

せん断波速度に基づくセメント系改良地盤の非破壊検査法

浅香 美治 安部 透 桂 豊 杉本 裕志 辰己 佳裕
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (設計本部) (設計本部)

Non-Destructive Technique Using Shear Wave Velocity to Inspect the Quality of Cement-Treated Ground

by Yoshiharu Asaka, Tohru Abe, Yutaka Katsura, Hiroshi Sugimoto and Yoshihiro Tatsumi

Abstract

A new, non-destructive inspection technique has been developed for inspecting the quality of cement-treated ground. The technique is based on the relationship between the strength, q_u , and the shear wave velocity, V_s , of cement-treated soil. In the V_s - q_u relationship, the value of q_u increases as the value of V_s increases, and q_u is expressed as an exponential function of V_s . The value of q_u can be estimated by performing laboratory tests on cement-treated soil sampled from a construction site. The value of q_u is uniquely defined for every soil type at the site. Based on the V_s - q_u relationship, the in-situ strength of the cement-treated ground at the site can be estimated immediately and non-destructively by using bender elements to measure the V_s -value of the ground. The non-destructive technique is a simple and reliable method for evaluating the in-situ strength of cement-treated ground.

概 要

構造物の支持地盤として利用されるセメント系改良地盤の品質を、非破壊・原位置で簡単・迅速に検査する技術を開発した。改良対象土質ごとに一義的に決まるセメント系改良土のせん断波速度と一軸圧縮強さの相関関係を現場ごとに予め求めておき、バンダーエレメントを使って現場の改良地盤上でせん断波が伝わる速度を非破壊で測ることにより、その圧縮強度を確認するものである。本検査方法の特徴は、(1)非破壊検査：コア抜きなどの試料採取が不要であり、何度でも同じ位置で検査が可能である、(2)原位置検査：原位置の品質をそのまま評価できるので、試料採取に伴う乱れ・試料採取時期・養生条件の違いなどを考慮する必要がない、(3)迅速性：1カ所5分程度で即座に品質検証でき、現場の改良地盤の品質を広範囲・高頻度で検証することが可能、(4)簡便性：検査実施にあたり特別な技量を必要としないことである。

§ 1. はじめに

近年、セメント系改良地盤の利用に関した法令・指針が整備されてきたことや、国土交通省告示でセメント系改良地盤の許容応力度が規定されたことなどから、ブロック状・柱状・壁状などに造成したセメント系改良地盤上に、直接基礎で建物を支持させる基礎工法を採用する事例が増加している。セメント系改良地盤は、土と固化材をスラリー状態で原位置攪拌して造成するため、その品質は地盤条件・施工機械・施工法などにより大きく異なる。このため、設計品質が確保できるように施工管理を行うとともに、現場の改良地盤の品質を多数か所で検査することが重要である。

一般に、セメント系改良地盤の品質検査では、材齢28日のコア供試体の強度試験で得られる圧縮強度を

指標として、強度と均質性を確認している。この検査は、(1)コア抜き作業により供試体が劣化する、(2)コア供試体の養生条件が現場の改良地盤のそれとは異なる、(3)現場の改良地盤の品質を広範囲・高頻度に検査するには手間・コストが掛かるといった問題を抱えている。このため、コア供試体の強度試験に、原位置の品質を多数検証できる検査方法を併用して、現場のセメント系改良地盤の品質を広範囲・高頻度に確認することが望ましい。原位置の品質検査方法としては、インテグリティ試験・衝撃加速度試験・シュミットハンマー試験などの非破壊試験が提案されているが、データの精度は必ずしも高くない^{1), 2)}。

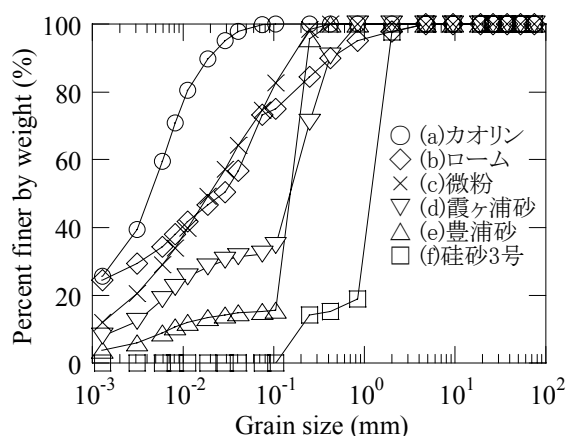
そこで本報では、簡便・迅速に実施可能なセメント系改良地盤の原位置・非破壊検査方法を開発した。改良対象土質ごとに一義的に決まるセメント系改良土の

