

(社)高知県測量設計業協会
平成22年度・設計技術研修会

⑥軟弱地盤対策工指針:軟弱地盤対策工の設計施工

Thursday October 22, 2010
(株)サン土木コンサルタント

和田達夫
技術士(総合技術監理部門・建設部門)
土木学会・上級技術者(流域・都市分野)

軟弱地盤対策の基本方針

- 「道路土工－軟弱地盤対策工指針」

(平成22年度版・改定原案・以下「改訂原案」という)“第2章 軟弱地盤対策の基本方針”(pp.21～27)

2-1 軟弱地盤対策の目的

軟弱地盤対策の目的は、軟弱地盤上に土工構造物を安全かつ経済的に構築するとともに、その**土工構造物が供用後長期間に渡り道路交通の安全かつ円滑な状態を確保する**ための機能を果たすことを基本的な目的とする。

2-2 軟弱地盤対策の基本

- (1)軟弱地盤対策の実施に当たっては、使用目的との適合性・土工構造物の**安全性・耐久性・施工品質の確保・維持管理の容易さ・環境との調和・経済性**を考慮しなければならない。
- (2)軟弱地盤対策の実施に当たっては、軟弱地盤対策の特性を踏まえて計画・調査・設計・**施工・維持管理**を適切に実施しなければならない。

軟弱地盤対策工の選定

- 「道路土工－軟弱地盤対策工指針」

改定原案“第6章 軟弱地盤対策工の設計施工”(pp.158～347)

6-1 軟弱地盤対策工の選定に当たっての基本的考え方

- (1)軟弱地盤対策工の適用に当たっては、軟弱地盤対策工を必要とする理由や目的を十分に検討したうえで、対策工の原理・対策効果・施工方法・周辺環境に及ぼす影響等を総合的に勘案し、経済的な対策工法を選定する。
- (2)軟弱地盤対策工の設計に当たっては、想定する作用に対して土工構造物が**要求性能を満足することを照査することを原則とする。ただし、6-2以降に示す対策工法を選定し、同規程に基づいて検討を行えば、必要な性能を満足するとみなしてよい。(→性能設計の枠組みを導入。)**
- (3)軟弱地盤対策工の施工に当たっては、対策の目的や軟弱地盤の性状を考慮し、周辺環境などの現地条件に即した**施工計画**を立案するとともに、適切な**施工管理**の基に施工を実施する必要がある。また、軟弱地盤対策工が施された土工構造物の**管理基準値は、施工・維持管理での条件に応じて各段階で適切に定める必要がある。**

軟弱地盤対策の目的と効果

- 沈下対策

- 圧密沈下の促進による供用後沈下量の低減…………… (効果:A)
- 全沈下量の減少…………… (効果:B)

- 安定対策

- 圧密による地盤強度増加の促進…………… (効果:C)
- スペリ抵抗の増加…………… (効果:D)
- スペリ滑動力の軽減…………… (効果:E)

- 変形対策

- 応力の遮断…………… (効果:F)
- 応力の軽減…………… (効果:G)

- 液状化対策

- 地震時の地盤液状化を防止…………… (効果:H)

- トラフィカビリティ対策

- 施工中の建設機械のトラフィカビリティ確保…………… (効果:I)

軟弱地盤対策工の種類と効果

● 主な軟弱地盤対策工法(赤字は主な効果)

- 圧密排水工法..... (効果: **ACHI**)
 - 表層排水工法・サンドマット工法・緩速再加工法・盛土・載荷重工法・バーチカルドレーン工法・サンド(ドレーン)工法・真空圧密工法・地下水水位低下工法など
- 締め固め工法..... (効果: **ABCDFHI**)
 - サンドコンパクションパイル工法・振動棒工法・バイプロタンパー工法・バイプロフローテーション工法・落錐落下工法・静的締め固め砂杭工法・静的圧入締め固め工法など
- 固結工法..... (効果: **BEFGHI**)
 - 表層混合処理工法・深層混合処理工法・高圧噴射各班工法・石灰パイル工法・薬液注入工法・凍結工法など
- 掘削置換工法..... (効果: **BDFH**)
- 荷重軽減(軽量盛土等)工法..... (効果: **BDG**)
 - 気泡混合軽量盛土工法・発泡スチロール盛土工法など
- 構造物による対策工法..... (効果: **BDEFGH**)
 - 押え盛土工法・地中連続壁工法・矢板工法・杭工法・カルバート工法など
- 盛土補強工法・補強材敷設工法..... (効果: **DHI**)
- 間隙水圧消散工法..... (効果: **H**)

軟弱地盤対策工の選定

● 対策工の選定に当たって考慮すべき内容

- 対策工の目的
- 対策工法の機構・原理とその効果
- 対象地盤の特性や地形条件
- 構造物に求められる性能(要求性能)
- 用地の制約・工期・工事予算・周辺環境への影響

● 対策工法の組み合わせ。

- 対策工法は単独に適用されることもあるが、**組み合わせることでより効果的で合理的な設計となる場合が多い**。ただし、工法の組み合わせによっては、想定した効果が現れない場合もあるので留意が必要である。

例えば、剛性の高い深層混合処理工と、剛性の低い敷き網やジオテキスタイルなどを組み合わせた場合、両者でピーク強度の発生する歪みレベルが異なるため、小さい歪みレベルでは、敷き網やジオテキスタイルなどの持つ引っ張り強度が有効に働かず、深層混合処理工の負担が過大となる恐れがある。

軟弱地盤対策工適用上の留意点

● 特異部に於ける対策工の適用の留意点(改訂原案pp.183~219)

軟弱地盤のうち、以下に示すような特異部では特に問題となる場合が多いので、対策工の適用に当たっては、これら特異部の特徴に留意する。

- 低盛土
- 片切り片盛部
- 傾斜基盤上の盛土
- 既設構造物がある場合
- 橋台・橋脚・擁壁等の構造物との取付部の盛土
- カルバート(特に剛性カルバート)に接する盛土
- 長期沈下が発生するおそれのある場合

例えば低盛土部では、**交通荷重が盛土内で十分に分散できないまま軟弱地盤に達するため、供用開始後に過大な沈下を生じる場合がある**。また、軟弱地盤が傾斜基盤上にある場合、**盛土の不同沈下や傾斜方向へのスベリ**を生じることがある。さらに、構造物取付部等では、**段差の発生**に留意する必要があるほか、粘性土層が厚く、中間に排水層が存在しないような地盤では、**長期的沈下により道路の供用性が損なわれる**場合がある。

