

締固めた泥岩材料の水浸沈下 特性に関する基礎的研究

村上幸利

正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 (〒400-0016 甲府市武田四丁目3-11)

典型的な軟岩の一つである泥岩が盛土材として用いられる場合、乾燥・湿潤の繰り返しや地下水位の変動等によって材質の劣化が生じて、表面沈下や膨潤の発生など盛土体の安定性に係わる問題が起こりやすい。本研究では、締固めた泥岩塊材料の力学的性質や浸透機構を考慮に入れながら、水浸に伴って発生する圧縮変形について理論の構築と解析ならびに室内実験を行った。その結果、限定された条件のもとではあるが、水浸沈下ならびに含水量の経時的变化に対して、構築した理論の妥当性を検証するとともに、水浸沈下特性に関する幾つかの知見を得た。

Key Words : slaking, settlement due to submergence, mudstone, embankment, unsaturated hydraulic conductivity

1. まえがき

道路建設や宅地造成に関連して各種の盛土構造物が築造される場合に、経済性あるいは環境保全への配慮から、築造現場付近に分布する岩石がそのまま盛立て材料として用いられることが多い。しかし、その岩石が泥岩や頁岩といった水成堆積岩あるいは凝灰角礫岩等の火砕岩である場合には、安山岩などの硬岩に比べて強度的に劣り、また環境変化の影響を受けて容易に脆弱化するために、締固めが不十分な場合には、乾燥・湿潤の繰返しあるいは地下水位の変動に伴って、長期にわたる継続的な沈下の発生あるいは法面部での進行性崩壊等、盛土体の安定性に係わる種々の問題が誘発される可能性が高い^{1)・2)}。たとえば図-1は、山梨県某所の沢部において最大高さにして約20mの盛土が泥岩塊材料(最大粒径は約20cm)を用いて含水量管理と密度管理のもとに転圧・築造されたケースについて、最大盛土付近の表面で観測された沈下量の経時的变化と日降水量の関係を表したものである。この図を見ると、日降水量にして100mmを超えるような降雨があると、それ以降において付加的な沈下が新たに発生している様子が分かる。このように水浸に伴って発生する軟岩盛土の沈下は、岩塊粒子のコラプス現象ならびに岩塊粒子自体の軟弱化に起因するとされ、水浸沈下と呼ばれている³⁾。軟岩盛土の水浸沈下量を解析的に求める方法は幾つか提案されているが、そのほとんどは非水浸状態での圧縮試験または圧密試験を行った後に水浸試験を行い、その試験結果の比較から盛土体の水浸沈下を定量的に把握しようとするものであり^{4)・5)}、今までのところ、不飽和浸透のメカニズムを考慮して水浸沈下

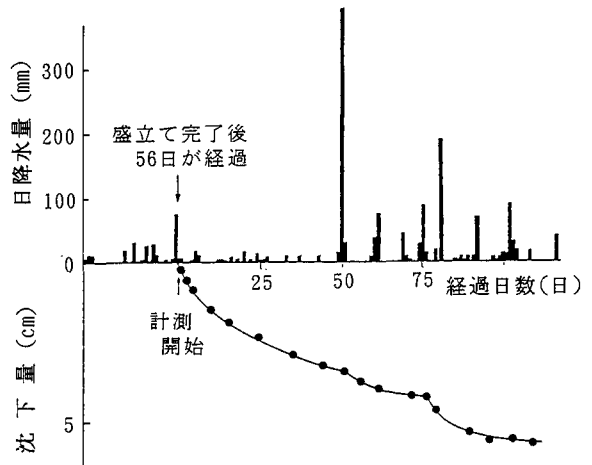


図-1 盛土表面での沈下測定例

の経時的变化を解析的に扱ったものはないようである。著者は、既に、泥岩や凝灰角礫岩などの軟岩を対象にして、締固めた軟岩材料の力学的安定性に及ぼす岩の性質と締固め度の影響について調べ、これら三者の間には強い関連性があることを明らかにし、それに基づいて軟岩盛土の転圧・締固め時における管理基準の設定が可能であることを示した⁶⁾。特にそのなかで、これまでの研究によっても明らかにされているように、締固めた盛土材の水浸沈下は盛土体の間隙中に存在する空気量が少ない場合は微小であるものの、空気量がある一定値を超えると急激に増大することが確認されている⁷⁾。また、その水浸沈下の進行は盛土体の水浸後において時間的な遅れを伴い、圧密沈下と類似した経時的变化をもつことが

現場または室内試験での観測から明らかにされている⁵⁾。

本論においては、上記のような既往の知見を踏まえながら、山梨県という限定されたグリーンタフ地域に分布する泥岩を対象として、それを盛土材料として締固めた場合の水浸沈下特性について、泥岩材料の基本的性質と力学的性質および不飽和土の浸透メカニズムを念頭に置きながら、理論および実験の両面から検討しようとするものである。

