


平成 24 年 7 月 1 日

山梨県環境整備センター 安全管理委員会
金子栄広 委員長殿

広島大学大学院工学研究科
機械システム工学専攻 特任教授
工学博士 澤 俊行 

はじめに

山梨大学の坂野先生よりご推薦いただき、委員会（金子委員長）より依頼を受けこのたびの問題、特に斜面設置によるせん断力が遮水シートに及ぼす影響、遮水シートの劣化の有無および影響について第三者の立場として独自に検討し、結果がまとまり次第、結果を述べさせていただきます。

ここでは、主に検討目的、方法および一部結果を述べさせていただきます。

上記の影響を明らかにするために以下のように検討を進めていくこととします。

I. 斜面設置によるせん断力が遮水シートに及ぼす影響

遮水シートに作用する荷重と伸びの関係(応力 - ひずみの関係)を測定し、この結果から有限要素法という計算手法に基づいて遮水シートに作用した力の関係を明らかにします。遮水シートが平面に設置された場合(圧縮力のみ)と斜面に設置された場合(圧縮力とせん断力)とで、局所的に作用する力の大きさが変化するか検討します。

また、この計算結果が妥当な結果であることは計算でのモデルと対応する同様の実験により検討します。

II. 遮水シートの劣化の有無および影響

遮水シートが劣化することが容易に想定できますので、熱による劣化、化学的な劣化を想定し、劣化の有無を表面硬さ、応力 - ひずみの関係、表面観察により検討します。

また、実際の遮水シートについて、硬さ測定および顕微鏡による表面観察を行い、実際の遮水シートの劣化の有無について検討します。

I. 斜面設置によるせん断力が遮水シートに及ぼす影響

① 遮水シートの荷重と伸びの関係について

(劣化させていない遮水シート)

荷重と伸びの関係測定試験（引張り試験）を行う目的

有限要素法に基づく計算を用いるためには、材料（ここでは遮水シート）の基本的な特性である荷重と変形の関係が必要となる。したがって、荷重と伸びの関係を測定することを第一の目的とします。また、第二の目的として、現在遮水シート製造メーカーから提示されている遮水シートの引張り特性の妥当性を検討するためにも、この荷重と変形の関係測定する必要があります。

この測定試験は日本工業規格 JIS K 2651(加硫ゴム及び熱可塑性ゴム・引張り試験方法)に基づき測定試験を行います。遮水シートは、荷重がかかる方向によって変形の仕方が全く異なることが考えられます(このことを異方性と言います)ので、縦(0°)、横(90°)、斜め(45°)の3方向の引張り試験を行います。写真1は実際の試験片をくりぬいた遮水シートを示します。



写真1 遮水シートより切り取られた試験片

実際に測定試験に用いる遮水シート形状について（測定試験片について）

測定試験を行うためには引っ張る遮水シートの形状を決定する必要がありますが、この形状はすでに日本工業規格 JIS K 6251 に示されるダンベル型3号試験片に準じました。図1は試験に用いた遮水シート（試験片）の寸法を示します（ダンベル型3号に準ずる）。

準じたと記述した理由は、日本工業規格 JIS に記載される試験片の厚みは 2mm が基準ですが、

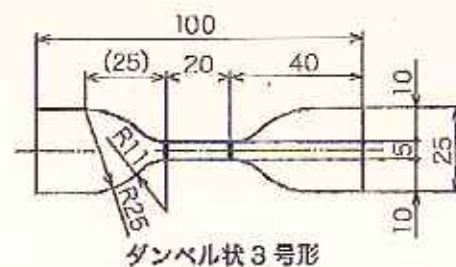


図1 試験片の各種寸法

本試験片は実際に使用される遮水シー
トの厚さが 1.5mm であるため 1.5mm のままとします。

測定方法について

島津製オートグラフ(最大荷重：25kN)を用いて測定試験を行います。写真 2 は実際に使用した測定装置(オートグラフ)を示します。写真 3 は試験中の画像を示します。試験片の広がった部分を器具によつてはさみ、上側の器具が上に上がることにより遮水シートを引っ張ります。この時の引っ張る荷重と伸び量を測定し、荷重と伸びの関係を明らかにします。引っ張る荷重は、ロードセルという装置(荷重を機械的かつ電氣的に測定できる)により測定できます。

