

3次元弾性有限要素法を用いた低改良率深層混合処理の改良体配置に関する基礎的研究

Numerical evaluation of the effect of column arrangement of deep mixing method with low improvement ratio by three-dimensional FEM

井上 靖武 Yasutake INOUE (福岡北九州高速道路公社)
 森 将彦 Masahiko MORI (国土交通省九州地方整備局福岡国道事務所)
 三木 博史 Hiroshi MIKI (独立行政法人土木研究所)
 落合 英俊 Hidetoshi OCHIAI (九州大学大学院工学研究科)

軟弱で鋭敏な粘性土地盤に、高盛土で道路を築造する。安定性の確保と建設コストの低減を目的として、実大試験盛土が計画された。各種対策工法の中で、浅層混合処理工法と低改良の非着底型深層混合処理工法(DMM)を組み合わせた対策工法について、DMMの改良体配置が変形抑制に与える効果を、3次元弾性有限要素法を用いて検討を行った。その結果、地盤の水平変形抑制に対する浅層混合処理工法固化盤厚さの影響が認められ、また、改良体配置をより合理的に設定することにより、地盤変形はさらに抑制できることがわかった。

キーワード：有限要素法、軟弱地盤、盛土、深層混合処理、変形 (IGC:E02, E13)

1. はじめに

軟弱で鋭敏な粘性土地盤に、高盛土で道路を築造する。安定問題および周辺地盤の変形問題から、地盤改良等の対策工法の適用が不可避となるが、対策工法の選定では、建設コストの低減が重要となる。

現在、軟弱地盤対策として、深層混合処理工法(DMM)が広く利用されているが、DMMは40%以上の比較的高い改良率で用いられ、また、比較的硬質な地盤まで着底して打設されることが多い。しかし、近年ではコストの低減を目的として、DMM改良率を大幅に抑えた工法の適用が三木¹⁾により検討されている。

低改良率 DMM では改良体間隔が大きくなるため、様々な改良体配置が考えられるが、配置による地盤の変形抑制に対する定量的な評価が必要となる。また、低改良率 DMM を硬質な地盤に着底させた場合には、過大な応力集中が改良体に生じる可能性もあるため、この応力集中を避けるため改良体を先端支持としない非着底型 DMM の適用が検討されている²⁾。しかし、非着底型とした場合の低減効果については、現状では明らかにされていない。

今回計画された実大試験盛土に適用するため、各種対策工法の中で、浅層混合処理工法と低改良の非着底型深層混合処理工法(DMM)を組み合わせた対策工法を取り上げ、DMMの改良体配置が変形抑制に与える効果を、3次元弾性有限要素法を用いて検討を行った。

2. 解析モデル

全体的な地盤構成は以下のようなものである。地表面より深度約10mまで、N値が0~1の非常に軟弱で鋭敏な粘性土層で構成され、その下にN値10以上の比較的硬質な地盤が堆積している。道路盛土の計画高さは8mと高い。

鋭敏な軟弱地盤上への盛土となるため、安定問題とともに周辺地盤の変形問題が懸念された。変形抑制型の対策工法としては通常のDMM工法を中心とした工法について、また変形がある程度許容されるケースではグラベルコンパクションパイル工法等、種々の対策工法について試験盛土への適用性を検討した。

この内、浅層混合処理工法と低改良率 DMM とを組み合わせた対策工法については、現状では設計方法が確立しておらず、また、改良体配置による変形抑制効果も明らかにされていない。そこで、3次元の弾性有限要素法を用いた検討を行った。解析モデルに線形弾性体を用いているため、地盤の破壊や圧密までは考慮していない。

