

地盤の不飽和浸透特性と測定法の検討

岡林 巧^{†1}・荒牧 憲隆^{†2}・杉尾 哲^{†3}

*Unsaturated infiltration characteristic of the ground
and examination of metrology*

Takumi OKABAYASHI, Noritaka ARAMAKI and Satoru SUGIO

Features of this research examine the infiltration characteristic and the procedure for measurement of the unsaturation of ground in the in-situ. The stability analysis of the unsaturation ground is possible by the use of existing ground stability analysis software as long as the unsaturated infiltration characteristic of the ground of the in-situ can be strictly input. Pioneering point of this research uses the unsaturated infiltration characteristic of the ground of the in-situ for the stability analysis of the ground while the research of the past has stayed in the data of the laboratory experiment. Moreover, the practical use of this research can design the ground where the unsaturated infiltration characteristic of the ground of the in-situ was strictly used. It is small-scale, and the unsteady seepage testing method with a cylinder is not only easily but also is unnecessary electricity, and a measurement analysis of identification for a short time. The unsteady seepage testing method with a cylinder is extremely effective to investigate the unsaturated infiltration characteristic of the ground.

Key Words: In-situ permeability test, infiltration test, double-ring, shirasu

1. まえがき

南九州が日本でも有数の多雨地帯に属することに起因して、地盤は雨季末期や台風時にしばしば破壊する^{1),2),3)}。このような地盤環境を反映して、地盤の雨水排水施設や流出抑制施設あるいは道路、港湾施設等の常時・地震時に関わる地盤の安定解析には、降雨下における地盤への浸透量あるいは地盤内圧力水頭など評価することが重要であり、このため地盤の原位置での不飽和浸透特性を的確に把握することが強く要求される。ここに、地盤における原位置での雨水浸透の測定については、西らや雨宮ら、杉尾らの報告などがみられ、採取した乱さない試料による不飽和浸透特性の同定については、中野ら、西垣らの報告などにみられるが、そのような報告は極めて少いのが現状である。これは、これまでの水の浸透に関する研究が主に乱した試料に

ついで室内実験によってなされていたこと、および設計・施工において不飽和浸透が考慮されるようになったのは、つい最近であるため、原位置での不飽和浸透特性を求めるための測定法そのものが確定されていないことに起因している^{4),5),6)}。

従来の研究に見られた地盤の不飽和浸透特性を求める原位置試験では、降雨発生装置や揚水井あるいは注水孔などが用いられた。いずれの試験方法もお互いに様々な特徴を有しているが、今後多くの地点とさまざまな地質状況のもとで不飽和浸透特性を求めるために用いられる原位置試験法は、まず試験装置の設置が容易でその取り扱いや計測に熟練を要しないことが大切である。さらに、その測定に電力を必要としないことが求められる。そこで、本研究では、新たに提案された試験装置の設置が容易でその取り扱いに熟練を要さず、測定に電力を要しないことの条件を満たしている測定方法として原位置において、地盤に打ち込んだシ

†¹土木工学科
†²崇城大学
†³宮崎大学

リンドからの浸透量の非定常変化を測定するものを検討した。また、不飽和土の浸透特性に関する各種パラメータの設定方法を試みた。さらに、北西部地震により液状化災害を起こした原位置しらす地盤へ研究成果を応用した。

2. 既往研究による不飽和浸透特性

不飽和帯の浸透を解析するためには、対象とする地盤の境界条件のほかに、不飽和土の浸透特性曲線を必要とする。ここに、地盤中の体積含水率 s と大気圧を基準とした圧力水頭 h との対象関係を示した水分保持曲線、および不飽和浸水係数と飽和透水係数の比 kr と h との対応関係を示した相対透水係数曲線は、種々の推定式で表現されており、その代表的なもの (1) ~ (5) 式) を示す⁶⁾。

