

数値実験を用いた土工構造物の施工管理手法の評価と提案

環境防災研究室 学部4年 近 崇明

1. 研究背景と目的

建設工事では構造物の挙動が設計の想定通りにいくわけではない。危険側にでも安全側にでも設計者の想定外の挙動を見せることが多く、当初設計に大きな影響を及ぼすことも少なくない。これは設計と施工の間に介在する様々な不確実性によるものであり、そういった不確実性を考慮に入れて建設を進めていくためには、構造物の動態観測を行い、逐次変化する現場構造物に臨機応変に対応し、設計・施工法を変更していくような施工管理を行う必要がある。だが、橋梁のような構造物では施工途中での設計変更というのは困難であり、大幅に計画を変更しなくてはならないこともあり得る。一方、盛土などの土工構造物では施工途中の細かい設計の変更にも対応することができる。また、土工構造物のように地盤を相手にするものでは、地域によって異なる地盤の性質などの影響で、想定外の挙動を表しやすい。そのため、積極的にこのような施工管理手法を採用していくことが望まれる。

現在、盛土や切土などの土工構造物の現場の多くでは、安定計算によって求められた安全率をもとに設計が行われているが、安全率を満足している構造物であっても崩壊を起こすことは往々にしてある。計算機械の進歩や構成式研究の進展により、現在ではFEMを用いた変形解析を設計に採り入れている現場もあるが、変形解析に用いる地盤の初期応力状態などは計測することが難しいうえ、計算結果に及ぼす影響も大きい。変形解析による設計の信頼性が高いとは言えない。だが、正確な挙動が再現できずとも、変形解析を用いて、およそどのような挙動を示すのか、各構造物に特徴的な破壊の前兆現象が存在するのかなどのシミュレーションをすることは可能であると思われる。つまり、その結果から施工管理に用いるべき計測場所を知ることができるかもしれない、という事である。そこで、本研究では土工構造物に対して変形解析を行い、その結果をもとに動態観測による施工管理手法の提案を行うことを目的としている。本研究ではまず軟弱地盤上の盛土に注目した。それは、土工構造物の中でも軟弱地盤上の盛土に関しては既にいくつかの施工管理手法が提案されているためであり、本研究では変形解析を行い、各手法の評価を行ったうえで、新しい施工管理手法について検討を行うこととした。

2. 解析条件

本研究では解析プログラムに土・水連成有限要素解析コード「DBLEAVES」を用い、土の構成式には上負荷面の概念と下負荷面の概念に基づいて、土の構造、過圧密、異方性を考慮できる移動硬化型弾塑性構成式「Cyclic mobility model」を用いた。

図1に解析に用いた有限要素メッシュを示す。簡単のため盛土の左右対称性を仮定し、半分の

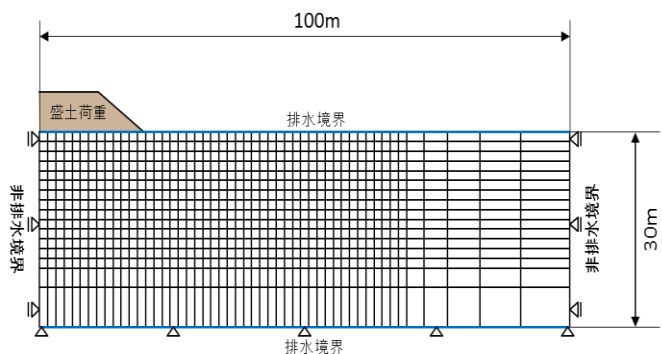


図1 有限要素メッシュ

表 1 地盤条件

| 破壊時の主応力比 $(\sigma_1/\sigma_3)_{cri}$ | 3.500 |
|--------------------------------------|----------------------|
| ポアソン比 ν | 0.333 |
| 密度 $\rho(t/m^3)$ | 1.553 |
| 静止土圧係数 K_0 | 1.0 |
| 基準状態($p=98kPa$)での間隙比 e_0 | 1.540 |
| 圧密指数 λ | 0.214 |
| 膨潤指数 κ | 0.0129 |
| 透水係数 $k(cm/sec)$ | 2.0×10^{-9} |
| 過圧密比 | 1.0 |
| 正規圧密土化指数 m | 50 |
| 構造低位化指数 a | 0.001 |
| 回転硬化指数 br | 0.1 |
| 初期構造比 R_0 | 0.1 |
| 初期異方性 ζ_0 | 0.0 |

