

管理型廃棄物埋立護岸遮水シートの敷設面 不陸に対する変形追随性

DEFORMATION PROPERTIES OF WATER PROOF SHEET LAID ON UNEVEN
BACKFILLING SURFACE AT COSTAL WASTE DISPOSAL SITE

狩野真吾¹・小田勝也²・吉田誠³・三藤正明⁴

Shingo KANO, Katsuya ODA, Makoto YOSHIDA and Masaaki MITOH

¹正会員 工博 国土技術政策総合研究所 研究官 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 工修 国土技術政策総合研究所 沿岸防災研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 工修 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

⁴正会員 工博 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須郡西那須野町四区町1534-1)

Laboratory examinations were undertaken to clarify the deformation behaviors of water proof sheet, applied at a seepage control structure in an offshore waste disposal site. We examined a pressure resistance of PVC sheet which is installed upon backfilling stones of gravity-type bulkhead. As the result, the more the penetrating point of stone is smartened, the more the maximum strain occurred near the point. Pressurizing for 24 hours on a backfilling slope modeled actual seepage control structure in a waste disposal site, PVC sheet was deformed due to unevenness of backfilling stones, however, no breakage was observed. Local large strains (more than 10 %) were measured upon large degree of unevenness near the penetrating point of a stone. Those results indicate that the behavior of waterproof sheet deformation during the penetration of a backfilling stone could be applied to the evaluation of waterproof sheet deformation due to unevenness of backfilling slope in a controlled waste disposal site.

Key Words : Offshore waste disposal site, Water proof sheet ,Pressure test, Unevenness of backfilling stones

1. はじめに

沿岸部に建設される管理型廃棄物海面処分場では、周辺海域への汚染を防ぐため、遮水機能が常時・異常時を問わず安定的に確保されている必要がある。しかし、外力作用時の遮水工の力学的挙動には不明な点が多く、その解明は喫緊の課題である。管理型廃棄物埋立護岸遮水工に設置される遮水シートには様々な外力が作用するが、捨石マウンド・裏込層等の不陸に追従して遮水シートが変形する際に発生する力は、引裂き力や突き破り力となって遮水シートを損傷させる危険性がある。遮水シートの破れ難さを評価する試験方法には、砕石やピラミッド状の突起物を敷き並べた上に置かれた遮水シートに圧力をかけシートが破損する限界圧力を測定する耐圧試験^{1), 2)}と、遮水シートに貫入棒を貫入させ、その時の抵抗を測定する突き刺し抵抗試験^{3)~7)}がある。遮水シートの突起物への抵抗性に関するこれら既往の研究は破断強度の測定を中心とした実験的考察が主で

あった。これに対し、変形中における遮水シートのひずみ分布についてはこれまで有効な測定手段が存在せず、詳細な議論がなされていない。そのため、突起物の貫入による遮水シートの破断挙動については依然として不明な点が多く、総合的な研究が少ないのが現状である。さらにまた、耐圧試験に用いられる実験装置は多くが60 cm程度の円筒形セルであり、用いる砕石も粒径20~50 mm程度のサイズであるが、実際の廃棄物海面処分場における遮水シート敷設面にはより大きな不陸が存在するため、実験から得られる遮水シートの変形挙動が実際の敷設面の裏込不陸に追従する場合に適応できるかどうかについては不明である。そこで、本研究は、直径10 cm程度の裏込石を並べた上に設置した遮水シートの円筒形セルによる耐圧実験、および大型土槽内の斜面裏込層に設置した遮水シートへの載荷実験を行い、不陸をともしう裏込層の突起形状と遮水シートの変形挙動との関連性、および実際の現場に近い裏込層斜面に敷設した遮水シートの静的載荷条件下での変

形挙動を把握することを目的とする。

2. 実験概要および実験材料

(1) 実験概要

突起物上に設置された遮水シートに上載荷重が作用した場合の変形破断特性を評価するため、本研究では、水圧荷重が可能な円筒形セルを用いた遮水シートの耐圧実験、および大型土槽内の裏込斜面上に敷設した遮水シートへの載荷実験を行う。前者では、突起物として単体および複数個の裏込石を使用し、シートに接触する裏込石の突起形状とシートの変形挙動との関連性を検討する。後者では、大型土槽内に作製した裏込石の斜面上に遮水シートを敷設しその上部に静的な荷重を加えることにより、実際の施工現場に近い斜面の裏込不陸が遮水シートの変形に及ぼす影響を検討する。

