

ベントナイトを用いた地中構造物の地盤変位吸収免震壁構造の検討 ーベントナイト供試体のせん断波速度の評価ー

清水建設（株） 正会員 ○田地陽一 福武毅芳 中島 均
齋藤 亮 石井 卓

1. はじめに 設計入力地震動の増大に伴い土木構造物においても、構造体の耐力強化から地盤からの強制変形そのものを低減させる工法の開発が行われている¹⁾。特にボックスカルバートのような地中構造物の耐震補強には、躯体内部からの補強が困難である場合があり、躯体外部からの対策により地盤変位を緩和する工法のニーズは高い。

筆者らは、図1の基本概念²⁾に示すように、ベントナイト壁により地盤変形の影響を緩衝させ、低減する工法の提案を行っている^{3)~5)}。これまでの同工法の検討の中で、図2に示すよう、FEM解析によって周辺地盤とベントナイト壁のせん断波速度比が0.6以下である場合、地震時に躯体に作用するせん断力が低減することを明らかにしている⁴⁾。これは、ベントナイト壁のせん断波速度の評価が工法成立の重要な要素であることを示唆している。

そこで、本研究では、室内試験によってベントナイト供試体のせん断波速度の評価を行った。

2. 室内試験の概要 ベントナイトは、その有効密度を調整することにより、所定の膨潤圧を発揮させることができるため、常時土圧に対する抵抗力を確保することができる。深度3～20mの地中構造物を対象とした場合、常時に作用する土圧に抵抗できるベントナイト壁の乾燥密度は、図3に示す乾燥密度と膨潤圧の関係^{3),6)}から逆算すると0.4～1.0g/cm³の範囲となる。室内試験によって、この範囲の乾燥密度を有するベントナイト供試体を作製し、ベンダーエレメントによってせん断波速度を計測し、その後、一軸圧縮試験を行った。ベンダーエレメントによるせん断波速度計測は、文献7)に記載しているシステムを用いた。

試料として用いたベントナイトはクニゲルV1（山形産、 $G_s=2.778$ 、 $63\mu\text{m}$ 以下90%以上）である。飽和状態のベントナイト供試体を所定密度で作製する方法は以下のとおりである。

- ①ベントナイトを炉乾燥させる。
- ②目標とする密度を決め、ベントナイトに所定の量（飽和度100%を目標）を加水する。
- ③ベントナイト試料を小さな球体に成形し、直径5cm、高さ10cmの円柱型枠に詰める。その際、円柱型枠の底部からCO₂を送り込む。
- ④ベントナイトの小さな球体が詰まった円柱型枠を、真空引きにより空気を排除しながら、所定の密度となるようにプレス成形する⁸⁾。