Burdine 式

$$Se = \left(\frac{h}{c} \right)^n, kr = Se^{3+2/n} \quad \text{----- (1)}$$

Mualem 式

$$Se = \left(\frac{h}{c} \right)^{2m}, kr = Se^{5/2+2/n} \quad \text{----- (2)}$$

van Genuchten 式

$$Se = \left\{ \frac{1}{1 + |a| |h|^n} \right\}^m \quad \text{----- (3)}$$

$$kr = Se^{1/2} \left[1 - \left(1 - Se^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad \text{----- (4)}$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad \text{----- (5)}$$

ここに、 c : 限界毛管水頭(cm) s : 飽和体積含水率(m^3/m^3) r : 残留体積含水率(m^3/m^3)である。

3. 原位置におけるシリンダによる非定常浸透量試験法⁶⁾

この測定方法の概要を図1に示す。図のように、地用面に打ち込んだシリンダ内の水深を一定に保ちながら地盤中に水を浸透させて、シリンダからの浸透量の時間的変化を測定するものである。シリンダによる非定常浸透量試験を行なうにあたって、事前に現場調査を行なわなければならない。

現場調査を行なう場合、以下の点に注意する必要がある。

- ・土中に大きな石を含まない場所
- ・木の根が含まれていない場所

一般の土ではシリンダを打ち込むことが非常に困難なためなるべく障害がない地盤を選ぶことが重要である。また、水が容易に手に入る場所(外側のシリンダには常に水を注入する必要がありマリOTTタンクには膨大な水を入れる必要があるため)できるならこの点は満たしておくとう便利である。また、雨の降った後は、地盤が多くの水分を含んでいるために、透水量が変わってくるので、雨の降った翌日などは避けた方が良い。

まず、浸透試験準備において場所が確定し地盤を整えた後、浸透試験は、図1に示すように直径280mm、高さ350mmのシリンダと直径450mm、高さ300mmのシリンダを地盤に二重に打ち込み、内径360mmのマリOTTタンクから注水することによって、内側のシリンダ内の水深を一定に保っておいて行なう。この時、シリンダからの浸透に伴って、マリOTTタンクから給水され、タンク内の水深が減るので、タンクに付属したマンメータによってタンク内水深の変化を測定する。その水深変化を用いて、内側のシリンダから地盤への浸透量の非定常変化を求める。

なお、シリンダの打ち込み時には、シリンダと地盤との密着性を保つために、絶えず鉛直に打ち込むように配慮するとともに、打ち込み後には、シリンダと地盤との間にできた隙間に目詰めするために高濃度泥水(ペントナイトのペースト状のもの等)を挿入するなどの必要がある。また同時に打ち込み場所の近くの土を密度、変水位試験用試料として採取しておく。次にあらかじめシリンダ内にビニール袋で遮水した状態で給水する。マリOTTタンクはタンク内パイプで底部位置を設定することができるが、タンク内上部の空気圧が大気圧よりも低い状態にならないとシリンダ内の水位を一定に保つ機能を果たせない。したがって、試験