(2) 実験材料

a) 裏込石

本研究で使用する裏込石は福島県いわき市西小川産の花崗岩であり、粒径が100 mm前後のものを中心に選定した。

b) 遮水シート

遮水シートには、廃棄物海面処分場遮水材として施工事例の多い塩化ビニルシート（PVC）を使用する。シートの厚さは1.5 mmと3 mmの2種類である。

3. 単体の裏込石突起に対する遮水シートの変形強度特性

(1) 実験方法

実験装置を図-1に示す。使用する円筒状セルは上部と下部に分離させることができ、上部セルは水圧による載荷が可能であり、下部セルは裏込石を設置する台座となっている。裏込石に作用する荷重は下部セルに設置されるロードセルにより測定し、水圧の載荷は上部セルにつながる水圧ポンプにより行う。また上部セルには石膏・水注入口および水圧載荷用注水口を設けており、さらに水圧計を設置して

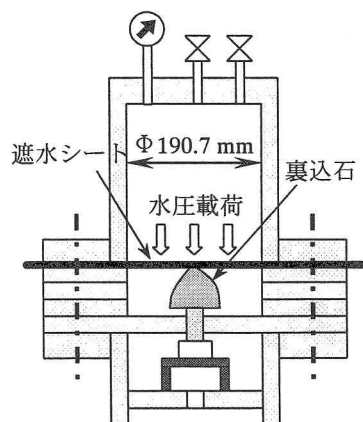


図-1 耐圧試験装置概略図

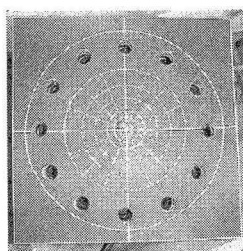


図-2 遮水シート

載荷水圧の測定を行う。

遮水シートは一辺305 mmの正方形になるように切断し、同心円および放射状のひずみ測定用計測線を引く（図-2）。ひずみ計測は、石膏を用いて遮水シートの変形形状を型取りし、固まった石膏の表面に転写された計測線の長さを測りひずみに換算することにより行う。

裏込石は、前述の通り選定したものの中から、統計処理により先端の尖った角形石および先端が丸まった丸形石をそれぞれ2個選び、突起物として使用する。便宜上、本論文ではこれらの裏込石を‘角形①’‘角形②’‘丸形①’‘丸形②’と記す。これらの裏込石の写真を図-3に示す。

実験パラメータは、遮水シートの厚さ、裏込石の形状および載荷水圧の3項目である。すなわち、遮水シートの厚さおよび突起の先端形状が、遮水シートの破断モード、破断荷重、ひずみ分布に与える影響について検討を行う。また、載荷水圧を制御することにより遮水シートが破断するときの最大載荷水圧を把握し、水圧を破断時より1～2割程度小さくした場合の遮水シートのひずみを計測する。なお、載荷速度は一定の50 kPa/minとする。

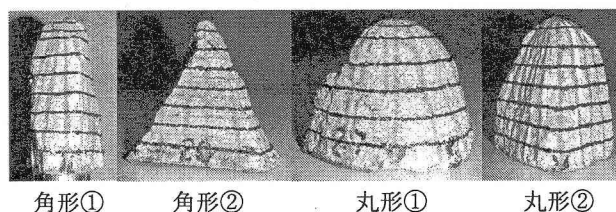


図-3 実験に使用した裏込石

(2) 実験結果

a) 遮水シートの破断状況

水圧載荷後の遮水シートには石の突起部の突き刺しによる損傷が見られる。損傷はすべて、引き裂きによるとみられるき裂である（図-4）。すべての実験ケースにおいてき裂はシートの中心（すなわち裏込石の突起先端が接触する箇所）からある程度離れた箇所で発生しており、突起先端が接触している領域に損傷は見られなかった。

