

6. 軟弱地盤技術解析

6.1 はじめに

軟弱地盤技術解析は、社会インフラを支える「地盤」に発生する様々な現象（圧密沈下、すべり破壊、液状化など）を解明するために地盤モデルを構築して数値解析を行い、現象の評価や対策工の必要性を検討するための技術を指す。

6.2 軟弱地盤とは

土工構造物の基礎地盤として十分な支持力を有しない地盤で、その上に盛土等の土工構造物を構築すると、すべり破壊、土工構造物の沈下、周辺地盤の変形、あるいは地震時に液状化が生じる可能性がある地盤を指す。

言い換えれば、構造物が軽い場合は土の強度が小さくとも基礎地盤として成り立つので軟弱地盤と言わず、構造物が重い場合には土の強度が大きくとも軟弱地盤として扱う必要がある。

このように、軟弱地盤は土の強度により定まるものではなく、計画構造物との相対的な関係によって定まるものとする必要がある。

表-6.1 構造物の種類による軟弱地盤の概略的な判断基準

構造物の種類	地盤の状態							判定
	対象土質	層厚 (m)	N値	一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)	コーン支持力 q_c (kN/m ²)	長期許容地耐力 q_a (kN/m ²)	含水比 (%)	
道路			2以下	25以下	125以下			非常に軟弱
			2~4	25~50	125~250			軟弱
			4~8	50~100	250~500			普通
高速道路	泥炭層		4以下	50以下			100以上	軟弱地盤
	粘性土層		4以下	50以下			50以上	
	砂質土層		10以下	≧0			30以上	
鉄道	泥炭層	2以上	0					軟弱地盤
	粘性土層	5以上	2以下					
	砂質土層	10以上	4以下					
		3以上*	30以下					支持層
新幹線			2以下		20以下			精密調査を要する地盤圧密と地盤破壊に対し
			2~5		20~50			厚い場合、沈下に対し一応の調査を要する
			5以上		50以上			事後の調査不要、軟弱地盤としての問題なし
建築			10以下			10以下		軟弱地盤
フィルダム			20以下					軟弱地盤