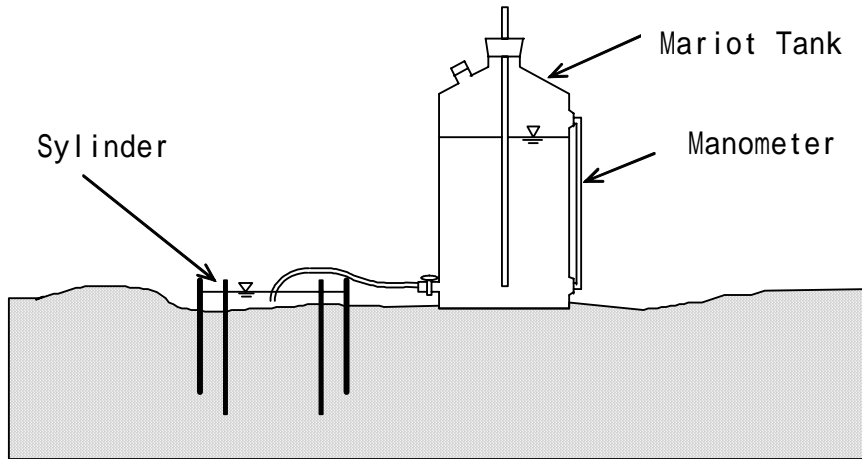


図 1 原位置浸透試験装置

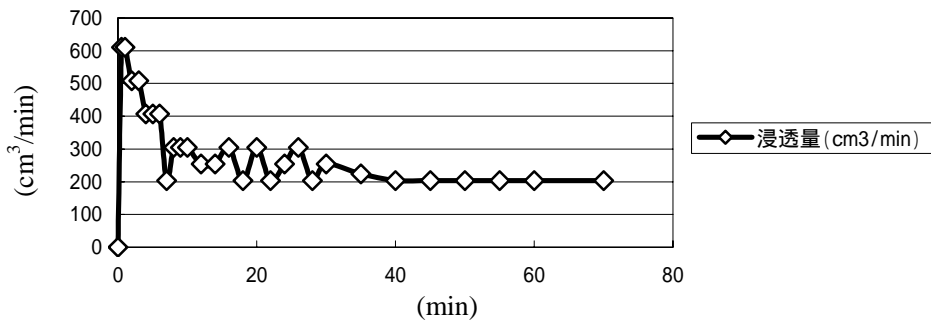


図 2 浸透量と浸透時間

準備時にタンクを密閉した状態で排水させて、タンク内に空気を吸い込む音を聞き、機能を果たす状態にあることを確認している。以上の準備が整った後に、給水を開始し、浸透量の測定を行なう。

給水開始は、ビニール袋の底を切開し、同時にマリオットタンクのcockを開け、ストップウォッチをスタートさせた時点から測定を開始した。本測定は、シリンダ内の水深は 20cm であった。測定時の外側のシリンダ内への給水は、その水位と内側シリンダ内の水

位との相違が生じないように配慮しながらマリオットタンクとは別に行なった。測定は始めの 0～10 分の間は 1 分、10 分～30 分の間は 2 分、30 分～60 分は 5 分、60 分～120 分は 10 分、以降は 30 分間隔として測定を行なった。また計測間隔において測定はタンクから供給量が一定になるまで継続した。

4. シリンダによる非定常浸透試験の測定結果

図 2 には、シリンダからの浸透量と時間の関係を示

表 1 対象地盤の物性

含水比 w %	41.8	土粒子密度 s g/cm ³	2.64
湿潤密度 t g/cm ³	1.59	間隙比 e	1.35
乾燥密度 d g/cm ³	1.12	飽和体積含水率 s	0.575
透水係数 k_s cm/s	4.46×10^{-4}	飽和度 S_r %	81.48