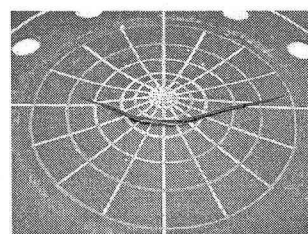


図-4 シート破断の様子

b) 遮水シートのひずみ分布

水圧载荷後のひずみ計測結果および载荷水圧の値を表-1に示す。3 mm厚と1.5 mm厚のシートのひずみを比較すると、全ケースについて1.5 mm厚のひずみは载荷水圧が3 mm厚の時より小さいにも関わらず3 mm厚より大きな値を示している。このことから、シートの突起物に対する変形追随性は、突起物の先端形状によらずシートの厚さが薄いほどその性質が顕著であると言える。

次に、1.5 mm厚シートに発生する放射方向のひずみ分布のうち高ひずみ領域と石の形状との関係を図-5に示す。図中の破線は裏込石の形状（約10 cm間隔の等高線）、×印は石の突起先端、角形石①、②における実線はシートの破断箇所である。どの石を用いた場合も、大きなひずみは石突起先端の周囲に分布していることがわかる。これは、突起部に接触する領域ではシートは石との摩擦により変形を拘束され、摩擦による拘束の影響が少ない突起周辺部において変形が集中するためと考えられる。また、角形石について高ひずみ領域と破断箇所がほぼ一致しており、この結果は筆者らの既往研究である裏込

石およびステンレス製コーンを用いた遮水シートの突き破り試験結果^{8)~10)}と同様、シートの変形破断プロセスが“ひずみ支配型”によるものであると考えられる。したがって、単体の裏込石が遮水シートに作用した場合のシートの破断は、突起先端の周囲で発生する局所的な大変形によってシートが塑性変形を起こし、変形が限界ひずみに至った瞬間に生じたと推察される。

4. 複数の裏込石突起に対する遮水シートの変形特性

(1) 実験方法

実験には、前章の実験で用いたものより大きい鉄製円筒状セルを使用する（図-6）。セルは上部と下部に分離させることが可能であり、上部セルは水圧载荷用、下部セルは裏込石を敷き並べるための容器となっている。

遮水シートは一边500 mmの正方形になるように切断し、ひずみの測定は前章の実験と同様、石膏による型取りで行う。

実験に用いる裏込石は先端形状が尖ったものと丸まったものを複数個選定した。これらの石を最大不

表-1 実験結果

裏込石	シート厚 (mm)	载荷水圧 (MPa)		最大ひずみ (%)	
		破断時	ひずみ計測時	放射方向	円周方向
角形①	3	0.46	0.41	117.0	73.7
	1.5	0.34*	0.30	171.1	94.6
角形②	3	-	0.51	130.6	103.9
	1.5	0.38	0.30	211.1	108.4
丸形①	3	-	0.40	42.2	68.1
	1.5	-	0.30	80.2	36.5
丸形②	3	-	0.40	72.0	70.8
	1.5	-	0.29	127.0	113.3