軟弱地盤対策工の設計

● 設計時の留意事項

- 「地盤の性状」は複雑なため、軟弱地盤に限らず、十分な調査を行ったとしても、**正確な地盤情報を把握するのが難しい**。
- 性状の複雑な軟弱地盤に対し、対策工や盛土或いは構造物の施工・基礎の掘削などを行ない、**地盤を乱したり変形させると、ますます取り扱いにくい地盤に変化することがある**。
- 事前に十分な調査を行い、慎重且つ綿密な設計を行ったとしても、施工中の挙動を完全に予測するのは困難なため、「**施工時に“予測できない事態”に遭遇することもあり得る**」との前提で設計する必要がある。
- 軟弱地盤対策工の設計では、**地盤性状の的確な把握に努め、最も効果的で適切な工法を選定するのはもちろんのこと、施工に於いて地盤の性状を著しく変化させることの無いよう、留意する必要がある**。
- 具体的な工法の選定に於いては、**施工時に想定される不確定要素まで考慮した、柔軟な計画・設計**を行う必要がある。
- 近年土木設計の各分野で、**「性能に着目した設計」**が広がっており、軟弱地盤対策工の分野でも、適切な対応が求められる。キーワードは「**情報化施工**」及び「**試験施工**」である。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計

➢ 従来の軟弱地盤対策工設計に於ける課題

- ◆ 軟弱地盤はその構造や構成が複雑であり、性状が多様であることから、現場に於ける失敗例や成功例・試行錯誤による検討結果など、**経験に基づく知見が多数取り込まれた設計体系**となっている。
- ◆ 軟弱地盤上に設置される代表的な構築物である盛土は、主構造が自然素材である“土”で構成されており、その物理的・化学的性状や変形の仕方にも地域的ばらつきが大きく、**理論と実際が一致しないことが多い。**

◇◇従来型の設計体系◇◇

- ①仕様規程にもとづく「標準設計」の適用
- ②理論上説明しがたい部分を安全側に評価して設計
- ③盛土構築物の設計は多くの経験に裏打ちされた形で発展

- ◆ 循環型社会の構築に向け、環境負荷低減の観点から、産業廃棄物の排出量縮減や有効利用の推進が叫ばれているが、建設発生土は約63%しか有効利用されていない。
- ◆ **従来型の設計体系の適用に限界が見え始めた。**

性能に着目した「軟弱地盤対策工」の設計が必要

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計

➢ 土構造の持つ利点

- ◆ **土は最も身近で豊富な資源**であり、建設工事に伴って必ず発生する材料であって、土を用いた構築物の築造は、環境上も比較的ダメージの少ないものと言える。
- ◆ 維持管理上も土構造は、高強度のコンクリートや鋼材などを用いた構築物と比べて、**補修・補強に要する費用が少なく**て済む。
- ◆ 再生可能な土を材料とする土構造の特性から、他の構築物に**比べて修復性が高く**、被災した場合にもその**復旧が比較的容易**である。

➢ 土質材料の持つ利点を活かすため、土構造の設計では、LCCの低減と有効で適切な維持管理に主眼を於いた設計を行うことが重要である。

- ◆ 軟弱地盤に「剛な構築物」を構築しようとするれば、「強度が低く」「変形しやすい」といった性状が問題となるが、“柔な構造”を持つ**土構造の場合、構築時の安定さ確保できれば地盤の長期的な変形にも追従できる。**
- ◆ 最近では軟弱地盤そのものの変形量を低減させる工法も一般化してきている。
- ◆ 道路の場合、走行性に支障のない程度の変形ならば許容出来るため、**軟弱地盤への土構造の適用性は高い**と言える。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計

➢ 軟弱地盤の変形性能(変形抑制量:定量的な目標)

- ◆ **従来型の設計体系**では、個々の構築物の持つ機能は余り配慮されることが無く、軟弱地盤の**変形性能として一律な値が用いられてきた。**
- ◆ 軟弱地盤の変形性能は、**対象とする構築物の持つ固有の機能面から個々に決定すべき問題**であり、どのような構築物も、本来一義的な値とはならない。
- ◆ 個々の盛土構築物毎に、どの程度の変形性能(沈下量〇〇cm/year以下など)が要求されているか、具体的に明示すれば無駄な対策工を行わなくて済む。

求める性能を明確に示す「**性能照査型設計**」(目標性能の実現を目的とした構築物設計法)を土構造の設計に導入することで、**合理的でLCCの低減も可能な設計**を実現することが出来る。

- 性能照査型設計の利点は、**設計法の透明化と明確化**に加えて、**新しい技術や設計法が導入しやすくなる**ことにある。
- 性能照査型設計法は、ユーロコード(Structural Euro-codes)やISO 2394に見られるように、**設計思想の基本的で国際的な潮流**になりつつある。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計

➢ 要求性能の水準。(改訂原案 p.87)

- ◆ **性能1:** 想定する作用によって土工構築物としての健全性を損なわない性能。
- ◆ **性能2:** 想定する作用による損傷が限定的なものにとどまり、土工構築物としての機能の回復が速やかに行いうる性能。
- ◆ **性能3:** 想定する作用による損傷が土工構築物として致命的にならない性能。

➢ 土工構築物の要求性能。(盛土の例:道路土工-盛土工指針・平成22年度版 p.84)

- ◆ **重要度1:** 万一損傷すると交通機能に著しい影響を与える場合、あるいは、隣接する施設に重大な影響を与える場合。
- ◆ **重要度2:** 上記以外の場合。

道路土工・盛土工指針・解表4-1-1 盛土の要求性能の例

	重要度 1	重要度 2
常時の作用	性能 1	性能 1
降雨の作用	性能 1	性能 1
地震時の作用	レベル 1 地震動	性能 2
	レベル 2 地震動	性能 3

- 鉄道分野では既に、土構造に対しても限界設計法により性能を照査する設計法を採用している。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計事例

事例－1：軟弱地盤上の橋台の側方移動対策（土木施工・2002年5月号別冊より）

➢ 設計－1：一般的な設計例

- ◆ 地盤の側方流動により、橋台が側方へ移動するか否かを、側方移動判定式（JHの設計要領によるF値（判定基準 $F=4 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ ））により判定。
 - ◆ 判定の結果、地盤を無処理とした場合側方流動が起きることを確認。
 - ◆ 軟弱地盤対策工を検討。
 - ◆ 橋台全面の用地の制約から、橋台背面を深層混合処理工により固結する方法を採用。
 - ◆ 杭基礎の設計では、梁～パネモデルによる断面力・杭頭変位量を算出。
 - ◆ 部材の耐力は許容応力度法で照査。→杭径 $\phi 800\text{mm} \times 48\text{本}$ ・許容変位量 15mm
- ただし、以上の設計には下記のような**不確定要素**が含まれている。
- ◆ 使用した側方移動判定式に確かな理論的背景はなく、現場計測から経験的に得られたものであることによる、**側方移動判定式の信頼性**の問題。
 - ◆ 軟弱地盤は本来、弾粘塑性的な挙動をすると考えられるにもかかわらず、解析の容易さから**弾性解析を採用していることに対する信頼性**（構造解析係数）の問題。
 - ◆ 材料係数としての**土質定数のバラツキ**の問題。
- このように従来型の設計手法では、不確定なものが多いがどの程度設計の中にも含まれているか分からないが、**標準仕様書の規程に従って手順を踏めば、おおむね間違いのない構造物の設計・施工ができる。**