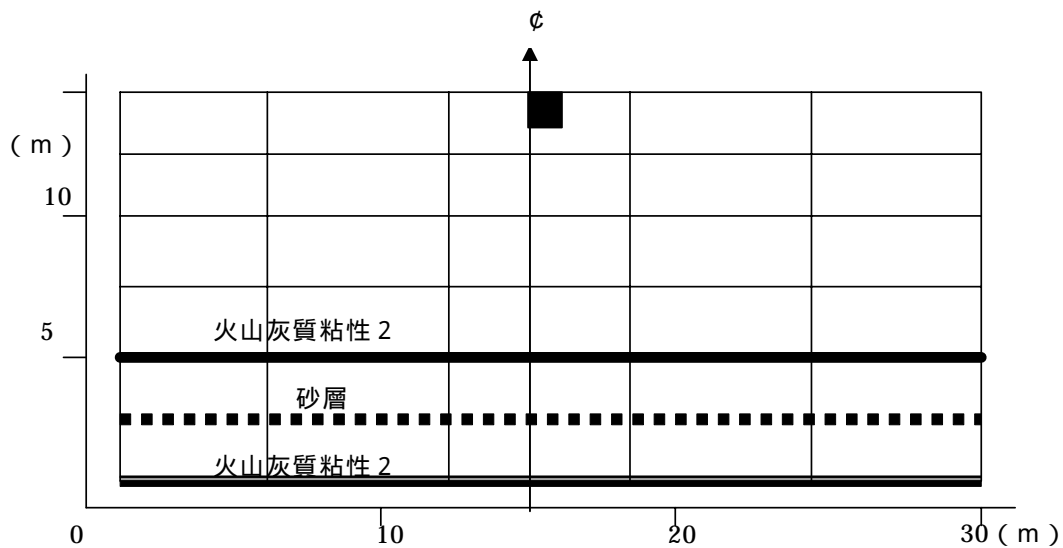


図 3 地盤構成図

している。本測定ではマンメータの読み取りを mm 単位の直読みによって行なっているため測定値がばらついているが浸透量は試験開始直後に特に大きな値を示し、時間の経過とともに次第に減少している。測定開始 40 分を過ぎたあたりより一定値を示して定常値化する傾向にあることが分かる。

5. 有限要素法による不飽和浸透流の再現

5.1 解析方法

解析を行うために、密度試験、含水比試験、変水透水試験を行いこれらの値をもとに不飽和浸透試験を行う。その結果を表 1 に表す。

表 1 に示した物性値を用いて、まず、図 3 に描いたように粗いメッシュによる不飽和浸透解析を行う。これは、この後に行う不飽和浸透流再現のための解析初期状態の圧力水頭を求めるために、南九州地域の年平均

降水量約 2,500mm の内、1,000mm が年間を通じて平均的に分散して定期的に地盤に浸透しているとみなして行っている。この解析により、図 3 に示す黒塗りの部分の圧力水頭を求めたものを利用している。

次に、図 4 に示す対象領域(図 3 中、黒塗り部分)において、原位置浸透試験で発生させた不飽和浸透状況を有限要素法による飽和・不飽和浸透流の数値解析で再現する。これにより、この地盤の不飽和浸透特性を同定した。解析に用いた軸対称鉛直二次元の流れの場合における飽和・不飽和浸透流解析の基礎方程式は、中心軸からの水平距を r 、基準面からの鉛直上向きを z とする次式で表される。

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + S_0\right) \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial}{\partial z} + k \right)$$