*: 2計測(0.32, 0.36)の平均値

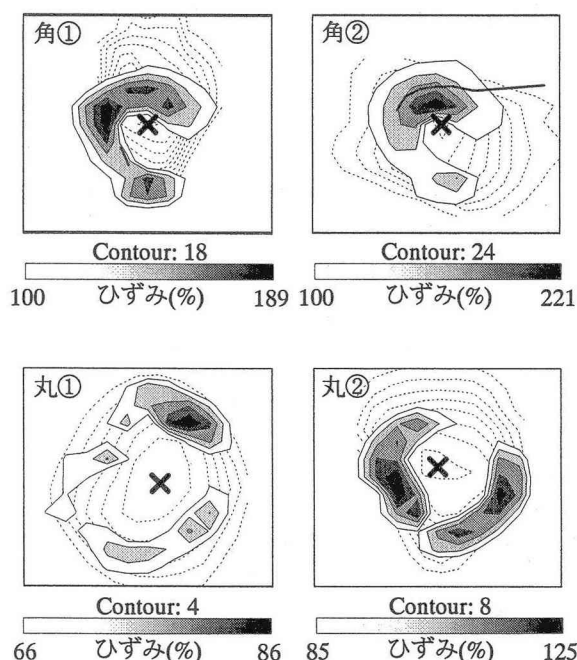


図-5 石の形状とひずみ分布の関係

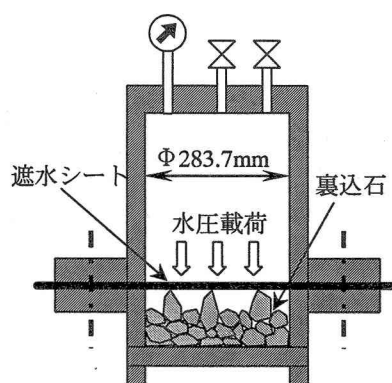


図-6 実験装置概略図

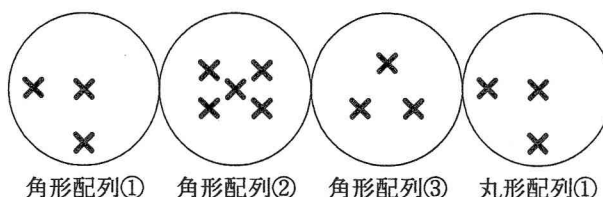


図-7 裏込突起の配列方法

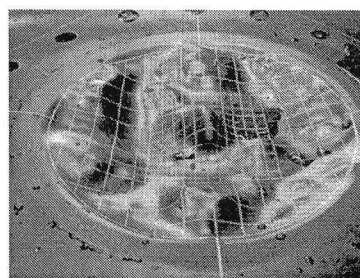


図-8 実験後の遮水シート

陸差が10 cm程度になるように配列し、4種類の裏込不陸を作製する。図-7にそれらの配列方法を示す。図中の×印は裏込石による突起部分を表す。角形配列①～③では角形の石を、丸形配列①では丸形の石をそれぞれ使用する。

実験パラメータは前章同様、遮水シートの厚さ、裏込石の形状および載荷水圧の3項目である。

(2) 試験結果

a) 実験後の遮水シートの状態

水圧載荷後の遮水シートの様子を図-8に示す。目視での観察の結果、1.5 mm厚、3 mm厚シートともに最大載荷水圧である1.0 MPaでも破断は見られなかった。これは、裏込石の凹凸形状にシートが完全

表-2 実験結果

石配列方法	厚さ (mm)	X方向ひずみ (%)		Y方向ひずみ (%)	
		最小値	最大値	最小値	最大値
角形配列①	3	-11.7	97.3	-8.5	102.2
	1.5	-88.5	150.0	-21.1	125.0
角形配列②	1.5	-18.5	135.3	-39.6	107.5
角形配列③	1.5	-16.8	114.9	-29.3	113.9
丸形配列①	1.5	-29.0	141.7	-45.4	161.4