6.3 軟弱地盤技術解析の分類

軟弱地盤技術解析は、地盤が生じる諸現象に応じて図-6.1のように区分される。

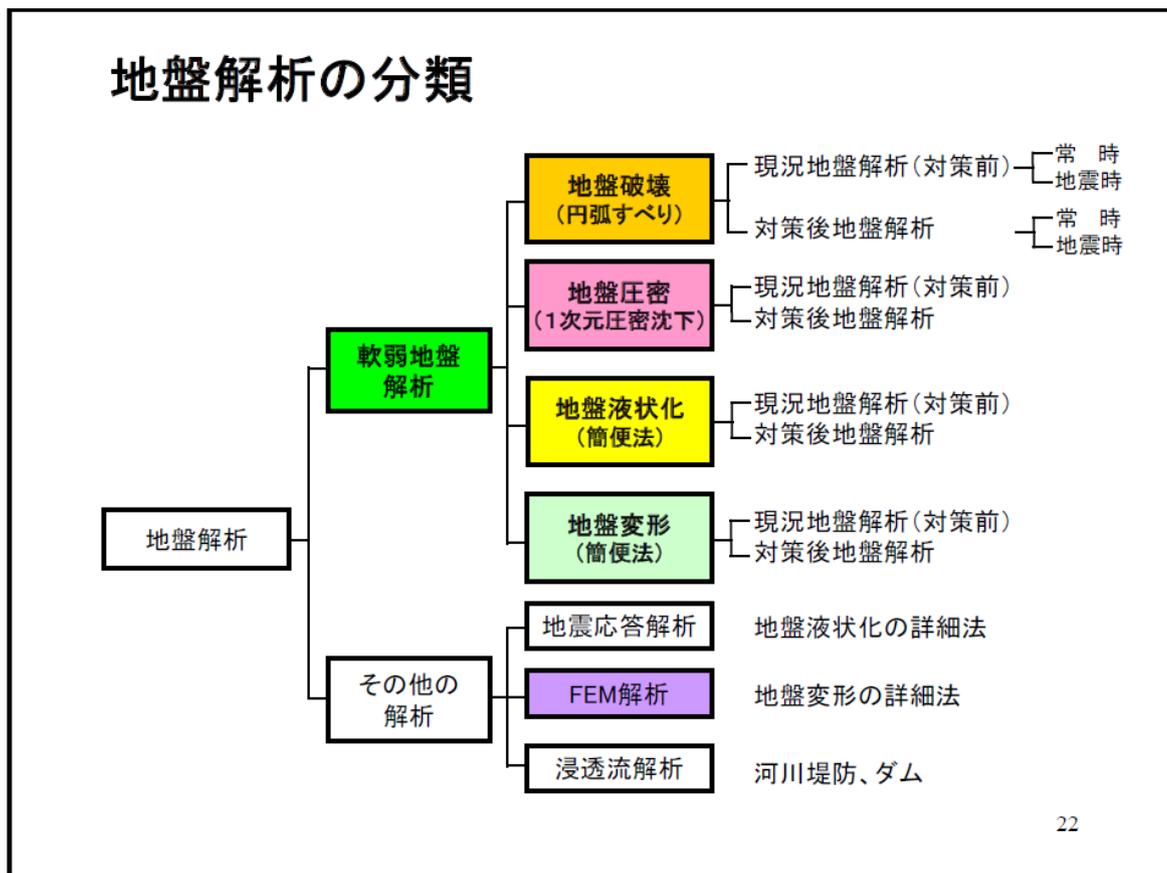
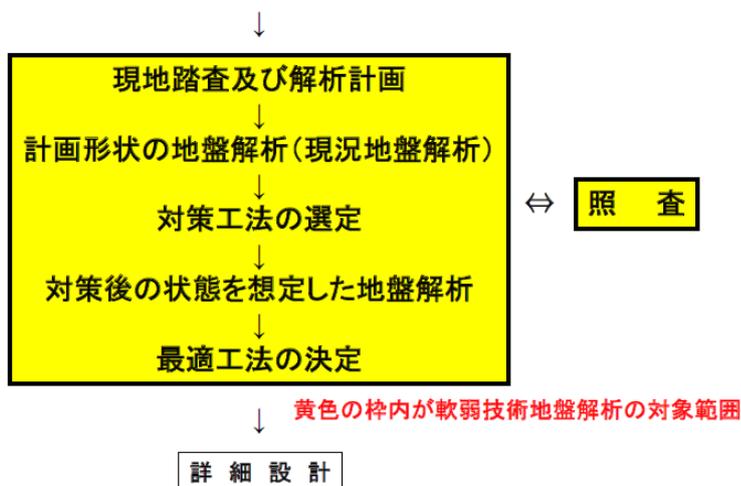


図-6.1 地盤解析の分類

6.4 軟弱地盤技術解析の流れと主な内容

地質調査, 総合解析とりまとめ(土質定数の設定を含む)



(1) 現地踏査・解析計画

現地状況の確認, 業務遂行のための作業工程計画・人員計画の作成, 解析基本条件の整理, 及び地盤モデルの作成を行う。

(2)現況地盤解析

設定された地盤モデル，荷重等の条件に基づき解析を行い，安全率，沈下量，沈下時間を算出する。

(3)対策工法の選定

当該地質条件，施工条件に対して適用可能な軟弱地盤対策工を抽出し，各工法の特長・経済性を概略的に比較検討のうえ，詳細な解析を実施する対策工法を1つ又は複数選定する。

(4)対策後地盤解析

選定された対策工法について，現況地盤の改良等，対策を行った場合を想定し，対象範囲，対策後の地盤定数の設定を行ったうえで，必要な軟弱地盤解析を行い，現地への適応性の検討を行う。