2. 水浸沈下に関する理論的アプローチ

締固めた泥岩材料は、塊状の泥岩片と破碎・細粒化した泥岩粒子の混合体とみなすことができる。その粒度は、締固め以前における泥岩材の状態や締固め条件等によって強く影響を受ける。材料が多量の細かい泥岩粒子に混じえて大きい泥岩塊を含有するような不均等性の高い場合あるいは大きい泥岩塊だけでほとんどを占められるような場合には、材料中の水分移動や変形挙動に関する力学機構は極めて複雑であって、その理論的取扱いは非常に困難になると考えられる。また前述したように、水浸沈下は吸水による粒子自体の脆弱化と骨格構造のコラプスに起因するとされるが、それをそのまま解析的に扱うのは無理がある。したがって、本研究においては、この種の研究の端緒として、粒度が比較的細かく、ほぼ均等であるような泥岩粒子材料を静的に締固めた場合をモデル化して、吸水による粒子自体の脆弱化についてはセメンテーションによる粒子間応力の変化によって表し、また水浸に伴う骨格構造のコラプス現象についてはサクシジョンの変化によって表すことにより、水浸沈下現象に関する理論的アプローチを試みる。なお、理論的取扱いの簡潔化を図るために、1次元状態を対象にする。また、発生ひずみ量が比較的微小であることを考慮して、材料の水浸に伴う有効応力変化と体積変化の間には線形関係が存在すると仮定する。

まず、構成関係については、

$$\sigma'_z = E_c \partial w / \partial z = E_c \varepsilon_z \quad (1)$$

ここに、 σ'_z : 鉛直z方向の有効応力、 ε_z : 鉛直方向のひずみ、 w : 鉛直方向の変位、 E_c : 側方拘束状態での変形係数であり、締固めた材料の飽和度によって若干変化するが、ここでは定数として扱う。

応力関係は、有効応力の概念ならびに不飽和土に対するビシヨップの関係を用いることとする。

$$\sigma_z = \sigma'_z + \sigma_c' + p_a - \chi (p_a - p_w) \quad (2)$$

ここに、 σ_z : 鉛直方向の全応力、 σ_c' : セメンテーションによる粒子間応力、 χ : ビシヨップのパラメータ、 p_a : 間隙空気圧、 p_w : 間隙水圧である。なお、 σ_c' については、泥岩塊が本質的にもっているセメンテーションが泥岩粒子によっても部分的に受け持たれるとして、この存在を仮定する。釣合い条件式は、

$$\partial \sigma_z / \partial z = 0 \quad (3)$$

であるので、式(1)~(3)を用い、サクシジョン $\phi = (p_a - p_w) / \gamma_w$ (< 0) を考慮することによって、

$$E_c \cdot \partial \varepsilon_z / \partial z + \partial \sigma_c' / \partial z + \partial (p_a - \chi \phi \gamma_w) / \partial z = 0 \quad (4)$$

を得る。式中の γ_w は水の単位体積重量を表す。セメンテーションによる粒子間応力 σ_c' を適切に評価することは非常に難しいが、泥岩粒子が吸水によって軟弱化することを考えて、ここでは、 $\sigma_c' = (1 - S_r) \sigma_{c0}'$ と仮定する⁶⁾。なお S_r は小数表示での飽和度であって、 σ_{c0}' は完全乾燥状態における σ_c' である。また、近似的に $\chi = S_r$ と仮定できるので、式(4)は、

$$E_c \cdot \partial \varepsilon_z / \partial z + \partial \{ (1 - S_r) \cdot \sigma_{c0}' \} / \partial z + \partial (p_a - S_r \phi \gamma_w) / \partial z = 0 \quad (5)$$

になる。ここに、サクシジョン ϕ はマトリックポテンシャルヘッドとして、若干の考察を行うことにより、次のように表せる。

$$\phi = \phi_0 \cdot \exp(-\alpha \theta)$$

上式において、 α は定数、 ϕ_0 は吸水過程での水分特性曲線(含水比-サクシジョン曲線)を直線近似した場合において含水比0に対応するサクシジョンである。また、 θ は体積含水率であり、 $\theta = n \cdot S_r$ (n : 締固めた泥岩材料の間隙率)の関係がある。このようにして得られた式(5)は、任意の一定時刻における泥岩材料の飽和度と発生ひずみ量の関係を表す。

一方、不飽和状態の締固めた泥岩材料中に生じる水の浸透について考える。まず、鉛直方向のフラックス q_z は、次のように表せる。

$$q_z = -K \cdot \partial \phi / \partial z = -K \cdot \partial \phi / \partial z - K \quad (6)$$

ここに、 K は不飽和透水係数である。また、 ϕ は全ポテンシャルヘッドであり、 $\phi = \psi + z$ の関係をもつ。連続条件式は、

$$\partial \theta / \partial t = -\partial q_z / \partial z$$

であるので、式(6)を用いて、

$$\partial \theta / \partial t = (K \partial \phi / \partial z) / \partial z = \partial (K(\phi) \partial \phi / \partial z) / \partial z + \partial K(\phi) / \partial z \quad (7)$$

となる。前述したように、 θ は体積含水率であって、初期間隙率を n_0 とすると、 $\theta = n \cdot S_r = (n_0 + \varepsilon_z) \cdot S_r / (1 + \varepsilon_z)$ の関係がある。なお、水分拡散係数と呼称される $D(\theta) = K(\theta) \cdot d\phi / d\theta$ を導入すると、式(7)は、

$$\partial \theta / \partial t = (D(\theta) \partial \theta / \partial z) / \partial z + dK(\theta) / d\theta \cdot \partial \theta / \partial z \quad (8)$$