試験盛土および対策工法の検討断面を図-1に示す。浅層混合処理工法と低改良率 DMM による改良範囲は、層厚10mの軟弱層のうち深度8mまでの非着底型とした。

3次元の改良体配置による、地盤の変形抑制効果を検討するため、3次元の弾性有限要素法を適用した。地盤および改良体は8節点の立体要素でモデル化した。

改良体モデルは、水平断面の面積が等価となるよう、改良体断面を図-2に示すように円形から正方形に単純化した。

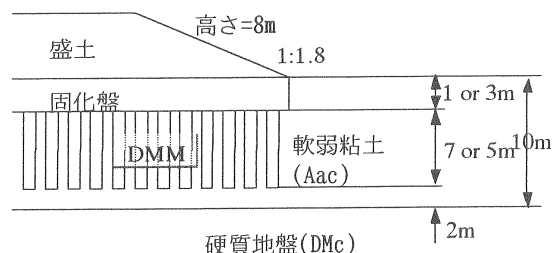


図-1 対策工法の検討断面

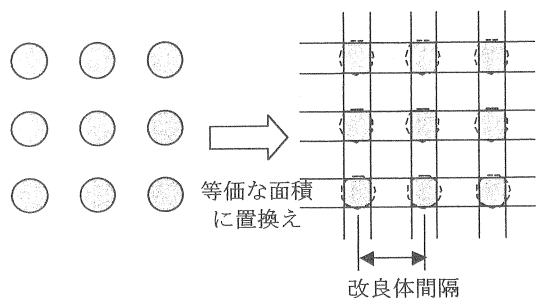


図-2 改良体のモデル化

実大試験盛土は対称形であるため、解析は図-3に示す1/4モデルとした。境界条件の影響を排除するため十分な解析領域を確保し、境界条件について底面は固定、解析モデル隅部は鉛直方向のみ自由、さらには解析領域表面上の節点はモデル表面の法線方向のみ固定とした。

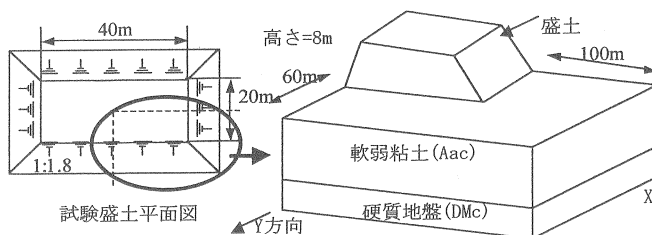


図-3 1/4解析モデル

表-1に示す6ケースの配置について検討を行った。このうち、当該地盤では無対策で高さ8mの盛土を行うことは不可能であるが、変形検討の参考パターンとして対策工無しをCASE0と設定した。

地盤の変形抑制効果に対する浅層混合処理固化盤厚さの影響を検討するため、CASE1とCASE2を設定した。改良体配置はともに正方配置とし、CASE1のDMM改良率は、安定解析における安全率がCASE2と同等となるように定めた。

CASE3からCASE6は、改良体配置の影響を検討するため、改良体配置を矩形とした。また、法面下の地盤では盛土荷重が小さくなるため、この部分のDMMの改良率は低く抑えることが可能と判断し、法先付近の改良率を低めに設定した。CASE3からCASE6の改良体配置を図-4に示す。改良体配置以外の条件、固化盤厚さおよびDMM全体としての平均改良率は、全てCASE2と等しい。

解析に用いた入力パラメータを表2に示す。今回の検討では盛土安定の観点から、井上ら³⁾と比較し改良体の設計一軸強度を、約1.8倍の700kN/m²に増加させた。改良地盤の変形係数は、経験式E=100q_uにより決定した。各解析モデルの総要素数および総節点数を表-3に示し、CASE1の3次元の有限要素分割図を図-5に示す。

表-1 解析条件

解析ケース	固化盤厚 (m)	DMM 平均改良率 (%)	改良体間隔(m)		
			A	B1	B2
0	0	0	—	—	—
1	1	22	1.9	1.9	1.9
2	3	9	3.1	3.1	3.1
3	3	9	3.5	3.5	2.3
4	3	9	5.0	1.8	1.6
5	3	9	7.0	1.7	1.1
6	3	9	2.8	8.5	2.3

