

碎石改良体を用いた地盤改良工法における地震時の水平力に対する安全性評価方法

エコジオ工法協会 技術顧問 神村 真／エコジオ工法協会 大石 新之介／
エコジオ工法協会 会長 尾鍋 哲也

はじめに

2025年4月の建築基準法改正により、木造二階建て住宅でも構造関係図書の確認が必要となり、基礎・地盤改良工事についても常時および地震時の安全性確認が求められるようになりました。

従来の杭状改良体（セメント系固化材を用いた柱状改良体（以下、柱状改良体）や鋼管など）で建物を支える杭状地盤改良の地震時の水平力に対する安全性評価は、杭状改良体が鋼材やセメントによって固化・一体化された連続体であるため、杭状改良体に水平力が作用して曲げが発生した場合に、抵抗する剛性や強度を評価します。一方、著者らが開発した碎石改良体を用いた地盤改良工法である「エコジオ工法」は碎石改良体と原地盤が一体となって建物を支持する複合地盤改良として扱う必要があります。複合地盤の場合、地盤内に構築された碎石改良体は碎石（粒状体）を柱状に締め固めて築造しているため、杭などの連続体を対象とした曲げに対する応力照査方法をそのまま適用することは、合理的ではありません。

そこで本稿では、粒状体である碎石改良体を杭のように単独の水平抵抗部材として扱うのではなく、碎石改良体と周辺地盤が一体となった複合地盤として捉え、地震時に生じる水平力に対して複合地盤がせん断破壊しないことを確認することにより、安全性を評価する方法を示します。

1 杭状地盤改良と複合地盤改良の支持機構の違い

図-1に、杭状地盤改良と複合地盤改良での作用荷重のイメージを示します。図-1(i)に示すように、柱状改良体や鋼管などの杭状改良体によって建物を支える場合、建物の荷重は杭状改良体だけに集中すると考えます。このため、杭状地盤改良の場合、地震時の水平力は杭状改良体のみが負担します。一方、碎石改良体を用いた複合地盤改良では、図-1(ii)のように、碎石改良体と原地盤の地盤全体で建物の荷重を支えます。そのため、複合地盤全体で地震時の水平力を負担する考え方に基づく評価が必要であると言えます。

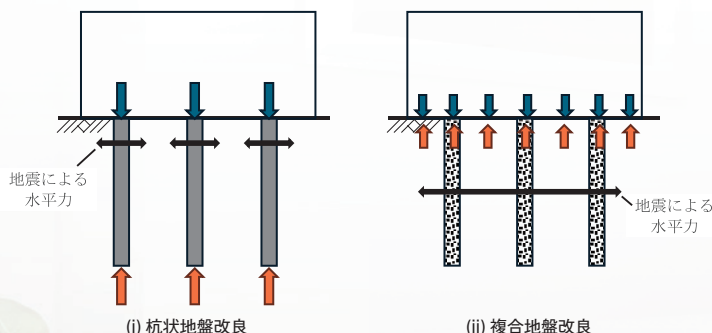


図-1 杭状地盤改良と複合地盤改良のイメージ

2 杭状改良体の地震時水平力に対する安全性評価方法

柱状改良体、鋼管、RC杭などの杭状改良体を用いた杭状地盤改良の場合、地震荷重による杭状改良体の安全性は、「弾性体の長い杭（連続体）」として改良体を考え、図-2に示すように杭の頭部に地震力による水平荷重が作用した場合の曲げモーメントとせん断力を算定することで評価します¹⁾。この場合、杭頭部および地盤中部に発生する曲げモーメントを求め、式（1）によって改良体内部に発生する最大・最小応力を算定します。あわせて、杭頭部に作用する水平力から、改良体に発生するせん断応力を式（2）によって算定します。