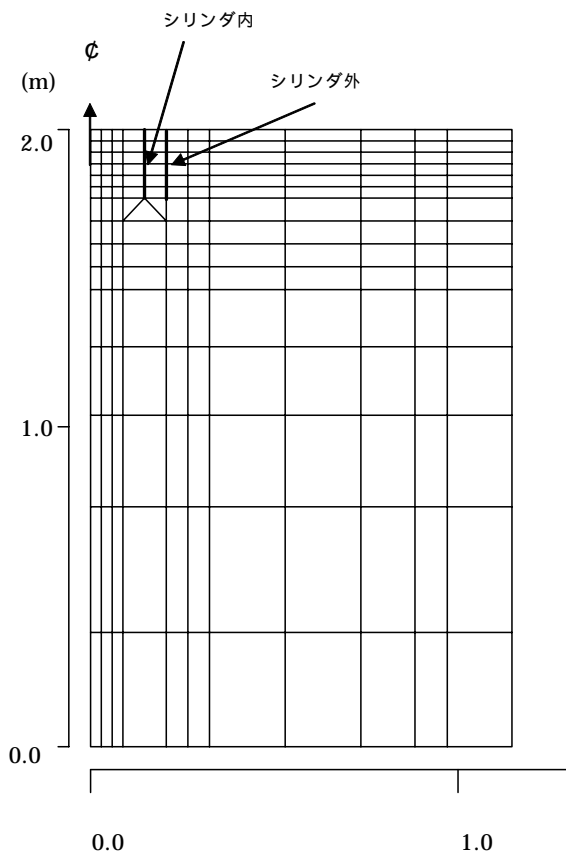


図 4 解析対象領域

ここに、 S_0 は飽和領域で 1、不飽和領域で 0 の値を持つ係数、 S_0 は比貯留係数、 k は透水係数(不飽和領域： k_s () 飽和領域： k_s) を表している。解析領域は図 4 に示すごとくシリンダ底面部分を密に要素分割し、シリンダから離れるにつれて粗に分割すると要素総数が 149、節点数が 170 となる。この程度の要素数の数値解析は、既設のパソコンレベルで行えるから、後述するように種々の推定式の中で平均な値を示す *van Genuchten* 式を対象として、浸透量の算定値と測定値の残差の平方の和が最小になるようにパラメータを逐次近似しながら同定することとした。

特に前述した *van Genuchten* 式のパラメータの内、飽和体積含水率 s_s は、原位置で直径 4.6cm、長さ 10cm のシリンダを地盤に打ち込んで採取した不攪乱状態の土について土質試験を行って間隙率を求め、この値と同値であるとみなすことによって決定できる。また、

飽和透水係数 k_s は、同様な方法で採取した試料を用いて変水位透水試験を実施することによって決定できる(表 1 参照)。

これらの値から有効飽和度 S_e が求められ、次式で定義される。

$$S_e = \frac{\left(\frac{\phi - r}{s - r} \right)}{\left(\frac{\phi - r}{s - r} \right)} \text{----- (7)}$$

$$= \frac{\rho_d}{\rho_w} \times \frac{W}{100} \text{----- (8)}$$

求められた S_e を次式に代入し、 k_r を求める。

$$k_r = S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \text{ ----(9)}$$

この後、求められた諸値を次式に代入することによって、 k_r が求められる。

$$S_e = \left\{ \frac{1}{1 + |a| |r|^n} \right\}^m \text{ ----- (10)}$$

上記のことを r 、 a 、 n を変え k_r 、 S_e の値を解析ソフト *Soil2F*⁶⁾ で解析をし、その解析結果から流速と解析対称領域の面積から浸透量を求め、浸透量の計算値と測定値の残差の平方和が最小になるようにパラメータを逐次近似しながら同定を行う。

5.2 不飽和浸透流の再現

浸透試験結果を参照しながら *van Genuchten* 式のパラメータを逐次修正し、飽和透水係数も適宜修正して解析を進め、図5の解析結果を得た。

図より、解析結果の時間的な浸透量の変化は測定結果とよく一致している。このことから、解析で求めた表2の値が測定地盤の不飽和浸透特性を表していると考えられる。しかし、この結果が妥当なものであるかは、室内試験によって確認することが必要で今後の課題である。

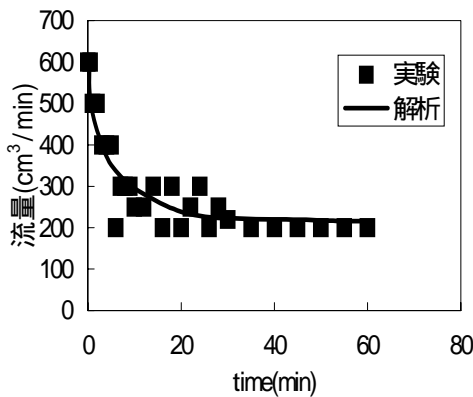


図5 浸透量の実測値と解析値

表2 *van Genuchten* 式のパラメータ

	解析値
k_r (cm/s)	4.5×10^{-3}
r	0
s	0.575
a	0.6
n	4

6. 原位置しらす地盤への研究成果の応用

鹿児島県北西部の薩摩地方を震源とする鹿児島県北西部地震が1997年3月および5月に相次いで発生した。この地震によって鹿児島県北西部地域は、甚大なしらす地盤災害を受けた^{1),2)}。

本研究は、内陸山間部で地震による液状化地盤災害を起こした鹿児島県薩摩郡入来町のしらす地盤をケーススタディとして不飽和浸透特性を考慮した地震時災害の評価を行うものである。