のように表せる⁹⁾。

以上のことから、締固めた泥岩材料の体積含水率 θ と $D(\theta)$ および $K(\theta)$ の関係がそれぞれ明らかであるならば、式(8)を解くことによって、体積含水率 θ の時間的および場所的な変化を評価することができる。その結果、式(5)および $n = (n_0 + \varepsilon_2)/(1 + \varepsilon_2)$ の関係を用いることによって、締固めた泥岩材料中の任意の位置について、水浸後の任意な経過時間での飽和度とひずみ量を評価でき、盛土体の水浸沈下の経時的変化を求めうることになる。

3. 室内試験

締固めた泥岩材料の水浸沈下特性を理論的に取り扱う方法として、上記のような力学モデルを構築した。このモデル式に含まれる力学パラメータを特定するためには、然るべき室内試験を行い、それに関連した力学関係を捉えることが不可欠である。例えば、締固めた泥岩材料の水分拡散係数 $D(\theta)$ を求めるためには、 $D(\theta) = K(\theta) / (d\theta/d\phi)$ の関係があるので、体積含水率 θ と毛管ポテンシャルヘッド ϕ の関係ならびに不飽和透水係数 $K(\theta)$ との関係をそれぞれ知る必要がある。前者については、含水比 w は $\theta \cdot \rho_w / \rho_d$ でもって表せるので、含水比 w とサクション $pF (= \log(-\phi))$ の関係曲線すなわち水分特性曲線を求めることによって明らかにできる(ここに、 ρ_d と ρ_w はそれぞれ締固めた泥岩材料の乾燥密度と水の密度である)。したがって、締固めた泥岩材料について、 pF 試験を実施しなければならない。また、後者の関係を知るためには、不飽和透水試験が必要になる。さらに式(5)に含まれる変形係数 E_v を知るためには、吸水過程を考慮しながら、作用応力レベルでの圧縮試験を行う必要がある。なお、いずれの力学関係あるいはパラメータも材料の状態によって大きく変動するので、締固めた泥岩材料と同じ粒度、含水量および密度を保有する供試体について試験を行うことが重要である。別途、理論解析の妥当性を検証するために、水浸沈下試験を実施することになる。以下に、試験に関連した事項を概述しておく。

(1) 泥岩試料の採取と基本的性質

本研究で用いた泥岩試料は、山梨県のグリーンタフ地域を形成する新第三紀・御坂層群ならびに富士川層群のうち、代表的な泥岩優勢層である「桃ノ木累層」および「身延累層」からそれぞれ採取した「勝坂泥岩」と「身延泥岩」と呼称されるものである。採取位置はそれぞれ南巨摩郡下部町平松地内および波高島地内であり、その泥岩の堆積年代は地質学上、それぞれ今から約2,000万年前(新第三紀・中新世前期)および約800万年前(新第三紀・鮮新世前期)であると推定される。

泥岩試料の基本的性質を明らかにするために、「密度試験」、「スレーキング試験」および「破碎試験」等を行った。それぞれの試験方法については、その試験の意

表-1 用いた泥岩試料の基本的性質

試料の名称	勝坂泥岩	身延泥岩
自然含水比 (%)	15.5	9.7
真比重	2.69	2.73
乾燥密度 (g/cm ³)	1.94	2.09
間隙率 (%)	29.1	23.6
スレーキング率 (%)	100.0	94.4
破碎率 (%)	44.0	34.4
最適含水比 (%)	17.2	14.5

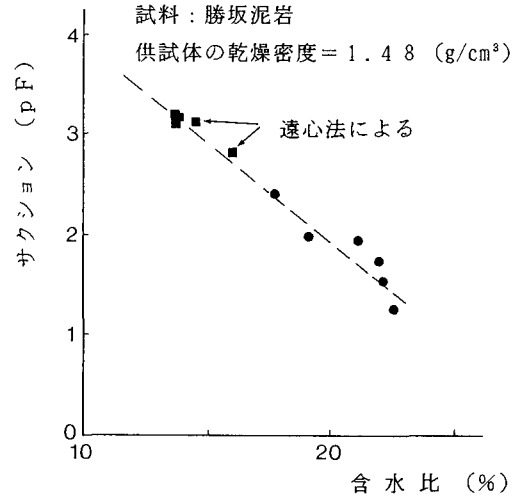


図-2 含水比とサクションの関係

義等を含めて、別論文に記載してあるので、参照願いたい⁶⁾。試験から求めた泥岩試料の基本的性質を示すと、表-1のとおりである。スレーキング率は94~100%であり、破碎率は34~44%であって、泥岩として典型的な数値を示す。

力学試験としての pF 試験、不飽和透水試験と圧縮試験、ならびに検証実験としての水浸沈下試験にそれぞれ用いる試料の粒度は、採取した泥岩を自然含水比に保ったまま、ハンマーで粉碎し、それをふるいにかけて調整したものであり、粒径2mm~4.75mmに相当するものとした。実際は、これよりも粒度が粗い試料を対象にすべきであるが、 pF 試験を始めとして、種々の試験に供する供試体の大きさとの関係、また理論構築の前提条件になる均質性を保持させるために、本研究ではこの粒度に設定した。粒度調整した泥岩試料の締固め試験(JIS A 1210)から得られた最適含水比を合わせて表-1に示しておく。なお参考までに、水浸沈下に及ぼす試料粒度の影響を調べるために、粒度の異なる試料を4種類用意し、それぞれについて水浸沈下試験を行った。

