

技術報 鉄道橋近接部における 3 次元 FEM 解析による盛土影響検討

水工・砂防東日本事業部 地盤解析部 ○下村 実柚 / 荒井 秀和



3次元モデルを用いた FEM 解析は、従来の 2 次元 FEM 解析において課題とされていた 3 次元力的な力の分布や挙動の再現が可能となり、設計精度の向上が期待されている。特に、複雑な盛土計画や既設構造物との干渉が懸念される箇所では、3 次元を用いた精度の高い解析が求められる。本稿では、A 川の河川堤防の最適な施工方法を検討するにあたり、鉄道橋への影響評価を目的として行った 3 次元解析の活用事例を報告する。

キーワード：3 次元 FEM 解析、近接施工、盛土影響検討、施工手順検討

1. はじめに

3 次元 FEM 解析は、従来の 2 次元 FEM 解析において課題とされていた 3 次元力的な力の分布や挙動の再現が可能となり、設計精度の向上が期待されている。

本業務は、河川堤防の盛土工事と、現在線の新設線へ切り替える鉄道施設の更新工事が同時期に並行して進められる共同事業である (図-1)。このような同時施工の状況下では、盛土工事が新設線に与える影響を適切に評価し、鉄道工事を含め最適な施工計画を提案する必要がある。そこで本検討では、3 次元 FEM 解析を用いて、盛土施工による地盤変位の予測を実施し、最適対策工法および盛土施工手順の検討を行った。

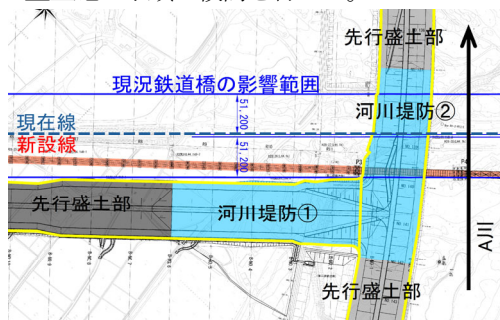


図-1 河川堤防と対象構造物の位置関係

2. 存在した課題

2-1. 土質定数の精度向上

本検討では、新設線整備にともない事前に事業者と鉄道管理者にて協議・合意した許容変位量が設定されており、構造物や地盤の挙動に対する精密な予測が求められた。特に、河川堤防盛土による複雑な荷重条件となることから、解析結果の妥当性を評価するためには、精度の高い土質定数の設定が課題であった (図-2)。

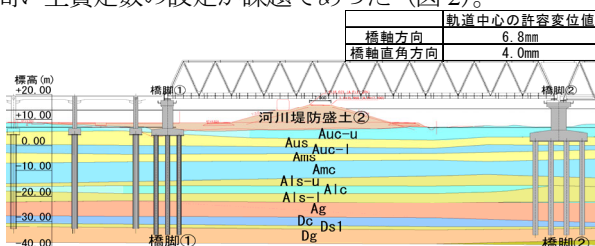


図-2 当該地の地層想定断面図

2-2. 合理的な施工手順の検討

おおまかな施工手順は基本設計で検討されていたが (図-3)、各ステップの細部手順までは未調整な状況であった。このため、最適な対策仕様の設定や合理的な盛土施工手順が必要となり、これを行うには、各施工段階の変位を定量的に把握することが課題であった。

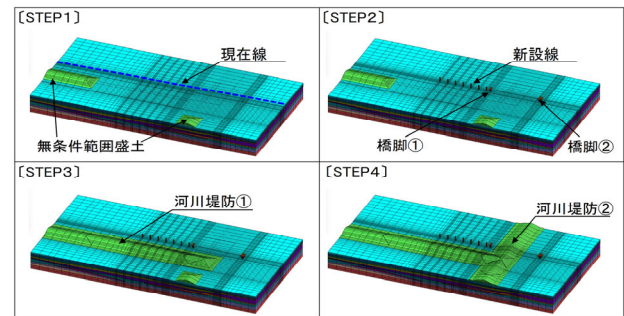


図-3 基本設計の施工手順

3. 解決する技術

3-1. 圧密沈下計算と FEM 解析のフィッティング

FEM 解析は多くの入力定数が必要となるため、解析結果の妥当性の評価が難しい。このため、これまで多くの実績があるテルツァギーの圧密理論に基づく圧密沈下計算結果との比較を行い、FEM 解析に用いる土質定数の見直し、精度向上を図った。