伸び量は高性能ビデオカメラを用いて試験中の 2本の白線の間の距離を撮影して画像処理によって測定します。この 2本の白線の距離ははじめ 20mm となるように書いております(写真 3 中になぜか見えません)。)

引っ張る速さ(引張り速度)は日本工業規格 JIS に規定されている 500mm/min(ひずみ速度 2.4/sec) 50mm/min(ひずみ速度 0.24/sec)と 5mm/min(ひずみ速度 0.024/sec)とします。ここで参考として、500mm/min の速さとは 1 分間に 500mm 進む速さです。(ここで引っ張る速さをどの程度にするかは、極めて重要です。多くの材料にひずみ速度依存性と言われる性質があります。これは、引っ張る速さによって強さや変形の仕方が変わる性質のことです。一例を挙げると、お餅をちぎるときに勢いをつけて引っ張ると糸を引かずきれいに取れることです。金属材料での測定試験の引っ張る速さは 0.001~0.01/sec の速さで測定します。今回の引っ張る速さは金属材料と比較してかなり速いものもあるといえます。しかし金属材料と同程度の速さで行うと 1 回の試験で 1 時間以上かかります。) 現在メーカーが提示されている遮水シートの引張り特性は、引っ張る速さが 50mm/min であります。



写真 2 測定に使用したオートグラフ

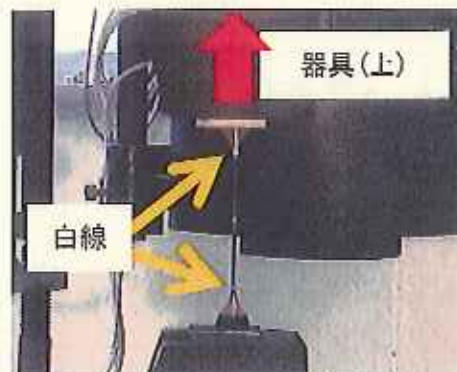


写真 3 実際の測定の一例

メーカ値と比較検討のための数値は以下のように計算しました。

引張り強さ(切断する直前の強さ)

(引張り強さ[MPa])=(最大の引張り荷重[N])/(試験片の断面積[mm²];試験片の厚さ×幅)

切断時の伸び

(切断時の伸び[%])={(切断時の標線間の距離[mm])-(初めの標線間の距離[mm])}/(初めの標線間の距離[mm])×100

引張り応力(応力:力を断面積に割ったもの感覚としては圧力に近い)

(引張り応力[MPa])=(引張り荷重[N])/(試験片の断面積[mm²])

測定結果について

当資料作成時点に測定された結果は、引っ張る速度が 500mm/min のもののみです。図 2 は遮水シートの荷重と伸びの関係(応力-ひずみ線図)を示します。縦軸は引張り応力(荷重のようなもの)を示し、横軸はひずみ(伸びみたいなもの)を示しています。この結果より遮水シートの異方性(引っ張る方向によって強さや伸び方は変化すること)は小さいと考えられますので、以後引っ張る方向については記述いたしません。

表 1 は現在提示されている遮水シートの特性値と今回の測定で得られた特性値の比較を示す。引張り強さについては厚さが 1.5mm と統一するため最大引張り荷重を引っ張る前の 2本の白線間の距離で除した値としています。引っ張る速さの影響があり両者の値が若干ずれていることが分かります。

