

統計モデルを用いた泥炭性軟弱地盤の含水比分布 その1

— 土質ごとのモデルへのあてはめ —

秋田大学 学生会員 ○西澤一記

秋田大学 正会員 荻野俊寛, 秋田大学 正会員 田口岳志, (一財) 海域環境研究機構 非会員 田中洋行  
 寒地土木研究所 正会員 林 宏親, 秋田高専 正会員 山添誠隆, 北海道大学 正会員 西村 聡

1. 背景

地盤材料の多くはそのなりたちが自然に由来するため人工材料に比べ物性値のばらつきが大きい。特に、泥炭は土を構成する腐植の不均一性からばらつきが大きいことが指摘されてきたが<sup>1),2)</sup>、統計的なばらつきを考慮した物性値の議論はこれまであまり行われなかった。本研究は地盤内のばらつきを統計的に組み込んだ物性値のモデル構築を目的とし、本報告ではその端緒として泥炭性軟弱地盤のボーリング調査から得られた一連のデータにもとづき、土質ごとの自然含水比の分布モデルを構築した。

2. 対象地盤

対象とした地盤は北海道石狩川流域にある泥炭性軟弱地盤である。当該地盤では過去に数多くの地盤調査が実施されている。本研究はこれらのうち、無処理の地盤に対して実施された調査結果を対象とした。調査結果から、泥炭が分布する最大深度の地表面以下10mまでを対象深度と定めた。採取された不攪乱試料から測定された含水比を自然含水比として用いた。含水比データの総数は675である。

地盤調査の測線は総延長約5.3kmの折れ曲がった直線となっている。したがって、各含水比データは深度方向と測線に沿った水平方向に軸を取った2次元の位置情報を持っているが、本報告では研究の第一歩として簡単なモデルを構築するために、水平方向の位置は使用せず、深さ方向だけを考慮した。また、著者らによる原位置調査の結果、地下水面の位置は地表面下1mであった。

3. 土質構成と含水比分布

対象地盤には泥炭、有機質粘土、粘土、シルト、砂礫が含まれており、特に泥炭とシルトを多く含む土質構成となっている。調査によって得られた各土質の含水比分布を図-1に示す。便宜上、深度0~10mを3等分し、それぞれ上層、中層、下層とした。含水比は深度が深くなるにつれて小さくなるが、比較的含水比平均の高い泥炭や有機質粘土では深さに比例して減少せず、地表面から4m付近までは高い含水比を維持している。図-2は含水比のヒストグラムを示している。砂礫やシルトと泥炭、有機質粘土の平均含水比は大きく異なるため、深度にかかわらず含水比分布は二つの山を持つ複雑な分布になっている。

4. 一般化線形モデルによる含水比分布

本報告では一般化線形モデルを用いて含水比分布をモデル化する。一般化線形モデルでは確率分布に任意の確率密度関数を用いることができ、その平均 $\mu$ を線形予測子の関数で表す。含水比は深度とともに減少傾向を示したことから線形予測子には深度 $d$ を採用し、含水比の平均 $\mu$ は $d$ の2次関数とした。

$$f(\mu[m]) = \beta_0 + \beta_1 d[m] + \beta_2 d[m]^2 \quad (1)$$

ここに、 $m$ は全データ数に対するインデックス( $m=1, 2, \dots, 675$ )、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ は係数であり、データセットを用いて最尤推定される。 $f(x)$ はリンク関数であり、本報告では $f(x)=x$ 、あるいは $f(x)=\log x$ とした。含水比の分布 $g(w)$ として、正規分布、ガンマ分布、対数正規分布、逆ガウス分布を比較検討した。代表例として、正規分布の場合の $g(w)$ を式(2)に示す。

$$g(w; \mu[m], \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\sigma}} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{w - \mu[m]}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (2)$$

ここに $\sigma$ は標準偏差であり、深度に依存しない定数として最尤推定から求めた。なお、式(1)において、 $\beta_1=\beta_2=0$ とすることで含水比が深度に依存しないモデルを作成することもできる。本報告ではこのようなモデルを切片モデル、 $\beta_2=0$ となるモデルを切片-深度1次モデル、 $\beta_2 \neq 0$ となるモデルを切片-深度2次モデルと呼ぶ。

5. 全土質の含水比分布とモデルのあてはめ

データセットに対し、切片モデル、および切片-深度モデルをあてはめた結果を表-1および図-2に示している。比較した分布のうち正規分布は $-\infty$ から $\infty$ で定義されるため、切片モデル(図-2左上)では含水比の分布が負の値にまで及んでおり、明らかに不適切である。対してガンマ分布、対数正規分布、逆ガウス分布は非負の範囲で定義されるため、含水比の分布としてはこれらの分布を用いるのが適切であると考えられる。全土質の含水比分布に最も当てはまりの良いモデルを検