せん断波速度と一軸圧縮強さの相関関係を現場ごとに予め求めておき、ベンダーエレメントを使って現場の改良地盤上でせん断波が伝わる速度を非破壊で測ることにより、その圧縮強度を確認するものである。以下、セメント系改良土のせん断波速度と一軸圧縮強さの相関関係、検査技術の概要、検査の適用事例を紹介する。

§ 2. セメント系改良土のせん断波速度～強度関係³⁾

改良対象土質ごとに一義的に決まるセメント系改良土のせん断波速度 V_s と強度 q_u の相関関係を調べるため、以下(a)～(f)の6種類の土質サンプルに対して、高炉セメント B 種と水を加え、ホバートミキサーで混合・攪拌してセメント系改良土を作成した。

- (a) カオリン TA 粘土 (以下、カオリン)
- (b) 原位置で採取した関東ローム (以下、ローム)
- (c) コンクリート再生微粉末 (以下、微粉)
- (d) 霞ヶ浦砂とカオリン TA 粘土を重量比 85 : 15 で配合した混合土 (以下、霞ヶ浦砂)
- (e) 豊浦砂とカオリン TA 粘土を 85 : 15 で配合した混合土 (以下、豊浦砂)
- (f) 硅砂 3 号と豊浦砂を 85 : 15 で配合した混合土 (以下、硅砂 3 号)



図－1 改良土の作成に用いた土質の粒度分布

表－1 セメント系改良土の配合

改良土の種類	セメント添加量(kg/m ³)	含水比(%)
(a)カオリン	50, 100, 150, 200, 300, 400	すべて100
(b)ローム	100, 150, 200, 300, 400	すべて120
(c)微粉	350, 310, 400	50, 60, 90
(d)霞ヶ浦砂	50, 100	すべて40
(e)豊浦砂	50, 100, 150, 200, 300, 400	すべて40
(f)硅砂3号	100, 200	すべて40

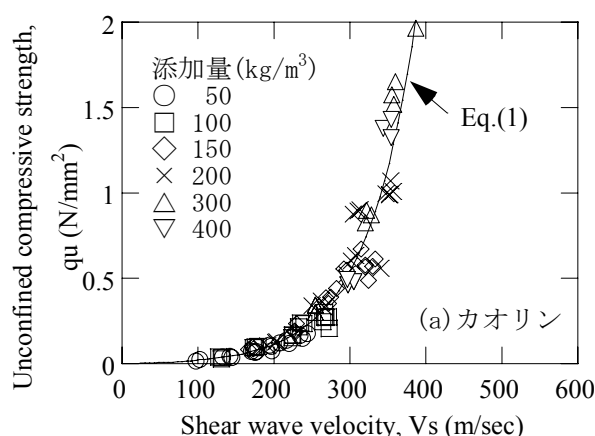
土質サンプル(a)～(f)の粒度分布を図－1に、固化材添加量・改良土の含水比の組み合わせを表－1に示す。

作成した供試体は、直径 5cm・高さ 10cm の円柱形で、いずれも 20℃で湿潤養生した。材齢 1 日、3 日、1 週、2 週、4 週、10 週に、せん断波速度測定と一軸圧縮試験を行った。

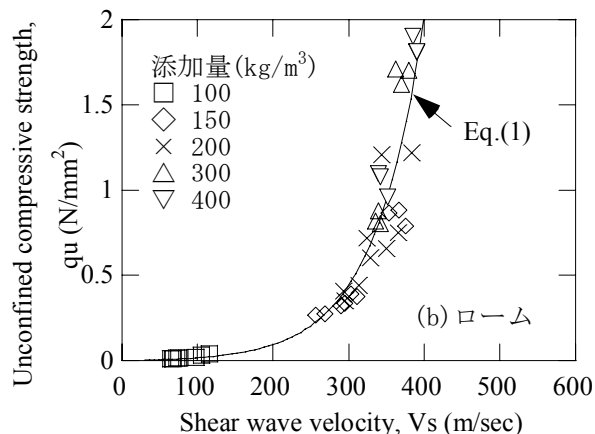
図－2～図－7に、試験で得られたせん断波速度 V_s と一軸圧縮強さ q_u の関係を、改良対象土質ごとに示す。 V_s が大きいほど q_u も大きくなり、両者には改良対象土質ごとに固化材添加量によらない正の相関関係が認められる。図中の実線は、 V_s (m/sec)と q_u (N/mm²)の関係を次式で近似したものである。

$$q_u = a \times \{\exp(b \times V_s) - 1\} \quad (1)$$

ここに、 a, b は定数で、(a)カオリンは $a=0.006, b=0.015$ 、(b)ロームは $a=0.005, b=0.015$ 、(c)微粉は $a=0.010, b=0.012$ 、(d)霞ヶ浦砂は $a=0.034, b=0.008$ 、(e)豊浦砂は $a=0.015, b=0.010$ 、(f)硅砂 3 号は $a=0.027, b=0.008$ とした。いずれのセメント系改良土においても、(1) 式は $V_s \sim q_u$ 関係を良く近似している。