断面を計算領域とした。また、上下両面を排水境界とし、地下水面は地表面に設定した。層厚 30m の均一軟弱地盤を仮定し、与えたパラメータを表 1 に示した。このパラメータは新潟県柏崎市の粘土を計測して得られたデータである。

図 2 に盛土荷重条件を示す。高速道路盛土を想定し盛土天端幅（車線数）、盛土高、のり面勾配を設定し、盛土地盤の密度は $2.0t/m^3$ とした。設定した台形荷重を等価節点荷重として载荷していくが、盛土の盛り立て速度の違いによる地盤挙動の変化を見るため、盛り立て速度に $5cm/day$ (緩速施工)、 $20cm/day$ (急速施工)の 2 パターンを設定した。

3. 施工管理手法の評価

松尾・川村方式

概要：縦軸に盛土中央部沈下量 d 、横軸にのり部側方変位量 δ と d の比をとった管理図である。松尾・川村は多くの盛土破壊例を調べることで、盛土の形状や地盤条件が異なるにも関わらず、破壊した盛土の $d \sim \delta/d$ 関係は一つの曲線上に集まることを発見した。これをもとに、破壊規準線から遠ざかるか近づくかで盛土の安定不安定を判断するという施工管理手法である。図 3 に管理図のイメージを示した。図 3 のように危険度のコンター曲線を描き、次の 3 つの状態で不安定状態とみなされる。① $\delta/d \geq 0.6$, ② 80% 線を超えており、軌跡が急に右へ動いた場合, ③ $\delta/d \geq 0.1$ で 90% 線を超える。

まず盛り立て速度での比較をおこなった。図 4 に解析結果を管理図に整理したグラフを示す。解析は载荷後の圧密期間も含め半年間の挙動を計算している。盛土幅は 2 車線 (12m)、盛土高は 3m である。急速施工では非排水せん断挙動が卓越するため、 δ が大きくなり、緩速施工と比べグラフが大きく右 (不安定側) に傾いており、急速施工が危険であることが適切に評価できている。

次に盛土幅の異なるケースを比較した。図 5 に結果を示す。盛土高は 5m で緩速施工とした。管理図の適用範囲外になってしまっているが、これは用いた柏崎粘土の透水係数が大きいと考えられる。これを見ると、盛土幅が狭いものほどグラフが左に立ち上がっている。また、4 車線と 6 車線のグラフにおける载荷終了点を比較すると、6 車線ではグラフの屈曲点となっているが、4 車線ではグラフが曲がった後に载荷が終了することになっている。図 6 に示したグラフは盛土中央部沈下量 d の経時変化で

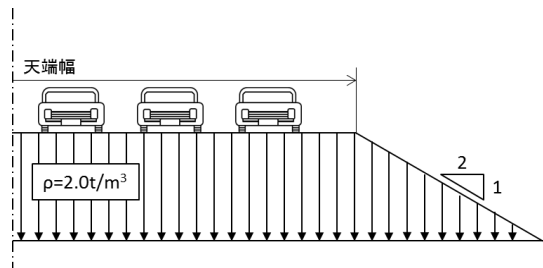


図 2 盛土荷重条件

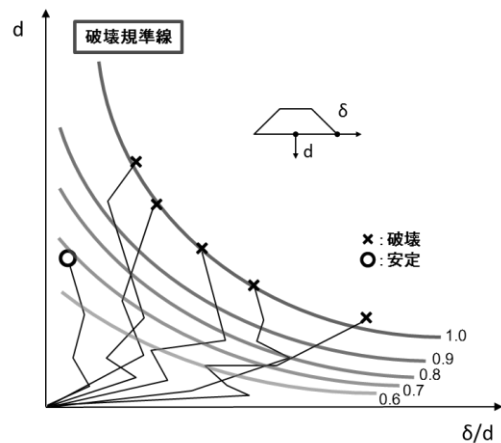


図 3 松尾・川村方式施工管理図イメージ

あるが、これを見ると、4車線では載荷終了前に d が急増していることがわかる。この d の急増が管理図において盛土幅の狭いものほど左に立ち上がり、グラフが屈折後に載荷が終了するという変化の原因となっていた。

