

泥炭性軟弱地盤上盛土における 周辺地盤の変形予測手法に関する検討

寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○橋本 聖
山木 正彦

軟弱地盤上に盛土を構築した際の周辺地盤の影響範囲および変形量（沈下、鉛直変位、水平変位）は、実際の観測実績に基づく推定方法（以降、簡便法）が運用されている。しかしながら、簡便法は軟弱地盤の物性、盛土形状、法面勾配、盛土の施工速度などが考慮されていないため、圧縮性の高い泥炭層とその下に粘土層が厚く堆積する、いわゆる、泥炭性軟弱地盤に対する簡便法の適用に関しては不明な点が多い。

本報告は泥炭性軟弱地盤上の盛土にて得られた周辺地盤の影響範囲や変位量の動態観測結果より、これらの実測値をベースとして、泥炭層および粘土層の物性や層厚をパラメータとしたパラメトリックスタディを実施した。これらの結果を踏まえ、泥炭性軟弱地盤上の盛土に適した周辺地盤の影響範囲、変位量を設定する新たな変形予測手法を提案するものである。

キーワード：泥炭性軟弱地盤、盛土、周辺地盤、変形予測手法

1. はじめに

泥炭は主に湿性植物の遺体が低温多湿の条件のもとで多年にわたり分解が不十分なまま自然に堆積したものである（写真-1）。泥炭はその大半が有機物で植物繊維が互いに交錯して海綿状の組織を形成している。我が国では大部分が北海道に分布しその面積は約2,000km²に及ぶといわれており、平野部面積の約6%に相当し東京都と同じ広さである（図-1）。

泥炭層は地表面に厚さ3～5メートル程度で堆積し、その下には地域によって異なるが軟弱な粘性土層の場合が多い。粘性土層は厚さが20メートル以上に及ぶことがあり、さらにその下には砂層や砂礫層が堆積している。このような地盤構成は、一般的に「泥炭性軟弱地盤」と呼

ばれており、北海道の一部の地域では泥炭層と粘土層の間に砂層が存在する場合もある。

表-1は北海道各地域における泥炭の工学的性質を示す。泥炭の工学的な性質として、含水比 w 、間隙比 e 、圧縮指数 C_c などが極めて大きい反面、コーン指数 q_c は大きさに幅があるが $q_c < 100\text{kN/m}^2$ と著しく小さい状態にあるのが特徴である。局所的に存在する事例として $w=1,000\%$ を超過し、かつ強熱減量 L が90%を超えるものもある。

このような泥炭層とその下の粘性土層で構成された泥炭性地盤上に盛土を急速に構築させた場合、盛土底部に大規模な沈下（圧密変形）が生じると同時に、盛土を不安定化させるすべり破壊的な挙動（塑性変形）のほか、盛土の周辺地盤に隆起や引込み沈下などによって、そこに存在する家屋や水田等に被害が生じる恐れがある。



写真-1 繊維質な北海道泥炭



図-1 北海道における泥炭性軟弱地盤の分布¹⁾

表-1 北海道泥炭の工学的性質¹⁾

地名	泥炭層厚 H (m)	含水比 w (%)	湿潤単位 体積重量 γ_t (kN/m ³)	乾燥単位 体積重量 γ_d (kN/m ³)	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	間隙比 e
石狩	2~6	115~1,570	7.1~17.7	0.8~5.2	1.13~2.53	2~21
天塩	4~5	200~1,350	7.8~19.7	0.8~2.9	1.33~2.45	4~19
網走	2~6	140~1,250	8.6~11.9	0.6~4.2	1.15~2.35	2~21
釧路	4	170~970	8.6~13.1	0.8~5.4	1.30~2.33	3~15
厚岸	0.5~1.5	190~610	9.8~12.5	1.7~3.9	1.49~2.34	3~10
日高	4~8	400~820	9.4~10.1	1.1~1.2	1.62~1.73	6~18
十勝	1~12	120~980	9.2~12.0	0.9~11.9	1.04~2.34	2~15

地名	飽和度 S _r (%)	強熱減量 L _i (%)	ヘンゼン断強さ τ_v (kN/m ²)	コーン支持力 q _c (kN/m ²)	圧縮指数 C _c
石狩	78~100	20~98	5~30	40~900	0.4~11
天塩	—	37~95	10~40	70~490	1~10
網走	—	20~84	—	90~650	1.7~14
釧路	—	20~87	10~40	90~400	0.3~10
厚岸	—	22~64	—	45~400	2~3
日高	—	74~82	10~30	10~400	4~10
十勝	—	20~83	15~40	15~530	1~12