図－2 改良土の $V_s \sim q_u$ 関係 (カオリン)



図－3 改良土の $V_s \sim q_u$ 関係 (ローム)

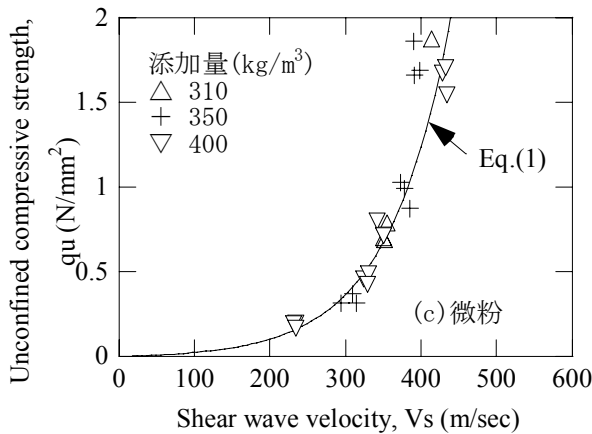


図-4 改良土の $V_s \sim q_u$ 関係 (微粉)

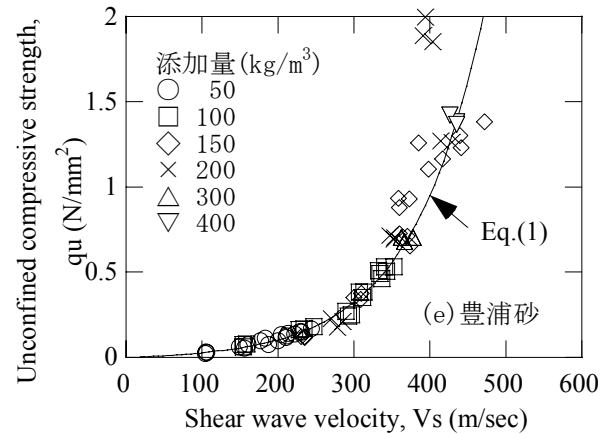


図-6 改良土の $V_s \sim q_u$ 関係 (豊浦砂)

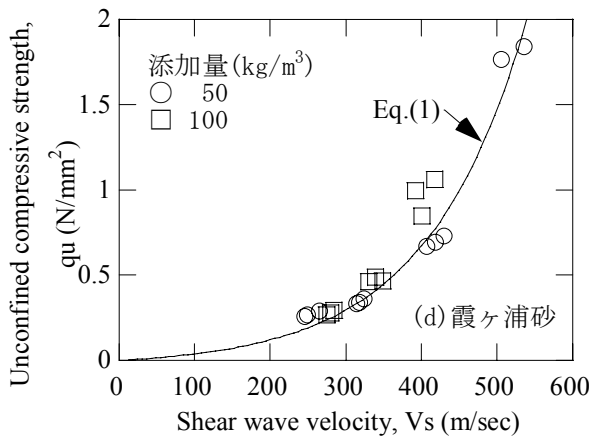


図-5 改良土の $V_s \sim q_u$ 関係 (霞ヶ浦砂)

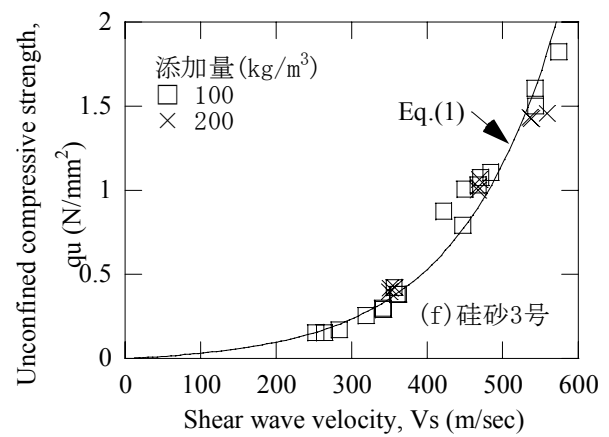


図-7 改良土の $V_s \sim q_u$ 関係 (硅砂3号)