6.1 不飽和浸透特性曲線

1997年鹿児島県北西部地震により液状化地盤災害を受けた入来町の原位置地盤は、物理的性質、化学的性質および土質力学的性質がほぼ一般のしらすと同様であることが山本らの研究^{3),4)}により確認されている。このことから入来町の原位置しらす地盤の不飽和浸透特性は既報⁵⁾で解明したしらす地盤のシリングによる非定常浸透量試験解析結果を用いた。なお、本不飽和浸透特性は、平均的なしらす地盤の不飽和浸透特性を与える *van Genuchten* 式を採用した。

6.2 原位置地盤の飽和・不飽和浸透流解析

図6は、1997年鹿児島県北西部地震により局所的ではあるが約80cm地盤沈下するなど、液状化被害が発生した鹿児島県薩摩郡入来町の原位置地盤の土質区分図を示したものである。この液状化被害を受けた地盤は約30年前に谷部を付近のしらすにより埋立宅地造成

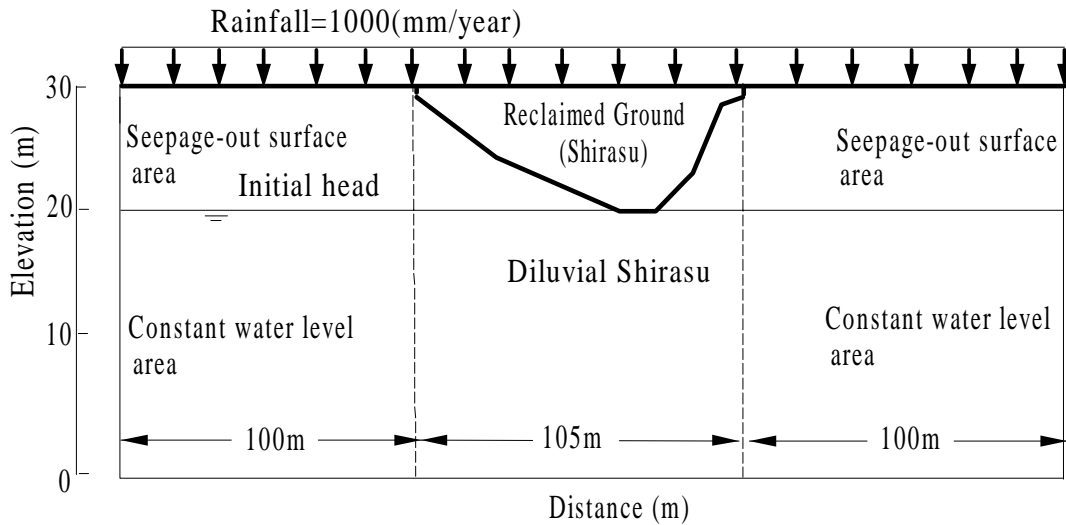


図6 原位置地盤の境界条件（しらす地盤）

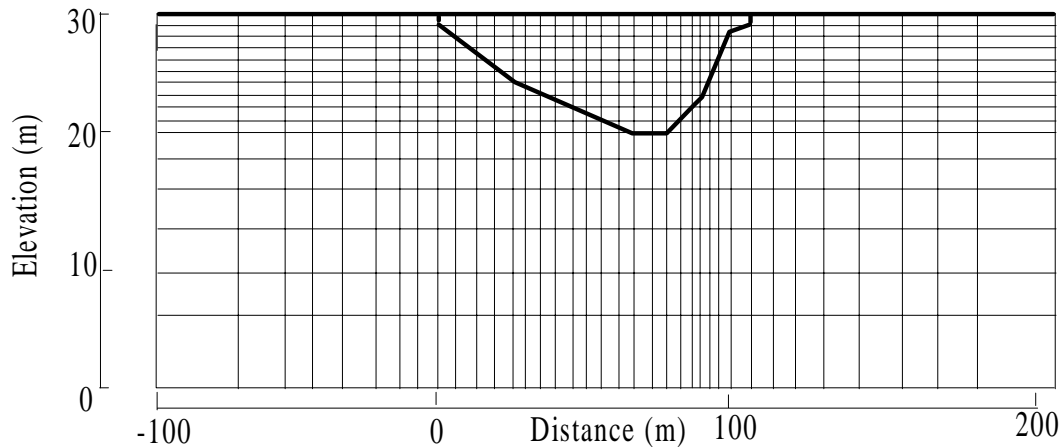


図7 原位置地盤の要素分割図（しらす地盤）

したものであり埋立地盤最下層部は一次しらす層に境界している。また、谷部を造成していることから地震時には側方流動が懸念される地形となっている。さらに、当埋立しらす地盤は、1993年の鹿児島豪雨災害時に谷側部分が大規模に侵食・崩壊した履歴を有している。