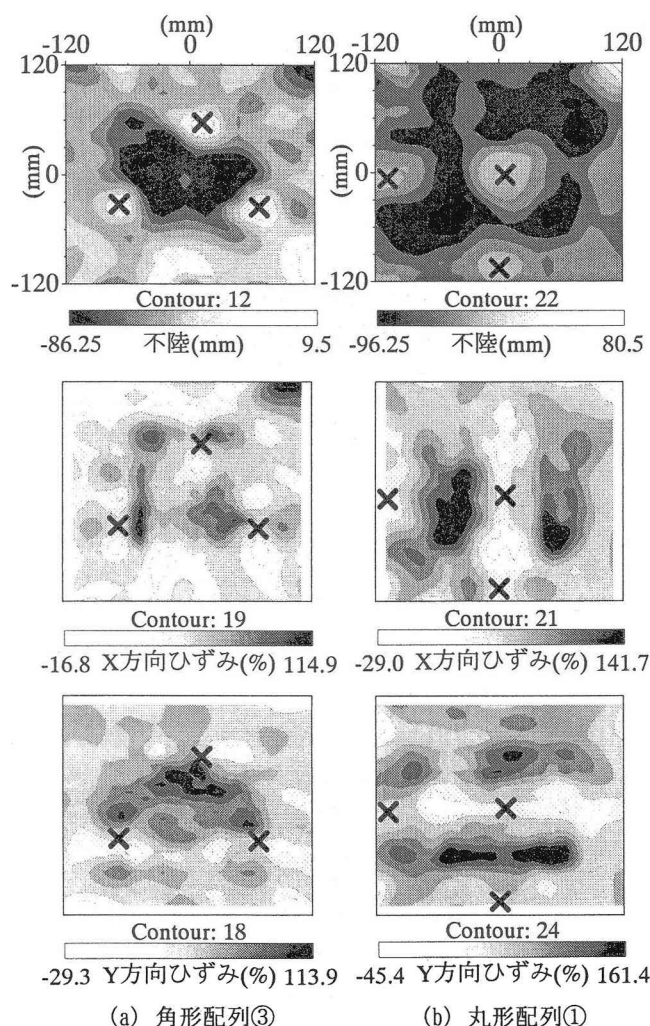


図-9 裏込不陸とひずみ分布の関係

に追随してしまい、破断ひずみに達しないまま変形が終了したためと考えられる。

b) 遮水シートのひずみ分布

各配列方法における遮水シートのひずみ値を表-2に、それらの二次元分布を図-9に示す。実験前後の裏込地盤高さはほとんど変化していなかったことから、水圧載荷による裏込石の移動はないと考えられる。

角形配列①において、ひずみの最大値は3 mm厚に比べて1.5 mm厚のシートの方が大きく、全計測点の平均値は3 mm厚ではX, Y両方向ともに約15%, 1.5 mm厚ではX, Y両方向ともに約25%となり、全体的な傾向としても1.5 mm厚シートには3 mm厚シートに比べてより大きなひずみが発生していることがわかる。また、図-9において、図中の×印は水圧載荷前からシートに接触している石の突起先端を示しているが、高ひずみの発生箇所は角形石と丸形石の場合で異なる。すなわち、角形石を使用した場合は突起部の近傍に高ひずみ領域が存在するのに対し、丸形石を使用した場合は2つの突起のほぼ中間部において高ひずみ領域が発生している。このような突起形状とひずみの関係は、前章で示した単体の裏込石が作用した場合のシート変形と基本的に一致するものであり、仮に破断が起きることを想定した場合、その箇所は高ひずみの発生領域に一致する可能性が高い。

次に、裏込不陸とひずみ分布の関係についてより詳細に検討するため、各ひずみ計測線におけるひずみの最大値と同断面における不陸差の最大値の関係に着目した結果を図-10に示す。その結果、全ケースにおいて両者の間には相関性が認められ、不陸が大きくなるほど最大ひずみも増加する傾向がみられた。これらのプロットの中には最大ひずみが最大不陸差の箇所で発生していないものも存在するが、それらの多くはグラフ中の“小不陸・低ひずみ領域”あるいは“大不陸・低ひずみ領域”に分布し、高ひ

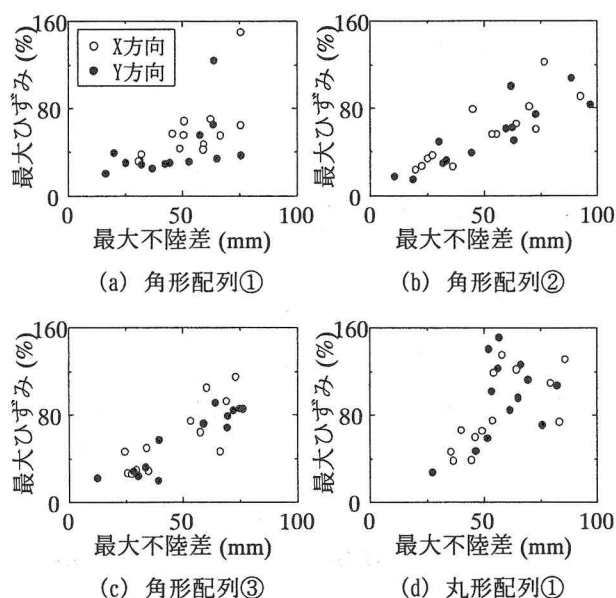


図-10 不陸差と最大ひずみの関係

ずみの発生は大きな不陸差に由来するようである。

5. 裏込地盤の不陸に対する遮水シートの変形特性

(1) 実験方法

実験装置は長さ3.5 m、幅3.0 m、高さ2.0 mの箱形の剛土槽である。土槽内部に長さ2.4 m、幅1.4 m、高さ1.05 mの仕切りを型枠により設置し、その中に裏込斜面を作製する。また埋立層厚5 m分の有効上載圧を載荷するため、9.7 kNのコンクリートブロックを模型上部に設置する。概略の実験装置を図-11に示す。