この施工管理図において、**図5** の変化のように載荷途中でグラフが左に動き出すというのは不自然である。また、盛土幅が変わっても**図7** に示すように盛土端部での破壊形態は同様であるため、危険度も同様に評価されなければならない。だが、**図7** に示すように盛土幅が狭くなると、端部での円弧すべり面が中央部にまでおよび、中央部沈下量 d が大きくなってしまうため、松尾・川村方式の施工管理図では**図5** のように盛土幅が異なると評価が大きく変わることになる。

4. 施工管理手法の提案

松尾・川村方式の施工管理図では盛土中央部とのり尻部という離れた2地点の観測値を用いていたため、盛土幅の違いに対応できていないと考えられた。そのため、盛土中央部沈下量 d ではなく、のり肩部沈下量 d' を用いた管理図を提案する。**図7** に d' の位置が示されている。 d を用いた方法では盛土端部でのすべり破壊が中央部にまで及ぶ場合と及ばない場合で変化率が変わってしまっていたが、のり肩部は盛土幅が変わってもすべり面内にあり、また、円弧の中心はのり面中点を通る鉛直線上付近に存在するため、沈下を起こすことも明白であるため、盛土幅が変わっても d' の変化率は変わらないものと思われる。また、松尾・川村方式の施工管理図は破壊規準線が反比例の関係を表す形をしており、おそらく δ の値が破壊規準となっていると考えられるため、 d' を用いても松尾・川村方式での破壊規準線が適用できるものと思われる。解析を行いその効果を確認した。**表2** に解析ケースの条件を示す。Case1~3 で施工速度比較を、Case1,4,5,6 で盛土幅比較を行ったものを**図8**、**図9** に示す。Case3 は盛土高 3m で途中圧密を行い、その後 5m まで盛り立てている。

図8 を見てみると、松尾・川村方式の場合と同じような変化をしており、盛り立て速度が速いほど不安定側に動いている。Case3 の途中圧密期間では、非排水せん断変形による側方変位 δ が変化せず、

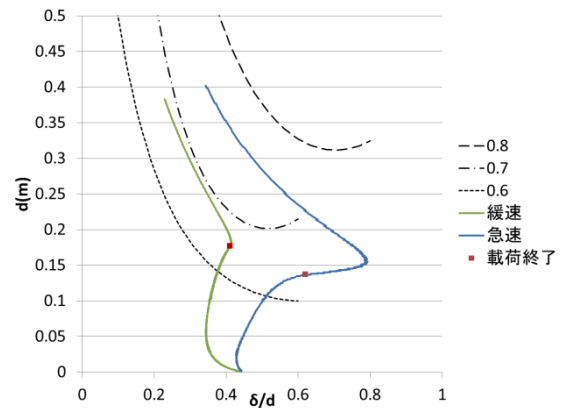


図4 盛り立て速度比較 (松尾・川村方式)

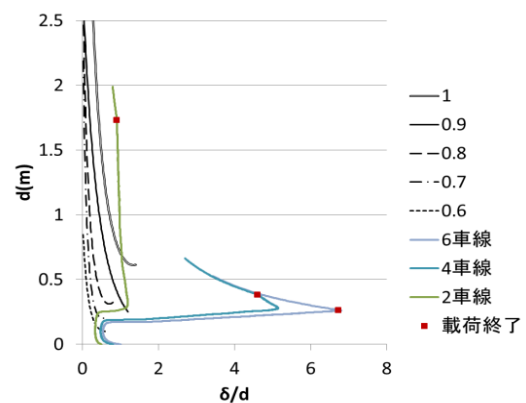


図5 盛土幅比較 (松尾・川村方式)