したがって、1993年の鹿児島豪雨災害以後から1997年の鹿児島県北西部地震までの実質3年間の降雨によりどれだけ地下水面が上昇し、いかなる上昇速度を示して地下水面形状が形成されたかを知ることが本二次元飽和・不飽和浸透流シミュレーションの目的とするところである。また、これらの地盤の浸透特性の成果は、原位置しらす地盤水位調査と併せて地震応答解析に寄与するものである。

浸透流解析は、一般的に普及している解析プログラムを使用して二次元飽和・不飽和浸透流解析を行うも

のとし、浸透流解析の対象範囲は、幅305m深度30mとした。また、初期地下水位は、しらす埋立地盤最下部G.L.-10mに設定した。さらに、両端の境界条件は、G.L.-10m以下を固定水位面としそれより深度の浅い部分を浸出面とした。一方、降雨条件は、南九州地域の年平均降水量約2,500mmの内、1,000mm(0.11mm/h)が年間を通じて平均的に分散して定常的に地盤に浸透しているとみなした。

図7は、更に本二次元飽和・不飽和浸透流解析に使用した原位置地盤の要素分割図を示している。要素数は、630であり、節点数は669である。

二次元飽和・不飽和浸透流解析より得られた原位置しらす埋立地盤内に形成された地下水面形状の経年変化を示したものが図8である。図から明らかなように、降雨浸透にともなうしらす埋立地盤内に形成された地