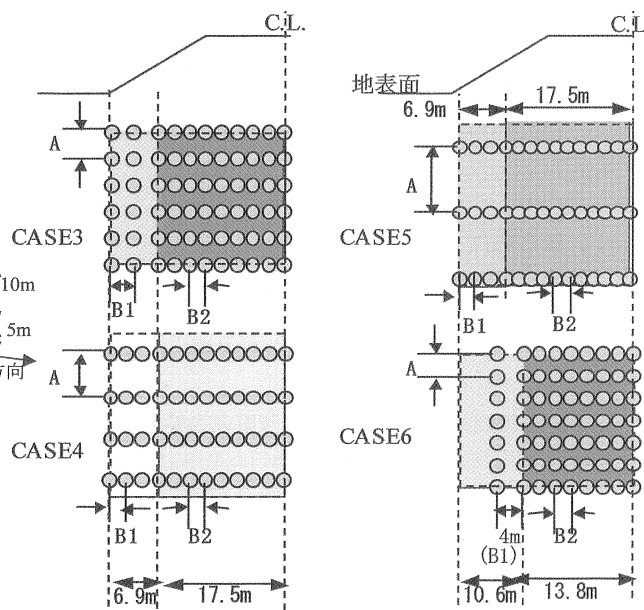


図-4 CASE3~6の改良体配置

表-2 地盤定数

地盤種類	層厚 (m)	単体重量 ρ_t (g/cm ³)	変形係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν	設計 q_u (kN/m ²)
盛土	8	1.9	3500	0.33	—
軟弱粘土 (Aac)	10	1.6	1000	0.40	—
硬質地盤 (DMs)	5	2.0	7000	0.33	—
固化盤	1 or 3	1.5	30000 ¹⁾	0.25	300
DMM	7 or 5	1.5	70000 ¹⁾	0.25	700

1) 改良土の E は、E=100q_u により算定

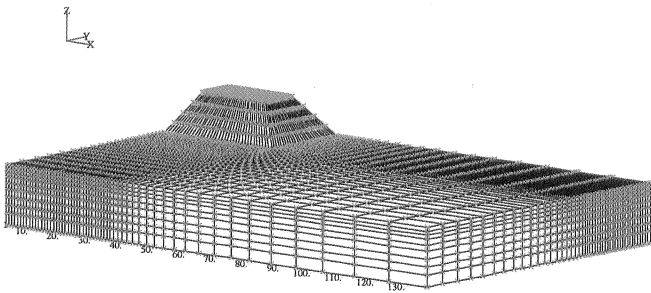


図-5 有限要素分割図(CASE1)

表-3 解析モデルの総節点数と総要素数

CASE	総要素数	総節点数
0	27032	30894
1	27032	30894
2	24648	28250
3	27108	31000
4	28950	33024
5	35300	40064
6	25942	29704

解析は、以下のように行った。

- 1) 原地盤は水平地盤として自重解析を行う。
- 2) 固化盤および改良体に相当する要素の物性を、原地盤からそれぞれの物性へ変更する。
- 3) 盛立てを行う。

3. 解析結果

3.1 応力分担比

1/4 モデルの盛土中心付近における、改良体の鉛直応力と、改良体間隔の中心位置での未改良地盤の鉛直応力の比から応力分担比を求めた。応力分担比と改良体間隔を図-6に示す。

改良体間隔が大きくなるほど応力分担比は減少し、また、正方配置と矩形配置の比較では、配置の違いによる応力分担比の差はほとんど認められなかった。

今回解析で得られた応力分担比の値は、三木¹⁾の実測データと類似であり、沈⁴⁾の計算値や大野⁵⁾のモデル実験値と比較して大きい値となった。大野のモデル実験については、改良体下部に改良体長さの1.5倍という非常に厚い未改良層を残しているため、この厚い未改良層の影響により、応力分担比が小さくなったとも考えられる。

低改良率DMMでは、通常の改良率と比較して大きな応力分担比となることが知られており、比較的剛性の大きな改良体を設定した今回の数値解析では、改良体を非着底型とした場合にも、大きめの応力分担比となった。

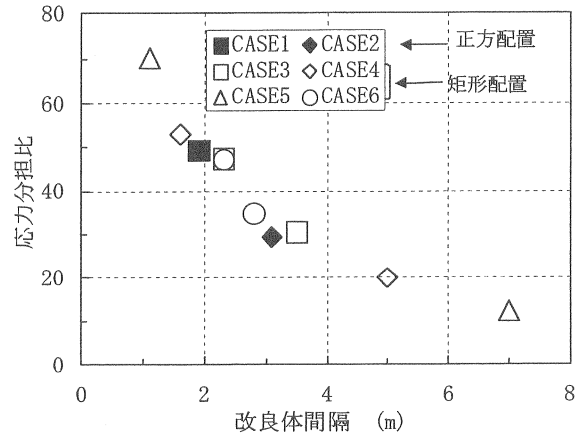


図-6 改良体間隔と応力分担

3.2 地盤沈下

CASE1 から CASE6 の盛土の中心点における地盤沈下量を図-7に示す。なお、図-7では、それぞれの値をCASE0での沈下量で正規化している。これより、CASE0の無改良と比較して、CASE1からCASE6の沈下量は、30~40%に減少する。6ケースの中では、CASE1の沈下抑制効果が最も高く、次にCASE6が続く。