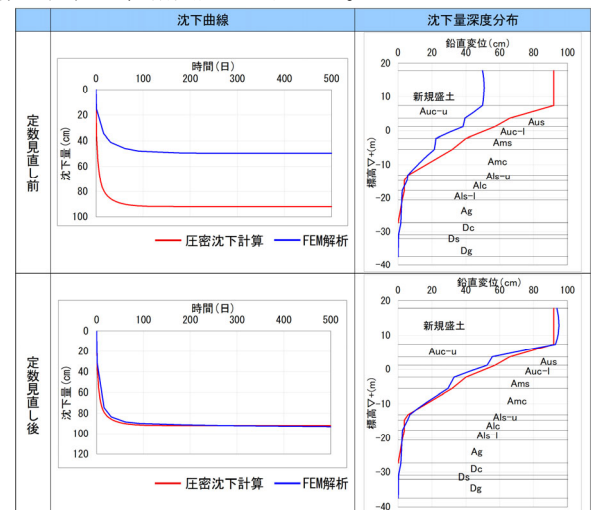


図-4 圧密沈下計算結果と FEM 解析結果の比較

結果の比較より、①粘性土の過圧密の程度、②上部の砂層の変形係数、③粘性土層の透水係数を見直すことで、図-4 に示すとおり圧密沈下計算と FEM 解析で沈下量が概ね整合する結果となるため、この定数を用いて解析を実施した。

3-2.盛土施工手順を反映した 3 次元 FEM 解析

課題 2-2 へ対応するため、2 ケースの盛土施工手順による 3 次元 FEM 解析を実施し、各施工段階の変位を算定した。Case1 は、基本設計の施工手順に従い、現在線の無条件範囲に盛土後、新設鉄道橋の建設を行い、最後に残りの河川堤防を盛土する手順とした。Case2 は、河川堤防①をプレロードとして先行して盛土し、その後新設鉄道橋の建設を行い、最後に河川堤防②を盛土する手順とした。表-1 に各ケースの新設鉄道橋の杭頭位置に着目した変形量を、図-5 に Case2 の変位図を示す。

表-1 杭頭の変位量

| | Case1: 鉄道橋先行施工案 | | | | | | Case2: 河川堤防①プレロード案 | | | | | |
|-----|-----------------|----|-------|------|--------|-----|--------------------|----|------------|-----|-----|-----|
| | 日数 | 方向 | 無対策 | | 全面地盤改良 | | 日数 | 方向 | プレロード+地盤改良 | | 橋脚① | 橋脚② |
| | | | 橋脚① | 橋脚② | 橋脚① | 橋脚② | | | 橋脚① | 橋脚② | | |
| ①初期 | - | X | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | - | X | 0.0 | 0.0 | | |
| | | Y | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | Y | 0.0 | 0.0 | | |
| ②盛土 | 新設線 | | | | | | 河川堤防① | | | | | |
| | 新設線、地盤改良 | | | | | | 180日 | | | | | |
| | 河川堤防① | X | -42.9 | 23.3 | 0.7 | 5.2 | | X | 2.6 | 7.6 | | |
| | 河川堤防② | Y | 46.1 | 1.4 | 0.2 | 1.1 | | Y | 36.6 | 3.9 | | |
| ③放置 | 新設線、地盤改良 | | | | | | 河川堤防② | | | | | |
| | 180日 | | | | | | 180日 | | | | | |
| | 盛土後 | X | -42.2 | 20.5 | 1.1 | 4.5 | | X | 0.3 | 8.5 | | |
| | 1095日 | Y | 44.7 | 1.3 | -0.1 | 1.0 | | Y | 32.7 | 2.6 | | |
| | 盛土後 | | | | | | 盛土後 | | | | | |
| | 1095日 | | | | | | 1095日 | | | | | |
| | | X | -42.2 | 20.5 | 1.1 | 4.5 | | X | 1.0 | 7.8 | | |
| | | Y | 44.7 | 1.3 | -0.1 | 1.0 | | Y | 32.5 | 2.4 | | |

上段X: 橋軸方向変位 (+が河川側の変位)
下段Y: 橋軸直角方向変位 (+が下流側への変位)

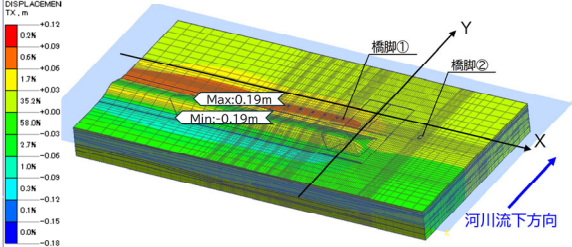


図-5 Case2 河川堤防①盛土後の変位図(橋軸直角方向の Y 変位)