(2) pF 試験

締固めた泥岩試料の水分特性曲線を知るために、 pF

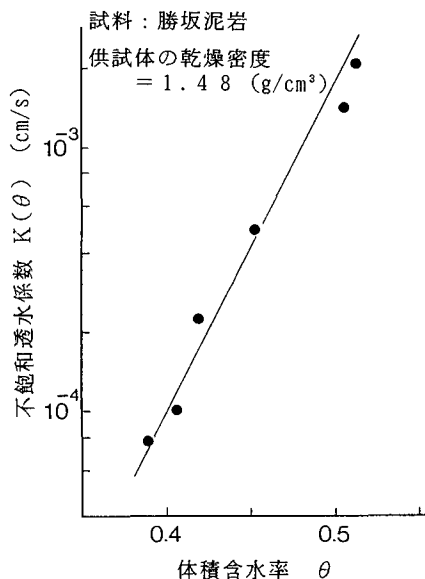


図-3 締固めた泥岩試料の不飽和透水試験結果の例

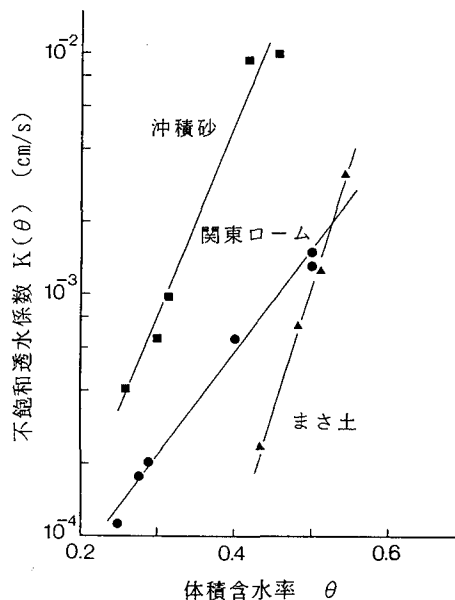


図-4 各種不飽和土の透水試験結果

試験を実施した。pF試験には、サクシヨンの程度に応じて吸引法や遠心法、蒸気圧法などがあるが、比較的サクシヨンの小さい範囲での問題を扱う本研究では、「吸引法」を用いて含水比とサクシヨンの関係を捉えることとした。図-2は、締固めた泥岩材料に対して、pF試験から得られた両者の関係を表す一例である。一般に、排水過程と吸水過程ではその関係が異なることが知られている。本研究は締固めた泥岩材料の水浸沈下現象を対象にしているため、吸水過程に絞って関係を求めたことは言うまでもない。これを見ると、データに多少のばらつきがあるが、狭いpFの範囲においては、水分特性曲線すなわち含水比とサクシヨンの関係曲線はほぼ直線でもって近似できることが分かる。ここで、水分特性曲線をあえて直線近似する理由は解析を容易にしたいためにすぎない。なお図中のpF=2.8以上については、遠心法によって求めた結果を参考までに併記したものである。

表-2 不飽和透水試験に用いた試料の基本的性質と供試体の密度

基本的性質 と乾燥密度	試料名		
	関東ローム	沖積砂	まさ土
土粒子密度 (g/cm ³)	2.86	2.65	2.68
有効径 (mm)	0.74	1.33	1.31
均等係数	29.2	4.4	6.8
塑性指数	36.4	—	—
乾燥密度 (g/cm ³)	0.74	1.33	1.31

の関係がほぼ認められる。なお参考までに、他の種類の不飽和土に対する同様な試験結果を合わせて図-4に示しておく(試料の基本的性質および供試体の密度は表-2のとおりである)。

(3) 不飽和透水試験

不飽和状態にある泥岩試料の透水係数を求めるためには、土壌物理学の分野で考案されている「不飽和透水試験」を行う必要がある。幾つかの試験法が提案されているが、大別すると、定常法と非定常法がある。本研究の水浸沈下試験では一定の正圧を負荷して土中水の浸透を図る方法を採用するために、その条件に合わせる意図をもって定常法のうちの加圧法を採用した。供試体の乾燥密度が一定した1.48 g/cm³になるよう静的に締固めた泥岩試料の体積含水率 θ と透水係数 $K(\theta)$ の関係を求めた例を図-3に示しておく。これを見ると、 $K(\theta) = c \theta^m$

(4) 圧縮試験

締固めた泥岩試料の側方拘束状態下での変形係数 E_c を求めるために、圧縮試験装置(オゾメータ)を利用した圧縮試験を行った。まず、含水比を調整した泥岩試料を圧密容器に入れて、所定の乾燥密度になるように静的荷重を順次増大させ、供試体を作成した。その後、荷重を作用させたまま供試体を水浸させ、水浸状態で増分荷重を与えた。このような圧縮試験から得られた載荷重とひずみの関係の例を図-5に示しておく。一般に、変形係数 E_c は応力レベルによって変化するので、圧縮試験での荷重は水浸沈下試験での作用応力に対応するものを与える必要がある。また E_c の値は水浸前後で若干