§ 3. せん断波速度に基づくセメント系改良地盤の非破壊検査⁴⁾

前章で示した様に、セメント系改良土では、せん断波速度 V_s が大きいほど一軸圧縮強さ q_u が大きくなり、両者の相関関係は改良対象土質に応じて一義的に決まる。現場の土質ごとに V_s と q_u の相関関係を予め求めておけば、以下に示す方法 a) または方法 b)、あるいは方法 a) と方法 b) を併用した手順により、セメント系改良地盤の非破壊検査が可能である (図-8)。

方法 a) 室内で攪拌作成した改良土の $V_s \sim q_u$ 関係に基づく方法

- ① 現場サイトにおいて、改良対象となる地層から原位置土を採取する。
- ② 現場で実際に採用された配合設計にしたがって、原位置土・セメント系固化材・水を室内で攪拌して、改良土の供試体を複数作成する。
- ③ 作成した供試体に対して、複数の材齢でせん断波速度測定と一軸圧縮試験を行い、 V_s と q_u の相関関係を調べる。

- ④ ③で得られた $V_s \sim q_u$ 関係を (1) 式で定式化する。
- ⑤ $V_s \sim q_u$ 関係式に基づいて、改良地盤の設計基準強度 F_c に対応したせん断波速度＝目標せん断波速度 $V_{s,spe}$ を決定する。
- ⑥ 原位置の改良地盤の表面で、せん断波速度 V_s を測定する。
- ⑦ 原位置で測定した V_s 値に基づいて品質を検証する。原位置 $V_s \geq V_{s,spe}$ であれば、原位置の改良地盤は、設計基準強度 F_c を満足していると判断する。原位置 $V_s < V_{s,spe}$ のときは、設計基準強度 F_c を満足していないと判断されるため、材齢が 28 日以前での測定結果であれば後日再度 V_s 測定を行って品質を確認する。材齢が 28 日時点の測定結果であれば再施工とする。

方法 b) 原位置で攪拌作成した改良土の $V_s \sim q_u$ 関係に基づく方法

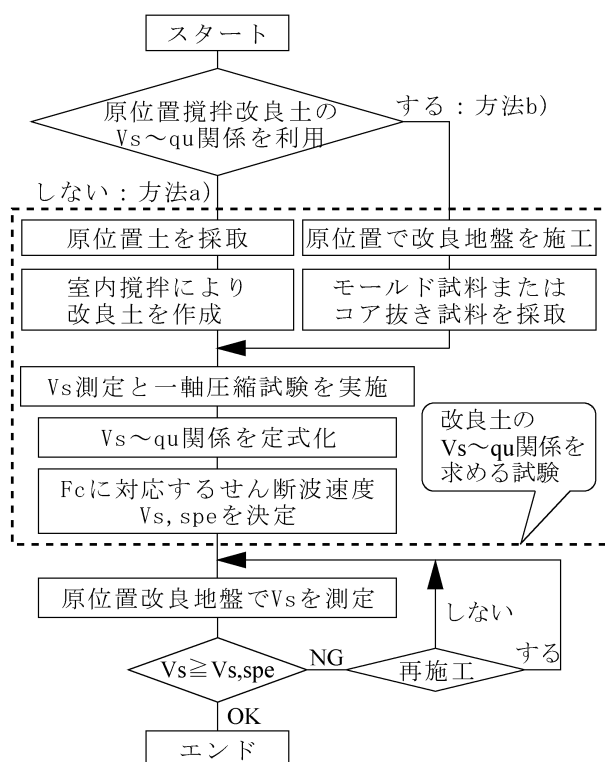
上記手順①、②を、以下①、②にそれぞれ置き換える。

- ① 実際の施工計画書・配合設計にしたがって、原位置で改良地盤を施工する。
- ② 改良地盤の造成体から、モールド供試体またはコ

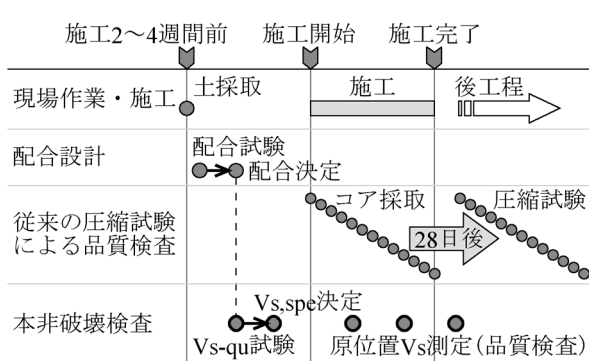
ア抜き供試体を採取する。

図－9は、本検査の実施時期を模式的に示したものである。現場での改良地盤の施工に先立って、改良土の $V_s \sim q_u$ 関係を求める試験を行い、品質検査の目標値 $V_{s,spe}$ を決定する。改良地盤の造成数日後から、現場にて本検査を適宜行い、設計品質が確認された施工ブロックから次行程に移行する。