基本的に河川堤防①盛土は橋脚を下流側 (+Y) へ変位させ、河川堤防②盛土は橋軸方向への変位で、橋脚①、橋脚②それぞれを堤内側 (-X)、河川側 (+X) に変位させる挙動となる。橋脚①の下流側への変位に着目すると、Case2 の河川堤防①のみによる変位(地盤改良有)よりも、Case1 の河川堤防①、②を盛土した変位(無対策)の方が大きい。これは河川堤防②盛土が橋軸方向のみでなく、橋軸直角方向の変位にも影響していることを示しており、2 次元解析では予測できない複雑な挙動が 3 次元解析で再現されたものと考えられる。

なお、Case1 において無対策と比較すると、地盤改良による変位低減効果はあるが、全面地盤改良を実施した場合でも最大で約 5mm の変位が発生する。また、盛土後の放置期間後の変位が同程度であることから、長期の

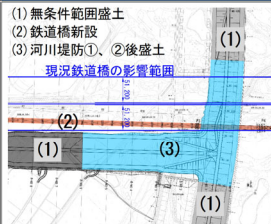
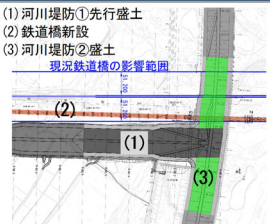
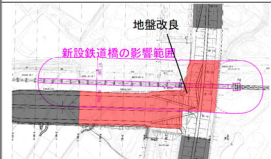
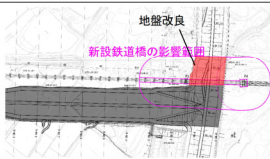
圧密沈下は発生しないと考えられる。これは、粘性土層中に砂層が多く介在することから、排水効果が大きいことが要因となる。

3-3.合理的な施工手順の決定

施工手順は、許容変位量に収めると同時にコスト低減にも留意して最適案を決定した。3 次元 FEM 解析結果より、許容値を満足する Case1 の全面地盤改良案と、Case2 の河川堤防①プレロード案を比較検討した結果、Case2 は河川堤防①プレロードにより橋脚施工後の盛土および地盤改良範囲の縮小が可能となり、コスト低減につながった(表-2)。

当該地では、新設鉄道橋建設前に出来るだけ可能な範囲の盛土を行い、建設後に発生する変位を抑制することが近接施工対策として効果的である。また、長期の圧密沈下が生じないことから、先行して盛土を行うことの効果が大きい。以上より、Case2 河川堤防①プレロード案を当該地におけるコスト低減に優れる合理的な施工手順として採用した。

表-2 施工手順の比較検討

| | Case1 鉄道橋先行施工方案 | Case2 河川堤防①プレロード案 |
|------------------|---|---|
| 模式図 | <div><p>(1) 無条件範囲盛土 (2) 鉄道橋新設 (3) 河川堤防①、②後盛土</p><p>現況鉄道橋の影響範囲</p></div> | <div><p>(1) 河川堤防①先行盛土 (2) 鉄道橋新設 (3) 河川堤防②盛土</p><p>現況鉄道橋の影響範囲</p></div> |
| 概要 | 新設鉄道橋建設後に河川堤防①、②盛土施工 | 新設鉄道橋建設後、河川堤防②盛土施工 |
| 地盤改良範囲 | <div><p>地盤改良</p><p>新設鉄道橋の影響範囲</p></div> | <div><p>地盤改良</p><p>新設鉄道橋の影響範囲</p></div> |
| 新設 鉄道橋 の変位 | <div>橋脚① 橋軸(X) 1.07 mm<6.8 mm:OK 橋軸直角(Y) -1.29 mm<4.0 mm:OK 橋脚② 橋軸(X) 2.53 mm<6.8 mm:OK 橋軸直角(Y) -0.32 mm<4.0 mm:OK</div> | <div>橋脚① 橋軸(X) -1.20 mm<6.8 mm:OK 橋軸直角(Y) -0.93 mm<4.0 mm:OK 橋脚② 橋軸(X) 2.24 mm<6.8 mm:OK 橋軸直角(Y) 0.02 mm<4.0 mm:OK</div> |
| 概算工 費(直工) | 大 | 小 |
| 評価 | × | ○ |

※許容変位量は杭頭でなく軌道中心の規定値である。

4. 今後の展望

本業務では、複雑な盛土状況となる鉄道橋近接部という条件下において、3 次元 FEM 解析を適用したことにより、従来の 2 次元解析では困難であった力の合成や変位方向の 3 次元的な挙動を把握し、構造物への影響を正確に評価することができた。特に、施工の各段階での変位を定量的に把握できたことで、より合理的な施工計画の立案に大きく寄与することができた。

一方で、3 次元解析の計算負荷が高いため、実務への幅広い適用にはモデリングの簡略化の手法や計算のさらなる効率化が課題であると考えられる。