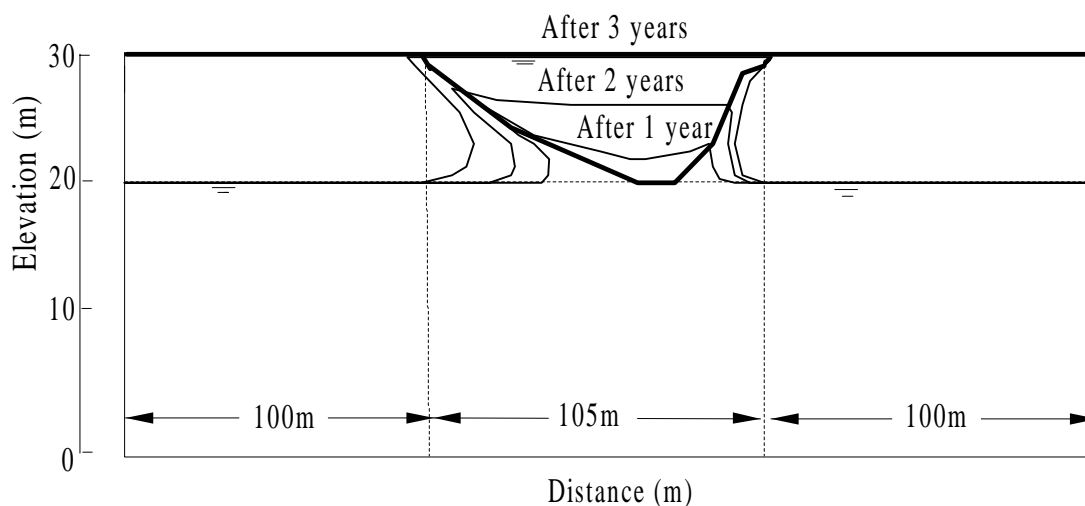


図8 原位置しらす地盤に形成された経年地下水面形状

下水面形状は、時間の経過とともにしらす埋立地盤下部より上方に順次貯留され、3年後にはほぼ地表面に到達している。

この降雨にともなった地下水面の挙動は、1993年の鹿児島豪雨災害により浸食・崩壊した本しらす埋立地盤谷側一部補修以後、実質3年後の1997年鹿児島県北西部地震時に地表面近くまで水位の上昇が確認されており、二次元飽和・不飽和浸透流解析結果と良く対応している。

これらのことから、1997年鹿児島県北西部地震によるしらす埋立地盤の液状化災害は、雨水浸透にともなって地表面近くまで地下水面が上昇したことに主要因の一つを考えることができる。

7. あとがき

今回、原位置における不飽和浸透特性と、その測定方法を確立させることを目的とした原位置浸透試験は、シリンダを用いた非定常浸透量試験として行った。得られた結果を以下に要約する。

(1) 原位置に打ち込んだシリンダからの浸透流量の時間的変化を測定して、その流れの場の飽和・不飽和浸透流について数値解析を行い、浸透流量の算定結果が

実測結果と一致するように、不飽和浸透特性を決定するうえでシリンダを用いた本非定常浸透量試験法は試験装置も大規模ではなく電力の供給も必要とせず、測定方法そのものが熟練を必要としない簡易な試験法であり、しかも比較的短時間の同定解析ですむ有効な方法であることが明らかになった。

(2) 二次元飽和・不飽和浸透流解析より得られた原位置しらす埋立地盤内に形成された地下水面形状の経年変化から、降雨浸透にともなうしらす埋立地盤内に形成された地下水面形状は、時間の経過とともにしらす埋立地盤下部より上方に順次貯留され、3年後にはほぼ地表面に到達することが解明された。この降雨に伴った地下水面の挙動は、1993年の鹿児島豪雨災害により浸食・崩壊したしらす埋立地盤谷側一部補修以後の実質3年後の1997年の鹿児島県北西部地震時には地表面近くまで水位の上昇が確認されており、二次元飽和・不飽和浸透流解析結果と良く対応することが明らかになった。

これらのことから、1997年鹿児島県北西部地震による当しらす埋立地盤の液状化災害は、雨水浸透にともない地表面近くまで地下水面が上昇したことに主要因の一つを考えることができる。

参考文献

- 1) 橋本 勇：鹿児島県北薩摩地方の時代末詳層群の層序と構造、九州大学教養部地学研究報告、8、pp.47-62、1962.
- 2) 米田 茂夫、岩松 輝：鹿児島県北薩地方の四万十層群の層序と地質構造、地質学雑誌、93、pp.881-895、1987.
- 3) 山本 哲朗、岡林 巧、久保 敬作、松本 直、郷 健一、宮部 智之：1997 年鹿児島県北西部地震・同第 2 北西部地震による被害調査、地盤と建設、Vol.15、No.1、pp.57-73、1997.
- 4) 岡林 巧、兵動 正幸、村田 秀一、山本 哲朗、中田 幸男、北村 良介、小林 孝洋、藤井 照久、日下部 伸：1997 年鹿児島県北西部地震および同第 2 北西部地震による液状化地盤災害、自然災害西部地区部会報・論文集-22 号、pp.21-28、1998.
- 5) 岡林 巧：しらす地盤の不飽和浸透特性と非排水せん断挙動、鹿児島工業高等専門学校研究報告、34、pp.29-37、1999.
- 6) 杉尾 哲、岡林 巧：原位置におけるしらすの不飽和浸透特性とその測定法の検討、土木学会論文集、No.503/ -29、pp.39-47、1994.