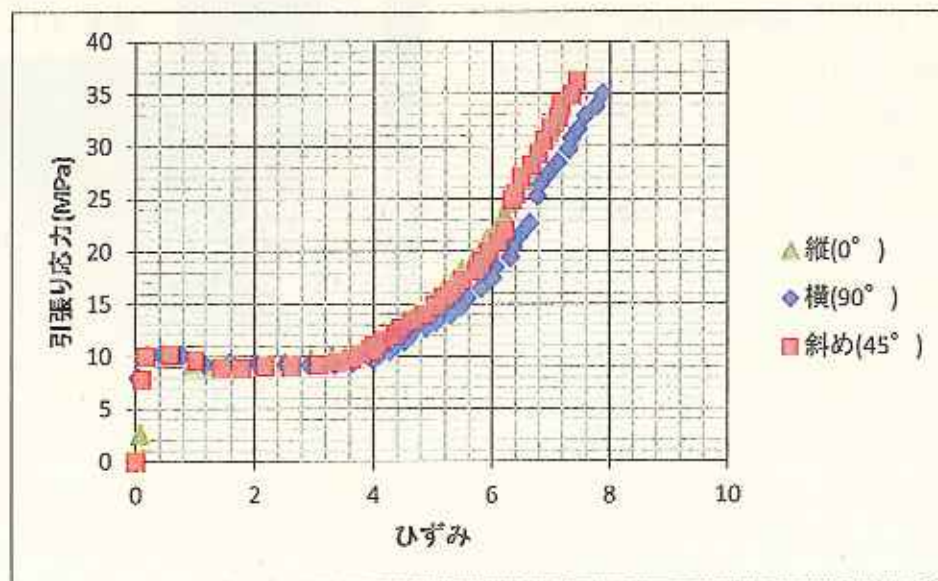


図 2 測定結果(遮水シートの応力-ひずみ線図)

表 1 測定結果との比較

項目	提示された特性値 (50mm/min)	測定された特性値 (500mm/min)
引張り強さ[N/cm] (厚さ 1.5mm で統一)	480	544
伸び率[%]	700	766

② 有限要素法を用いる計算について

有限要素法とは

物（物体）に力が作用した時に、物（物体）の内部に生じる力の分布は理論的に計算することができます。例えば、お弁当についている醤油の袋には切欠きがついています。これがないとなかなか開きませんよね。しかし、切欠きがあろうとなかろうとひねっている力は一緒です。これは理論的に計算すると実は切欠きがあると周りの力より 3 倍から 4 倍の力が切欠きに生じていることが分かります。醤油の袋のように単純であれば理論的に計算できるのですが、物の形が複雑であったり、いろいろな方向から力が沢山作用すると計算が複雑になり、なかなか一筋縄にはいきません。そこで物（物体）を単純な形に小さく分割して考えて、計算を楽にする考え方で、数値計算手法の一つです。ところがこの方法は計算量が増えてしまうためコンピュータを使って計算します。コンピュータの発展と共に世界で使用が拡大している手法です。

有限要素法を用いた計算を行う目的

斜面に遮水シートを設置した場合、遮水シートには平面に遮水シートを設置した場合と異なり圧縮力だけでなく摩擦によるせん断力が作用します。メーカーが提出したせん断力に関する資料中にある計算モデル及び結果は概ね間違いないとは言えます。しかし、漏水検知の為の銅線については表現できていません。この銅線を考慮した上で遮水シートの強度を評価する必要があります。

また漏水検知用の銅線は丸線であり、十字を切るように設置されています。この場合銅線同士により遮水シートに作用する力は極めて点に近いと言えます。作用する力が点に極めて近いときの、内部の力の分布を求める理論計算はかなり複雑になります。したがって計算を簡略化するため有限要素法を用いた計算を行うことにします。

有限要素法の一例

写真 4 はボルトナットの実際の使用例を示しています。このようにボルトナット締結体はいたるところで使用されています。しかし、このボルトナット締結には緩みやへたりといった問題があります。これらのメカニズムを明らかにするためにボルトナット締結体について有限要素法を用いた計算を行い、その力の分布を明らかにし緩みやへたりについて検討しております。世界的に使用され、その妥当性は示されています。最初に作成された有限要素法コードは米国航空宇宙局 (NASA) の NASTRAN です。図 3 はボルトナット締結体の簡単な形で小さく分割された状態を示します。この状態をもとに計算を行います。図 4 は計算結果を示します。図のように計算により締結体の内部の力 (応力) の分布が分かります。