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計事例

事例－1：軟弱地盤上の橋台の側方移動対策（土木施工・2002年5月号別冊より）

➢ 設計－2：構造物の機能に着目した設計例

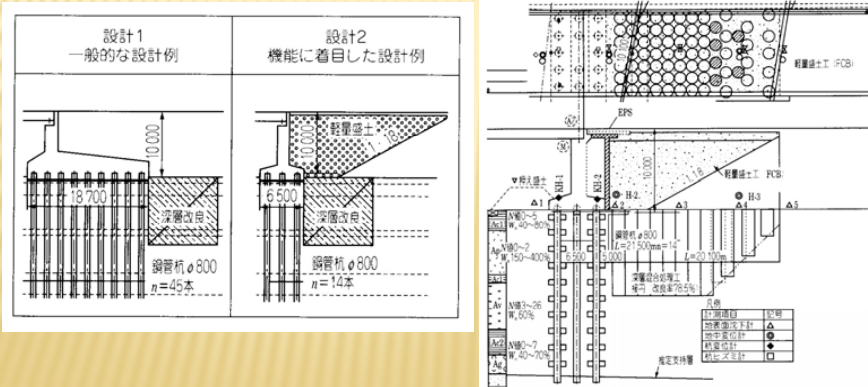
- 情報化施工を前提**に、橋台や杭基礎が破壊せず、地盤や基礎の変位が下部工や上部工の機能に影響しない程度に**水平変位の管理値を定め**、杭の応力に着目して設計。
- ◆ 上部工と橋台間の遊間を調整し、ある程度の変形に追従できる構造とする。
 - ◆ 軟弱地盤の不確実性に対し、**情報化施工**を前提に杭基礎の水平変位の管理値を設定。
 - ◆ 杭の本数は許容応力度を満足するように設定。
 - ◆ 基礎杭に作用する水平力を低減させるため、橋台背面にFCB軽量盛土を採用。→水平力を基礎杭に負担させる場合より、経済的な設計となる。
 - ◆ **情報化施工**に於いて、橋台の水平変位が管理限界値を超過したことが確認されたため、盛土築造を中止して放置期間をとると共に、橋台前面に押え盛土を施工。
 - ◆ **情報化施工**により、橋台の水平変位が回復するのを待って残工事を施工・完成。
- 設計－1では、杭基礎の許容応力度に対しては余裕がある一方、軟弱地盤が厚く橋台が大規模になると、基礎に要する費用が多額となり不経済である。それに対し**設計－2**では、
- ① 既存の設計方式に於いて不確定要素となる、地盤定数のばらつきと構造解析の信頼性の問題に対しては、**情報化施工により適切に対応**する。
 - ② 橋台背面土圧に対しては、杭の水平耐力でなく土圧力の軽減により対応することで、合理的な設計が出来ていることが分かる。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計事例

事例－1：軟弱地盤上の橋台の側方移動対策（土木施工・2002年5月号別冊より）

設計－2：橋台に於ける計測機器配置



軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計事例

事例－2：軟弱地盤上のカルバート（土木施工・2002年5月号別冊より）

➢ 設計－1：一般的な設計例

- 当カルバートの目的は、高速道路の下を横断（アンダーパス）する道路のための空間確保と、道路機能の継続的確保であり、下記の機能が求められる。
- ① 耐用期間終了まで、内空断面として所定の建築限界以上の空間（アンダーパス道路のための空間）を確保すること。
 - ② 構造的に安定であり、高速道路及びアンダーパス道路を支持し、走行性が確保出来る耐久性を有すること。
- 以上の初期条件のもとに行った**設計－1**の概要は下記のとおりである。
- ◆ カルバートの設計は、「道路土工－カルバート工指針」に準拠して行う。
 - ◆ 基礎形式として深層混合処理工による地盤改良（効果BEFGHI）を採用。
 - ◆ 施工中の盛土の沈下促進と安定性向上のため、サンドドレーン（効果ACHI）を併用し、地盤改良部と無処理盛土部の境界に於ける不同沈下量（段差）が30cm以下になるよう、路面平坦性の確保など、道路機能の維持を重視した計画。
 - ◆ カルバート本体には沈下が生じない計画（想定）のため、内空断面に対する余裕（上げ越し）は設定しない。
- 以上のように**設計－1**は、カルバート建設時に、地盤の安定と沈下対策に重点を置いて施工を行い、供用後の**維持管理では特に補修等を想定しない設計**である。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計事例

事例-2: 軟弱地盤上のカルバート(土木施工・2002年5月号別冊より)

➢ 設計-2: 構造物の機能に着目した設計例

一般に盛土に囲まれたカルバートは、盛土に安定上の問題がなければ、多少の地盤沈下や傾斜が生じても、構造的な問題は生じにくい構造物である。これらを念頭に設計-2では、下記のような設計を行った。

- ◆ カルバート基礎工としての地盤改良は行わない。
- ◆ カルバート機能の健全性維持を目的に、カルバートと盛土を一体的に沈下させる「浮き基礎」(Floating Foundation)工法を採用。
- ◆ 残留沈下によってカルバートに生じると思われる、道路としての機能低下を防ぐため、プレロードによる沈下促進とカルバートの上げ越しを計画。
- ◆ 供用後の残留沈下による路面の不陸発生に対しては、舗装のメンテナンスで対応。
- ◆ プレロードやカルバートの上げ越しで対処できない残留沈下分については、カルバート内空断面に対する適切な余裕高の確保で対応。

以上のように設計-2は、カルバート建設に於ける初期投資を抑制し、メンテナンスに重点を置いた設計であり、一般的に初期投資とメンテナンスなどの長期投資を合わせたトータルコスト(LCC: Life Cycle Cost)で比較すれば、設計-1よりも優れていることが多い。

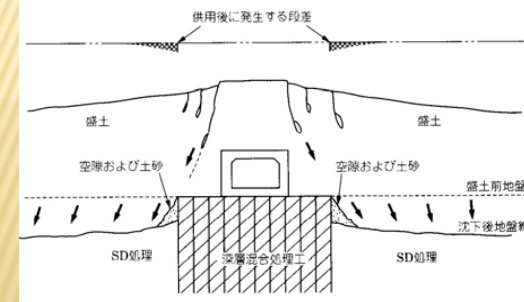
ただし設計-2を採用するには、道路の機能的に多少の変形が許容され、供用後のメンテナンスが容易な場所であること等の問題がクリアされている必要がある。