地震時の水平荷重による安全性は、算定した曲げ応力とせん断応力を、杭状改良体材料の短期許容応力度と比較することで確認します。

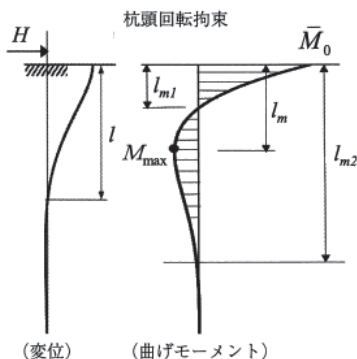


図-2 杭頭部に作用する水平力による杭の変位と曲げモーメント分布イメージ¹⁾

$$\left\{ \begin{matrix} \sigma_{max} \\ \sigma_{min} \end{matrix} \right\} = \frac{N}{A} \pm \frac{M_d}{z} \quad (1)$$

$$\tau_{max} = \kappa(Q/A) \quad (2)$$

ここで、 σ_{max} 、 σ_{min} (kN/m²)：改良体内部に発生する最大・最小鉛直応力、 N (kN)：改良

体頭部に作用する鉛直荷重、 M_d (kN・m)：改良体に作用する曲げモーメント、 A (m²)：改良体の断面積、 z (m³)：断面係数、 τ_{max} (kN/m²)：改良体断面内の最大せん断応力、 Q (kN)：改良体頭部に作用する水平力、 κ ：形状係数（柱状改良体：4/3、鋼管：2）。

3 砕石改良体の地震時水平力に対する安全性評価方法

砕石改良体を地盤内に構築するエコジオ工法は、開発中に载荷試験後の砕石改良体頭部付近の地盤変状を観察しています²⁾。その結果、図-3(i)に示すように、一般的に地盤で見られるようなせん断変形が砕石改良体頭部付近で確認出来ています。この変状から、砕石改良体頭部に水平力が作用した場合も、砕石改良体と周辺地盤を合わせたせん断抵抗によって、水平力に抵抗していると考えられます。

エコジオ工法ではこの考えに基づき、砕石改良体を柱状改良体や鋼管のような連続体として扱うのではなく、砕石改良体周辺地盤を含めたせん断抵抗によって支持力度が発揮されるものとして評価しています。

一方、直接基礎の地震時支持力度は、水平力の作用による荷重傾斜の影響を考慮して支持力度を低減することとされていましたが、近年の研究から荷重傾斜による支持力度低下は考慮する必要がないことが明らかになっています³⁾。このことは、砕石改良体頭部に水平力が作用した場合でも、支持力度の評価上、水平力による荷重傾斜の影響を別途考慮する必要性は小さいことを示すものと考えられます。このため、エコジオ工法では、地震時における砕石改良体周辺地盤で破壊が発生しないことが確認出来れば、砕石改良体の支持力度は保持されると判断出来ます。

以上のことから、エコジオ工法の地震時水平

力による砕石改良体の安全性は、砕石改良体周辺を含めた地盤の地震時安全性を確認することにより評価出来るとします。具体的には、地震時に地盤内に発生する繰返しせん断応力 τ_d を求め、これが原地盤の地震時繰返しせん断強さ τ_L に対して十分小さいことを確認することになります。

4 砕石改良体の地震時水平力に対する安全性評価手順

地震によって地中に発生する繰返しせん断応力 τ_d の算定

地震時に地盤内に発生する繰返しせん断応力は、液化化危険度予測方法に準じて次式で算定することが可能です⁴⁾。

$$\frac{\tau_d}{\sigma_z} = \gamma_n \frac{\alpha_{max}}{g} \frac{\sigma_z}{\sigma_z'} \gamma_d \quad (3)$$

$$\gamma_n = 0.1(M - 1) \quad (4)$$

$$\gamma_d = 1 - 0.015z \quad (5)$$

ここで、 τ_d (kN/m²)：水平面に生じる等価な一定繰返しせん断応力振幅、 σ_z' (kN/m²)：検討深さにおける有効土被り圧（鉛直有効応力）、 γ_n ：等価な繰返し回数に関する補正係数、 M ：

地震のマグニチュードで通常は7.5、 α_{max} (m/sec²)：地表面における設計用水平加速度（ここでは、1.96m/sec²とします）、 g (m/sec²)：重力加速度 (9.8m/sec²)、 σ_z (kN/m²)：検討深さにおける全土被り圧（鉛直全応力）、 γ_d ：地盤が剛体でないことによる低減係数、 z (m)：地表面からの検討深さ。