写真 4 実際のボルト締結体

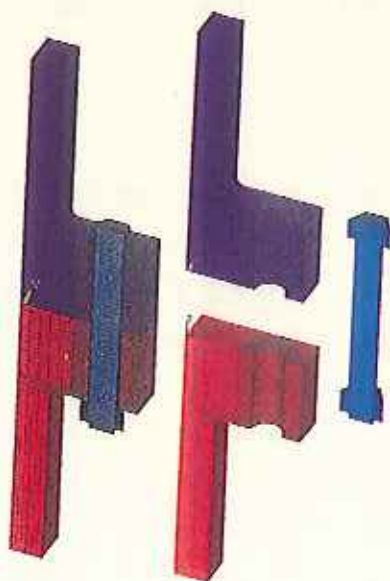


図 3 簡単な形に小さく分割された締結体

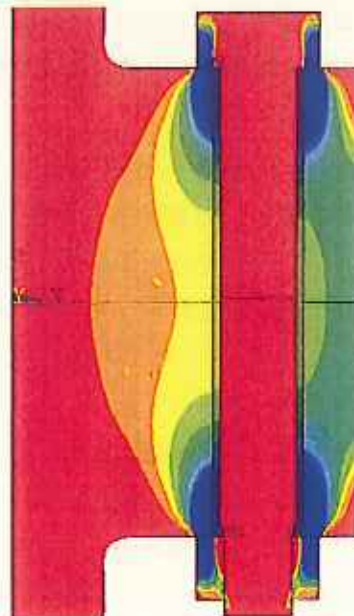


図 4 計算結果

③ 遮水シートと銅線を用いた圧縮試験について

圧縮試験を行う目的

有限要素法についての項でも記述しましたが、有限要素法も万能ではありません。計算する物を、簡単な形に小さく分割するとき、どのような形にどれだけ小さく分割するかによって計算結果が大きく変わります。したがって、必ず計算結果が正しく分割の仕方が正しいか検討する必要があります。その検討方法として実際に計算と同じ条件で実験を行うことです。

実験より得られる荷重や変形の値と計算によって得られる値を比較検討することで計算の妥当性を明らかにします。

II. 遮水シートの劣化の有無および影響

④ 遮水シートの荷重と伸びの関係について

(劣化させた遮水シート)

荷重と伸びの関係測定試験（引張り試験）を行う目的

荷重と伸びの関係は材料の基本的特性です。この荷重と伸びの関係を比較することで劣化が遮水シートの強度に及ぼす影響が概ね推定することができます。

また、各種劣化が遮水シートに影響を正確に把握するため、有限要素法を用いる計算を行う場合でも同様にこの荷重と伸びの関係は必要となります。

劣化方法について

熱による劣化

乾燥炉を用いて80℃の温度雰囲気状態に240時間(10日間)暴露(曝す)します。

写真5は使用した乾燥炉を示します。この乾燥炉は、温度変化を正確に制御することができます。80℃までの昇温、常温までの降温はできるだけ緩やかに1分間に1℃上昇と設定しました。

化学反応による劣化

化学反応で大きく分けて酸による影響、アルカリ(塩基)による影響と考えられます。そこで酸には硫酸(0.05%濃度)、アルカリは



写真5 試験に用いた乾燥炉

水酸化ナトリウム飽和水溶液としました。また、実際に遮水シートがさらされる溶液は浸出水であるため、この浸出水も曝露溶液として用いることにしました。したがって、これら3種類の溶液に対して劣化の影響を検討しました。

遮水シートはこれらの3種類の溶液に曝露され、乾燥炉を用いて60℃の温度雰囲気中に240時間(10日間)さらします。

荷重と伸びの関係測定試験方法について

基本的には、常温を同様ですが、引っ張る速さのみ50mm/minとしました。

⑤ 遮水シートの硬さ試験について

硬さ測定の目的

遮水シートは浸出水を防ぐために地中に埋設されています。したがって、浸出水や圧縮荷重または熱のような要因によって、組織が変化している可能性が考えられます。

新品、熱、各種溶液により劣化させたもの及び現場より切り取られた遮水シートの表面の硬さを測定することで、遮水シートの表面組織の変化の有無を検討することができます。

デュロメータについて

写真6はゴムの硬さ測定で使用するデュロメータ(A型)の一例を示します。デュロメータ硬さは、規定した条件下で試験片に既定の押針を押し込んだときの押針の押し込み深さから得られる値です。

(注意：ゴムの硬さを測定する方法はデュロメータ以外にもいくつかあるがそれらの結果とデュロメータによる結果を結びつけることはできません。)