軟弱地盤対策工の設計

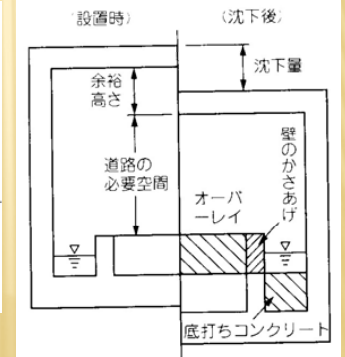
● 性能に着目した軟弱地盤対策工の設計事例

事例-2: 軟弱地盤上のカルバート(土木施工・2002年5月号別冊より)

設計-1: カルバート周辺の地盤の挙動概念図



設計-2: 上げ越し施工概念図



断面の余裕確保による沈下対策

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の基本的考え方

- 性能照査型設計法の軟弱地盤への導入の目的は、既往の設計法に比べて、設計に於ける透明化・明確化・自由化を図ることにある。
- 従来型の設計手法では、随所に制限値を設けたり、安全側の設計定数を用いたりするなど、設計法そのものの中に隠れた余裕が含まれている。
- 従来型の設計手法では、実際の挙動や安全性がわかりにくいいため、設計や施工に於いて、新しい知見を導入しにくい面がある。
- 性能照査型の設計手法を導入すれば、新しい解析理論や工法の採用など、創造的能力が発揮しやすい設計体系に移行していくと思われる。



性能照査型設計は、「情報化施工」または「試験施工」を活用し、建設段階から耐用期間終了まで(Life Cycle内)の、築造物の「健全な機能の確保」と「安全性の保証」が前提条件となる設計手法である。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の基本的考え方

- 性能照査型設計は、構造物の供用期間を通じて、通常の供用条件下で作用する外力、及び地震などの突発的・短期的な荷重条件下で、予め設定された要求性能を確保すると同時に安全性も照査する手法である。



- 構造物の耐用年数(想定供用期間)とその間の要求性能を設定する。
 - ◆ 例えば道路の場合は、「路面の走行性」「構造物の耐震性や耐久性」「供用時の騒音や振動の低減」「景観や環境との調和」などが想定される。
- 要求性能は「検証」可能なことが前提であり、構造物の目的に応じて設定される。
 - ◆ 通常「要求性能」に対する検証は、「対象とする構造物が設定した外力によって「限界状態」に至らない」ことを保証するもので、通常は限界状態設計法の考え方に従って行われる。
 - ◆ 「限界状態」は、対象となる構造物や部材に応じて設定するが、一般的には構造物の破壊などに対する終局限界状態、供用中の不具合の発生などに対する使用限界状態、或いは疲労耐久性に対する疲労限界状態等々が設定される。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の基本的考え方

- 性能照査型設計では、設定された耐用年数や、構造物の重要度に応じた各種の「**限界状態**」に於ける安全性や供用性・耐久性等に対する「**要求性能事項**」を明確に示す必要がある。

性能要求事項の提示に続いて荷重を設定し、設定した荷重条件・環境条件の下で、**要求性能を工学的な表現で明示し、目標性能を決定する。**

「**目標性能**」が照査の判断基準となる。

照査は設計者が選択した「**限界状態**」を表現できる手法を採用し、「**応答値**」が**目標性能を満足しているかどうか**により照査する。

軟弱地盤対策工の設計

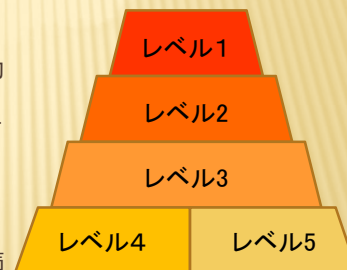
● 要求性能の照査と限界状態設計法

- 要求性能の照査・検証に用いられる「**限界状態設計法**」は、「**予め設定した限界状態を超えないように設計する。**」設計手法であり、予め限界状態を示すという意味では、性能照査型設計と同じ設計思想によっている。
- コンクリート構造物では、既に平成8年制定のコンクリート標準仕様書から、限界状態設計法が取り入れられている。
- 軟弱地盤対策工では「**限界状態**」のイメージを、「**使用限界 (Serviceability Limit)**」「**終局限界 (Ultimate Limit)**」の2タイプに分けて考える。
- 「**使用限界**」状態とは、軟弱地盤対策工の変形により**対象構造物の機能が失われる場合**である。
- 機能が失われる状態は対象構造物の構造形式・材料・形状寸法等によって異なり、「**対策工の全沈下量**」「**不同沈下量**」「**相対回転角**」「**水平変位**」など、**地盤の変形量によって評価**される。
- 軟弱地盤対策工の「**終局限界**」状態には「**地盤が壊れる場合**」「**対策工が壊れる場合**」「**対象構造物が壊れる場合**」があり、このうち最も危険なもの(要素)により、終局限界が決定される。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の性能規程

- 要求性能は、構造物の段階(レベル)として、下記のように分類できる。
 - レベル1: 目的(構築物・構造物の目的)
 - レベル2: 要求性能(機能的要求・構造物の果たすべき役割)
 - レベル3: 目標性能(要求水準・構築物それ自身の機能を発揮または保持するための能力・性質)
 - レベル4: 照査・検証方法(計算方法・検査方法)
 - レベル5: 見なし規程(性能要求水準を満足していると見なされる具体的な仕様)



- 軟弱地盤対策工では、一般的に**それ自身が目的物とはなりえないこと**から、構築物(例えば道路や鉄道)や構造物(盛土・橋梁・擁壁・カルバートなど)といった、**対象物を介して要求性能(レベル2)を表現する**という特殊性がある。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の性能規程

- 道路の目的は、「ある期間(**耐久性**)車輛が規程の速度で安全(**安全性**)で快適で走行できる(**供用性**)道路を、環境にも配慮しつつ、**適正な便益評価(B/C:Cost Benefit Ratio算定)のもとに提供すること**である。
- 道路には明確なヒエラルキーが存在し、それぞれに供用目的・利用目的が異なり、その重要度・道路規格・交通のサービス水準等によって、目的のレベルが変化する。
- 一般に道路計画では、**供用期間中の交通サービスを一定に保つこと**を目標に設計が行われる。道路の機能として設定されることの多い、主な交通のサービス水準は下記のとおりである。
 - 通行時の車輛走行速度(設計速度)
 - 行動の自由度(道路ネットワークの充実度や車線数)
 - 交通の中断や障害の可能性(構築物としての安定性・耐久性・防災対策の有無)
 - 公共施設としての・安定性・安全性
 - 車輛運転時の快適性・容易性(運転しやすい線形や交通安全施設)
 - LCCとしての経済性(維持管理性)

上記以外にも、例えばメンテナンスを前提にした性能照査型設計を行う場合には、メンテナンス時の交通運用によるサービス低下についても考慮する必要がある。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の要求性能