原地盤の地震時繰返しせん断強さ τ_L の算定

原地盤が砂質土地盤の場合、 τ_d と同様に液化化危険度予測方法に準じて決定することが可能です。具体的には、図-4のせん断ひずみ5%の曲線を用いて、補正N値に対応する τ_L/σ_z' からせん断強さ τ_L を求めます。なお、補正N値は次式で算定します。

$$N_a = N_1 + \Delta N_f \quad (6)$$

$$N_1 = C_N \cdot N \quad (7)$$

$$C_N = \sqrt{100/\sigma_z'} \quad (8)$$

ここで、 N_a ：対応する震度の補正N値、 N_1 ：換算N値、 C_N ：拘束圧に関する換算係数、 ΔN_f ：細粒分含有率Fcに応じた補正N値増分（図-5による）、 N ：自動落下法による実測N値。

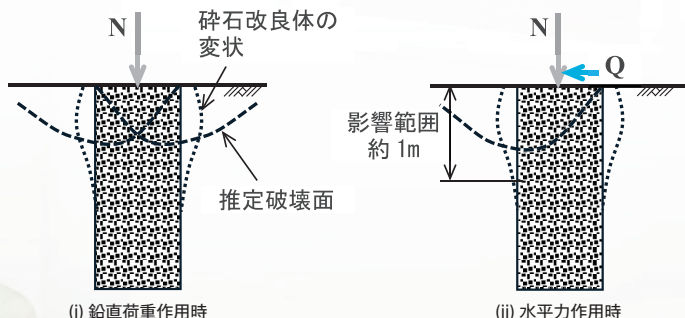


図-3 砕石改良体頭部の荷重による周辺地盤への影響のイメージ

一方、原地盤が粘性土の場合の τ_L は、次式で算定します。

$$\tau_L = \alpha_c \cdot (45W_{SW} + 0.75N_{SW})/2 \quad (9)$$

ここで、 τ_L (kN/m²)：地震荷重に対する地震時繰返しせん断強さ α_c ：静的非排水せん断強さから地震時繰返しせん断強さに換算するための低減係数 ($\alpha_c=0.5$ とします)⁵⁾、 W_{SW} 、 N_{SW} ：SWS試験結果。

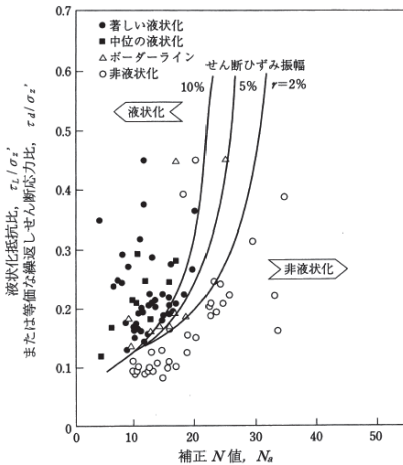


図-4 補正 N 値と τ_L/σ'_z 、 τ_d/σ'_z の関係⁴⁾

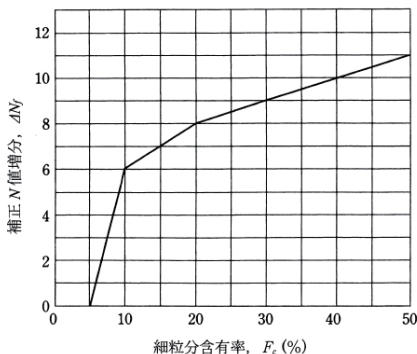


図-5 細粒分含有率と N 値の補正係数の関係⁴⁾

各深度での地震時繰返しせん断応力とせん断強さの比較

各深度での地震時繰返しせん断応力と地震時繰返しせん断強さの比 (τ_L/τ_d) は次式で算定し、1.0以上であることを確認します。

$$\frac{\tau_L}{\tau_d} = \frac{\tau_L/\sigma'_z}{\tau_d/\sigma'_z} \geq 1.0 \quad (10)$$

5 事例

検討条件

ここで実際のケースについて見ていきたいと思っています。図-6に検討に用いたモデル地盤のSWS試験結果を示します。想定地震規模はマグニチュード7.5、最大加速度1.96 m/sec² (200gal) とし、砂質土地盤の実測 N 値は稲田式を用いて換算した N 値とします。

検討結果

図-7, 8に、 τ_d/σ'_z と τ_L/σ'_z および両者の比 τ_L/τ_d の深度分布を示します。図-8から、 τ_L/τ_d の値を確認すると、エコジョ工法の施工可能深度である施工時GL-5.0mまでの範囲において、いずれも $\tau_L/\tau_d \geq 1.0$ を満足しており、本検討条件では、地震時の水平力に対する砕石改良体を含む複合地盤の安全性が確保出来ていると考えられます。