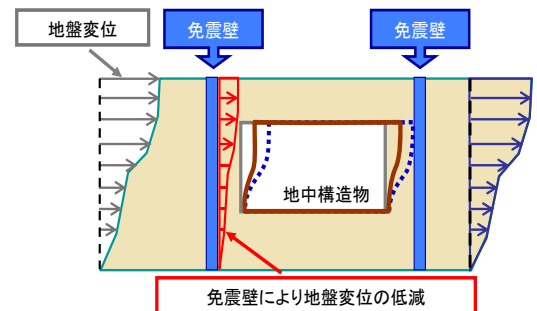


図1 免震壁の基本概念²⁾

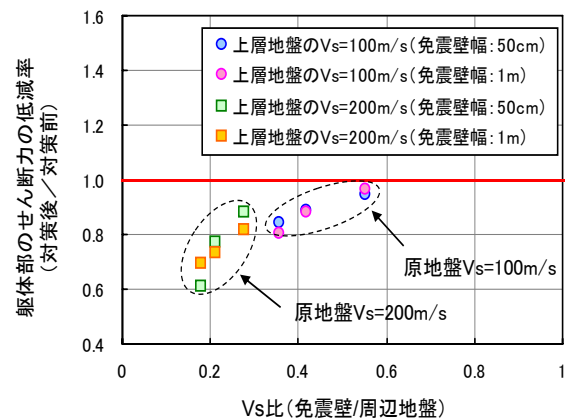


図2 免震壁と地盤のVs比と躯体部のせん断力低減率の関係³⁾

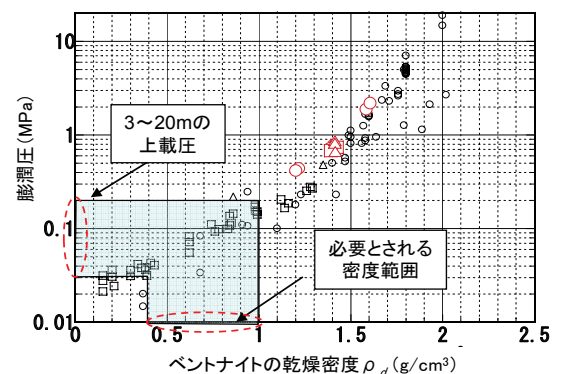


図3 ベントナイト乾燥密度と膨潤圧の関係^{3),6)}

キーワード ベントナイト・免震・地中構造物・せん断波速度・ベンダーエレメント

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設（株）技術研究所 TEL:03-3820-5937

⑤プレス成形が完了した後、円柱型枠を取り外す。その後、供試体のせん断波速度をベンダーエレメントにより計測し一軸圧縮強度試験を行う。写真1はベントナイト供試体のせん断波速度計測の様子を示したものである。



写真1 ベントナイト供試体のせん断波速度計測の様子（両側青い部分にベンダーエレメントが埋め込まれている）

3. 試験結果 図4は、上述した手順により作製したベントナイト供試体の含水比と乾燥密度 ρ_d の関係を示したものである。同図には、飽和度 100% であるゼロ空隙率曲線も併記している。プレス成形によって作製されたベントナイト供試体は、飽和度 S_r がほぼ 100% であることがわかる。含水比が高くなるほど乾燥密度は小さくなる。乾燥密度が $0.4 \sim 1.2/\text{cm}^3$ となる供試体の含水比は 50 ～ 220% である。

図5は、ベントナイト供試体の乾燥密度 ρ_d とせん断波速度 V_s の関係を示したものである。せん断波速度は乾燥密度の増加とともに線形的に増加しており、Eq(1) に示す関係式で表される。

$$V_s = 101 * \rho_d - 22.4 \quad \text{Eq(1)}$$

同図から、GL-3 ～ 20m の常時に作用する土圧に抵抗するために必要なベントナイト壁の乾燥密度 $0.4 \sim 1.0\text{g}/\text{cm}^3$ に対応するせん断波速度は $20 \sim 80\text{m}/\text{s}$ であることがわかる。図2のFEM解析結果において、原地盤の平均せん断波速度を $100\text{m}/\text{s}$ とした場合、ベントナイト壁は、乾燥密度が $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 以下、せん断波速度が $60\text{m}/\text{s}$ 以下であれば、常時に作用する土圧に抵抗し、地震時に躯体に作用する応力の低減効果を発揮することができる。

図6は、ベントナイト供試体のせん断波速度 V_s と一軸圧縮強さ q_u の関係を示したものである。圧縮成形した飽和度 $S_r 100\%$ に近いベントナイト供試体では、せん断波速度と一軸圧縮強さの関係は、乾燥密度によらず、Eq(2) に示す指数関数で表される。

$$q_u = 0.016 * (\text{EXP}(0.022 * V_s) - 1) \quad \text{Eq(2)}$$

4. まとめ 本研究では、ベントナイト免震壁工法における免震材であるベントナイト試料について、室内試験によってプレス成形したベントナイト供試体のせん断波速度と乾燥密度の関係を明らかにした。また、せん断波速度と一軸圧縮強さの関係が、乾燥密度によらず、指数関数で表せることを明らかにした。乾燥密度とせん断波速度の関係から、所定のせん断波速度を有するベントナイト壁の配合設計が可能となる。