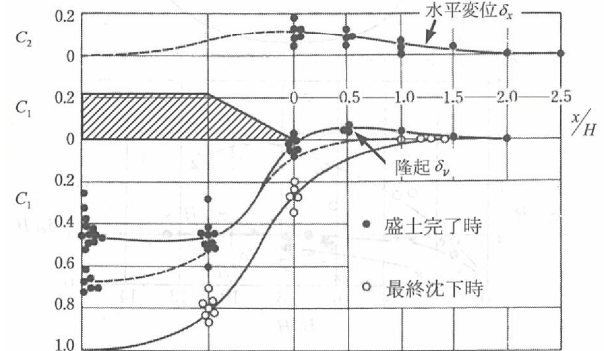
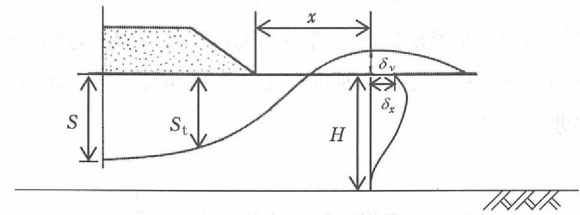
2. 簡便法とは

道路土工指針（軟弱地盤対策工指針）²⁾や NEXCO の設計要領（第一集 土工）³⁾などでは、軟弱地盤上に盛土を構築した際の周辺地盤の影響範囲および影響度合い（変形量）を簡易に予測する手法（以降、簡便法）が記載されている。この簡便法は名神、東名その他の高速道路および一般国道等において、実際に観測された盛土直下の沈下、周辺地盤の隆起、沈下、水平変位および側方変形の及ぶ盛土法尻からの水平距離などのデータをプロットし、その傾向を整理したものである（図-2）。

図中の C_1 、 C_2 は係数であり、 C_1 が 0 より大きい場合は地盤面より隆起、同じく 0 より小さい場合は沈下を示し、 C_2 は周辺地盤の水平変位に関する係数である。いずれも、周辺地盤の影響範囲および変位量は検討すべき盛土中央部の最終沈下量 S 、軟弱層厚 H 、盛土法尻からの水平距離 x が既知であれば、上記の各係数 (C_1 、 C_2) を図から読み取り、図-2（解 5-17）の 3 つの値から盛土に伴う周辺地盤の影響範囲および影響範囲内の鉛直変位、水平変位を簡易に推定することが可能である。

図-2 をみると、周辺地盤の影響範囲が 0 となる地点 ($C_1=0$ 、 $C_2=0$) は盛土法尻から軟弱層厚 H の 1.5~2 倍の距離 ($x=1.5\sim2.0H$) であるが、北海道では軟弱層厚の 1.5 倍 ($x=1.5H$) で検討されることが多い¹⁾。

しかしながら、簡便法は検討対象となる軟弱地盤の物性、盛土形状、法面勾配、盛土の施工速度などがまったく考慮されていない、文字どおり簡便な推定手法である。



$$\begin{aligned}
 \text{沈下量} & S_t = C_1 \cdot S \\
 \text{側方地盤隆起量} & \delta_v = C_1 \cdot S \cdots \cdots \cdots \text{(解 5-17)} \\
 \text{側方地盤水平移動量} & \delta_x = C_2 \cdot S
 \end{aligned}$$

ここに、

- C_1 、 C_2 : 係数
- S : 盛土中央における最終全沈下量 (m)
- H : 軟弱層厚 (m)
- x : 盛土からの水平距離 (m)

図-2 盛土の沈下形状と側方への影響²⁾ 一部修正

このため、北海道に広く分布する圧縮性の高い泥炭層とその下に粘土層が厚く堆積する泥炭性軟弱地盤に対する簡便法の適用性に関しては、北海道内の地盤技術者から、簡便法で得られる影響範囲や周辺地盤の変位が実態より過大に評価している可能性が指摘されている。

3. 泥炭地盤上盛土における周辺地盤の影響範囲

筆者らは、泥炭性軟弱地盤上に盛土した際の影響範囲および周辺地盤の変位量を把握するため実態調査を行った。調査対象は平成 26 年度末に供用した一般国道 276 号岩内共和道路（図-3）の泥炭性軟弱地盤上に構築した低盛土（盛土高 3m 程度）であり、動態観測にて盛土の沈下と周辺地盤の変位を計測した事例である（写真-2）。