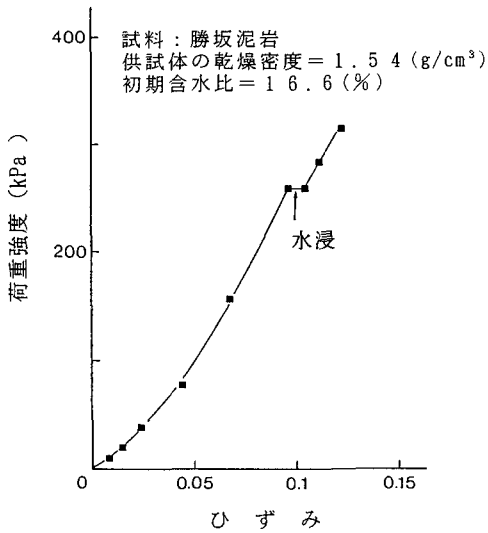


図-5 締固めた泥岩試料の圧縮試験結果の例

変動するので、解析においてその平均値を用いるか、水浸後の値を用いるかは、その選択に注意を要する。本研究では、水浸後の E_c が水浸沈下量に強く影響すると考えられるので、それを用いることにした。また参考までに、図-5の試験と同じ条件下で行われた圧縮試験の途中段階において測定された水浸前後での供試体試料の粒度を図-6に示しておく。水浸に伴って試料の細粒化が生じている様子が分かる。

(5) 水浸沈下試験

締固めた泥岩試料の水浸沈下特性を明らかにするために、解析モデルを構築したが、その妥当性を検討するために、いくつかのケースについて水浸沈下試験を試みた。

ある一定の含水比 w (勝坂泥岩では約 17%，身延泥岩では約 14%) を有する泥岩試料を直径 15cm のモールド内に入れて、静的荷重 p の作用のもとで締固め、個々に異なった空気間隙率 V_a ($=10\sim 25\%$) を有する供試体を作成した。なお、供試体の高さは 2cm から 10cm の範囲内で任意に変えることにした。貯水容器の水位を一定に保たせながら、載荷重 p を作用させたまま供試体全体を水浸させ、供試体底面からの水の浸透を許して、その後に継続的に発生する供試体の沈下量を測定した。なお、供試体底面での水圧を一定に保たせた理由は、不飽和透水試験で供試体両端面に対する加圧を一定とした条件にできるだけ合わせようとしたためである。図-7は、粒径 $=19.0\sim 37.5$ mm という粒度の粗い試料を対象とした場合における典型的な水浸沈下試験結果を示す。この結果を含めて全体的に見られる特性は次のとおりである。まず、水浸沈下量の時間的な変化については、圧密沈下のそれとほぼ同様な関係が得られる。ただし、空

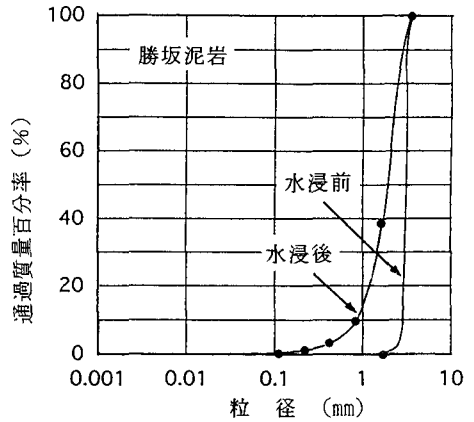


図-6 水浸前後における泥岩試料の粒度の比較

供試体の初期高さ = 10 cm
初期含水比 = 14.2 %

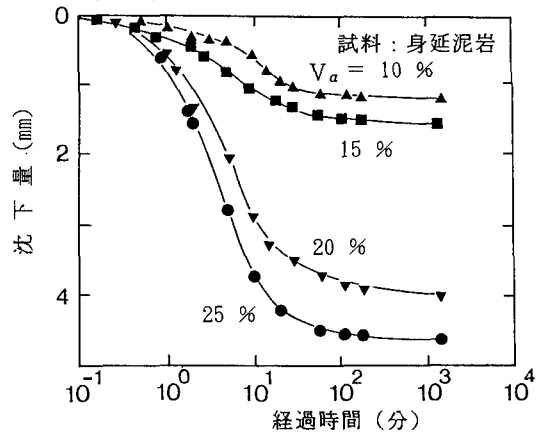


図-7 締固めた泥岩試料の水浸沈下試験結果

気間隙率が $V_a = 10\%$ 、 15% のように小さい供試体では、水浸後に比較的小さい圧縮沈下が発生し、その進行が時間の経過のなかでほぼ終息に向かう。一方、空気間隙率がある一定の数値 (図-7では、 $15\sim 20\%$ の間の数値) を超えると、沈下の発生量が急激に増大して、空気間隙率の増加に対して必ずしも単純に増すわけではないことが分かる。この理由としては、空気間隙率が小さい場合は、構造骨格が安定しており、水浸に伴う泥岩粒子の軟弱化が主に水浸沈下に関与するのに対して、空気間隙率が大きい場合は、骨格のコラプスと粒子の軟弱化の両方が起こって、それが水浸沈下に反映されるためと推測される。

また、泥岩試料の粒度が水浸沈下に及ぼす影響を調べるための試験を実施した。水浸後 24 時間が経過した時点での沈下量について、その結果を図-8に示しておく。これを見ると、水浸沈下量は泥岩試料の粒度によって大きく影響を受け、粒度が粗いほど相対的に増大すること、