- 土構造物の要求性能として、「安定性」は土の破壊基準に関して必ずしも明確でなく、「供用性」は構築物によって異なるため、設定が難しい。
 - 土構造自体は、他の構造に比べて、経時的な沈下や剪断変形による大きな変位・変状・不同沈下が生じて、追従性が高く、修復性能に優れた（補修や補強が容易で安価な）構造物である。
- 一般的な軟弱地盤についての要求性能を以下に示す。
- 交通荷重に対して舗装構造を支持すること。
 - 盛土が作用する外力（荷重）に対して適切な安全性を有し、供用時に十分な機能を発揮すること。
 - 盛土の有害な変位・変状・過度な沈下・不同沈下によって道路機能の低下を招かないこと。
 - 盛土施工に起因して、擁壁などの抗土圧構造物や周辺構造物に有害な影響を与えず、環境にもダメージを与えないこと。
 - 軟弱地盤対策工は、他の要求性能を満足した上で、総合的な評価により、最適な設計であること。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の目標性能

- 目標性能は要求性能を満足する上で必要な性能で、構築物に求められる性能であり、機能項目毎に工学的表現で示される。
- 要求性能と目標性能の関係について以下に例示する。

交通荷重の支持

- ◆ 要求性能: 交通荷重に対して舗装構造を支持すること。
- ◆ 目標性能: 舗装設計から定まる規定値を満足し、低盛土区間などに於いて、交通荷重による支持力の低下が生じないこと。

安定

- ◆ 要求性能: 盛土が作用する外力（荷重）に対して適切な安全度を持ち、供用時に十分な機能を発揮すること。
- ◆ 目標性能: 供用時にスベリ破壊を生じさせず、破壊基準に照らして適切な安全度を有すること。

沈下

- ◆ 要求性能: 盛土の有害な変位・変状・過度な沈下・不同沈下により、道路機能の低下を招かないこと。
- ◆ 目標性能: 供用後に於ける軟弱地盤の残留沈下は、許容される交通サービスの範囲内とし、維持管理で対処できる沈下速度・沈下量とする。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の目標性能

側方変位

- ◆ 要求性能: 盛土施工に起因して、擁壁などの抗土圧構造物及び周辺構造物に悪影響を与えず、環境にもダメージを与えないこと。
- ◆ 目標性能: 供用時に擁壁等の機能に有害な影響を与えない程度の変位量に留める、或いは周辺構造物の機能を害しないか機能復旧が可能な変位量に留める。

軟弱地盤対策工

- ◆ 要求性能: 軟弱地盤対策工に求められる要求性能を満足すると共に、総合的な評価により、最適な設計に努めること。
- ◆ 目標性能: 軟弱地盤対策工の設計では、個々の要求性能に対してそれぞれ対策工の設計を行った場合、多くの対策工が必要となる。しかしながら軟弱地盤対策工の場合、ある対策工の効果が、“全沈下量の減少（効果B）だけでなく地盤強度増加の促進（効果C）も有している”というように、複数の効果を有している場合が多い。従って、具体的な対策工の選定に於いては、対策工の効果を総合的に評価しながら、最も効果的な対策工を設計する必要がある。さらに、一方的に対象とする構造物の対策工に求める要求性能を満たすだけでなく、場合によっては、対象とする構造物形式の変更や、土構造に於いては工期の変更による時間効果の活用をも、選択肢の中に取り込むことが重要となる。軟弱地盤上の設計の基本は、「構造物を軽くし変形性能を高める対策」「地盤を強くする対策」「不同沈下対策」の3つを総合的に評価し、しなやかで変形性能に優れた構造系を構築することである。

軟弱地盤対策工の設計

● 性能照査型設計の荷重設定

- 構造物の構造形式・地盤条件・環境条件等により荷重を設定し、終局境界状態時には、地震・降雨・衝突等の偶発的短期荷重と組み合わせる。

● 耐用期間

- 軟弱地盤対策工の耐用期間は、対象とする構造物の機能を保証する期間であり、対象構造物の耐用期間までの長期のものと、仮設的な短期のものに分けられる。軟弱地盤対策工の耐用期間の例を下記に示す。

軟弱地盤対策工の耐用期間の例

クラス	必要な設計耐用期間 (year)	対象構造物	軟弱地盤対策工
1	1~5	短期の構造物	安定対策（敷き網工）
2	25	置換可能な構造物	
3	50	通常構造物	沈下対策（排水対策）
4	100以上	橋梁等の構造物	液状化対策・支持力対策 軽量盛土・地盤改良など

軟弱地盤対策工の設計

- 性能照査型設計の照査
 - 限界状態設計法による照査は、**目標性能を満足**する適切な項目の限界値(R)を設定し、設計外力により計算される構造物の応答値(S)が限界値に達しないことを確認する。即ち **R < S** である。
- 試験施工
 - 重要な構造物や実績の少ない構造物、或いは設計計算での妥当性が評価しにくい構造形式等に対し、**工事の施工に先だて、実際の挙動と設計内容の対比を行い、経済的で妥当な構造形式を設定する。**
- 情報化施工
 - 軟弱地盤対策を含めた土構造の設計では、設計のため収集されたデータに不確実性が含まれることが避けられず、**安全側の不経済な設計**となる可能性が高い。これを解決する手法の一つが**情報化施工**であり、施工中の設計変更を前提として、**施工中の地盤や構造物の挙動を観測(動態観測)**し、得られた**情報をもとに設計内容をより適切なものに修正する。**迅速な情報の交換が求められるため、**建設CALS/EC**など、インターネットを介した、電子データ交換システムの活用により運用される事例が多い。

軟弱地盤対策工の施工

- 施工時の留意点
 - 軟弱地盤対策工の施工では、対象地盤や盛土・構造物の安定性を損なわない範囲で、**施工管理データにもとづき、**載荷重の載荷速度を調節しながら、**出来るだけ早期に計画荷重にまで到達**することが基本となる。
 - 対策工の施工を速やかに完了させ、本体盛土工との間に十分な時間を取って地盤を落ち着かせる(**時間効果の活用**)のが望ましい。
 - CCDカメラやGPS・インターネット等の活用により、**リアルタイムに現場の状況を入力し、設計時に想定した挙動との比較検証**により、的確で効率の良い施工を行う必要がある。(建設CALS/ECなどを利用した**「情報化施工」**が有効。)

軟弱地盤上の大規模土構造物の施工に於いては、
「情報化施工」を行うことを原則とする。(改訂原案・p.352)

軟弱地盤対策工の施工

- 軟弱地盤対策工施工に際して必要な配慮
 - 設計条件や現地状況と照合の上、所定の品質・出来形・工程が確保できる施工計画を立案する。
 - 施工計画にもとづいて施工を行う。
 - 施工管理に於いて**適切な管理・挙動観測**を行い、その**データを施工現場にフィードバック**させる。