当該箇所は供用後も沈下量が計測されており、一部では盛土の沈下量が 400cm を超える超軟弱地盤である⁴⁾。

検討断面は 25 断面であり盛土の施工速度は 3cm/day 以下、必要盛土厚 $H=2.9\sim5.3$ m、泥炭性軟弱地盤層厚 $z=3.5\sim12.7$ m（このうち、泥炭層厚 $z=1.6\sim6.5$ m）、泥炭層の自然含水比 w_n は 3 パターンに分割 ($w_n < 300\%$ 、 $300 \leq w_n < 700\%$ 、 $w_n \geq 700\%$) して整理した（図-4）。

いずれも盛土完了時の実測値に基づいた結果であり、盛土中央部の最終沈下量（泥炭層は能登式¹⁾、粘性土層

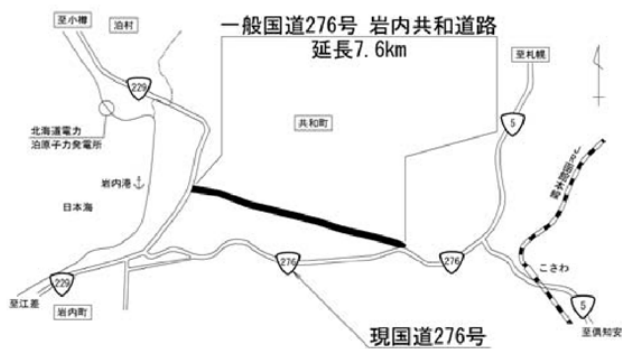


図-3 岩内共和道路の位置



写真-2 岩内共和道路の盛土施工状況

は $e\sim\log p$ 式にて算出) に係数 (C_1 , C_2) を乗じた値で周辺地盤の変形量を評価した。図-4中の破線は、簡便法にて盛土立上り時に周辺地盤の変形量 (鉛直, 水平) を算定する係数 (C_1 , C_2) を繋いだ線である。

図-4 をみると、25 断面の動態観測で得られた C_1 , C_2 の一部は破線を超過しているがその大半は内側にある。

C_2 (水平変位の係数) をみると、盛土法尻近傍から離れるに従って小さくなる傾向にあった。ただし、泥炭層の含水比の多少による C_2 の明確な差は無い。

次に C_1 をみると、 $x/H=0\sim1.5$ の約 70% が $C_1=0$ より下

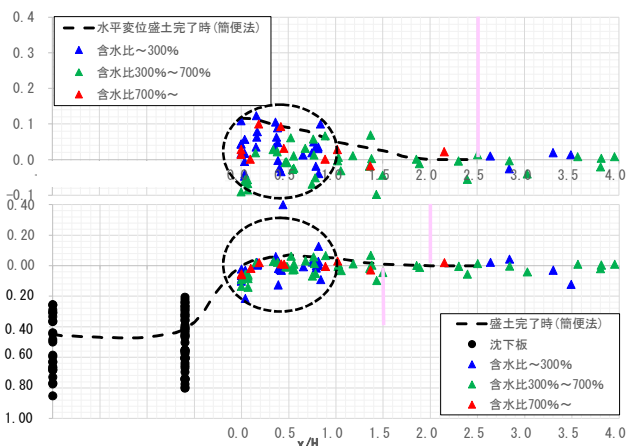


図-4 岩内共和道路における周辺地盤の分布

方にあった。これは、泥炭層は圧縮性が高くてかつ、非排水せん断強さが小さい¹⁾ため、盛土が所定の高さまで構築された際に上記の範囲内では引込み沈下が生じた割合が高かったことが示唆される。ただし、 C_1 も C_2 と同様、泥炭層の含水比の多少による明瞭な差は見られない。2. で述べたとおり、北海道では盛土周辺地盤の影響範囲は軟弱層厚の 1.5 倍 ($x/H=1.5$) にて決定されるが動態観測の結果、顕著に係数 (C_1 , C_2) の数値として表れた影響範囲は $x/H<1.0$ の割合が多かった (図-4)。以上、泥炭性軟弱地盤上の盛土による周辺地盤の影響範囲等を従来の簡便法より狭められる可能性が示唆された。

4. 泥炭性軟弱地盤に即した簡便法の考案

簡便法は式の性質上、盛土中央部の最終全沈下量 S と周辺地盤への影響の度合いを示す係数 C_1 , C_2 (x/H =盛土法尻からの水平距離/軟弱層厚) から周辺地盤の変位 (δ_x , δ_y) を評価するため、 x/H 内の変位量は軟弱対象層の圧密特性に拘わらず x , H , S で一義的に決定される。