遮水シートは長さ1,927 mm、幅1,300 mm、厚さ1.5 mmであり、長手方向の端から215 mmまでは裏込

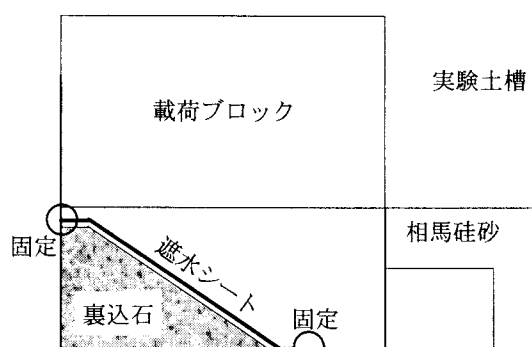


図-11 実験装置断面図

天端部に敷設し、残りの部分は斜面に敷設する。その際、遮水シートの端部は土槽に固定する。また、遮水シートの長さ1,280 mm、幅440 mmの領域に2 cmピッチでメッシュ状にひずみ計測線を引く。遮水シートのひずみ計測方法は、あらかじめ遮水シートに塗布しておいたモルタルにより実験後のシート変形を型取りし、モルタルに転写された計測点間の長さをひずみに換算することにより行う。

実際の管理型廃棄物埋立護岸遮水工における裏込表面の均し精度は明確には規定されていないが、本実験での不陸差は±5 cmとした。最大載荷荷重は、遮水シートが水深5 m付近に設置される場合を想定して50 kPaとした。載荷時間は24時間である。

(2) 実験結果

実験後の遮水シートの状態について目視での観察の結果、遮水シートには裏込不陸形状に追従することによる変形が確認されたが、損傷箇所は見られなかった。

モルタルの型取りによる遮水シートのひずみ計測結果を以下に示す。X方向（水平方向）に1452箇所、Y方向（斜面方向）に1495箇所の計測点間の線ひずみを計測した結果、両方向ともに約9割が±5%の範囲であり、さらにそのうちの約4割が±1%の範囲であった。ここで、正の値は引張り変形を、負の値は圧縮変形を表している。