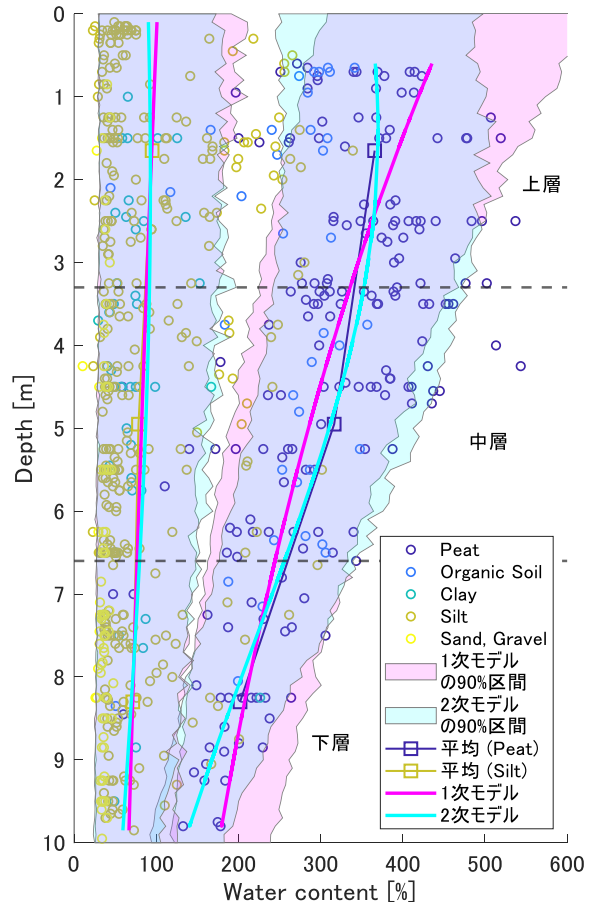


図-1 深度-含水比分布およびモデルによる予測区間 (予測は高含水比側が泥炭、低含水比側がシルト。□は土質ごとの各層の平均を表す。)

キーワード 一般化線形モデル 泥炭 含水比 確率分布

連絡先 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 TEL 018-889-2364

討するために、これらの分布と各モデルの全ての組み合わせに対し、あてはまりのよさの指標である対数尤度を求め、表-1にその結果をまとめた。これらの中で

表-1 最もあてはまりのよい分布と係数の最尤推定値( $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \sigma$ )

	地盤全体	泥炭	シルト
切片 ( $\beta_1=\beta_2=0$ )	逆ガウス分布 (5.0, 0, 0, 134.3)	ガンマ分布 (5.7, 0, 0, 119.1)	逆ガウス分布 (4.4, 0, 0, 184.8)
切片-深度1次 ( $\beta_2=0$ )	逆ガウス分布 (5.5, -0.12, 0, 144.8)	ガンマ分布 (6.1, -0.096, 0, 98.1)	逆ガウス分布 (4.6, -0.042, 0, 190.4)
切片-深度2次 ( $\beta_2 \neq 0$ )	逆ガウス分布 (5.1, 0.093, -0.019, 147.1)	ガンマ分布 (5.9, 0.040, -0.14, 94.1)	逆ガウス分布 (4.5, 0.029, -0.0073, 191.4)

最もあてはまりがよいモデルは逆ガウス分布を用いた切片-深度2次モデルであるが、このモデルを用いても二つの山を持つ地盤全体の含水比分布をうまく表せていない。

6. 土質ごとの含水比分布とモデルのあてはめ

次に、土質ごとの含水比分布のモデル化を試みる。図-2に示す深度ごとのヒストグラムから各土質を抽出し、モデルをあてはめた結果を図-3に示す。代表例として泥炭およびシルトについて示している。また、各モデルについて最もあてはまりのよい分布を表-1に示す。図-3から含水比平均の低いシルトでは、各分布を比較してもあまり大きな差はない。しかし含水比平均の高い泥炭の場合、ガンマ分布と対数正規分布ではあまり差はないが、逆ガウス分布のみ明らかにあてはまりが悪いことが分かる。また表-1から2次項の係数 $|\beta_2|$ の値が最も大きい土質は泥炭であり、これは図-1に示した地下水面の影響により地表面下3m付近の含水比分布が曲線的に変化しているためである。そのため2次の項を加えることで、このような地下水面が原因とした含水比変化をうまく表現できていると考えられる。

各土質の最もあてはまりのよいモデルは各対数尤度の比較により、泥炭と有機質粘土、砂礫ではガンマ分布を用いた切片-深度2次モデルであり、シルトは逆ガウス分布を用いた切片-深度2次モデル、粘土では対数正規分布を用いた切片-深度2次モデルとなった。砂礫やシルトは図-1から含水比の平均値が深度によってほとんど変化していないが、そのような土質では係数がほぼ0になっている。そのため全土質で統一的に切片-深度2次モデルを使うことができるが、あてはまりの良い確率分布は各土質で異なっていると分かる。

