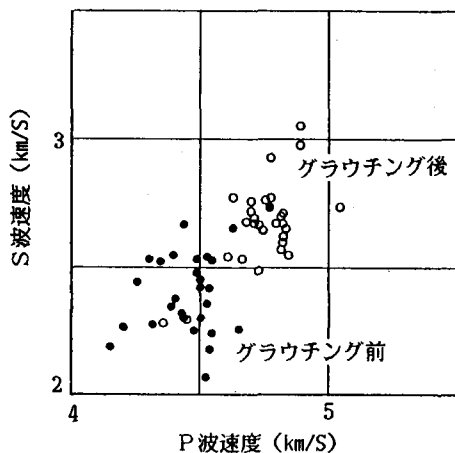


図-8 P波・S波速度の相関

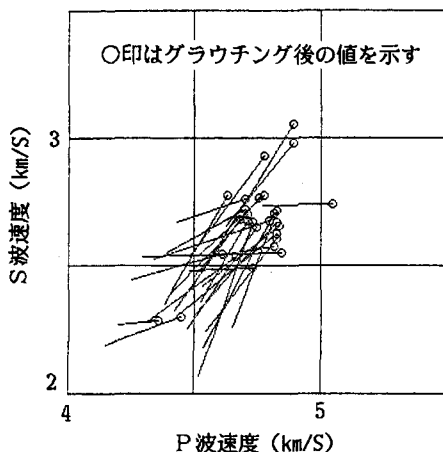


図-9 P波・S波速度の相関変化

5. 結論

ボーリング孔間距離3m、深さ0～15mの岩盤においてグラウチング前後で孔間弾性波調査を行い、それぞれのP波伝播速度 V_p 、S波伝播速度 V_s を測定し、得られた特性値の比較からグラウチングによる岩盤の改良効果判定を試みた。その結果、以下の定量的、定性的知見を得ることができた。

- ①P波、S波速度の変化(増加)は、それぞれ5～14%、8～25%程度で、平均的にはS波のほうが大きく変化する。
- ②弾性波速度から求められた岩盤の動弾性係数 E_d の増加率は最大50%で、グラウチング前の岩盤が不良(動弾性係数が小さい)程増加率は大きい。

結論として、グラウチングによる岩盤の効果判定に孔間弾性波調査技術が有効な手段となる可能性があることがわかった。

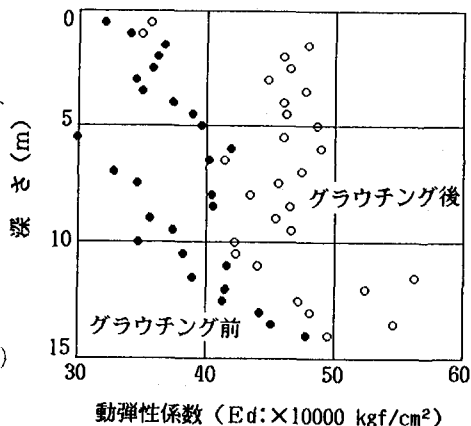


図-10 動弾性係数の分布

6. あとがき

本報告のポイントはS波の判定にある。岩盤によってはS波の判定は非常に困難であり、この部分に今後の課題がある。システムにおける発振装置の機構に起因する問題や、受振子の数・方向の問題、データ処理上の問題等解決していくべき課題は多い。今後も孔間弾性波調査を通じて、岩盤の評価検討を行っていくつもりである。

(参考文献)

- 1) 世一、蓮井、山下：原位置岩盤における孔間弾性波測定結果とその処理について、第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.169-174、1987.12
- 2) 世一、蓮井、山下：孔間弾性波測定法によるグラウト効果の判定についての実験的考察、土木学会第42回年次学術講演会論文概要集第3部、pp.632-633、1986.9
- 3) 蓮井、世一、平井：岩盤における孔間弾性波測定システムとその適用について、間組研究年報、pp.79-87、1988

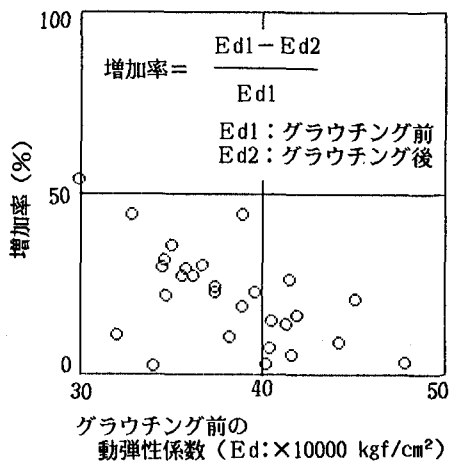


図-11 動弾性係数の変化

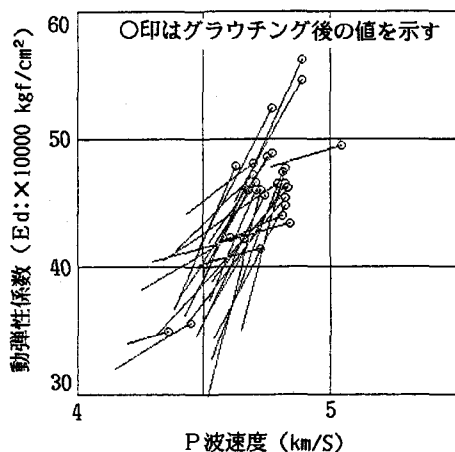


図-12 P波速度と動弾性係数の相関変化

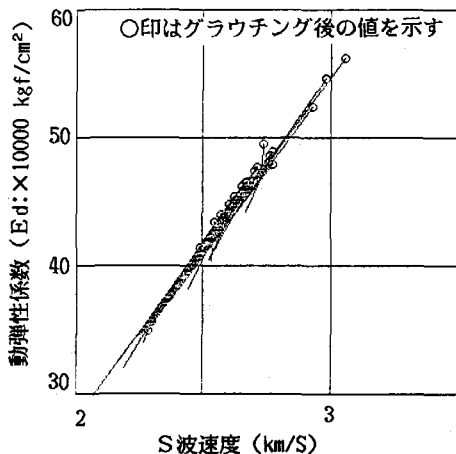


図-13 S波速度と動弾性係数の相関変化