

第 III 部門

乾燥過程における土の応力測定に基づくひび割れ生成メカニズムの考察

京都大学大学院 学生会員 ○角 裕介
 京都大学大学院 正会員 澤田 茉伊
 京都大学大学院 フェロー会員 三村 衛

1. はじめに

土は、乾燥に伴い収縮するが、境界条件によって収縮が妨げられると、ひび割れが発生する。本研究では、ひび割れの生成メカニズムを定量的に解明することを目的に、乾燥過程における土の応力を測定するための拘束収縮試験を考案した。本稿では、試験法および測定結果を示し、これをもとにひび割れ生成のメカニズムを議論する。

2. 拘束収縮試験

実験試料はまさ土（2 mm ふり通過分）を用いた。図-1 に粒径加積曲線を、表-1 に試料の諸量を示す。

拘束収縮試験では、変形を拘束するためのアルミ部材（縦弾性係数 $6.05 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ）を埋め込んだ直方体の供試体を乾燥させて、ひび割れが発生するまでの供試体断面の応力を測定する試験である。図-2 に示すように、拘束部材の両端部は土と定着しているが、中央部は非定着であるため、中央部のみ体積変化が許容され、乾燥に伴って収縮すると、拘束部材に対して圧縮方向の力を及ぼす。つまり、作用反作用の法則から非定着領域は引張方向の力を受けることになる。そこで、拘束部材に生じるひずみ量を上下 2 枚のひずみゲージで測定し、そのひずみ量から拘束部材にはたらく圧縮応力を求め、拘束部材断面全体に働く圧縮力と供試体断面全体に働く引張力が等しいことから、供試体に働く引張応力を求めることができる。なお、上下 2 枚のひずみゲージで測定することで、供試体の上面と下面で収縮量の差によって曲げ応力が生じた場合、両面のひずみゲージの測定値の平均を取り、上下面で正負対称に生じる曲げひずみを相殺することにより、直ひずみを正確に算出できる。

本実験ではアルミ板を拘束部材とした。図-3 に示すように定着領域では両面テープで貼り付けた珪砂 5 号と供試体の摩擦抵抗によって供試体両側を拘束した。非定着領域では中央にひずみゲージを貼ったあと、テフロンシートを巻き、シリコンオイルを塗布することで、供試体との摩擦抵抗を減らした。図-4 に供試体概略図を示す。なお、供試体は 2 層に分けて締め固め、中央部でのひび割れを誘導するために中央部に深さ 1 mm、幅 1 mm の溝を入れた。作製した供試体は恒温恒湿槽（温度 20 °C、湿度 60%RH）内で電子天秤の上に置き、拘束部材のひずみと供試体質量を自動計測した。また、一部の試験では、自動撮影し、ひび割れが発生する過程を捉えた。本試験では、ひび割れが発生したことを確認して、試験終了とした。

3. ひび割れ生成に至るまでの土の応力

図-5 に、供試体断面に働く引張応力（ kN/m^2 ）と時刻経過のグラフを示す。全体で 8 ケースの試験を行い、赤線で示

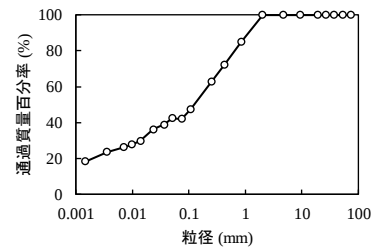
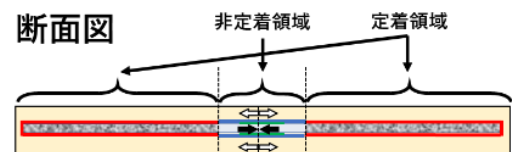


図-1 粒径加積曲線

表-1 試料の物理量

物理量	数値
細粒分含有率	42 %
乾燥密度	1.37 g/cm ³
土粒子密度	2.64
自然含水比	29 %
収縮限界	25.15 %
塑性限界	23.09 %
液性限界	37.42 %
塑性指数	14.79



- …拘束部材にはたらく力
- ⇄ …供試体断面にはたらく引張応力
- と ⇄ は作用・反作用の関係

図-2 測定原理

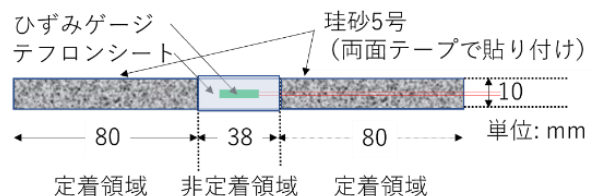


図-3 拘束部材概略図

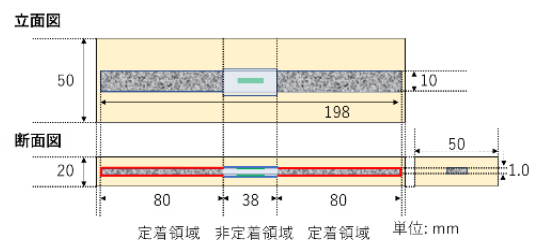


図-4 供試体概略図

したケースを例に詳しく述べる。引張応力は2.83時間後に最大値 11.03 kN/m^2 に達し、3.17時間後に、 3.96 kN/m^2 まで落ち込んだ。実際、カメラで30分おきに撮影した画像（図-6）では2.5時間後の時点ではひび割れが生じていなかったものの、3時間後にはひび割れが生じていたことから、引張応力が最大値に達し