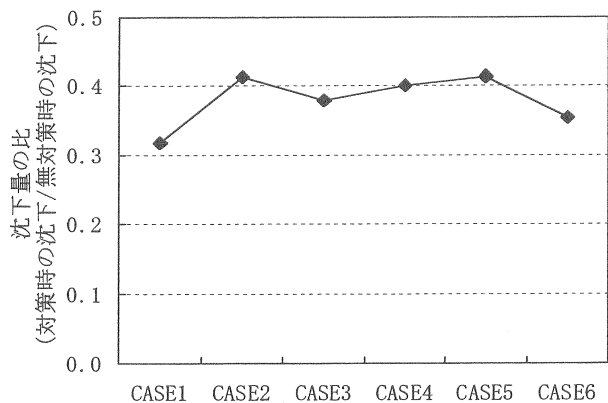


図-7 盛土中心地点の地表面沈下

CASE1とCASE2の比較では、CASE2の沈下量が多い。図-8には、固化盤、DMM改良層、深部の未改良層およびその下の硬質地盤でのそれぞれの地層での沈下量を示す。これより、CASE1は固化盤厚さが小さいためここでの沈下量が小さく、また、未改良層の沈下量も小さめとなっているため、全体沈下量が小さく抑えられたことがわかる。

一方、DMMの平均改良率が等しいCASE2からCASE6においても、それぞれのケースで沈下量に差が現れている。CASE3の未改良部の沈下は、CASE2と比較してやや小さく、同様にCASE6における未改良層の沈下量も、CASE2のよりやや小さい。

今回の改良ケースの中では、未改良層の沈下が最も大きいのはCASE5であり、逆にDMM層の沈下が最も小さいのもCASE5であった。このような沈下性状の違いは、改良体配置の影響により生じたものと考えられる。

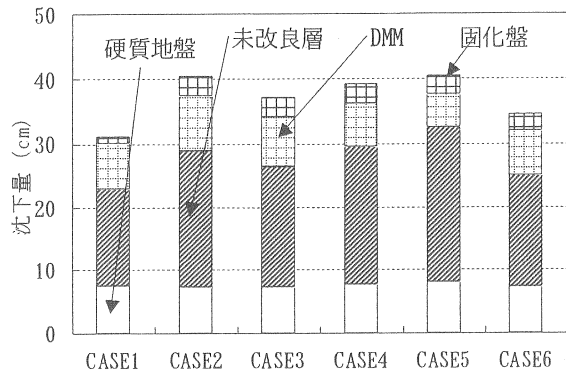


図-8 層別沈下

不同沈下の影響を検討するため、盛土中心位置から法先までの間における固化盤の傾斜を求めた。図-9に示すように、DMMを適用した全てのケースで、無処理の場合と比較して約1/3に傾斜が減少する。今回、不同沈下に対する効果が最も大きいのはCASE6であり、次にCASE1が続く。

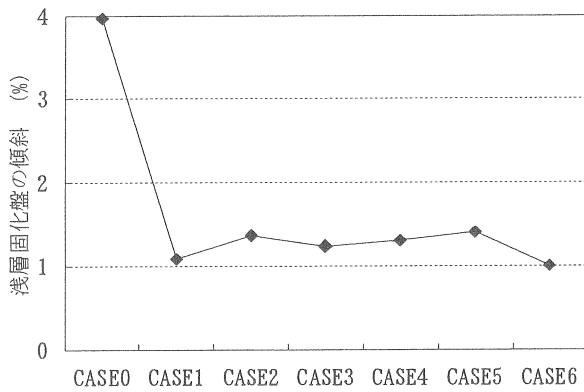


図-9 不同沈下

3.3 水平変位

法先位置での水平変位を図-10に示す。ここでの水平変位は、CASE0で計算された変位量との比で表わす。CASE0と比較して、改良を適用した全てのケースで水平変位が20%以下に抑えられる。