(5)最適工法の決定

対策後の検討結果を踏まえ，経済性・施工性・安全性等の総合比較により最適対策工法を決定する。

(6)照査

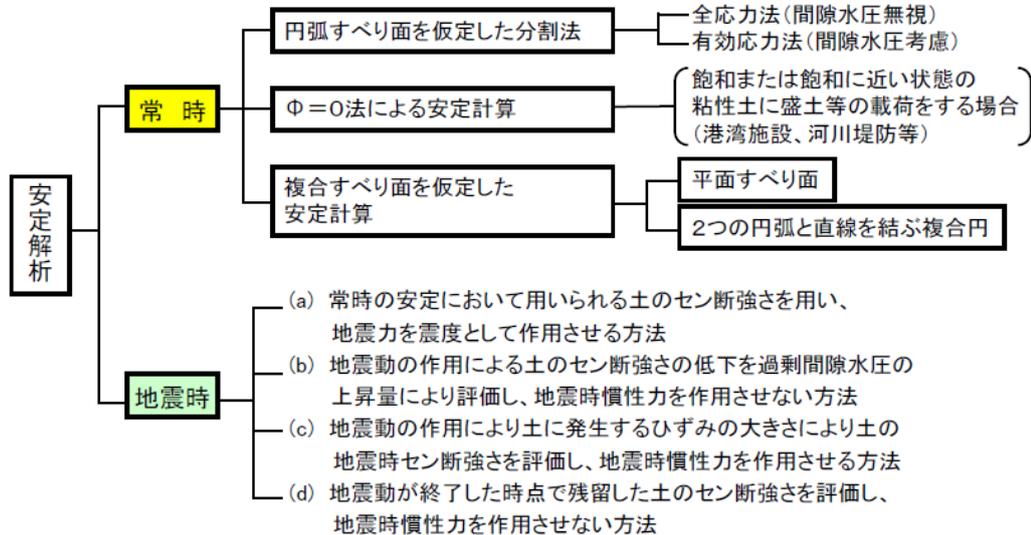
各項目毎の基本的な方針，手法，解析，及び評価結果に誤りがないかについて確認する。

6.5 主な軟弱地盤技術解析

(1) 地盤破壊（円弧すべり）

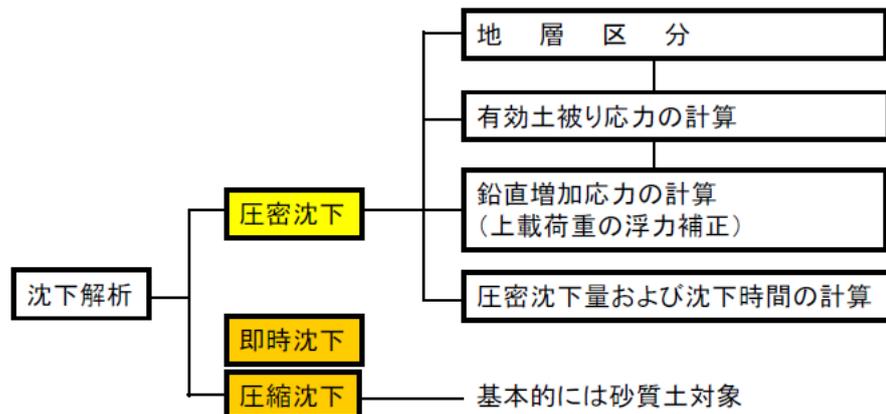
適切に設定された土質定数，荷重（地震時含む）などの条件に基づき，斜面の2次元断面モデルにおいて，すべり面を円弧形状と仮定して解析することで斜面の安定性を評価する。

地盤の破壊に係わる検討手法は円弧（円形）すべり計算に適用する。
複合すべり、有限要素法による弾性解析は適用しない。
 また、地盤の浸透破壊（ボイリング、パイピング、アップリフト＝盤ぶくれ、
 湿潤線上昇に対する安全性）の検討は適用しない。



(2) 地盤圧密（一次元圧密沈下）

適切に設定された土質定数，荷重などの条件に基づき地中鉛直増加応力を算定し，即時沈下量，圧密沈下量，各圧密度に対する沈下時間を算定する



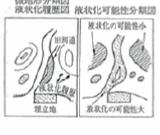
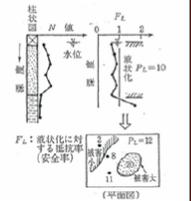
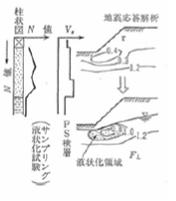
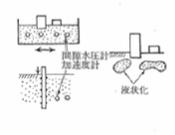
沈下検討にあたっては次の点に留意する必要がある。

- ① 計算値と現場における沈下との対応
- ② 二次圧密などの長期沈下
- ③ 広域地盤沈下
- ④ 低盛土に生ずる沈下

(3) 地盤液状化

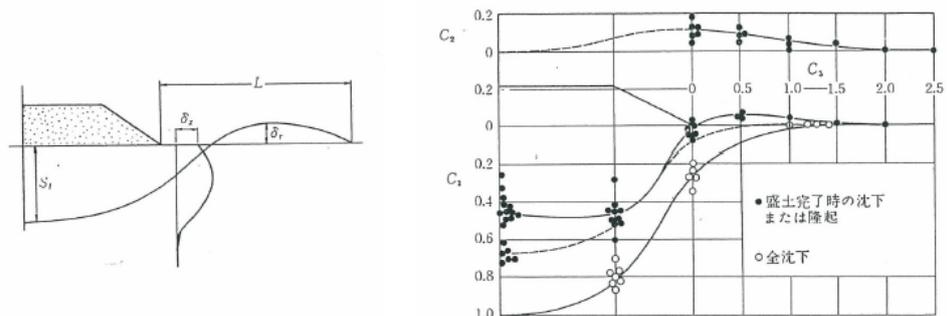
広範囲の砂質地盤を対象に土質定数および地震条件に基づき、液状化強度、地震時せん断応力比から、液状化に対する抵抗率FLを求めて判定を行う。