情報化施工：施工管理結果から得られた諸条件の変化を、速やかに**設計及び施工計画に反映させ修正**を行う。

- 軟弱地盤対策工の施工では、周辺地盤の沈下・変形・浮き上がりなど、**周辺の地盤にも影響**が生じ、既存施設や環境にも影響を与える場合があるため、留意が必要である。
- 基礎地盤の破壊などへの**応急対策が必要な場合を想定**し、施工計画の中にそのための要員・機械・資材など、必要な準備態勢を整えておく。

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

- 施工管理
 - 施工管理には工程管理・品質管理・出来形管理・安全管理などが含まれるが、軟弱地盤対策工の施工では、対象地盤の挙動を把握し、施工に反映させるための**「動態観測」が非常に重要**である。**観測結果(データ)が対象地盤の性状を代表するもの**かどうか、対策工の成否を左右するファクターであることを念頭に、調査・観測項目を設定しなければならない。
 - 基礎地盤処理は出来るだけ**早期に完了**させ、盛土や構造物など(以下「構築物」)の施工を始める前に地盤を安定させる。
 - **基礎地盤が著しい変状や破壊を起こさない施工速度**で、盛土や構築物を施工(工程管理)する。
 - 盛土施工は出来るだけ**早期に完了**し、**放置期間を長く**取り、舗装や構築物の施工後に生じる**残留沈下量**を出来るだけ**少なく**する。
 - 構築物の施工中に、基礎地盤の支持力不足に起因する破壊に対する安全管理や構築物の**沈下管理(動態観測)**を行い、そのデータにもとづいて構築物の**施工方法や施工速度**を調節する。(→**情報化施工**)

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 主要な対策工に於ける施工管理

- サンドマット工法
 - ◆ サンドマット材料の品質(特に**粒度**は抜き取りによる管理試験が必要)の確認
 - ◆ サンドマットの**厚さと施工範囲**の確認
- 置換工法
 - ◆ 置換の**深さ・範囲**並びに置換の施工順序及び方法の確認
- 盛土荷重載荷工法
 - ◆ 載荷重の**施工範囲・高さ**並びに**載荷重の取り除き時期**及び仕上げ面の高さの確認
- サンドドレーン及びサンド(グラベル)コンパクションパイル工法
 - ◆ 砂杭**打設位置・範囲と間隔**及び打設順序の確認
 - ◆ 砂杭に使用する材料の品質(特に**粒度**は抜き取りによる管理試験が必要)の確認
 - ◆ 砂杭の**長さ(打ち止め深さ)・砂投入量・出来上り杭径・ケーシング内空気圧**の確認
- 深層混合処理工法
 - ◆ 安定処理工の**範囲・打設位置と間隔**及び打設順序の確認
 - ◆ 安定処理工に使用する**安定剤の品質及び添加量**の品質
 - ◆ 施工**深度(打ち止め深さ)・混合の均一性及び処理効果**の確認

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 盛土工に於ける施工管理

盛土工は道路構築に於ける工事の主体であり、その出来形・品質の良否が、道路全体の安定性を支配する。盛土工に於ける施工管理の留意点は下記のとおりである。

- 施工面(地表面)を乾燥状態にするための**準備排水**。
- 施工の途中段階に於ける、**盛土表面の排水**を促すための排水処理。施工面への横断勾配(1=4~5%)付加など。
- 盛土完成時の形状予測にもとづく、施工時盛土形状(**上げ越し・のり面勾配の修正など**)の設定。
- 基礎地盤の安定性を確保し、効率的・効果的に敷き均し・転圧を行うための、**土の撒き出し厚管理**。
- 盛土の品質(密度・剪断強度)確保のための、適切な作業工程の作成と**使用機械の選定、及び的確な動態観測**。
- 浸透水等による法尻崩壊を防止するための、軟弱地盤と接する法尻部盛土の補強。

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 動態観測

軟弱地盤上の施工で問題になるのは、盛土荷重による基礎地盤の沈下と安定の問題である。これらの問題に対処するため、通常は**動態観測を併用しながら施工**を行う。

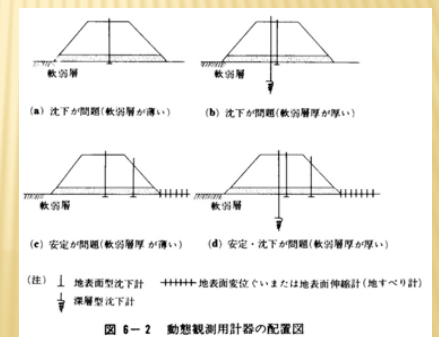
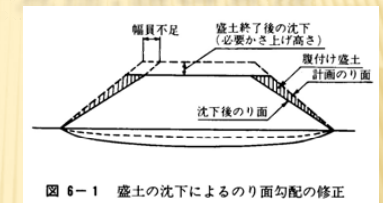
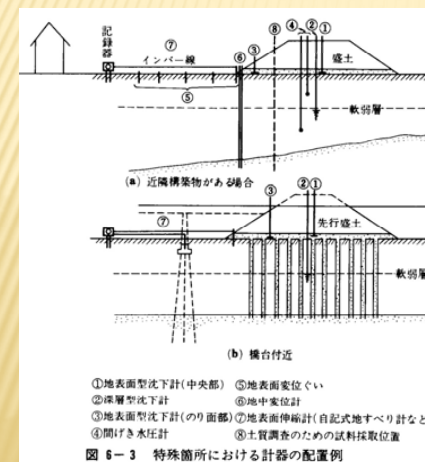
動態観測は、調査・設計時に**予測した現象(沈下・変位)が実際に起きているかどうか**、起きている場合**予測とのズレ**はどの程度か、**対策工の効果**が予測通り現れているか等を照合すると共に、**予期せぬ挙動が生じた時には迅速にその原因を究明し、適切に対処(情報化施工!)**するために実施する。

動態観測のために使用される主な機器は下記のとおりであり、通常は**赤字**のものがよく使われる。

- 沈下管理
 - ◆ 使用機器：**地表面型沈下計**・深層型沈下計・間隙水圧計
- 安定管理(変位管理)
 - ◆ 使用機器：**地表面型沈下計**・層別沈下計・**地表面変位杭**・**地表面伸縮計**(自記式地すべり計)・挿入型傾斜計・地中変位計・間隙水圧計

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 動態観測機器の配置



軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 沈下管理

軟弱地盤上に構築された構造物は、沈下が長期間継続したり、予想以上の不同沈下が生じて、道路としての機能に支障を生じることがある。そのため、これらの**沈下被害を最小限に食い止める**ため下記のような管理を行う。

- 軟弱地盤各層の沈下量を求め、**沈下の進行状況を調査**する。
- 理論計算により求めた沈下量の経時変化を、**沈下管理結果により補正し**、施工工程の修正を行う。(→**情報化施工**)
- 載荷重工法を採用した場合は、プレロードの量・放置期間及び除去の時期等を、**沈下管理により判断**すると共に、除去後に施工する構造物の施工時期を決定したり、施工後継続する**沈下量の推定**を行って、**上げ越し量の設定**を行う。
- 沈下管理結果から、杭基礎などで支持した構造物と、軟弱地盤の境界部に於ける不同沈下量を求めて、**ネガティブフリクション等の影響**について検討する。
- 沈下量の測定結果にもとづいて、最終的な盛土量を検討する。