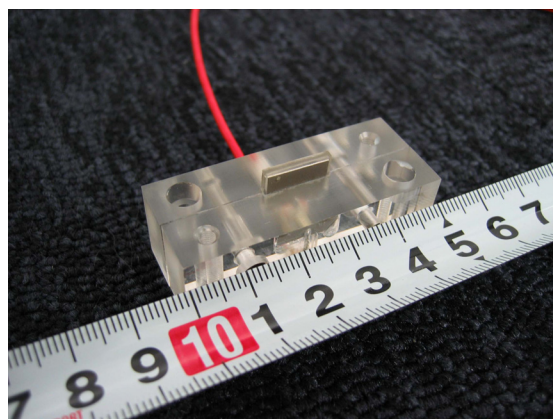
本検査においては、 $V_s \sim q_u$ 関係を求める室内試験・原位置 V_s 測定ともに、ベンダーエレメント（写真－1）を用いる手法を採用している。地盤材料のせん断波速度測定にベンダーエレメントを用いる手法は、1970年代に提案された方法⁵⁾である。現在では主に、三軸試験をはじめとする室内要素試験において、土質材料の初期せん断剛性の評価に利用されている。



図－8 せん断波速度に基づく品質検査フロー



図－9 改良地盤の施工および品質検査の実施時期

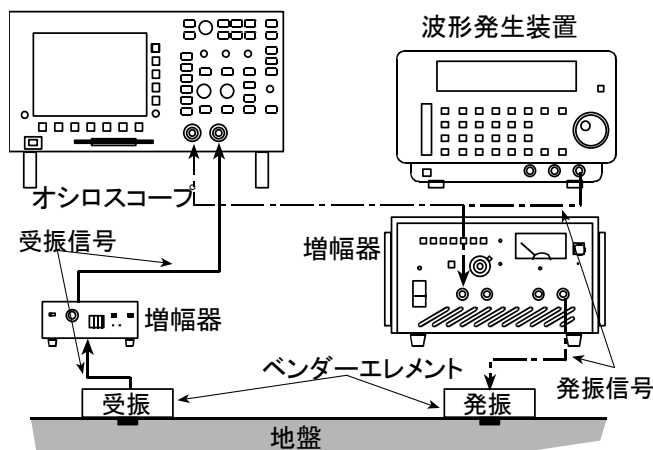


写真－1 V_s 測定に用いたベンダーエレメント

図－10はベンダーエレメントを用いたせん断波速度測定装置の模式図、写真－2は原位置の改良地盤でのせん断波速度測定の様子である。せん断波速度測定は、以下①～⑥の手順により行う。

- ① 原位置では、ベンダーエレメントを改良地盤の表面に設置する。室内試験では、ベンダーエレメントを供試体の両端面にセットする。
- ② 波形発生装置により、信号（例えば正弦波信号）を生成する。
- ③ この信号を増幅器により増幅し、ベンダーエレメントを発振させて、改良地盤にせん断波を発生させる。
- ④ 改良地盤中を伝播したせん断波を、もう一方のベンダーエレメントで受振する。
- ⑤ 発振・受振波をオシロスコープに取り込み、せん断波の伝播時間 Δt を測定する。
- ⑥ ベンダーエレメント間の距離（あるいは供試体長さ） L を Δt で除して、せん断波速度 V_s を算定する。

図－11は、上記⑤における発振・受振波形の例である。この場合、伝播時間 Δt は 0.904 ミリ秒と読み取



図－10 せん断波速度測定装置の模式図



写真-2 原位置でのせん断波速度測定の様子

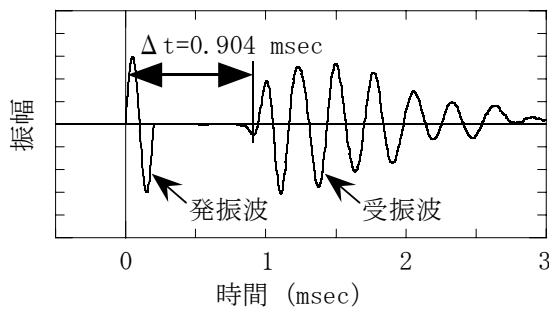


図-1-1 発振・受振波形の典型例

れる。例えばベンダーエレメント間の距離 L を 0.5m と仮定すると、せん断波速度 V_s は、 $V_s = L \div \Delta t = 0.5\text{m} \div (0.904 \times 10^{-3})\text{sec} = 553\text{m/sec}$ と算定できる。