図-5 1)は泥炭層厚3.6m、その下に粘性土層厚30.5mのトータル34.1mの泥炭性軟弱地盤における周辺地盤の影響範囲を算出した例である。簡便法に従うと、周辺地盤

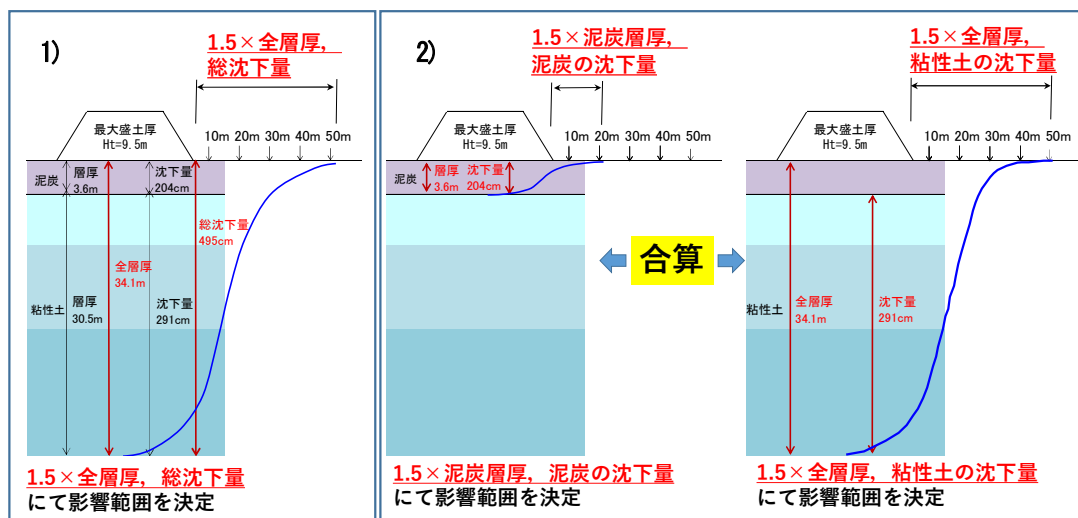


図-5 泥炭性軟弱地盤に対する従来の簡便法 (左) および合算法 (右) のイメージ

の影響範囲は盛土法尻から約51m離れた位置 ($x=1.5H$) となる。本例の S は計算の結果、約5mのため盛土法尻から約51m内では周辺地盤に変位が生じると推測される。

ここで、圧縮性の高い泥炭層と圧縮性の低い粘性土では層厚と最終沈下量が大きく違うこと、周辺地盤の変位量は x/H 、 S と密接に関連することを踏まえ、泥炭性軟弱地盤を上層部(泥炭層)と下層部(粘性土層)に分割し、各結果から得られる影響範囲、周辺地盤の変位を合算する方法(以降、合算法)を考案した(図-5 2)。

5. 泥炭性軟弱地盤における合算法の妥当性検証

図-6 は岩内共和道路(SP=4,880)における盛土構築時の施工履歴、盛土天端中央部の沈下履歴および最終沈下量は双曲線法で推定したものである。解析時の一次元圧密解析(泥炭層は能登式³⁾、粘性土層は $e \sim \log p$ 式にて算出)の結果は実測値を外挿して最終沈下量を算出した。

図-7 は上記測点における盛土法尻からの距離(x)の実測値、従来の簡便法で評価した影響ラインのほか、図-4 で提案した合算法による影響ラインである。横軸は x/H ではなく盛土法尻からの距離(x)で評価した。

泥炭性軟弱地盤における簡便法と合算法を比較すると、簡便法の影響範囲や変位が実測値と乖離しているが、合算法は地盤変形の影響範囲に関して整合性が高い。これは、4. で述べたとおり、泥炭層のみ簡便法にて評価すると、簡便法の式の性質上、泥炭層厚が薄いため影響範囲は限定的になるが、総沈下量が大きいので周辺地盤の変位が盛土法尻近傍に集中する。一方、粘性土層のみ簡便法で評価すると、層厚が厚いが総沈下量が小さいため、影響範囲が広がる反面、沈下量は小さくなる傾向にある。そのため、これらを合算する方法が泥炭性軟弱地盤の影響範囲や周辺地盤の変位の推定には適すると考えられる。