地盤の液状化に係る検討手法は、簡便法（N値と粒度からFL法で推計：道路橋示方書・同解説V耐震設計編参考）、および詳細法（液状化試験で得られる液状化強度比と地震応答解析で得られる地震時せん断応力比より推計）があり、軟弱地盤技術解析では「簡便法」を指す。

予測手法の種類	(a) 地形・地質および液状化履歴による概略的予測	(b) N値や粒度分布による簡易な予測	(c) 地震応答解析や液状化試験による詳細予測	(d) 模型実験や原位置液状化試験による予測
予測手法の概要	過去の地震で液状化した履歴のある地点は再び液状化しやすいとか、微地形分類で旧河道、湿地、埋立地、砂丘間低地と分類されているところは地震により液状化しやすい。これらの資料を収集して判定する。	一般に、地下水位以下の緩い砂質土が大きな地震力を受けた場合に液状化するため、それぞれの地下水位、N値、粒度組成、地表最大地震加速度をパラメーターとして判定する。中でも限界N値法とFL法の2種類がある。さらに平面分布を表すには(1-FL)を深度方向に積分したPL値(参考資料を添付)もある。	地震力によって地盤内に発生する繰返しせん断応力比Lを地震応答解析により求め、一方、地盤の液状化強度Rをサブリングした試料について室内液状化試験を行って求め、両者の比からFL=R/Lを計算して判定する。この中にもいくつかの手法がある。	振動台上に構造物を含む模型地盤を作成し、加振力と液状化発生、模型の挙動状況から実際の地盤の液状化を予測する。原位置液状化試験では杭やケーシングの振動、発破振動を生じさせ、その結果から地震時の液状化の予測を行う。
				

(4) 地盤変形（簡便法）

設定された土質定数、荷重などの条件に基づき、簡易的手法によって地盤内発生応力を算定し、地盤変形量（側方流動、地盤隆起、仮設構造物の変位など、および既設構造物への影響検討を含む）を算定する。



- ・ 沈下量 $St = C_1 \cdot S$
- ・ 側方地盤隆起量 $\delta v = C_1 \cdot S$
- ・ 側方地盤水平移動量 $\delta X = C_2 \cdot S$
- ・ 側方地盤に変位の及ぶ距離 $L = C_3 \cdot H$

ここに、
 S: 盛土中央における最終全沈下量(m)
 H: 軟弱層厚(m)

(5) その他の地盤解析

前述(1)～(4)の解析のほかに、地盤モデルを分割した要素で作成した詳細モデルによる計算(FEM解析(有限要素法))が挙げられるが、これらの解析手法は軟弱地盤技術解析は適用しない。

解析の種類	応力変形解析 (弾性解析・弾塑性解析)	圧密解析 (弾粘塑性解析)	浸透流解析
解析の概要	地盤および構造物の応力～ひずみ関係に線形もしくは非線形弾性、弾塑性を仮定することで要素の応力や節点変位などを求めることが可能。	従来の応力変形解析で扱えなかった圧密現象(変形、有効応力)の経時変化を求めることが可能。	河川堤防の浸透問題、井戸・掘削底面の揚水問題などの水位変動、降雨を考慮した解析が可能。 不飽和領域における解析も可能。
適用事例	<ul style="list-style-type: none"> 盛土の築堤 土留め、切土の掘削 トンネルの掘削 基礎の支持力 斜面安定 地盤改良の効果 etc.	<ul style="list-style-type: none"> 軟弱地盤上の盛土の圧密沈下 応力変形解析と同じもの etc.	<ul style="list-style-type: none"> 井戸の揚水問題 ダムや堤防の浸透安定問題 降雨浸透による影響 掘削による地下水位低下 etc.
解析入力パラメータ (一般的に使用するものであり、使用するモデルによって違ってくる)	E : 変形係数 v : ポアソン比 γ_t : 単位体積重量 c : 粘着力 ϕ : 内部摩擦角 etc.	E : 変形係数 v : ポアソン比 γ_t : 単位体積重量 c : 粘着力 ϕ : 内部摩擦角 λ : 圧縮指数 κ : 膨潤指数 k : 透水係数 M : 破壊応力比 etc.	K_s : 飽和透水係数 S_s : 比貯留係数 θ_s : 飽和体積含水率 K_r : 比透水係数 (水分特性曲線が必要) etc.
解析から得られるもの	変形量 応力 要素安全率 etc.	変形量 応力 水圧 要素安全率 経時変化結果 etc.	地下水位 流量 流速 水位の経時変化 水頭(全水頭、圧力水頭) etc.
必要な調査及び試験 (一般に必要なもの)	物理試験 一軸試験 三軸試験 標準貫入試験 孔内水平載荷試験 沈下計測 etc.	物理試験 圧密試験 一軸試験 三軸試験 標準貫入試験 沈下計測 etc.	現場透水試験 室内透水試験 粒度試験 pH試験 地下水位観測 揚水試験 45 etc.