ベンダーエレメントを用いた本品質検査の特徴は、以下(1)～(4)である。

- (1) 非破壊検査：コア抜きなどの試料採取が不要であり、何度でも同じ位置で検査が可能である。
- (2) 原位置検査：原位置の品質をそのまま評価できるので、試料採取に伴う乱れ・試料採取時期・養生条件の違いなどを考慮する必要がある。
- (3) 迅速性： V_s 測定は1カ所5分程度と迅速に実施でき、その場で即座に品質検証できる。このため、現場の改良地盤の品質を、広範囲・高頻度に検証することが可能である。
- (4) 簡便性： V_s 測定にあたり、特別な技量は不要である。このため、検査の合否判定が検査者の技量に依存しない。

§ 4. せん断波速度に基づく非破壊検査の適用事例

神奈川県川崎市に建設されたA棟・B棟からなる建築面積 $3,800\text{m}^2$ の鉄骨造3階建倉庫に、本非破壊検査を適用した。A棟・B棟ともに、基礎形式は壁状のセ

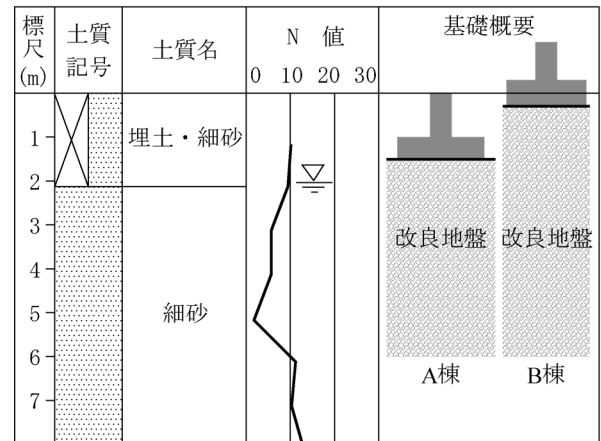


図-1-2 地盤と基礎の概要 (神奈川県川崎市)

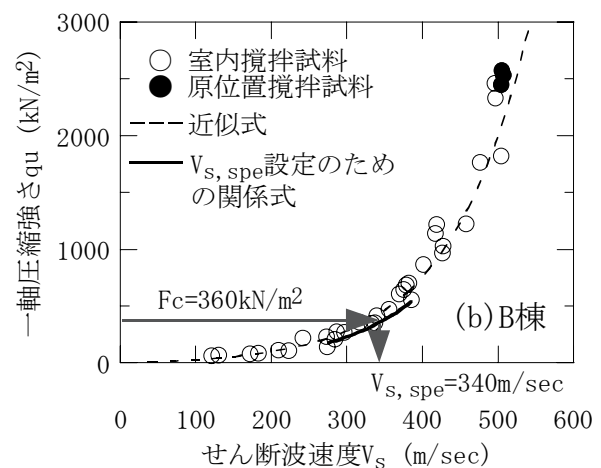
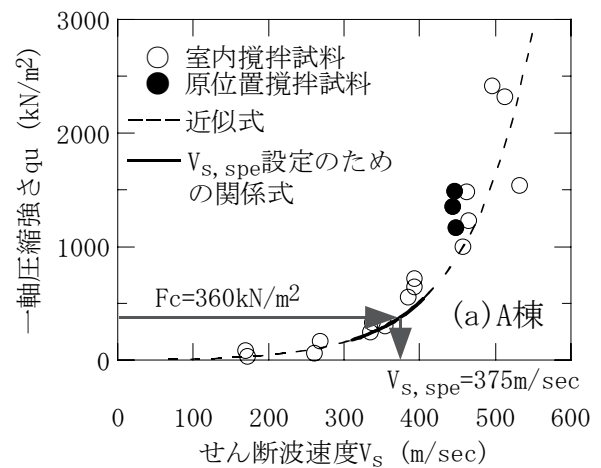


図-1-3 セメント系改良土の $V_s \sim qu$ 関係

メント系改良地盤を支持地盤とする布基礎で、接地圧は 110kN/m^2 、改良地盤の設計基準強度 F_c は 360kN/m^2 である (図-1-2)。A棟・B棟は基礎下レベルが異なり、改良対象となる地層が異なる。このため、棟ごとに配合試験を行って、A棟の改良地盤の固化材添加量は $200\text{kg/原位置土 } 1\text{m}^3$ 、B棟のそれは 150kg/原位置土