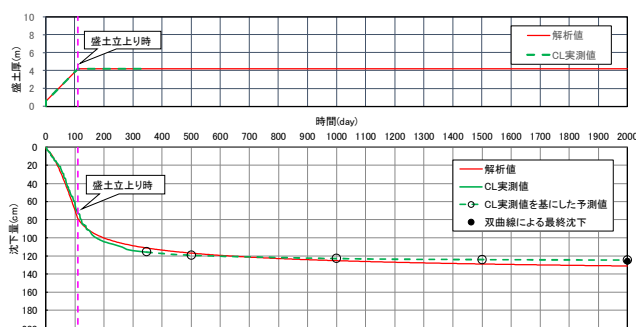


図-6 泥炭性軟弱地盤上盛土(天端中央部)の沈下履歴

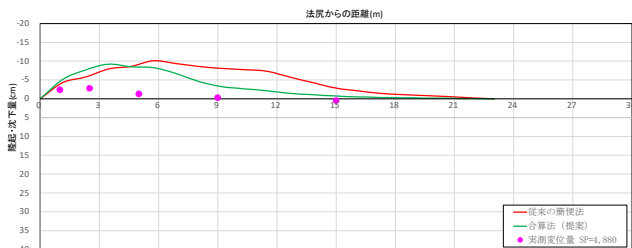


図-7 簡便法および合算法による周辺地盤の影響度の比較

6. 合算法によるパラメトリックスタディ

5. の検討結果を踏まえ、合算法によるパラメトリックスタディを実施した。図-7 1)は泥炭層の含水比、粘性土層厚を変化させたケース(Case1)、図-7 2)は図-7 1)と同一条件であるが、泥炭層と粘性土層に間に砂層が存在するケース(Case2)である。

表-2 はパラメトリックスタディの諸元等を整理したものである。Case1 は泥炭層は層厚 $z_p=6m$ 一定の含水比 w_p が 3 パターン ($w_p=500\%$ 、 800% 、 1000%)、粘性土層は道路土工 軟弱地盤対策工指針の自然含水比 w_n と $e \sim \log p$ 曲線の関係を参考に、含水比 $w_c=80\%$ の圧密特性²⁾、圧密係数 C_v は圧密圧力 p が $p=10kN/m^2$ 未満では $C_v=1,000cm^2/day$ 、 $p=10kN/m^2$ 以上では $C_v=250cm^2/day$ として、粘性土層厚 z_c を 4 パターン ($z_c=5m$ 、 $10m$ 、 $15m$ 、 $20m$) をパラメトリックに変化させた検討である。Case2 は Case1 と同一条件だが、いずれも中間砂層 $2.4m$ を有した検討である。なお、盛土高はすべて $H=6m$ とした。

これらの条件設定の根拠として、泥炭性軟弱地盤上に緩速載荷盛土を実施する際に考えられる最大の盛土高さ、盛土の構築によって周辺地盤が変形しやすい物性および層厚を考慮したものである。

パラメトリックスタディは汎用的な圧密沈下計算システム(DECALTO_富士通 Japan)を用いた。全ケースともに盛土の施工速度 $3cm/day$ として、盛土高 $6m$ 立ち上がり時および最終沈下時の周辺地盤の変形量(鉛直変位、水平変位)を合算法にて整理した。

図-9 はパラメトリックスタディによる検討結果を示す。図-9 1)、4)は各ケースの盛土立ち上がり時における周辺地盤の隆起量(cm)、図-9 2)、5)は同じく水平変位量(cm)、図-9 3)、6)は同じく最終沈下時の沈下量(cm)であり、横軸は合算法(図-8 3))の手法で盛土法尻からの距離(x)を泥炭層厚、粘性土層厚でそれぞれ正規化して合算して整理した値である。それぞれ、周辺地盤の影響範囲および度合いの最大値(Max)も示した。

前項で述べたとおり、北海道では泥炭性軟弱地盤上に盛土を構築した際の周辺地盤の影響範囲(閾値)は経験的に軟弱層厚の1.5倍($x=1.5H$)として検討されている¹⁾。盛土立ち上がり時の鉛直変位量および水平変位量、最終沈下時の鉛直変位量を見ると、盛土法尻の近傍($x/H=0 \sim 0.5$ 程度)にて変位量が大きくなり、 x/H が大きくなるのに従って急速に収束する傾向にあった。泥炭層と粘土層を分割して整理することで、層厚が薄くてかつ圧縮性の高い泥炭層、層厚が厚くて相応の圧縮性を有する粘性土層の物性が反映された形である。いずれも Case1(2)-3 の周辺地盤の変位が最も卓越したが、中間砂層を有する Case2 では変位が早期に収束する傾向にあった。