さらに最もあてはまりのよい分布を適用した場合の切片-深度1次モデルと切片-深度2次モデルを比較するために、代表例として泥炭およびシルトについて、式(1)、式(2)からランダムサンプリングによって得られた予測値の90%区間を図-1に示す。1次モデルでは含水比の平均の変化は深度に対し、ほぼ直線となっているが、2次モデルでは緩やかな曲線を描いている。特に、2次項の係数 $|\beta_2|$ が大きな泥炭の場合、両者の差はより顕著であり、深度4m以浅の含水比の変化をよく捉えている。また、いずれの土質においても含水比の観測値は90%区間にほぼ収まっていることから、土質ごとの含水比分布は一般化線形モデルによってうまく表現可能であることがわかる。したがって地盤全体の含水比分布は、土質ごとに切片-深度モデルをあてはめ、それぞれの分布を混合することでモデル化することが可能と考えられる。分布については、地盤全体に最もあてはまりのよいいずれかの分布を選択することが合理的と考えられる。

7. 結論

本報告で得られた知見は以下のとおりである。

- ・泥炭性軟弱地盤の含水比分布を一般化線形モデルでモデル化した。
- ・様々な土質からなる地盤全体の含水比分布を単一のモデルで表現することは難しいが、土質ごとにモデルを作成し、あてはめることにより分布をうまく表現することができた。
- ・泥炭性軟弱地盤全体の含水比分布は土質ごとのモデルの混合分布として表すことができる。

謝辞：本研究で用いた含水比データは北海道開発局札幌開発建設部岩見沢河川事務所から提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】1) 佐々木・能登：泥炭の工学的性質の均一性に関する一考察，土木学会第28回年次学術講演会，pp. 284-285, 1973.

2) 佐々木・能登：泥炭の工学的性質の均一性に関する一考察 第2報，土木学会第30回年次学術講演会，pp. 427-428, 1975.

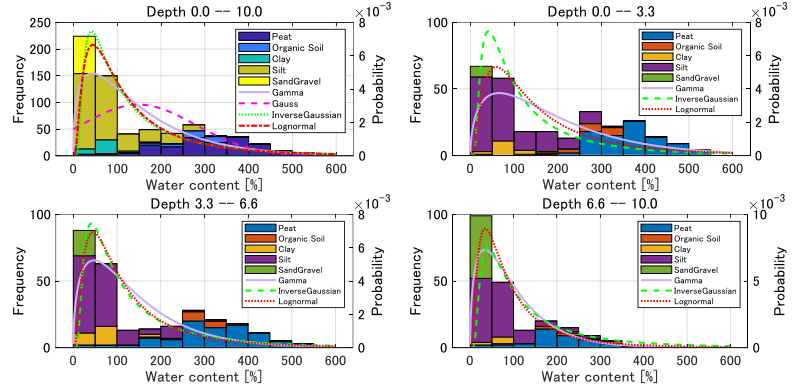


図-2 含水比のヒストグラムと各種モデルのあてはめ(左上：切片モデル，右上，左下，右下：切片-深度1次モデル)

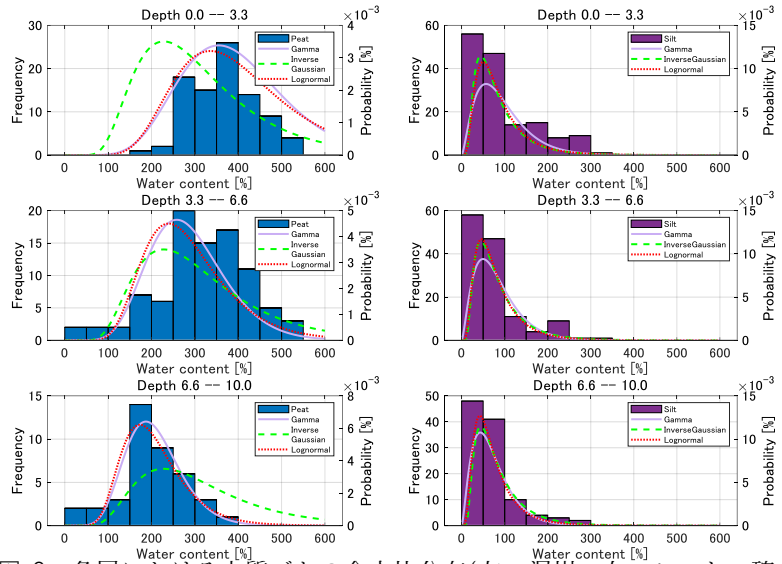


図-3 各層における土質ごとの含水比分布(左：泥炭，右：シルト。確率密度は各層の中央深度から式(1)によって求めた)