また、CASE1と比較して固化盤厚さが3倍のCASE2からCASE6では、CASE1より水平変位が小さくなった。水平変位に対する固化盤厚さの影響が大きいことを示していると考えられる。

今回、地盤の水平変形抑制効果が最も大きいのはCASE5であり、X方向ではCASE6の効果が大きい。CASE3からCASE5の結果から、改良体間隔が小さいほど、その方向の水平変位は小さくなる。

今回の検討は弾性有限要素法を用いたため、地盤の破壊や圧密までは考慮していない。特に改良体間隔が大きなCASE5のような場合には、改良体間の地盤に局所的な破壊が生じる可能性もあり、その場合には、地盤の破壊まで考慮できる弾塑性有限要素法を適用することが望ましい。

実大盛土試験では、地盤の変形や改良体に作用する土圧等、各種の動態観測を実施する。これら計測データを解析にフィードバックし、3次元の弾性有限要素法の適用性も含めて、低改良率DMMの設計手法の確立に役立てて行きたい。

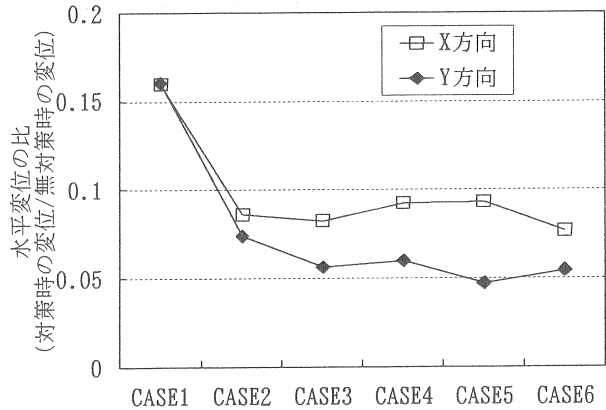


図-10 法先地点の水平変位

4. 結論

浅層混合処理工法と低改良の非着底型深層混合処理工法(DMM)を組み合わせた対策工法について、DMMの改良体配置が変形抑制に与える効果を、3次元弾性有限要素法を用いて検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 比較的剛性の大きな改良体とした今回の解析では、低改良率DMMを非底着型とした場合にも、応力分担比が50~70と比較的大きな値となるケースが認められた。
- 2) 浅層混合処理工法の適用により、地盤の不同沈下は約1/3に大幅に減少する。
- 3) 改良体配置を変化させても、地盤沈下量の変化は小さく、地盤沈下抑制に対する改良体配置の影響は小さい。
- 4) 地表面における地盤変形に対し、浅層混合処理工法の固化盤厚さの影響が認められた。
- 5) 改良体配置に応じて生じる水平変位に差が現れており、配置をより合理的に設定することにより、地盤の水平変位はさらに抑制できると考えられる。

今後、実大盛土試験で得られる計測データを解析にフィードバックした検討を行う予定である。3次元の弾性有限要素法の適用性の検討を進め、低改良率DMMの設計手法の確立に役立てて行きたい。

謝辞

今回解析に用いた3次元有限要素法は、東京大学農学部田中忠次教授開発のGEODYNを用いた。また、解析モデルや計算手法の検討に関し、(株)NOM、工学博士大河内保彦氏に助言を賜った。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1)Miki H. :Design of deep mixing method of stabilization with low improvement ratio, 1st seminar of Japan -Thailand joint study project of soft clay foundation, 1997 .

2)Nozu M. :Estimation of floating type mixing method with low improvement ratio for reducing settlement of road embankment, 2nd seminar on ground improvement in highways, 1998 .

3)Inoue Y. , Mori M. ,Miki H. , Ochiai H. :Numerical evaluation of the effect of column arrangement of deep mixing method with low improvement ratio by three-dimensional FEM, Kazakh-Japan Joint Geotechnical Seminar, 2001 .

4)沈, 古賀, 三浦:道路舗装下におけるコラムスラブ系基礎の応力分担について,第36回地盤工学研究発表会, pp1067-1068, 2001.

5)大野, 古本, 恒岡, 藤村, 清水:フローティング式深層混合処理工法の改良率に関するモデル実験, 第36回地盤工学研究発表会, pp1077-1078, 2001.