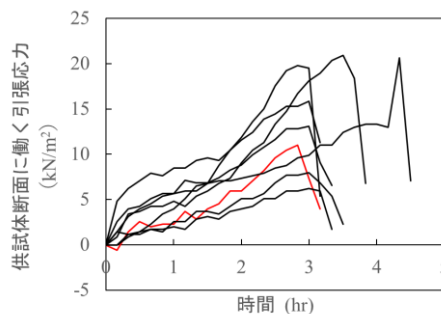


図-5 引張応力の時刻経過

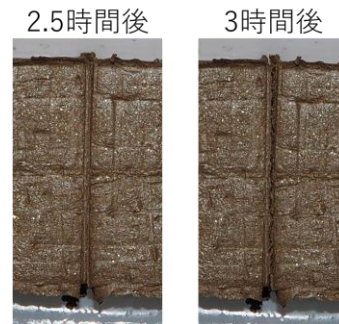


図-6 供試体中央部のひびわれ発生画像

て、急激に減少している理由はひび割れによって応力が解放されたことによるものと言える。なお、拘束部材と土の定着が不十分な場合は、すべりが生じ、引張応力が過小評価されるため、適切な定着長について検討を行った。非定着領域の長さはいずれも 38 mm とし、定着領域の長さを 40 mm （供試体の長さ： 120 mm ）と、 60 mm （供試体の長さ： 160 mm ）に変えて試験を行った。その結果、定着長が 40 mm のケースでは拘束部材と供試体の摩擦が十分でなかったために、滑りが生じ、ひび割れが生じなかったが、定着長が 60 mm のケースでは、定着長が 80 mm の場合と遜色ない結果が得られた。したがって、本供試体については、定着長は 80 mm で十分と判断できるが、収縮・力学特性の異なる土に対してはその都度、検討が必要と考えられる。

4. 拘束収縮試験の最大応力と引張強度の比較

拘束収縮試験で得られた引張応力の最大値が引張強度に相当するものかを検証するため、直接引張試験により、引張強度を調べた。図-7に示すように直接引張試験機は上下2つの治具で板状の物体を挟み、荷重計が取り付けられている上部の治具が一定速度で動くことにより、鉛直方向に引張応力を与え、そのときの荷重を測定することができる装置である。これを用いて、治具の移動速度を最小速度である 10 mm/min に設定し試験を行った。供試体は拘束部材を入れずに、拘束収縮試験と同じ方法で作製した。異なる含水比での引張強度を測定するために、恒温恒湿槽（温度 20°C 、相対湿度 $60\%\text{RH}$ ）で乾燥時間を変えて試験を行った。直接引張試験によって得られた引張強度ならびに拘束収縮試験で得られた結果を図-8に示す。含水比 22.8% 以上の供試体では試験時に自重によって変形し、引張強度を測定できなかった。そこで飽和度 100% （含水比は 35.1% ）で引張強度が 0 kN/m^2 となると仮定して、点線で推測を示した。含水比が高いほど引張強度が低く、 17% 以上で急激に引張強度が減少していることがわかる。



図-7 直接引張試験装置

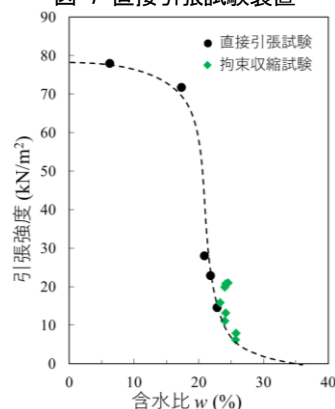


図-8 試験結果のまとめ

拘束収縮試験で得られた引張応力の最大値は、直接引張試験で得られた含水比と引張強度の関係に沿うように分布している。このことから、乾燥過程では、引張応力・強度ともに増加するが、強度に達した時点でひび割れが発生する仕組みと考えられる。なお、拘束収縮試験の引張応力の最大値は、引張強度よりも若干大きい傾向にあるが、これは両試験の試験条件の差異が影響していると予想される。例えば、引張応力の発生メカニズム（外力・内力）の違い、ひび割れ発生までの時間の違い、供試体周囲の摩擦条件の違い、などである。また、直接引張試験については、データ数がまだ十分ではなく、試験を重ねることにより確度を上げる必要がある。

5. まとめ

変形を拘束した条件の下で土を乾燥させる拘束収縮試験により、乾燥に伴い引張応力が増大し、やがて引張強度に達した時点でひび割れが生じることが定量的に示された。考案した拘束収縮試験は、有効なデータが取得できたと考えられるが、今後さらに拘束部材の仕様や供試体寸法等の最適な条件を検討する予定である。本研究は基礎的段階にあるが、将来的には乾燥過程における土の力学的性質の変化およびひびわれ挙動を解明・モデル化することにより、室内保存のため乾燥による損傷が著しい遺構のより良好な保存手法の構築に役立てたい。