解析の種類	地震応答解析	液状化解析	移流拡散解析
解析の概要	地中構造物の地震時の損傷や、橋梁などの構造物基礎と地盤との動的相互作用を考慮した解析を行うことが可能。	地震動による地盤の有効応力低下に伴う液状化現象の解析が可能。	地下水流における溶質(汚染物質など)の移流分散現象の解析が可能。
適用事例	<ul style="list-style-type: none"> 地中構造物の地震時の損傷 基礎と地盤の動的相互作用 造成盛土の耐震検討 etc.	<ul style="list-style-type: none"> 液状化する地盤上に構築された構造物の地震による被害の予測 岸壁や盛土構造物の耐震解析 etc.	<ul style="list-style-type: none"> 塩水流入問題 汚染物質の拡散 廃棄物処理場からの漏水範囲の検討 etc.
解析入力パラメータ (一般的に使用するものであり、使用するモデルによって違ってくる)	G : せん断弾性係数 v : ポアソン比 h : 減衰定数 γ_t : 単位体積重量 入力地震波 G~ γ 関係 h~ γ 関係 etc.	G _{ma} : せん断弾性係数 K _{ma} : 体積弾性係数 ϕ_f : 内部摩擦角 h _{max} : 履歴減衰の上限値 ϕ_p : 変相角 ρ : 質量密度 v : ポアソン比 液状化パラメータ 入力地震波 etc.	浸透流解析と同じもの 遅延係数 分散長 分子拡散係数 有効間隙率 実流速 etc.
解析から得られるもの	変位、速度、加速度 応力(σ_x , σ_y , τ_{xy}) ひずみ(ϵ_x , ϵ_y , γ) 時刻歴結果 etc.	変位、速度、加速度 有効応力(σ'_x , σ'_y , τ_{xy}) ひずみ(ϵ_x , ϵ_y , γ) 過剰間隙水圧比 時刻歴結果 etc.	浸透試験と同じもの 濃度分布 濃度の経時変化 etc.
必要な調査及び試験 (一般に必要なもの)	物理試験 標準貫入試験 動的変形試験 PS検層 etc.	物理試験 標準貫入試験 繰返し非排水三軸試験 動的変形試験 PS検層 三軸試験 etc.	カラム試験 タンクリーチング試験 浸透流解析に必要なもの etc.

6.6 代表的な軟弱地盤対策工法

軟弱地盤対策工の目的には、沈下の促進・抑制、安定の確保、周辺地盤の変形の抑制、液状化による被害の抑制、及びトラフィカビリティの確保がある。これらの目的を十分踏まえたうえで条件に適合した対策工法を選ぶ必要がある。

対策工法の選定にあたって考慮すべき条件の主たるものは、対策工法の原理と効果、道路条件、地盤条件、施工条件、及び経済性などが挙げられる。

表-6.2 軟弱地盤対策工法の例※1)