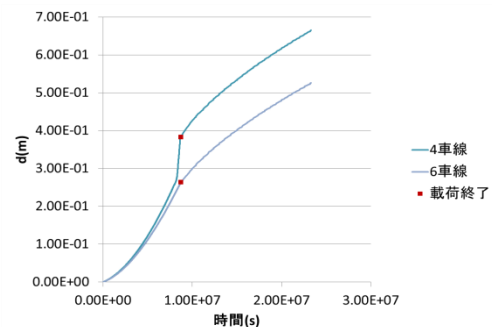


図6 中央部沈下量経時変化

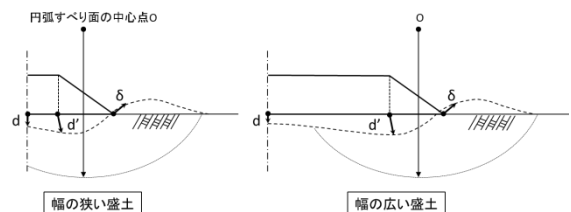


図7 盛土端部での円弧すべり破壊

圧密のみがすすみ、 d' が増加することで丁度危険度 60%のコンター曲線上を動いている。これらのことから、中央沈下量 d の代わりにのり肩部沈下量 d' を用いた修正松尾・川村方式においても松尾・川村方式と同じ破壊規準を用いて盛土の安定・不安定を評価することができると考えられる。図9を見てみると、盛土幅の狭いケースも広いケースも同様な変化をしており、既往の方法の問題点として挙げられた载荷途中での安定側への変化は見られず、どのケースも载荷終了後に安定側へ動いている。このことから、修正松尾・川村方式では松尾・川村方式では適切に評価できなかった盛土幅の狭いケースについても適切に評価できているものと考えられる。また、盛土幅が広いケースほど右側の位置にあるのは、盛土幅が広いほど側方に流動する盛土下の土量が多いため、側方変位量 δ が大きくなるものと考えられる。

5. 結論および課題

軟弱地盤上の盛土の施工管理手法である松尾・川村方式について数値実験を用いて評価を行い、盛土中央部沈下量 d を管理に用いることで盛土幅の異なる盛土の評価が適切にできていない問題点を指摘した。また、それに代わる計測値としてのり肩部沈下量 d' を用いることを提案した。提案した手法は指摘した問題点が改善できており、また、松尾・川村方式の破壊規準線をそのまま適用することができる可能性を示した。

本研究では盛土工を対象に観測的施工法の検討を実施したが、幅広い地盤条件について検討する必要がある。合理的な地盤定数の設定が難しく、十分な検討ができなかった。また、载荷問題だけでなく、除荷問題（斜面の切土）について同様の検討が必要である。今後の課題としたい。

表 2 解析ケース

| Case | 車線数 | 盛土高 | 層厚 | 施工速度 | 途中圧密 |
|-------|-----|-----|-----|----------|------|
| Case1 | 2 | 5m | 30m | 5cm/day | |
| Case2 | 2 | 5m | 30m | 20cm/day | |
| Case3 | 2 | 5m | 30m | 5cm/day | あり |
| Case4 | 1 | 5m | 30m | 5cm/day | |
| Case5 | 4 | 5m | 30m | 5cm/day | |
| Case6 | 6 | 5m | 30m | 5cm/day | |

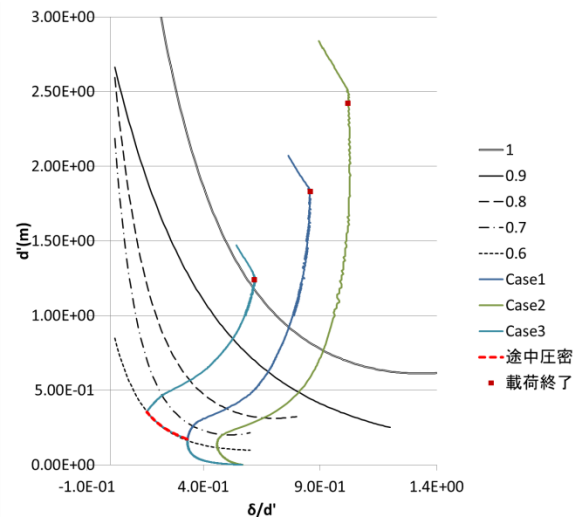


図 8 载荷速度比較

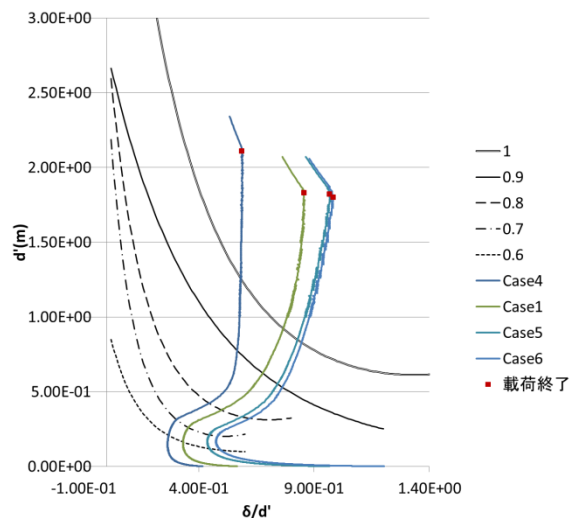


図 9 盛土幅比較