盛土周辺地盤における変位の閾値として、ほ場整備の基盤造成(表土整地)の標高較差の規格値($\pm 50mm$)⁵⁾

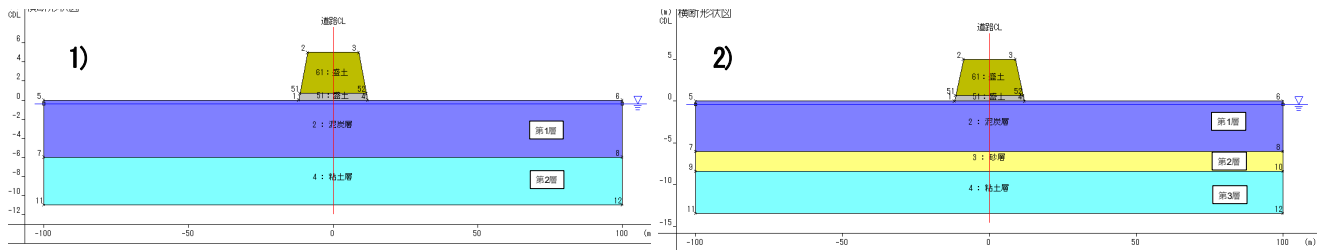


図-8 パラメトリックスタディによる検討断面（左：中間砂層なし、右：中間砂層あり）

表-2 パラメトリックスタディによる検討パターン（左：中間砂層なし、右：中間砂層あり）

Case1	第1層	第2層	軟弱層厚 (m)	Case2	第1層	第2層	第3層	軟弱層厚 (m)
	泥炭層厚6m 含水比 (%)	粘性土層厚 (m)			泥炭層厚6m 含水比 (%)	砂質土層 (m)	粘性土層厚 (m)	
1	500	5	11	1	500	2.4	5	13.4
2	800			2	800			
3	1000			3	1000			
4	500	10	16	4	500		10	18.4
5	800			5	800			
6	1000			6	1000			
7	500	15	21	7	500		15	23.4
8	800			8	800			
9	1000			9	1000			
10	500	20	26	10	500		20	28.4
11	800			11	800			
12	1000			12	1000			