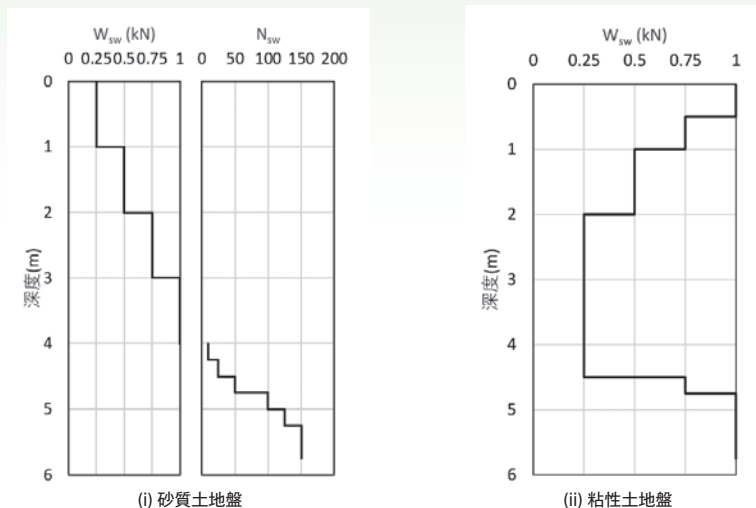


図-6 想定する SWS 試験結果

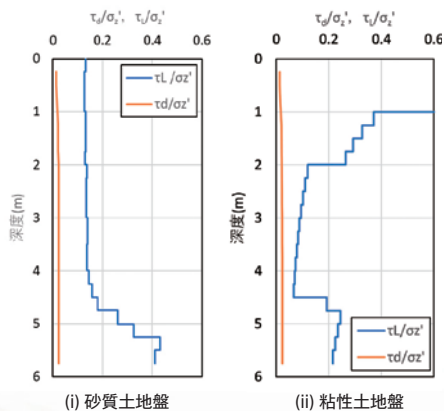


図-7 検討結果 (τ_d/σ'_z と τ_L/σ'_z の深度分布)

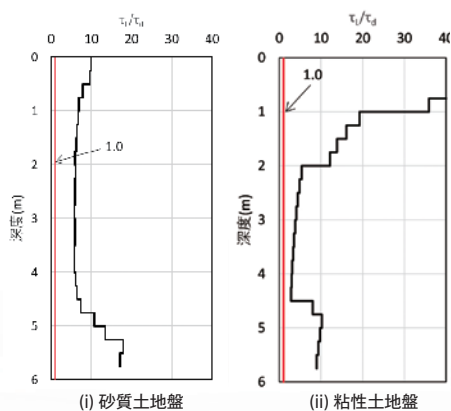


図-8 検討結果 (τ_L/τ_d の深度分布)



おわりに

砕石改良体の支持力特性は杭状改良体と異なり、複合地盤全体で発揮されると考えます。このため、砕石改良体周辺地盤を含めた繰返しせん断抵強さを地震によって発生するせん断応力と比較することで、地震時の水平力に対する安全性を評価する方法を示しました。この方法は、エコジオ工法のように、砕石改良体の支持力が砕石改良体周辺地盤と一体となってせん断強さが発揮されることが確認されている工法にのみ適用可能と考えられます。

本稿で示した例は、地盤の液状化危険度の評価方法を応用したもので⁴⁾、土質や水位などいくつかの仮定を含んでおり、使用に当たっては安全が担保出来るよう地盤定数を適切に選定し、検討する必要があります。なお、エコジオ工法が適用できる地盤条件においては、中規模地震レベル（マグニチュード7.5、地表面加速度200gal）であれば、地盤の繰返しせん断強さは、繰返しせん断応力以上となると考えられます。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.259-264, 2019.
- 2) 株式会社尾鍋組：建築技術性能証明 第09-31号 改5（更1）, pp.58-62, 2024.
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, p.130, 2019.
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp.50-54, 2019.
- 5) 大原資生，松田博：飽和粘性土の動的強度について，山口大学工学部研究報告，Vol.27, No. 2, pp.33-40, 1977.