統計モデルを用いた泥炭性軟弱地盤の含水比分布
― 含水比分布モデルの構築 ―

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 [1), 2)]，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する．

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おり，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μ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μは d の 2 次関数で表現した．

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

ここに，m は全データ数に対するインデックス(m=1，2，…，675)，β_0，β_1，β_2 は係数であり，データセットを用いて最尤推定される．例えば，含水比が深度によって曲線的に変化する泥炭の場合，$|\beta_2|$が大きく，深度によってほとんど変化しないシルトの場合，β_1，β_2 が 0 に近い値となる．$f(x)$はリンク関数であり，常にμ[m]>0 の条件を満足するよう，$f(x)$=log x とした．また，確率分布は非負の連続値で定義されるガンマ分布を採用した．ガンマ分布の確率密度関数 $g(w)$を式(2)に示す．

$$g(w; a, b[m]) = \frac{1}{b[m]^a \Gamma(a)} w^{a-1} \exp\left(\frac{-w}{b[m]}\right) \qquad (2)$$

ここにa，b[m]はそれぞれ分布の形状および縮尺を決める母数であり，a は深度によらない．また，a，$b[m]$と$\mu[m]$との間には式(3)の関係がある．

$$\mu[m]=ab[m] \qquad (3)$$

なお，式(1)においてβ_1=β_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，β_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 次モデルと呼び，これら 3 つのモデルを比較する．

5.　地盤全体の含水比分布

図-1 の各層における含水比のヒストグラムを図-2 に示す．当該地盤は主としてシルトおよび泥炭からなっており，図-1

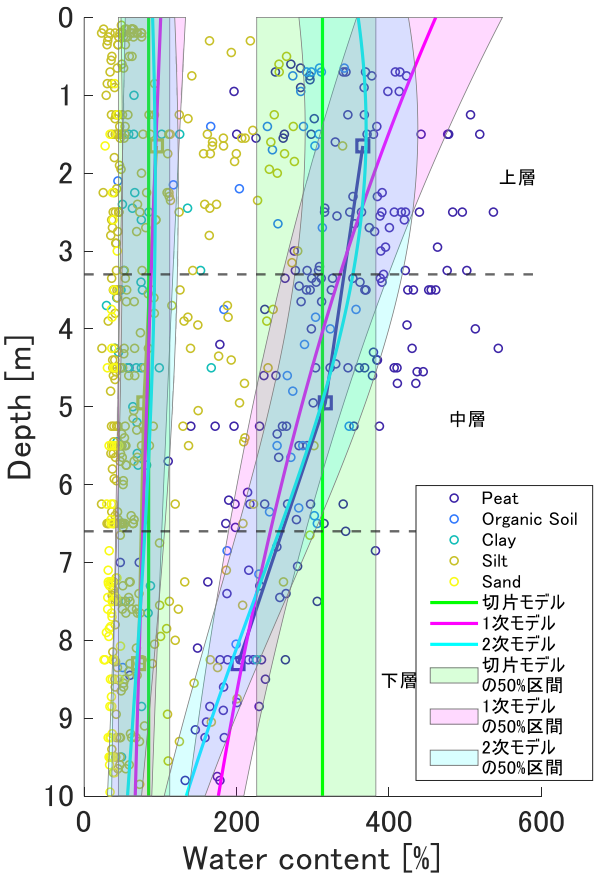

図-1 深度―含水比分布および各モデルによる予測区間(予測は高含水比側が泥炭，低含水比側がシルト．□は土質ごとの各層の平均を表す．)

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

© Japan Society of Civil Engineers

表-1　各モデルの対数尤度 L，AIC と係数の最尤推定値(β_0, β_1, β_2, a)

	泥炭	シルト
切片 (β_1=β_2=0)	L= -1098, AIC=2198 β_0=5.7, β_1= 0, β_2= 0 a= 6.9	L= -1841, AIC=3684 β_0=4.4, β_1=0, β_2=0 a= 2.5
切片－深度 1 次 (β_2=0)	L= -1061, AIC=2126 β_0=6.1, β_1= -0.096, β_2= 0 a= 10.2	L= -1834, AIC=3672 β_0=4.6, β_1=-0.042, β_2=0 a= 2.5
切片－深度 2 次 ($\beta_2 \neq 0$)	L= -1056, AIC=2117 β_0=5.9, β_1=0.040, β_2=-0.014 a= 11.0	L= -1832, AIC=3671 β_0=4.5, β_1=0.035, β_2=-0.008 a= 2.5

に示すように両者の含水比の平均は大きく離れているため，ヒストグラムは二つの山を持つ複雑な分布となっている．このような分布は土質ごとの含水比分布の混合することで表されると考えられるため，以下ではその第一歩として土質ごとにモデルをあてはめる．

6.　土質ごとの含水比分布とモデルのあてはめ

図-2 に示す各層のヒストグラムから各土質を抽出し，3 つの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，対数尤度と各係数の最尤推定値，AIC の値を表-1 に示す．図-3 から，含水比平均の低いシルトのヒストグラムは，深度によってあまり大きな差はなく，3 つのモデルはいずれもヒストグラムの形状をおおむねよく捉えている．