《参考文献》 1) 室野, 桐生, 館山, 小林: ポリマー材を用いた開削トンネル免震工法, 土木学会地震工学論文集, No. 28, 2005 2) 桐生, 室野, 盛川: ポリマー材を用いた既設開削トンネルのための免震工法の適用性, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 4, pp. 905-914, 2008 3) 張, 福武, 木全, 西村: ベントナイトを用いた地中構造物の免震壁構造の検討 (その1: 基本概念と免震材の力学特性の検証), 土木学会第65回年次学術講演会, 2010 4) 張, 福武, 木全, 西村: ベントナイトを用いた地中構造物の免震壁構造の検討 (その2: FEM解析による免震効果の考察), 土木学会第65回年次学術講演会, 2010 5) 田地, 福武, 中島, 吉成, 齋藤: ベントナイト壁を用いた地中構造物の地震時挙動, 第48回地盤工学研究発表会, 2013(投稿中) 6) 工藤, 田中, 横倉, 北村: 締固めたベントナイト試料の膨潤圧測定方法に関する検討, 第40回地盤工学研究発表会, pp. 2573-2574, 2005 7) 浅香, 安部, 桂, 杉本, 辰己: ベンダーエレメントを用いたせん断波速度測定によるセメント系改良地盤の非破壊検査方法, 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp. 103-110, 2007 8) 石井, 中島, 白石, 後藤: $1\text{E}-13\text{m}/\text{s}$ の透水係数を短時間で測定する拘束透水試験, 土木学会第58回年次学術講演会, 2003

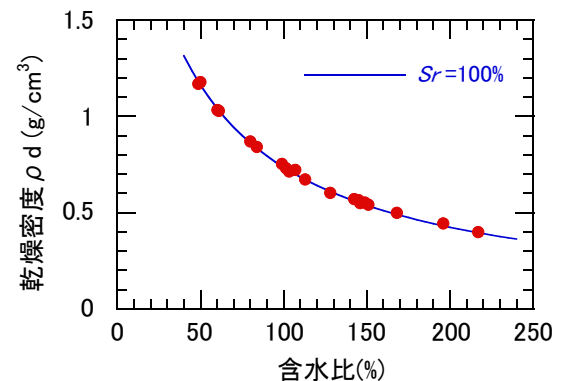


図4 ベントナイト含水比と乾燥密度の関係

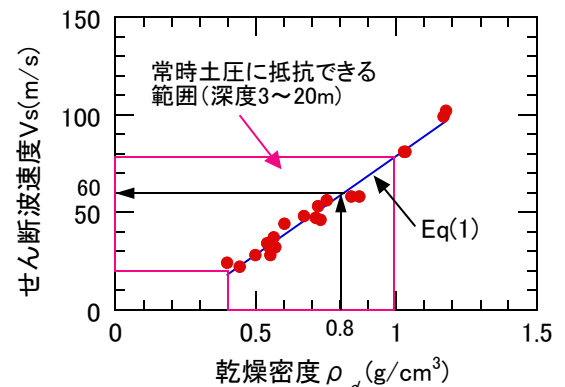


図5 ベントナイト乾燥密度とせん断波速度の関係

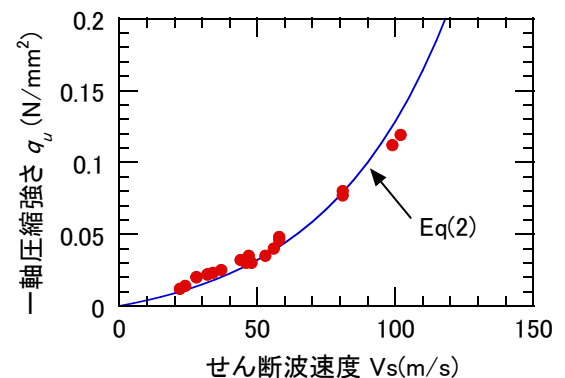


図6 ベントナイトせん断波速度と一軸圧縮強さの関係