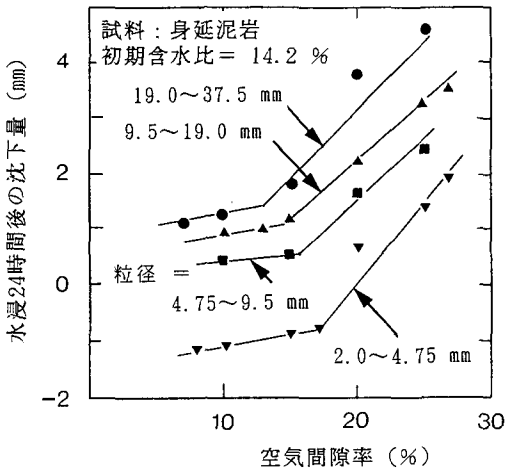


図-8 粒度の異なる泥岩試料に関する空気間隙率と水浸24時間後の沈下量の関係

粒度の細かい供試体では、空気間隙率が小さい場合に、むしろ膨潤が起ることが分かる。これらの実験事実から、水浸に伴って発生するスレーキング現象によって泥岩粒子が細粒化を起し、その程度が粒度の粗い試料ほど顕著であること、また粒度の粗い試料ほど供試体内での個々の間隙が大きく、それを埋めるように細粒化した泥岩粒子が移動を起し、結果的に沈下量が増大すること、粒度が細かい試料では、泥岩粒子のスレーキングよりも膨潤が相対的に卓越することなどが推定できる。

なお、図-8の結果から判断すると、前述した解析モデルは、均質性が高い細粒試料を対象とし、水浸沈下の発生を前提とするものであるから、その適用範囲は粒径が2.0~4.75mmであり、かつ沈下を発生させる20%以上の空気間隙率をもつ試料の場合に限定されよう。

4. 計算結果と実験結果の比較および考察

ある一定の空気間隙率を有する供試体を対象にして水浸沈下試験を実施するとともに、それに対応する条件のもとで2章で展開した理論に基づき数値計算を行い、両者の比較から、理論の妥当性について検討した。

(1) 数値計算の方法

式(8)に含まれる不飽和透水係数 $K(\theta)$ は、図-3または図-4の不飽和透水試験結果から明らかなように、 $K(\theta) = c \theta^m$ として表せる。また、図-2のような含水比とサクシジョンの関係、すなわち水分特性曲線は本研究で扱う含水比の範囲において直線近似ができるので、

$$\begin{aligned} d\theta/d\phi &= (d\theta/dw) (dw/d\phi) \\ &= (\rho_d / \rho_w) \cdot \exp(2.3\beta w) / (-2.3\beta \phi_0) \end{aligned}$$

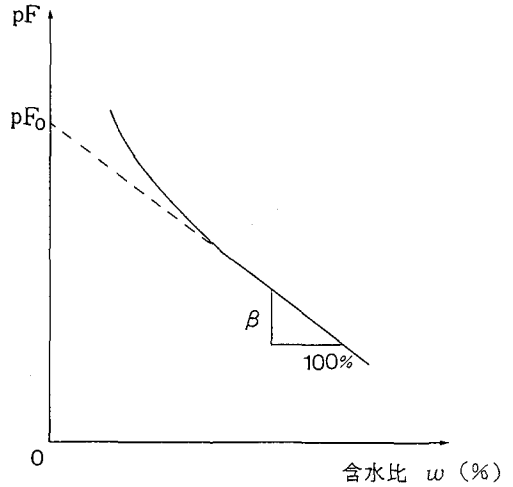


図-9 水分特性曲線の直線近似化

として表せる。なお、式中の β は直線近似した水分特性曲線の絶対勾配であり、またその含水比 $w=0$ に対応するサクシジョンを pF_0 とすると、 ϕ_0 は $\phi_0 = -10^{pF_0}$ (<0)である(図-9を参照)。よって、 $D(\theta) = K(\theta) / (d\theta/d\phi)$ は、

$$D(\theta) = A \theta^m \cdot \exp(-\alpha \theta)$$

になる。ただし、 $A = -2.3 \beta \phi_0 c (\rho_w / \rho_d)$ である。これより、供試体高さを H として、補助変数 $t' = t / H^2$ 、 $z' = z / H$ を用いると、式(8)は、

$$\begin{aligned} \partial \theta / \partial t' &= D(\theta) [(m/\theta - \alpha)(\partial \theta / \partial z')^2 \\ &\quad + (\partial^2 \theta / \partial z'^2) + (cm H \theta^{m-1} / D(\theta)) (\partial \theta / \partial z')] \end{aligned} \quad (8')$$

となる。これを差分式に変換して、境界条件の(1) $t' = 0$ で $\theta = \theta_0 = (\rho_d / \rho_w) w_i$ 、(2) $z' = 0$ で $\theta = \theta_f = (n_0 + \varepsilon_{zf}) / (1 + \varepsilon_{zf})$ 、(3) $z' = 1$ で $\partial \theta / \partial z' = 0$ のもとで差分計算を行えば、任意の時刻と位置での体積含水率 θ が求まる。なお、 w_i は供試体の初期含水比である。また、 n_0 は供試体の初期間隙率であって、 $n_0 = (\rho_w G_s / \rho_d - 1) / (\rho_w G_s / \rho_d)$ によって評価できる。また、 t' と z' の刻みについては、収束条件を満たす様々な場合について差分計算を行い、計算結果が刻みの大きさにかかわらず一定になるもののうち、最も大きい刻みを用いた。 θ が求まれば、式(5)ならびに間隙率 n と圧縮ひずみ ε_z の関係式を合わせて用いることにより、水浸後での任意時間における供試体内の飽和度と圧縮ひずみ量が求まり、水浸沈下量を算定できる。ただし、境界条件(2)で用いられる θ_f は事前には分からないという問題があるので、まず、 $\theta_f = n_0$ と仮定して水浸沈下の全過程について差分計算を行い、得られ