原理	代表的な対策工法	効果													トラフィカビリティ確保 の被害を軽減する対策			
		沈下		安定		変形		液状化										
		の沈下量の低減	全沈下の促進による併用後	圧密による強度増加	すべり抵抗の増加	すべり滑動力の軽減	応力の遮断	応力の軽減	液状化の発生を防止する対策									
									砂地盤の性質改良			有効応力の増大				過剰間隙水厚の消散		
圧密・排水	表層排水工法																○	
	サンドマット工法	○															○	
	緩速載荷工法			○														
	盛土載荷重工法	○		○														
	バーチカルドレーン工法	○		○														
	プレファブリケートッドバーチカルドレーン工法	○		○														
	真空圧密工法	○		○														
締固め	地下水位低下工法	○		○							○	○						
	振動締固め工法	サンドコンパクションバイブル工法	○	○	○	○			○	○								
		振動棒工法		○						○								
		バイプロフローテーション工法		○						○								
		バイプロタンパー工法		○						○								
	重錘落下締固め工法		○						○									
	静的締固め工法	静的締固め砂杭工法	○	○	○	○				○	○							
静的圧入締固め工法										○								
固結	表層混合処理工法		○		○			○		○							○	
	深層混合処理工法 (機械攪拌工法)	深層混合処理工法		○		○			○	○						○	○	
		高圧噴射攪拌工法		○		○			○	○						○	○	
	石炭パイル工法		○		○				○	○								
	薬液注入工法		○		○					○								
	凍結工法				○													
掘削置換	掘削置換工法		○		○			○			○							
間隙水圧消散	間隙水圧消散工法														○			
荷重軽減	軽量盛土工法	発泡スチロールブロック工法		○				○		○								
		気泡混合軽量土工法		○				○		○								
	発泡ビーズ混合軽量土工法		○				○		○									
	カルバート工法		○				○											
盛土の補強	盛土補強工法				○												○	
	押し盛土工法				○												○	
構造物による対策	地中連続壁工法															○		
	矢板工法				○			○							○**		○	
	杭工法		○		○			○									○	
補強材の敷設	補強材の敷設工法				○											○		

*) 砂地盤について有効

***) 排水機能付きの場合

対策工法は単独で適用させるだけでなく、組み合わせて適用されることもある。

例えば、軟弱層の表層に砂を被覆するサンドマット工法は、施工機械の作業を容易にするとともに、排水層の役目も果たすため、バーチカルドレーン工法等と併用されるのが一般的である。

それぞれの現場条件に対し、最も効果的で経済的な組合せを検討することが必要である。

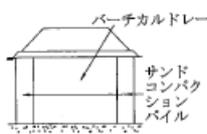
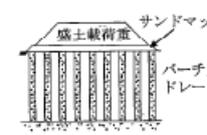
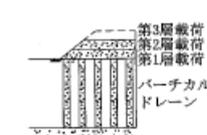
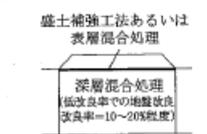
沈下対策		せん断変形対策		安定対策		図例
目的	工法	目的	工法	目的	工法	
沈下の促進	バーチカルドレーン工法 (例) サンドドレーン工法	応力の遮断 コンパクションパイル工法 (例) サンドコンパクションパイル工法	コンパクションパイル工法 (例) サンドコンパクションパイル工法	コンパクションパイル工法 (例) サンドコンパクションパイル工法	コンパクションパイル工法 (例) サンドコンパクションパイル工法	
	盛土載荷重工法	—	押え盛土工法またはコンパクションパイル工法 (例) サンドコンパクションパイル工法	押え盛土工法またはコンパクションパイル工法 (例) サンドコンパクションパイル工法	—	
	盛土載荷重工法とバーチカルドレーン工法 (例) サンドドレーン工法	—	—	—	表層排水工法 (例) サンドマット工法	
	バーチカルドレーン工法 (例) サンドドレーン工法	—	—	—	強度増加の促進 緩速載荷工法	
	バーチカルドレーン工法 (例) サンドドレーン工法	応力の遮断 変形の吸収	深層混合処理工法 変形吸収工法 (例) 変位吸収溝工法	—	—	変位吸収溝 深層混合処理
沈下の軽減	盛土補強工法あるいは表層混合処理と深層混合処理	—	盛土補強工法あるいは表層混合処理と深層混合処理	すべり抵抗の増加 盛土補強工法あるいは表層混合処理と深層混合処理	盛土補強工法あるいは表層混合処理 深層混合処理 (低改良率での地盤改良 改良率=10~20%程度)	

図-6.2 軟弱地盤対策工法の組合せ例※2)

《引用・参考文献》

- 1) 社団法人日本道路協会, (平成 24 年 8 月): 道路土工 軟弱地盤対策工指針 p. 191
- 2) 社団法人日本道路協会, (平成 24 年 8 月): 道路土工 軟弱地盤対策工指針 p. 200