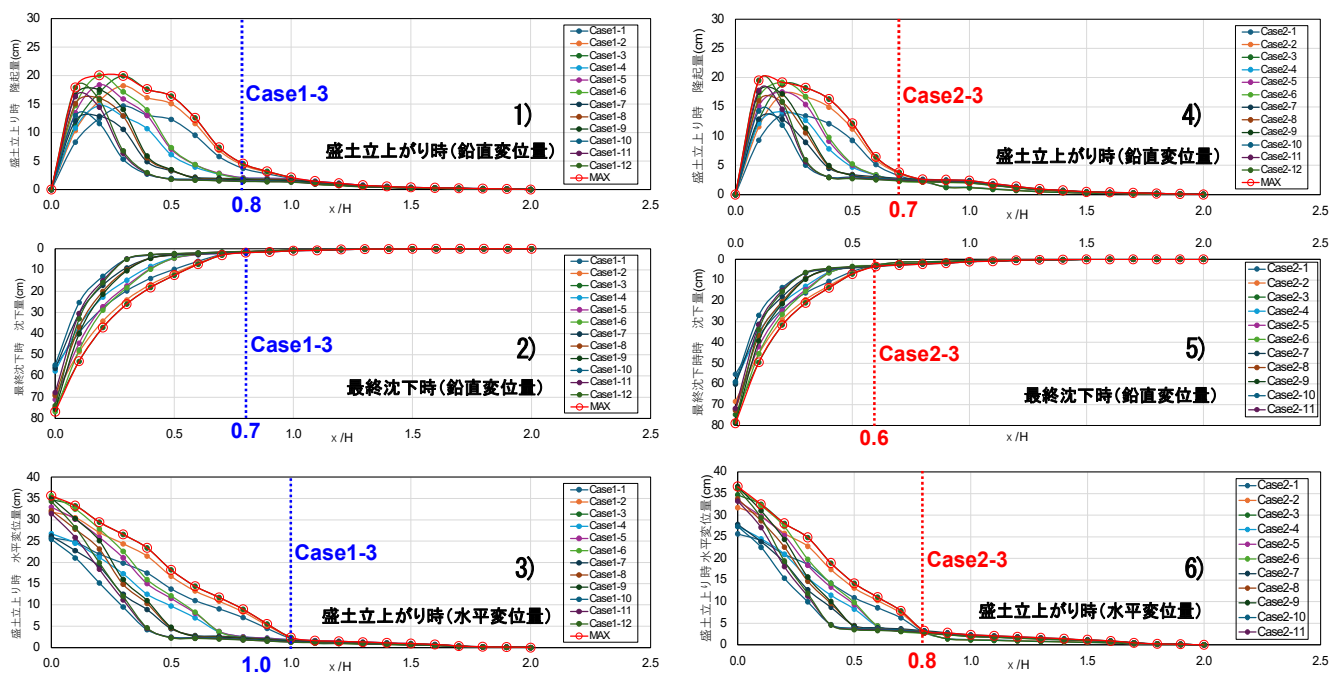


図-9 パラメトリックスタディの結果（左：中間砂層なし、右：中間砂層あり）

がある。パラメトリックスタディの結果、砂層の有無に拘わらず、盛土立上がり時、最終沈下時の x/H は $x/H < 0.8$ では規格値内 ($< 50\text{mm}$) であった (図-9 1)、2)、4)、5))。一方、周辺地盤の水平変位に関する評価基準は存在しないが、仮に鉛直変位の同様、 $\pm 50\text{mm}$ を規格値とみなすと $x/H \leq 1.0$ が規格値内にあった (図-9 3)、6))。ただし、合算法は簡便法をベースとした式の性質上、周辺地盤の変位が 0 になる範囲はすべて $x/H = 2.0$ であった。

図-10 は岩内共和道路の動態観測結果に図-9 1)~6)を重ねたものであり、図-10 1)、2) は x/H における鉛直

変位、水平変位を示す。鉛直変位は $x/H \geq 0.8$ 、水平変位は $x/H \geq 1.0$ で概ね $\pm 50\text{mm}$ 以内に収束した。泥炭性軟弱地盤による周辺地盤の鉛直変位や水平変位は絶対量で評価しても盛土法尻近傍に集中する傾向にあった。

図-11 は図-4 に図-9 1)、3)の変位 (縦軸)を各層の沈下量で正規化し、合算した係数 (C_1 、 C_2)を表記したものである。図-9 1)、3)を合算法の閾値の対象とした理由は、算出された変位の影響範囲が中間砂層が存在しない Case より大きかったためである。あらためて図-11をみると、動態観測結果の $x/H \leq 1.0$ における C_2 は合算

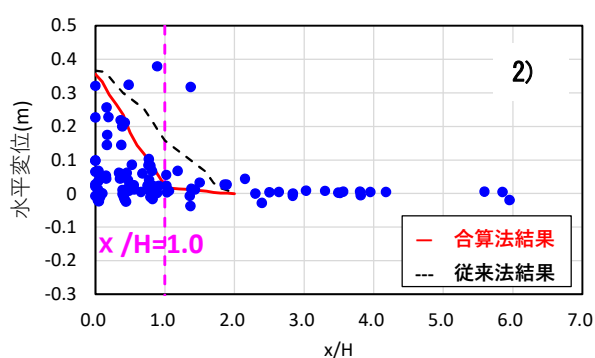
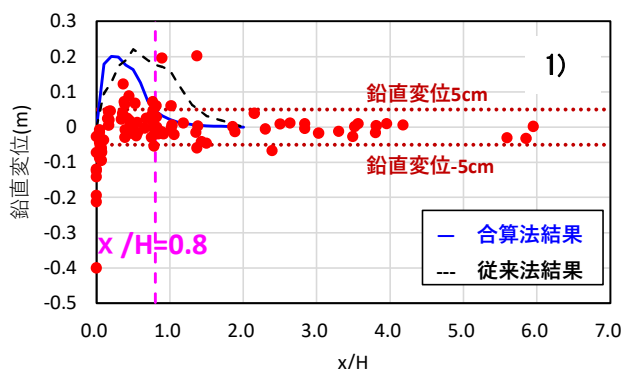


図-10 岩内共和道路の実測値とパラメトリックスタディによる周辺地盤変位 (左：鉛直変位、右：水平変位)

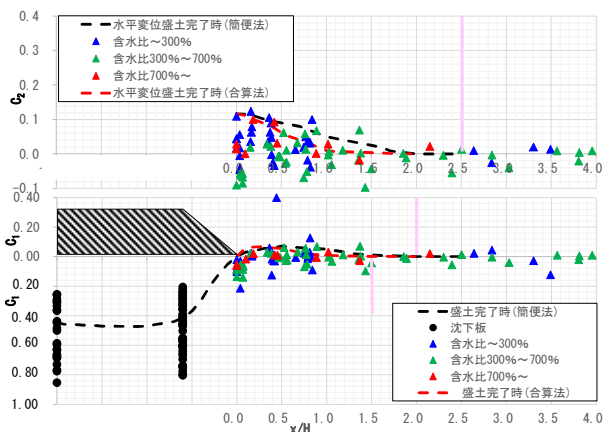


図-11 岩内共和道路における周辺地盤の分布 (合算法含む)