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 施工後継続する沈下量の推定

改訂原案では、沈下管理結果から施工後の沈下量を推定する方法として、**双曲線法・log t 法及び浅岡の方法**を紹介している。

- **双曲線法**: 盛土の施工時など施工途中の短期間の推定に用いられる。
 - ◆ 双曲線法では、時間-沈下曲線について、沈下の平均速度が双曲線に沿って減少していくと仮定しており、下記の式により推定する。(軟弱地盤対策工指針・PP190~193)

$$St = S_0 + t / (\alpha + \beta \cdot t) \quad St: \text{時間}t\text{時の沈下量 (cm)} \quad S_0: \text{初期沈下量 (}t=0\text{) (cm)}$$

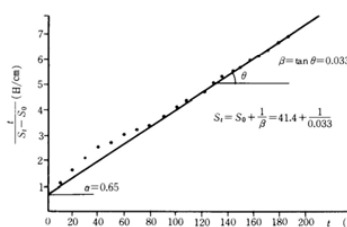
$$t: \text{起点日よりの経過時間 (day)} \quad \alpha, \beta: \text{実測値から得られる常数}$$
- **log t 法**: 盛土の供用時期判定など長期間の推定に用いられる。
 - ◆ 盛土開始後一定期間 (t_1 : day) の盛土の立ち上がり高さとして沈下の実測値から、log t に比例した沈下が始まる時期 (長期沈下岸時間 t_0 : day) を判定し、(t_1 : day) 以降の任意の時点での沈下量 (St) を、軟弱地盤対策工指針・P69の式 (参3-2: $S_s = \beta \cdot \log(t/t_0)$) から、下記の式により推定する。(軟弱地盤対策工指針・PP193~194)

$$St = \alpha + \beta \cdot \log(t/t_0) \quad \beta = dS/d\log t' \quad \log t' = \log t - \log t_0$$
- **浅岡の方法**: 荷重が一定の時の沈下量を下記の差分式で表す。

$$S_j = \beta_0 + \beta_1 \times S_{j-1} \quad S_j: \text{時間}t\text{を離散化して}t_{j-1} = \Delta t \times (j=0, 1, 2, \dots) \text{とした時の時の時間}t_j\text{における沈下量} \quad \beta_0, \beta_1: \text{係数}$$

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

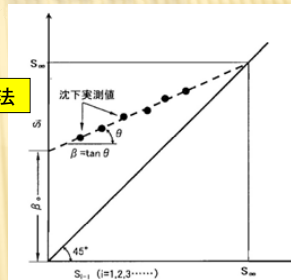
● 施工後継続する沈下量の推定



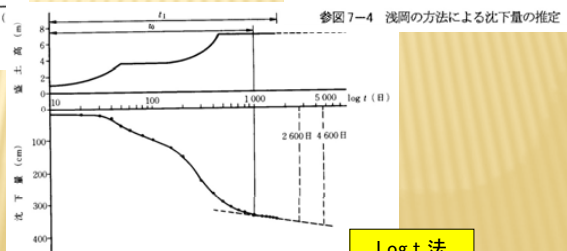
参图 6-2 双曲線法による沈下量の推定

双曲線法

浅岡の方法



参图 7-4 浅岡の方法による沈下量の推定



参图 6-3 log t 法による沈下量の推定

Log t 法

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 安定管理: 情報化施工のための技術管理

基礎地盤の変形が著しくなると、変形の範囲が徐々に拡大し、地盤の強さが低下する。動態観測結果を速やかに整理し、常に軟弱地盤の挙動を把握しながら施工する体制 (**安定管理体制**) を確立しておく必要がある。

- 安定管理の主な項目は下記のとおりである。
 - ◆ 計画どおりの速度で盛土が施工されているかどうかの管理。
 - ◆ 基礎地盤や盛土などの変形量や、その**経時変化の継続的観測**と、結果の解析。
 - ◆ 必要に応じ、軟弱地盤から採取した試料による土質試験や、現位置試験による**各軟弱層の性状 (現在の状況・当初からの変化) の把握**。
- 軟弱地盤の挙動が安定か不安定かの判断は難しいが、一般的に、不安定状態の定性的な傾向としては、下記のようなものがあるとされている。
 - ① 盛土の天端面や法面にヘアークラックが発生する。
 - ② 盛土中央部の沈下が急激に増加する。
 - ③ 盛土法尻付近の地盤の水平変位が、盛土の外側方向に急増する。
 - ④ 盛土法尻付近の地盤の鉛直変位が情報に急増する。
 - ⑤ 盛土作業を中止しても、上記③・④の傾向が継続し、地盤内の間隙水圧が上昇する。

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 定量的な手法による安定管理方法

改訂原案・pp.367～372には、動態観測もとづいて盛土の安定管理を定量的に行う方法が紹介されている。

➢ 松尾・川村の方法：(沈下量S)と(水平変位量δ)／(沈下量S)の関係(S～δ/S管理図)を用いる方法

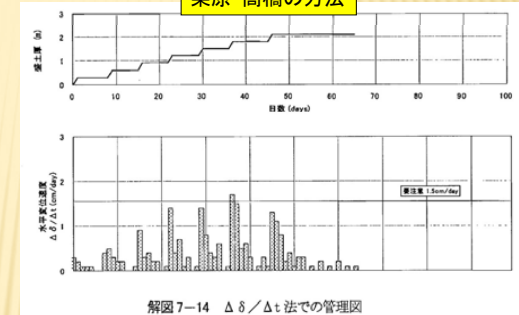
- ◆ 盛土施工の全期間に亘って地盤の挙動を把握するのに有効な方法である。
- ◆ S～δ/S管理図を用いた場合の管理基準は以下の通りである。
 - ① δ/S 0.6
 - ② Pj/Pf 0.8でα3 1(解図7-13)
 - ③ δ/S 0.1でPj/Pf 0.95

➢ 栗原・高橋の方法：(水平変位量δ)の時間変位に注目する方法

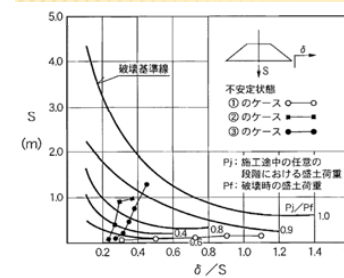
- ◆ 盛土載荷直後の(水平変位速度 $\Delta\delta/\Delta t$ (cm/day))がある一定の値を超えると、盛土が不安定または破壊につながる。(解図7-14)
- ◆ 管理基準値としては $\Delta\delta/\Delta t$ 2.0cmを用いる場合が多いが、1.5cm $\Delta\delta/\Delta t$ 2.0cmの範囲を要注意ゾーンとして、盛土の施工速度を落とすなどの対応を行う場合もある。