デュロメータの値は、ゴムの弾性率、粘弾性、試験片の厚さ、押針の形状、押し込む力、押し込む速さ、読み取るまでの時間などの影響を受ける。つまりは、測定する人間による誤差があります。

測定について

デュロメータ硬さは、ゴムの硬さにより使用するデュロメータの型式が異なります。図4は試験材質の違いと使用するデュロメータの型式の違いの概略を示します。



写真6 デュロメータ
の一例(A型)



図4 試験材料とデュロメータの型式の簡易的な関係

これらの選択は、次のように行います。

- D型デュロメータで硬さが20未満の値を示す場合は、A型を用いる。
- A型デュロメータで硬さが20未満の値を示す場合は、E型を用いる。
- A型デュロメータで硬さが90を超える値を示す場合は、D型を用いる。

試験片について

A型、D型では、試験片の厚さを6mm以上とする必要があります。6mm以上に満たない場合は積み重ねて測定してもよいとされています。したがって、本遮水シートの厚さは約1.5mmのため5枚以上積み重ね規定範囲とします。(注意：一般的に積み重ねたときの結果と積み重ねていないとき(6mm以上)では測定結果は異なります。)

写真7は実際に測定に用いた遮水シート試験片を示します。



写真2 測定試験片

測定方法について

平坦で硬い面に試験片を置き、デュロメータの加圧板が試験片の表面に平行に維持され、かつ、押針がゴムの表面に対して直角になるようにデュロメータを保持し、衝撃を与えないように、加圧版を試験片に接触させます。規格に指定されるように試験片の端から12mm以上離れた位置で測定を行いました。測定点数は試験片では10点行い6mm以上離れた位置で行いました。測定時間は15秒とし、本測定は室温環境下で行いました。

測定結果について

D型デュロメータで測定すると試験片に跡が残るため、まずA型を用いて測定しました。

表2はA型デュロメータを用いて測定した結果を示します。積み重ね枚数を6枚とした。測定結果は規定値の90を超えているためA型デュロメータでは測定できないことが分かります。したがってD型デュロメータを用いて測定しました。表3はD型デュロメータを用いて測定した結果を示します。D型デュロメータの場合も積み重ね枚数を6枚として測定しました。平均値は45.75でありました。ここでは示しませんが、積み重ね枚数を3枚としたときの測定も行い、この時の測定結果もまた積み重ね枚数が6枚の時より大きくなることが分かりました。したがって、試験片はできるだけ大きく積み重ね枚数は6枚程度がよいことが分かりました。

表1 A型デュロメータによる測定結果
(新品)

A型 6枚大	
93.8	92.2
94.2	95.2
95	95.5
92	94.6
94.2	94.2

表2 D型デュロメータによる測定結果
(新品)

D型 6枚大	
46	44.5
44.5	45.2
47.5	46.5
46	47.2
44	46.2

⑥ 遮水シートの表面観察について

表面観察の目的について

坂野先生の指示とその他の方々のご要望により原子間力顕微鏡によって表面観察を行います。表面観察には光学顕微鏡、電子顕微鏡等いろいろと方法がありますが、今回、表面観察に AFM (原子間力顕微鏡) を用いることとしました。SEM (走査型電顕) は金メッキする必要があり、このゴム材料の観察には不向きと考え、AFM が最適と判断しました。**結果はいずれお見せしますが、方向性のみ述べておきます。**

AFM (原子間力顕微鏡) について

原子間力顕微鏡 (げんしかんりよくけんびきょう、Atomic Force Microscope; AFM) は、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) の一種。その名のとおり、試料と探針の原子間にはたらく力を検出して画像を得ることができます。

原子間力はあらゆる物質の間に働くため容易に試料を観察することができるため、探針と試料表面間に流れるトンネル電流を利用する STM とは異なり、絶縁性試料の測定も可能である。また電子線を利用する SEM のように導電性コーティングなどの前処理や装置内の

真空を必要とする事もない。このため、大気中や液体中、または高温～低温など様々な環境で、生体試料などを自然に近い状態で測定できます。

他の走査型プローブ顕微鏡と同様に空間分解能は探針の先端半径 (nm 程度) に依存し、現在では、原子レベルの分解能が実現されています。

