

ブートストラップ法による泥炭性軟弱地盤の含水比分布の信頼区間推定

秋田大学 学生会員 ○阿部剛成

秋田大学 正会員 荻野俊寛, 秋田大学 正会員 田口岳志, 北海道大学名誉教授 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。著者らはこれまでに、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、自然含水比分布の統計モデルを提案した^{3, 4)}。本報告はブートストラップ法(BS法)を用いたリサンプリングによって、母集団である原地盤の含水比分布を再現し、原地盤の含水比の信頼区間および提案したモデルの信頼区間、すなわち原地盤の含水比やモデルのばらつきの範囲を検討している。

2. 一般化線形モデルによる含水比分布のモデル化

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^{3, 4)}である。対象深度は地表面以下 10m とし、水平方向の相関は考慮せず深さ方向だけを考慮した。含水比分布をモデル化するために、西澤ら³⁾が提案した切片-深度-2 次モデルを用いた。なお含水比の確率分布は西澤らの結果を踏まえ、全ての土質に総合的にあてはまりがよかったガンマ分布を用いた。西澤らのモデルは以下の式で表せる。

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

ここに、 μ は含水比の平均値、 d は深度、 m は全データに対するインデックス、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ は係数である。 $f(x)$ はリンク関数であり、本報告では $f(x)=\log x$ とした。

用いたデータセットは既報³⁾と同一であり、土質調査から得られた $n_0=675$ 点の含水比データである。ただし、西澤らは対象地盤を泥炭、有機質粘土、粘土、シルト、砂礫の5つに分類し、モデル化した。内訳を見ると、特に泥炭とシルトを多く含む土質構成となっていたため、本報告ではOrganic(泥炭と有機質粘土)とInorganic(粘土、シルト、砂礫)の2つに再分類してモデル化した。再分類した含水比分布とモデルを当てはめた結果を図-1に示す。含水比は深度によって変化するが、特に泥炭を含むOrganicでは同深度でもばらつきが大きい。含水比の平均はOrganicで303.4%、Inorganicで76.3%、標準偏差はOrganicで102.0%、Inorganicで59.9%となっている。

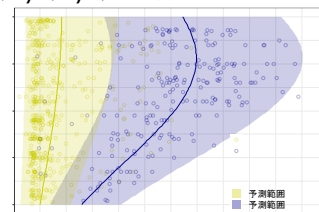


図-1 解析に用いた含水比データおよびモデルのあてはめ

3. ブートストラップ法

本報告では西澤らのモデルの信頼区間を求めるために、ノンパラメトリックBS法を用いた。その概念図を図-2に示す。ノンパラメトリックBS法は母集団から観測されたデータセットを擬似的な母集団に見立て、擬似的な母集団から復元抽出を行うことで疑似データセット(BS標本)を生成するリサンプリング法である。復元抽出を行う際に、擬似的母集団と実際の母集団の分布が類似していると仮定することで、実際の母集団のばらつきを推定することができる。データセットから n 個復元抽出し、得られたBS標本からモデルを作成する。これを m 回くりかえすことによって m 個のモデルが得られ、この m 個のモデルから信頼区間を構築する。

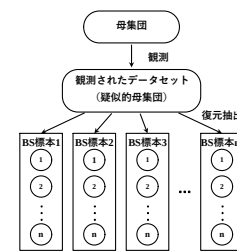


図-2 BS法概念図

4. 地盤全体の含水比分布とその平均および標準偏差の信頼区間

まずは地盤全体の含水比平均と標準偏差について検討する。BS標本数 n はオリジナルデータと同じ $n=n_0=675$ (Organic: 215, Inorganic: 460)、反復回数は $m=1000$ としてリサンプリングする。これにより得られた含水比の平均値と標準偏差のヒストグラムを図-3に示す。BS標本の含水比平均の平均はOrganicが303.2%、Inorganicが76.2%であり、どちらもオリジナルデータの平均値(図-1)とほぼ一致している。またBS標本の標準偏差の平均もオリジナルデータの標準偏差と一致している。ただし、あくまで図-1のデータから得られる平均や標準偏差などの推定量は母集団である原地盤から得られた標本の結果に過ぎないため母集団の統計量とは誤差が生じる。BS標本は擬似的母集団からのリサンプリングであるため、そのヒストグラム(図-3)から母集団の統計量が存在する範囲を推定することができる。図-3から、BS標本の含水比平均の90%信頼区間の幅はOrganicでそれぞれ22.4%、9.2%、標準偏差の90%信頼区間の幅はOrganicでそれぞれ16.4%、10.7%となっており、いずれも小さいことがわかる。このことから、原地盤全体の含水比は、表-1に示す狭い範囲にあると推定される。