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

栗原・高橋の方法

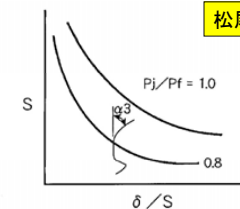


解図7-14 $\Delta\delta/\Delta t$ 法での管理図



解図7-12 S～δ/S管理図

松尾・川村の方法



解図7-13 S～δ/S管理図におけるα3

解表7-3 Pj/Pfのコンター式

(Pj/Pf)	a	b	c	range of (δ/S)
1.0	5.93	1.28	-3.41	0 < δ/S ≤ 1.4
0.9	2.80	0.40	-2.49	0 < δ/S ≤ 1.2
0.8	2.94	4.52	-6.37	0 < δ/S ≤ 0.8
0.7	2.66	9.63	-9.97	0 < δ/S ≤ 0.6
0.6	0.98	5.93	-7.37	0 < δ/S ≤ 0.6

$$S = a \exp \{ b (\delta/S)^2 + c (\delta/S) \}$$

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

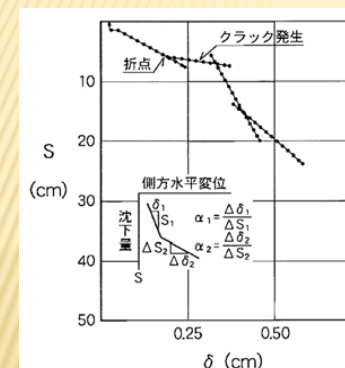
➢ 富永・橋本の方法：(沈下量S)と(水平変位量δ)を用いる方法

- ◆ (盛土中央部の沈下量S)と(盛土法尻部の水平変位量δ)の関係を用いて、S～δの関係を求める管理方法。
- ◆ 圧密変形と剪断変形のバランスが容易に分かり、破壊の聴講を比較的早い時期に読み取れる特性を持っている。(管理例：解図7-15)
- ◆ 上載荷重が小さく比較的地盤が安定な時期のS～δ関係の勾配α1と比較して、盛土の進行とともに地盤の不安定化が進むと勾配の傾きがα2に変化する。この時のα1に対するα2の変化量を指標として管理する。管理基準値は下記のとおりである。
 - ① α2 0.7
 - ② α2 α1+0.5

➢ 柴田・関口の方法：(盛土荷重q)と(水平変位量δ)の(増分比 $\Delta q/\Delta\delta$)と、(盛土高h)との関係を用いる方法

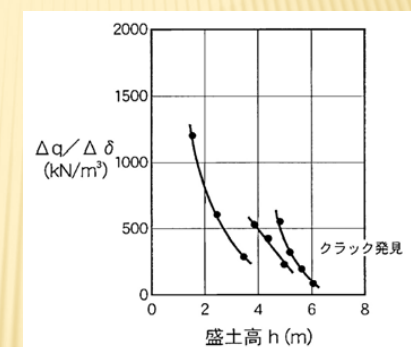
- ◆ (盛土荷重qの増分 Δq)と(水平変位量δの増分 $\Delta\delta$)の比 $\Delta q/\Delta\delta$ がゼロに近づくと地盤に破壊に近づくことを利用して、限界盛土高を予測する方法。
- ◆ qの代わりに盛土高hを取り $\Delta q/\Delta\delta \sim h$ をプロットした管理図は、ある程度の高さまで盛土を施工した時点で、それまでのデータを用いて、その地盤に於ける限界臨海高を推定するのに有利な方法である。(図解7-16)
- ◆ $\Delta q/\Delta\delta$ 100～150kN/m³で不安定状態が発生することが分かっている。

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理



解図7-15 S～δ管理図

富永・橋本の方法



解図7-16 $\Delta q/\Delta\delta \sim h$ 管理図

柴田・関口の方法

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 復旧対策

軟弱地盤の道路土工で復旧対策の必要性が高いのは**施工段階**。

➢ 基礎地盤が破壊する原因を大別すると下記のとおり。

- ◆ 土質調査が不十分。
- ◆ 資料などの解析或いは判読の誤り。
- ◆ 施工の不手際。

情報化施工の実施で予防・修復できる

➢ 復旧対策のために必要な調査

- ◆ 盛土や周辺地盤に生じたクラックや変位など、**破壊の状況と範囲の把握**。
- ◆ 破壊の状況と範囲の把握した後、**スベリ面の深さや土質定数**を求めるための調査。
- ◆ 盛土材の諸元・土質定数を、**設計条件と照合**するための調査。

➢ 復旧対策工

復旧対策は、基礎地盤や周辺施設の復旧と、盛土本体の復旧に分けられる。先ず応急復旧対策を行った後、本復旧のための対策を実施する。

- ◆ 安定管理により基礎地盤の破壊が疑われる場合は、上載荷重の軽減を図る。
- ◆ 最も一般的な復旧対策工としては、押え盛土工が用いられる。
- ◆ 軟弱層が深い場合、深層混合処理や矢板による側方流動防止工法が有効である。

軟弱地盤対策工の施工管理・維持管理

● 維持管理

➢ 軟弱地盤上の盛土では、**供用後の不同沈下**が問題となる。

- ◆ 一般に**沈下は長期に亘り継続**し、徐々に**不同沈下の量が大きくなる**。
- ◆ **杭基礎で支持された構造物と盛土との取付部に生じる段差**は供用上大きな問題となる。
- ◆ 調査・設計時に設定した**初期条件**や施工中の**動態観測データ**、**供用後の沈下量**の大きい箇所等について、資料を整理しておくのが有効である。

➢ 巡回点検・追跡調査

- ◆ 安定管理に於いて問題のあった箇所や軟弱層の厚い箇所では、完成供用後も計器による**追跡調査(動態観測)**を継続するのが望ましい。
- ◆ 安定管理で施工中問題が認められた箇所や、供用後の沈下・変位の大きい箇所(**低盛土箇所・橋梁など杭基礎で支持された構造物と盛土の取付部・横断構造物及び地下構造物の近く等**)に留意して点検する必要がある。

➢ 補修

- ◆ **路面の補修**→オーバーレイ・舗装の打ち換えなど
- ◆ 踏み掛け版などの下に生じた空洞の補修→空洞部へのグラウト充填など
- ◆ 盛土荷重による**周辺地盤の引き込み沈下**の補修→周辺地盤嵩上げ・地盤改良など
- ◆ 排水系等の補修→亀裂へのコーキングや打ち換えなど

(社)高知県測量設計業協会 平成22年度・設計技術研修会

⑥軟弱地盤対策工指針:軟弱地盤対策工の設計施工

The End

(Thank you for your kind attention !)

Thursday, October 22, 2010