一方，含水比平均の高い泥炭のヒストグラムは，深度が大きくなるほどピークが低含水比側に移動している．含水比平均が深度によって変化する切片－深度 1 次モデルおよび切片－深度 2 次モデルでは確率密度関数のピーク点がヒストグラムのピークの変化に追随しており，おおむねヒストグラムの形状を表現しているが，切片モデルではピークの位置が大きく乖離している．図-1 に式(1)から計算した各モデルの深度―含水比関係および予測分布の 50%区間を示している．2 次モデルは上層部での含水比が緩やかに変化しており，地下水面の影響による含水比変化をうまく表現している．一方で，切片モデルでは下層部の予測分布が大きく外れている．

観測値に対するモデルのあてはまりのよさを表す対数尤度の値(表-1)は，シルト，泥炭とも 2 次モデルが最も大きく，深度―含水比関係を曲線であてはめ可能な切片－深度 2 次モデルが最もあてはまりがよい．あてはまりのよさはモデルの次数を増やすことでさらに向上させることができるが，必要以上に次数を大きくするとオーバーフィッティングを招き，かえって予測のよさを低下させる．そこで，未知のデータに対する予測の悪さを表す AIC の値を見ると，シルト，泥炭いずれの場合も 2 次モデルが最小となっていることから，これら 3 つのモデルの中では予測性能においても切片―深度 2 次モデルが最も優れていることがわかる．

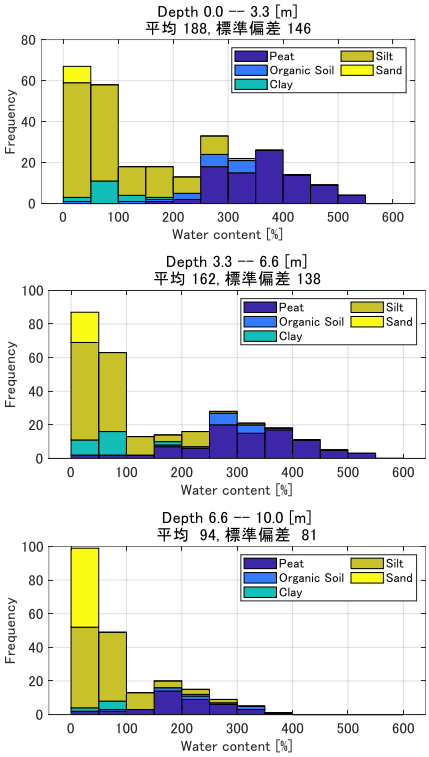

図-2 各層の含水比のヒストグラム

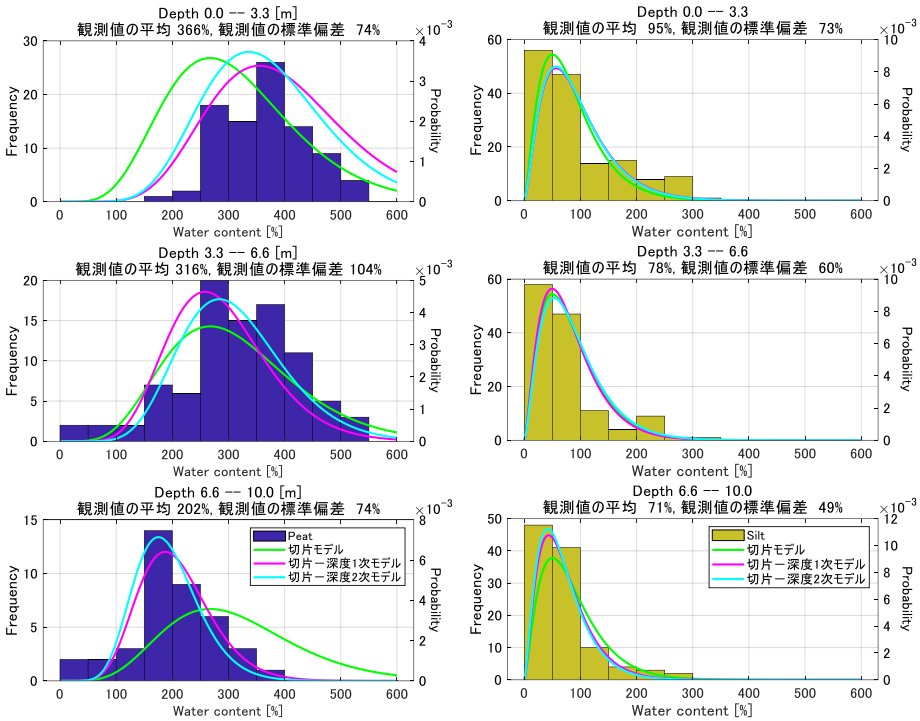

図-3　各層における土質ごとの含水比分布(左：泥炭，右：シルト．確率密度は各層の中央深度から式(1)によって求めた)

7.　結論

本報告では泥炭性軟弱地盤の含水比分布を一般化線形モデルを用いてモデル化した．含水比の平均値を深度の 2 次関数で表し，ガンマ分布をあてはめることで土質ごとの含水比分布をうまく表現することができた．

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.

© Japan Society of Civil Engineers