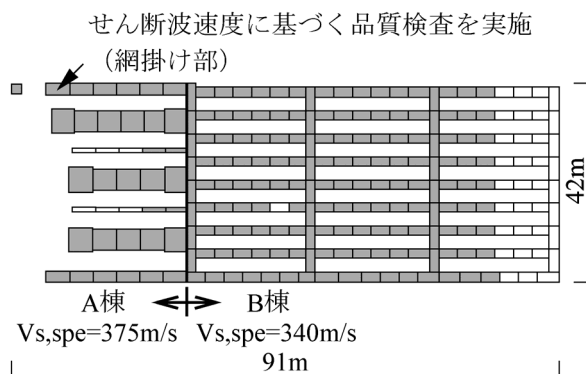


図-14 施工ブロックと品質検査実施ブロック

1m³とした。改良地盤は、トレンチャーと呼ばれる縦型攪拌機を有した重機により、基礎下レベルからGL-6mまでの原位置土とセメント系固化材をスラリー状態で原位置攪拌して、壁状に造成した。本建物のセメント系改良地盤に対し、コア供試体の強度試験による品質検査を補完する位置づけで、図-8に示した品質検査フローの方法a)と方法b)を併用して、せん断波速度に基づく非破壊検査を実施した。以下、せん断波速度に基づく非破壊検査の結果を紹介する。

図-13は、本現場におけるセメント系改良土のVs～qu関係である。品質検査における原位置せん断波速度の目標値Vs,speは、室内試験結果のバラツキを考慮して、A棟で375m/sec、B棟で340m/secとした。

図-14に、改良地盤の施工ブロックの平面形状と、本非破壊検査を行った改良ブロック位置を示す。現場でのせん断波速度測定は計4日行い、検査率は82%(全234ブロックのうち192ブロック)であった。

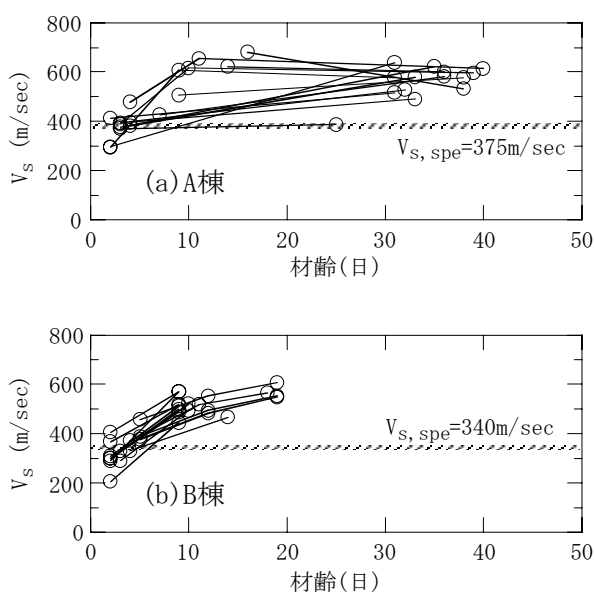


図-15 材齢に伴う原位置のせん断波速度の変化

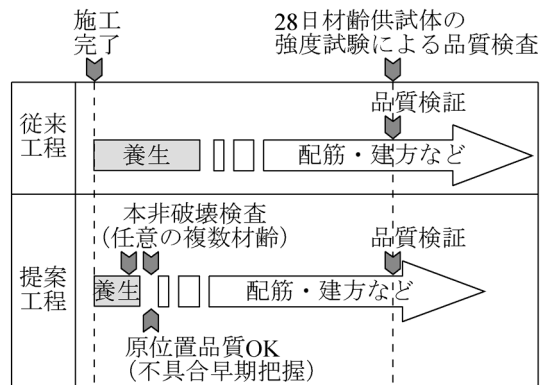


図-16 養生期間の最適化による工期短縮イメージ

本非破壊検査の特徴を生かして、同一改良ブロックにおいて複数材齢でVsを測定した。図-15に、原位置Vs値の変化を示す。A棟・B棟ともに、Vsは材齢10日程度までは大きく上昇し、その後の上昇は小さい。1回目の品質検査で原位置Vs<Vs,speとなる場合でも、後日再検査することで原位置Vs≥Vs,speとなっている。本現場の改良地盤は、材齢5～10日で設計品質を満足している。そこで本現場では、図-16に模式的に示すように、せん断波速度に基づく非破壊検査により設計品質が確認された改良ブロックから、次工程の建設作業を前倒しながら工事を進めて、基礎工事の工期短縮・施設の早期操業を実現した。