裏込不陸の形状およびX方向、Y方向のひずみ分布を図-12に示す。図中の○印はひずみが10%以上の

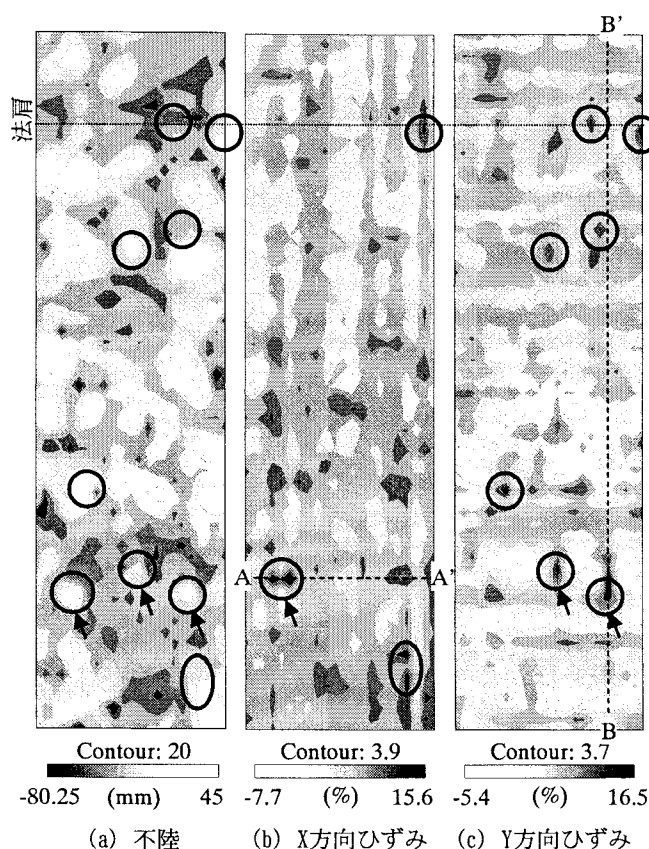


図-12 裏込不陸とひずみ分布の関係

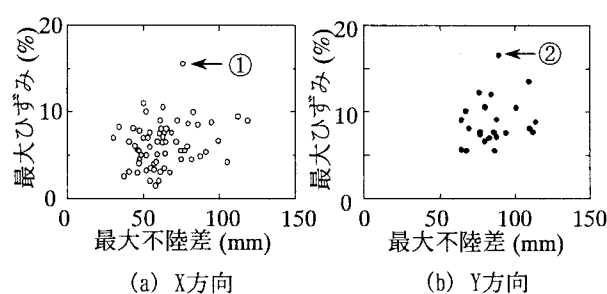


図-13 不陸差と最大ひずみの関係

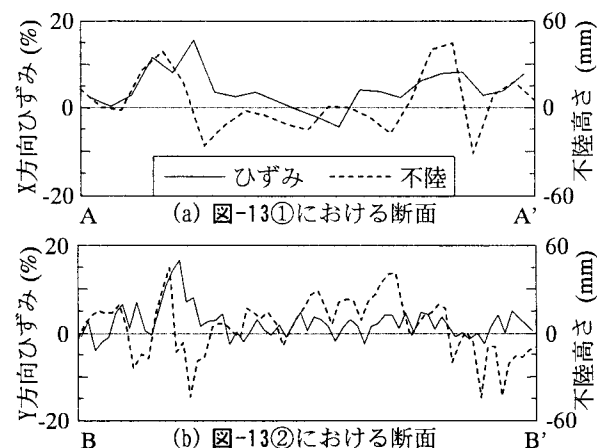


図-14 裏込断面におけるひずみ分布

箇所およびそれに対応する不陸の箇所を示している。ただし、実験後は固化したモルタルが斜面下方に偏ってしまい、その影響を受けて遮水シートが斜面下側へ引き延ばされたため、斜面方向については実験後のシート上の計測点と裏込不陸の計測点が正確に一致していない。図中の○印はこのずれを考慮して記入したものである。これらのひずみは、そのほとんどが近傍に存在する裏込石の突起の影響を受けた局所変形である。特に矢印で示した3箇所は先端の尖った石によって意図的に大きな不陸差（左からそれぞれ65 mm, 76 mm, 88 mm）を設けた箇所であるが、同箇所におけるひずみ（○印と矢印で示された箇所）はそれぞれX, Y方向あわせて左から15.6%, 12.2%, 16.5%となり、不陸への追随による局所変形が顕著に現れた結果であるといえる。また、X, Y両方向ともに法肩部で比較的大きなひずみが発生していることも注目すべき点である。実際の施工現場において遮水シートの端部が固定されている場合、廃棄物層による上載荷重とシートの自重によってシートが斜面下方に引っ張られるため、法肩部は構造上シートに最も大きなひずみが発生しやすい箇所と考えられる。本実験についてもシートは端部を固定されており、法肩部において発生した高ひずみ領域は不陸による突起の影響の他、廃棄物層の上載荷重やシート自重（シート上に塗布されたモルタルの重量も含む）によるクリープ変形が少なからず影響しているものと考えられる。

次に、各ひずみ計測線におけるひずみの最大値と同断面の不陸差の最大値との関係をプロットした結果を図-13に示す。その結果、Y方向は前章の実験結果と同様、不陸差の増加にともない最大ひずみが増加する傾向が若干見られるが、X方向については両者の相関性は低い。このうち、X方向およびY方向におけるひずみの最大値を含む計測断面を図-14に示す。これらの断面は図-12におけるA-A' およびB-B' 断面に等しいが、両断面はともに意図的に設置した裏込突起上に位置し、さらに最大ひずみの発生箇所はこれらの突起に由来するものであることがわかる。この結果は、先に示した複数の裏込石による遮水シートの変形挙動と共通するものであり、さらに、個々の裏込突起に着目した場合、石の貫入によって発生するシートのひずみは単体の裏込石を用いた実験で明らかになったシートの局所変形と同じ原理であると考えられる。また、本実験では遮水シートは破断しなかったが、仮に裏込突起により破断が起きることを想定した場合、その箇所は局部的に高ひずみが発生しやすい裏込谷部や突起の周辺であると推察される。