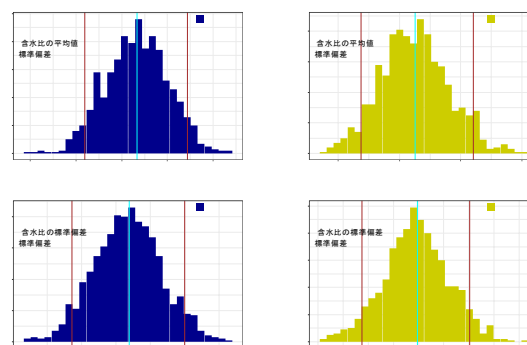


図-3 BSによる地盤全体の含水比平均と標準偏差のヒストグラム(赤線の区間は90%信頼区間を示す。水色線は観測値の平均および標準偏差)

表-1 地盤全体の含水比の90%信頼区間

	Organic	Inorganic
平均	292.0%~314.4%	71.9%~81.0%
標準偏差	93.6%~110.0%	54.4%~65.1%

キーワード 一般化線形モデル 泥炭 含水比 信頼区間

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

5. 提案モデルの信頼区間

次に、BS 標本を $n=n_0=675$ 、反復回数 $m=1000$ としてリサンプリングを行い、信頼区間を構築した。図-4 にリサンプリングの結果を示す。また、図中の太誤差棒は地盤の上・中・下層における BS 標本の平均値の平均および標準偏差の平均を示しており、細誤差棒はそれらの標準偏差を示している。細誤差棒の幅が小さいことから、上記の地盤全体の場合と同様、母集団である原地盤の平均や標準偏差が狭い範囲にあることが示唆される。また、図中の曲線群は BS 標本から計算したモデル(式(1))による含水比平均 μ と深度 d の関係である。これら m 本の曲線群からモデルの信頼区間を得ることができる。赤曲線は含水比平均 μ の 90%信頼区間を示している。表-2 にモデルの 90%信頼区間の幅の最大値と最小値を示す。提案モデルの 90%信頼区間は Organic の場合 22.8~54.9%、Inorganic の場合 10.0~33.1%となっている(表-2)。以降これと比較して反復回数 m や BS 標本数 n が信頼区間に及ぼす影響を考察する。

まずは反復回数の影響について検討する。BS 標本 n を $n=n_0=675$ とし、反復回数を $m=100, 500, 2000, 5000$ と変化させる。図-5 に代表例として $m=100, 2000, 5000$ の場合の結果を示す。図-5 の太誤差棒、細誤差棒はいずれも図-4 とほぼ同様となっている。反復回数と含水比平均の標準偏差の関係を図-6 に示した。図-6 から含水比平均の標準偏差もほぼ変化していない。したがって、反復回数を増やしても推定される含水比平均や標準偏差、およびそのばらつきは変化しないことがわかる。一方、モデルの信頼区間については、 m の増加に伴ってモデル曲線の数が増えているが曲線群は一定の区間に集中しており、赤曲線の幅はほとんど変化していないことから、反復回数がモデルの信頼区間に及ぼす影響が小さいことがわかる。

次に BS 標本数の影響について検討する。反復回数を $m=1000$ とし、BS 標本数 n を $n=n_0/2, n_0/3, n_0/4, n_0/5, n_0/8$ と変化させる。図-7 に代表例として $n=n_0/2, n_0/4, n_0/8$ の場合の結果を示す。図-7 から BS 標本数が減少するほど細誤差棒の幅が大きくなり、BS 標本の含水比平均および標準偏差のばらつきが大きくなっていることがわかる。図-8 に BS 標本数と含水比平均の標準偏差の関係を示す。Organic、Inorganic とともに BS 標本数が減少すると、ばらつきが大きくなっている。これに伴い、モデル曲線のばらつきも大きくなっており、90%信頼区間(赤曲線)の幅も広がっている。