図-17に、最終的に確認した原位置Vs値の頻度

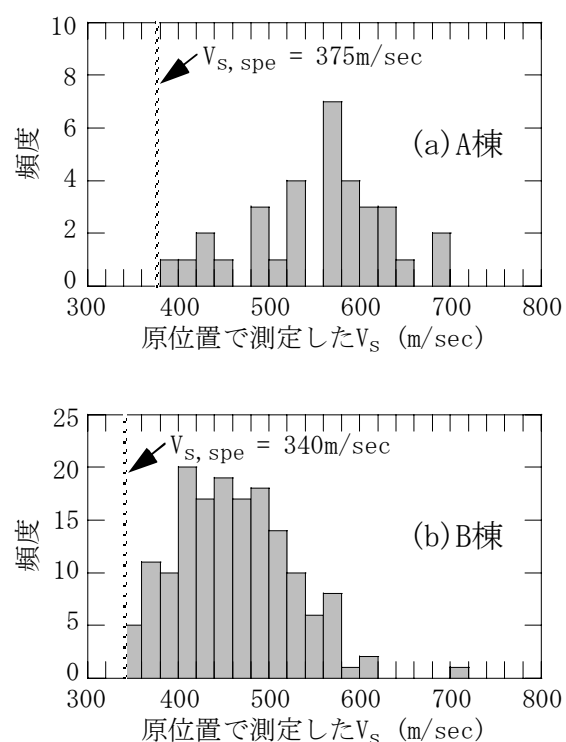


図-17 最終的に確認した原位置のせん断波速度

分布を示す。検査した全ての改良地盤において、原位置 $V_s \geq V_{s,pe}$ であり、設計品質を満足していることが確認できる。このように、せん断波速度に基づく非破壊検査技術により、現場のセメント系改良地盤の品質を広範囲・高頻度に確認することが可能である。

また、改良地盤の施工後 7 日以上経過してから 5 地点で改良深さ 6m の区間のコアを採取し、材齢約 50 日において、コア供試体のせん断波速度を測定した。図-18 に、コア供試体の採取深さとせん断波速度の関係を示す。測定されたせん断波速度は 380~620m/sec で、深さ方向に大きくなる傾向が認められる。このことから、原位置の改良地盤の表面で測定したせん断波速度に基づいて品質検査を行えば、品質管理上は安全側であることが確認できる。

§ 5. まとめ

構造物の支持地盤として利用されるセメント系改良地盤の品質を、非破壊・原位置で簡単・迅速に検査する技術を開発した。改良対象土質ごとに一義的に決まるセメント系改良土のせん断波速度と一軸圧縮強さの相関関係を現場ごとに予め求めておき、ベンダーエレ

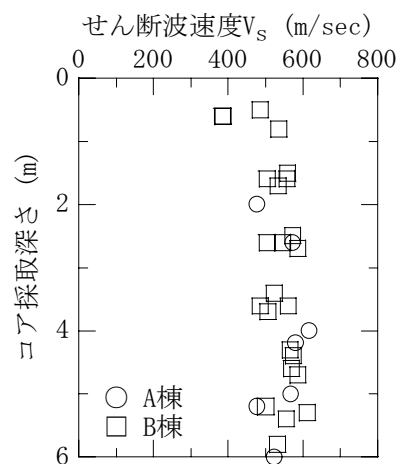


図-18 コア試料の採取深度とせん断波速度の関係

メントを使って現場の改良地盤上でせん断波が伝わる速度を非破壊で測ることにより、その圧縮強度を確認するものである。本検査方法は、(1)非破壊検査、(2)原位置検査、(3)迅速性、(4)簡便性が特徴であり、現場のセメント系改良地盤の品質を広範囲・高頻度に確認することが可能である。本検査を実案件に適用して、その有効性を示した。

<参考文献>

- 1) 日本建築センター："改訂版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—", pp.238-241, 2002.
- 2) セメント改良土の物性と試験方法に関する研究委員会："セメントおよびセメント系固化材を用いた固化処理土の調査・設計・施工方法と物性評価に関するシンポジウム発表論文集 委員会報告書", p.81, 2005.
- 3) 浅香美治、桂豊："室内配合試験によるセメント改良土のせん断波速度と一軸圧縮強さの関係", 日本建築学会学術講演梗概集, No.20222, pp.443-444, 2003.
- 4) (財)日本建築総合試験所："建築技術性能証明評価概要報告書 Vs-QUIC システム—せん断波速度に基づくセメント系改良地盤の品質検査システム—", GBRC 性能証明 第 04—04 号, 2004.
- 5) Shirley, D.J. and Hampton, L.D. : "Shear wave measurements in laboratory sediments", Journal of Acoustical Society of America, 63(2), pp.607-613, 1977.