6. おわりに

本研究では、管理型廃棄物埋立護岸遮水工への施工実績が多いPVC遮水シートについて、裏込石の突起が作用した場合の変形破断特性を検討した。すな

わち、裏込石の貫入により発生する遮水シートの二次元ひずみ分布を計測し、遮水シートの破断プロセスについての考察を行った。これにより、以下の結論を得ることができた。

- ①単体の裏込石を用いた遮水シートの耐圧実験の結果、遮水シートは突起先端近傍で破断し、さらに破断箇所と変形中における最大塑性ひずみの発生箇所が一致した。これらから、突起物貫入による遮水シートの破断モードは、限界塑性ひずみを超えた瞬間に起こったひずみ支配型破壊であり、局部的な塑性ひずみが破断の直接的な原因であると考えられる。
- ②複数の裏込石を用いた耐圧実験において、角形石を用いた場合のシートの最大ひずみは裏込突起先端の近傍で発生した。一方、丸形石を用いた場合のシートの最大ひずみは裏込地盤の谷部で発生した。これらの計測結果により、突起形状とひずみ分布の関連性が明らかになった。
- ③土槽を用いた遮水シートへの載荷実験の結果、不陸差の大きい谷部や大きな突起の周囲ではX方向、Y方向ともに相対的に大きなひずみが発生した。また、裏込不陸の二次元分布と遮水シートのひずみ分布とを比較した結果、高ひずみの発生箇所と不陸の大きい箇所はほぼ一致し、裏込突起がシートの局所変形に直接的に関わったことが示された。

参考文献

- 1) 森芳信, 梅村順, 西村淳, 平井貴雄: 廃棄物処分場遮水シートの突起物に対する抵抗試験, 土木学会第51回年次学術講演会, III-A386, pp.772-773, 1996.
- 2) 三木博史, 林義之: ジオメンブレンの突き破り抵抗に関する考察, 土木学会第46回年次学術講演会, III-372, pp.766-767, 1991.
- 3) 森芳信, 梅村順, 西村淳, 平井貴雄: 廃棄物処分場用遮水シートの材料評価方法, 第30回土質工学研究発表会, pp.207-208, 1995.
- 4) 押方利郎, 花嶋正孝: シャ水シートの貫通抵抗試験方法に関する実験的研究, 廃棄物学会論文誌, Vol.7, pp.244-252, 1996.
- 5) 宮地秀樹, 坪井正行, 今泉繁良: ジオメンブレンの突き刺し抵抗性に関する研究, ジオシンセティックス論文集, Vol.13, pp.156-163, 1998.
- 6) 宮地秀樹, 今泉繁良, 吉直卓也: 保護マットの組合せ順序と遮水シート貫入抵抗の関係について, 第13回廃棄物学会講演論文集II, pp.942-944, 2002.
- 7) 今泉繁良, 池田浩和, 坪井正行, 宮地秀樹, 石川雅洋: 遮水シートの突き刺し性能, 第12回廃棄物学会研究発表会講演論文集, pp.912-914, 2001.
- 8) 狩野真吾, 吉田誠, 三藤正明, 近藤三樹郎, 諸星一信: 突起物貫入による遮水シートの破断とひずみ分布の関係, 第14回廃棄物学会講演論文集, pp.943-945, 2003.
- 9) 吉田誠, 狩野真吾, 諸星一信, 三藤正明, 近藤三樹郎: 遮水シートの厚さがシート破断に及ぼす影響について, 第14回廃棄物学会講演論文集, pp.946-948, 2003.
- 10) 狩野真吾, 小田勝也, 吉田誠, 三藤正明: PVC遮水シートの突起物貫入に対する変形破断プロセス, ジオシンセティックス技術情報, Vol.20, No.1, pp.18-23, 2004.