表-3 数値計算に用いた定数(勝坂泥岩)

供試体の力学状態を表す定数		乾燥密度 (g/cm ³)	
		1.40	1.47
初期間隙率	n_0	0.48	0.45
初期体積含水率	θ_0	0.24	0.25
水分特性曲線の絶対勾配	β (%)	24.7	21.5
含水比0の対応サクシオンpF ₀		6.91	6.30
変形係数	E_c (MPa)	3.2	5.4
透水特性を表す係数	c (cm/s)	943	670
透水特性を表す冪数	m	13.5	13.6

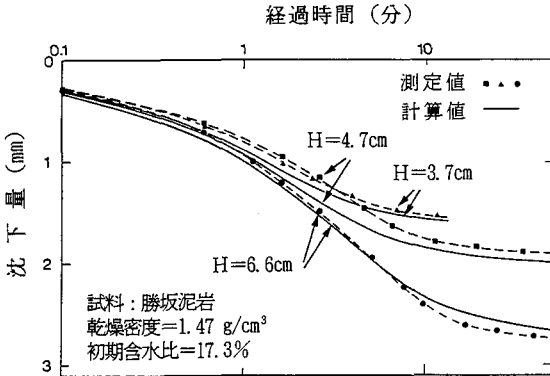


図-10 水浸沈下に関する測定値と計算値の比較 (供試体の高さを変化)

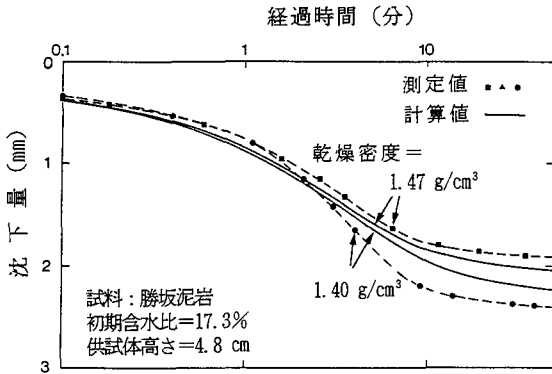


図-11 水浸沈下に関する測定値と計算値の比較 (供試体の密度を変化)

た ε_{zf} を用いて $\theta_f = (n_0 + \varepsilon_{zf}) / (1 + \varepsilon_{zf})$ から修正を施し、また水浸沈下の全過程の差分計算をやり直すという具合にして、解の整合性が確認できるまで差分計算全体を数度繰り返す、結果として精度の高い数値計算を行えるようにした。

(2) 計算値と測定値の比較とその考察

まず、乾燥密度が 1.40g/cm³ または 1.47g/cm³ (空気間隙率で 23.3% または 20.0%) であるような比較的大きい水浸沈下が発生する場合について、水浸沈下の測定値と計算値の両者を比較すると、図-10および図-11のようになる。なお、計算に用いた諸パラメータの数値はすべて前述の室内試験から求めたものであり、その一覧を表-3に示しておく。

図-10は、含水比=17.3% (JIS A 1210による最適含水比) のもとで乾燥密度が 1.47g/cm³ (空気間隙率では

20.0%) になるよう静的に締固めた泥岩材料の供試体について、その高さを変えた場合の経過時間と水浸沈下量の関係を表す。また図-11は、供試体の厚さを一定にして、供試体の乾燥密度を 1.47g/cm³ と 1.40g/cm³、すなわち空気間隙率で 20.0% と 23.3% に設定した場合の同様な関係である。これを見ると全体的に、測定値と計算値の両者はほぼ同じような水浸沈下特性を示していることが分かる。すなわち、最終的な水浸沈下量は両者でほぼ一致した結果になること、沈下の経時的な進行についてはその変化特性が全体的にみて両者で類似した様相になっていること、半面、変化速度については計算結果と実験結果で僅かながら相異なる部分があることなどが分かる。沈下の速度に影響する要因は供試体内での間隙水の浸透性にあるので、水浸沈下試験での間隙水の浸透機構が不飽和透水試験のそれと若干異なることが考えられる。このため、水浸沈下試験での動水勾配と透水試験で設定する動水勾配を等しくしたり、供試体の密度や載荷重強度などが同じ条件になるよう細心の注意を払ったが、結局は差異を解消することはできなかった。ここには、泥岩のように水浸に伴ってスレーキングすなわち粒度変化を起こす材料または粒子骨格のコラプスが発生する材料に対して、従来の不飽和浸透理論をそのまま適用することに限界があるのかも知れない。しかし、このことに関して明確な見解を打ち出すには、今後のさらなる研究が必要であろう。

また、展開した理論の妥当性を局所的な観点から検討するために、水浸沈下過程の途中段階における供試体内部の含水量の分布状態を調べた。図-12は、供試体内部の各点における含水比の測定値と同じ過程段階での計算値を比較したものである。両者の差異が認められる部分が一部存在するが、全体的には良い一致がみられ、この点については理論の妥当性がほぼ確認できると言えよう。