6. 結論

BS 法を用いて、泥炭性軟弱地盤の含水比および既報で提案したモデルの信頼区間を構築した。本報告で得られた知見は以下の通りである。

- ・泥炭性軟弱地盤の土質を有機質・非有機質の 2 つの土質に区分し、675 点の含水比データから地盤全体の含水比の信頼区間を構築した。表-1 に示す 90%信頼区間を得た。
- ・上記の含水比データを式(1)にあてはめ各土質の含水比モデルを作成した。BS 法から得られた 2 つのモデルの信頼区間の幅は小さく、ばらつきが小さいことを確かめた。その幅は最大でも有機質土で 54.9%、非有機質土で 33.1%であった。
- ・BS 反復回数が増えなくても信頼区間はほとんど変化しないが、BS 標本数が小さくなると信頼区間の幅は広がった。

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. 3) 西澤ら：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—土質ごとのモデルのあてはめ—，土木学会東北支部技術研究発表会，2021. 4) カイラーら：統計モデルを用いた泥炭性軟弱地盤の含水比分布 その 2—地盤全体に対するモデルへのあてはめ—，土木学会東北支部技術研究発表会，2021.

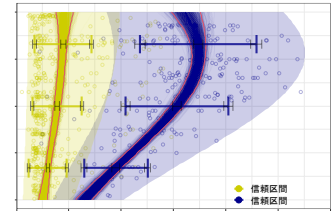


図-4 BS 法によるリサンプリングの結果($n=675, m=1000$)

表-2 モデルの信頼区間 $n=675, m=1000$

	Organic		Inorganic	
	最大値	最小値	最大値	最小値
区間の幅	54.93%	22.81%	33.11%	9.96%

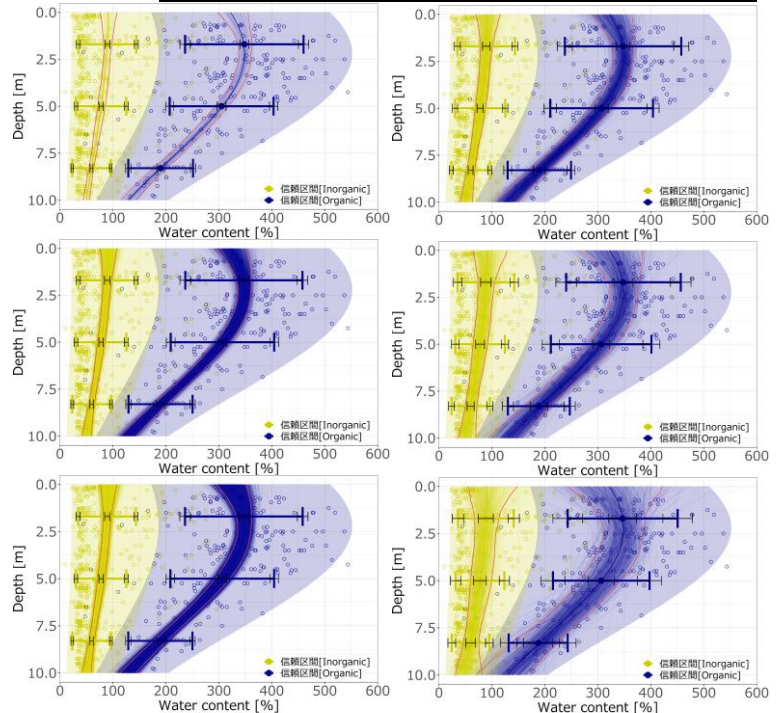


図-5 信頼区間に及ぼす反復回数の影響

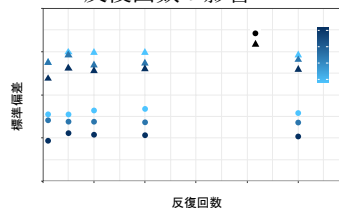


図-6 反復回数と含水比平均の標準偏差の関係

図-7 信頼区間に及ぼす BS 標本数の影響

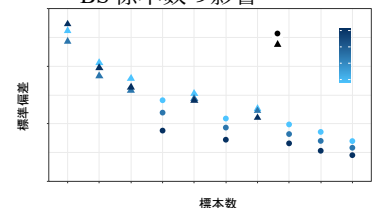


図-8 BS 標本数と含水比平均の標準偏差の関係