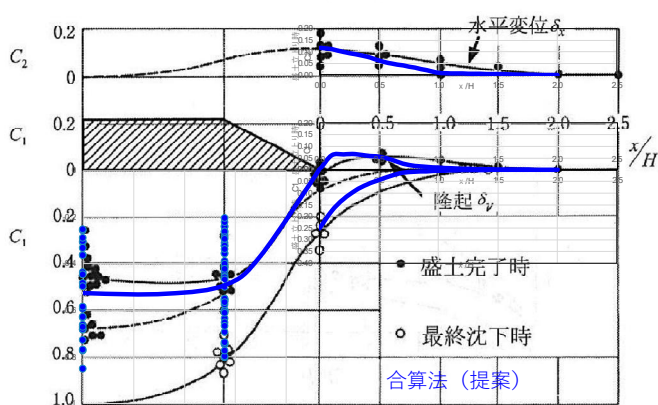


図-12 泥炭性軟弱地盤に応じた周辺地盤変位の推定 (合算法)

法の C_2 の閾値を超過している。これは、係数 (C_1 、 C_2) は図-2 に記載の式のとおり、周辺地盤の各変位 (δ_x 、 δ_y) を S で正規化した値であるが、現場条件 (検討断面) によっては実測の変位に対して、最終沈下量の推定値が小さくなり係数を大きく見込んだ可能性がある。

しかしながら、図-10 に示すとおり、動態観測やパラメトリックスタディによる周辺地盤の変位は盛土近傍に限定的であるため、合算法が泥炭性軟弱地盤の周辺地盤の変形予測手法として合理的と考え提案する (図-12)。

7. まとめ

本報告は泥炭性軟弱地盤上の盛土にて得られた周辺地盤の影響範囲や変位の動態観測結果より、本地盤条件に適した周辺地盤影響範囲および変位の推定方法 (合算法) を提案した。また、動態観測結果をベースに泥炭層および粘性土層の物性や層厚をパラメータとしたパラメトリックスタディを実施した。結果は次のとおりである。

- ・動態観測の結果、泥炭性軟弱地盤の盛土における周辺地盤の影響範囲は $x/H=1.5$ 程度だが、鉛直、水平ともに変位は $x/H < 1.0$ に集中する傾向であった。
- ・泥炭性軟弱地盤に適した周辺地盤の影響範囲や変位の推定法として、泥炭層と粘性土層に分割して個々に得られた影響範囲、変位を合算する方法を考案した。
- ・動態観測による実測値をベースとして、簡便法、合算法による周辺地盤の影響範囲や変位を比較した結果、

合算法は動態観測の傾向を示すことがわかった。

- ・泥炭性軟弱地盤上に緩速载荷盛土を検討する際の最大盛土高さ、盛土構築に伴い地盤が変形しやすい物性、層厚を考慮したパラメトリックスタディを実施した。
- ・その結果、周辺地盤の鉛直変位、水平変位が $\pm 50\text{mm}$ 以内であった閾値は $x/H \leq 0.8 \sim 1.0$ であった。また、動態観測結果も同様の結果を得た。

設計段階において、泥炭性軟弱地盤上の盛土に伴う周辺地盤の影響範囲は従来の簡便法と比較して、周辺地盤の変形量を多少見込むという条件が付くが、狭められる可能性を示した。これにより、従来の簡便法で検討された際に過大に評価した周辺地盤への影響範囲の設定に伴う借地や対策工が不要となり、事業のコスト縮減に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル，2017.
- 2) 社団法人) 日本道路協会：道路土工 軟弱地盤対策工指針 (平成 24 年度版) p.50, 2012.
- 3) 東日本・中日本・西日本高速道路 (株)：設計要領第一集土工編，pp.5-62, 2012.
- 4) 菅原正則，益子優太，菊池優希，橋本聖，木幡行宏，川端伸一郎：実測値を基にした異なる沈下予測手法の精度に及ぼす地盤特性と検討時期の影響，令和 7 年度土木学会全国大会 第 80 回年次学術講演会 III-91, 2025.
- 5) 国土交通省北海道開発局：農業土木工事仕様書 土木工事施工管理基準，pp.2-84, 2024.