以上のような理論結果と実験結果の両者の比較から、構築された理論は、全体的にはほぼ泥岩材料の水浸沈下現象を説明するものになっていると考えられる。しかし、今回の解析では、間隙空気圧を無視し、不飽和パラメータを $\chi = S_r$ で近似しているため、この点について

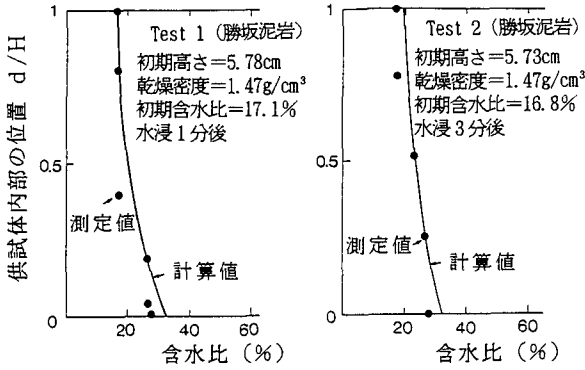


図-12 水浸沈下試験中における含水比の測定値と計算値の比較

は今後の改善が必要であると考える。

また本論では、構築理論の妥当性を検証することを目的の一つとしたために、土質パラメータの数値を決定するための各種室内試験ができるだけ容易に実施されるように供試体の空気間隙率が比較的大きい場合、すなわち比較的大きい水浸沈下が発生する条件のもとでの検討を中心に行った。今後は、締固めた泥岩材料が小さい空気間隙率を有して水浸沈下をあまり起こさない場合やむしろ膨潤を起こす場合を含めて、より高い視点から空気間隙率が水浸沈下特性に及ぼす影響を理論解析的に明らかにしていく必要がある。

5. 結論

本研究においては、典型的な軟岩である泥岩を盛立て材料として用いた場合に工学的問題を引き起こす恐れのある水浸沈下現象に注目して、その発生機構を考慮した理論の構築を行うとともに、各種室内試験を実施して、理論結果と実験結果を比較・検討し、水浸沈下に関する一般的特性を追究した。その結果、下記のような結論を得た。

(1) 締固めた泥岩材料に発生する水浸沈下現象について、

不飽和浸透問題と不飽和体の変形問題を結び付ける解析手法により理論的に追究し、解析モデルを構築した。

(2) 室内実験における測定値と構築した理論に基づく数値計算値との比較から、締固めた泥岩材料の空気間隙率が比較的大きい場合について、理論の妥当性を検証した。その結果、理論によって、水浸沈下および含水量の経時的な変化を定性的かつ定量的にほぼ説明できた。

(3) 締固めた泥岩材料の粒度は水浸沈下に大きく影響して、粒度が粗いほど沈下量が相対的に増大すること、また粒度が細かい場合には、空気間隙率が非常に小さくなるまで締固めると膨潤が発生することが水浸沈下試験結果から明らかになった。

なお本研究では、この種の研究の端緒として、理論の構築と解析が比較容易にできるように、岩粒子の均等性が高く、粒度の細かい泥岩材料を対象の中心に据えた。実際には、泥岩塊材料の粒度は多岐にわたるので、そのような場合に対する研究を進展させる必要がある。

参考文献

- 1) 土質工学会編：日本の特殊土（土質基礎工学ライブラリー10），pp.314-342,1974.
- 2) 中岡時春，望月秋利，阪口 理：堆積軟岩を用いた盛土造成工事の施工管理，堆積軟岩による盛土の工学的諸問題に関するシンポジウム，pp.205-212,1995.
- 3) たとえば，土質工学会編：土質工学用語辞典，p.101,1985.
- 4) 福田 護，中沢重一：盛土地盤の浸水に伴う沈下とその解析について，土質工学会論文報告集，第17巻，第2号，pp.65-73,1977.
- 5) 野田 耕，西 勝：軟岩盛土の水浸沈下に関する研究，土木学会論文集，第391号，pp.77-86,1988.
- 6) 村上幸利：締固めた軟岩材料の力学的安定性に及ぼす岩の性質と締固め度の影響，土木学会論文集，第511号，pp.109-116,1995.
- 7) 島 博保，今川史郎：スレーキング材料（ぜい弱岩）の圧縮沈下と対応策，土と基礎，第28巻，第7号，pp.45-52,1980.
- 8) 入江恒爾，荒井克彦，竹内成和：不飽和泥岩の吸水膨張機構，土質工学会論文報告集，第22巻，第2号，pp.142-148,1982.
- 9) 八幡敏雄：土壌の物理，東京大学出版会，pp.71-108,1975.

(1997. 5.22 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON SETTLEMENT CHARACTERISTICS OF COMPACTED MUDSTONE MATERIALS SUBJECTED TO SUBMERGENCE

Yukitoshi MURAKAMI

When mudstone is employed as a fill material, the slaking or degeneration of the material often causes the engineering problem such as excessive surface settlement or slope failure of an embankment. The present study is theoretically and experimentally concerned with the settlement characteristics of compacted mudstone materials subjected to submergence, by considering the mechanical properties of compacted mudstone and the mechanism of unsaturated seepage flow. Although there remains the problem that the conditions treated in this study are strongly idealized and restricted, it has been found that the theory can explain the time history of both settlement and moisture content of a compacted mudstone material subjected to submergence. Moreover, some settlement characteristics has been revealed from the experimental results.