

管理型埋立護岸における遮水シートの耐波安定性および耐久性に関する検討

STABILITY AGAINST WAVE ACTION AND DURABILITY OF WATERPROOF SHEET AT BULKHEAD

池辺将光¹・下迫健一郎²・徳渕克正³・織田朋哉⁴・中野史丈⁵・生駒信康⁶
Masamitsu IKEBE, Kenichiro SHIMOSAKO, Katsumasa TOKUBUCHI, Tomoya ORITA,
Fumitake NAKANO and Nobuyasu IKOMA

¹シバタ工業(株) ((独法)港湾空港技術研究所 研修生) (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

²正会員 (独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

³正会員 農修 シバタ工業(株) 海洋土木設計G SL (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾1058)

⁴シバタ工業(株) 海洋土木設計G (〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾1058)

⁵(独法)港湾空港技術研究所 耐波研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

⁶正会員 シバタ工業(株) 工博 学術専任部長 (〒650-0023 兵庫県神戸市中央区栄町通4-1-10)

When an offshore waste disposal site is constructed, the bulkhead which surrounds the site must be a waterproof structure to prevent substances contained in waste from leaking out to the sea. The waterproof sheet, which is placed in the backfill space of the bulkhead for this purpose, must be stable against the wave pressure and the hydraulic pressure induced by the difference of water levels between the outside and the inside of the bulkhead. In this study, hydraulic model experiments were conducted in order to examine the stability against wave action and durability of the waterproof sheet. It was proved that the strain of the waterproof sheet depended on the difference of water pressure between the outside and inside of the sheet, and the scale of the rubble.

Key Words : bulkhead, waterproof sheet, stability against wave action, durability, wave pressure, strain

1. はじめに

管理型廃棄物処分場は、法令で規定される遮水構造を備えていなければならず、遮水性能はもとより耐久性に加え、地震時等の変形追随性が必要とされる。遮水工の一つとして用いられる遮水シートは、海上の場合には施工時から半永久的に波浪が作用し、処分場完成後には潮汐に起因する処分場内外の水位差による静水圧の作用を受ける。これらの外力は、遮水シートに繰り返しの反復ひずみをもたらし、疲労による強度低下を招くと考えられる。よって、遮水シートとしては圧力が作用した際に、ひずみ量なるべく少ないものほど安定していると言える。さらに、遮水シートには疲労に対して強度変化の小さい、耐久性のある材料が必要となる。この要求は遮水シート自体に求められるのはもとより、シートとシートの接合部に対しても同様である。

混成堤や傾斜堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波力は、藤井ら¹⁾や伊野ら²⁾により算定式が提案

されており、狩野ら³⁾により遮水シートの突き破り抵抗等の研究も進められてきた。一方、遮水シート自体の波力に対する安定性や圧力が作用した際の挙動は明らかにされていない。そこで、本研究は管理型埋立護岸の要素研究として、遮水シートに圧力を作用させ、シートの挙動を明らかにすることで安定性の検討を行い、繰り返しの波浪を遮水シートに作用させ耐久性の検討を行った。さらに、シートの接合部におけるひずみ特性や、裏込めと被覆層の割ぐり石質量の違いや間詰め石の有無が、遮水シートのひずみ量に与える効果についても検討した。

2. 実験方法

(1) 実験方法

遮水シートなどのシート材料は、小縮尺の模型実験においてはスケール効果を受けやすく、実現象を正確に把握することが困難な場合が多い。そのため、できるだけ実スケールに近い実験を行うことが重要

である。そこで、本実験はスケール効果を重視し、実験断面は管理型護岸全体を再現するものではなく、図-1に示すように裏込め・遮水シート・被覆層の付近をモデル化し、遮水シートを水平に設置するものとした。

遮水シートは管理型埋立護岸で一般的に用いられている塩化ビニル(PVC)シート(図-2 a))、ゴム繊維複合膜材(図-2 b))の2種類とした。以下、本論文ではそれぞれ「PVCシート」、「ゴムシート」と記述する。PVCシートおよびゴムシートの厚さは3mmであり、試験体の大きさは0.8m×1.0mとした。また、現地遮水シートに合わせ、保護層として上下に厚さ5mmの不織布を貼り付けた。管理型埋立護岸では、遮水シートを2重にして敷設されるが⁴⁾、本実験では各シートのひずみ特性をより明確にするため、1枚のシートにて実験を行った。さらに、接合部の耐波安定性および耐久性を検討するため、中央に接合部のある遮水シートを作成した。各シートの接合方法は、実際に行われている接合方法を基準にし、PVCシートは熱溶着による幅10cmの接合とし、ゴムシートは樹脂系接着剤による幅15cmの接合とした。

実験は長さ105mの水路内に断面を作製し、進行波を作用させることで遮水シートに変動圧力を与え、各実験ケースにおけるひずみ特性の解析を行った。実験波は規則波を用いている。実験ケースを表-1に

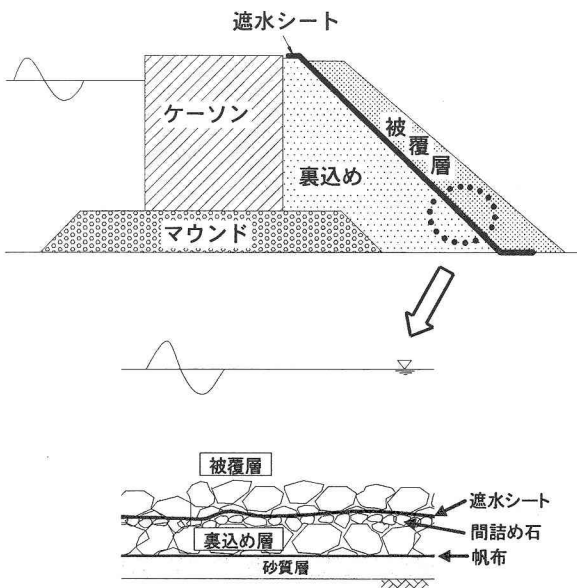


図-1 実験断面図

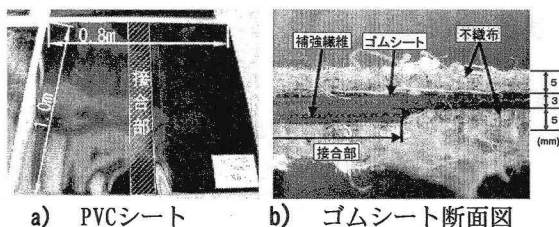


図-2 遮水シート図

示す。ケース1～10に示す間詰め石は1～10kgの割ぐり石を用い、裏込め層と被覆層の割ぐり石を含め、全て花崗岩を使用した。

実験の計測項目は波高と遮水シート上下面の間隙水圧および遮水シートのひずみである。ひずみゲージは伸びに強い樹脂ベースを用い、遮水シート1枚に対し3点の計測を行った。ひずみゲージの取付け場所は、予めシートとシート下側の割ぐり石が接する点を求め、接点をつなぐことで三角形格子を作り、最も大きな格子の図心とした。これは、大きな変位が期待できる場所に取り付けることで、ひずみ特性の違いを明確にするためである。また、接合部のひずみゲージ取付け位置は、接合部上にある最も大きな三角形格子の図心位置とし、ひずみゲージの1つは接合部のすぐ横の1枚部分に取付けた。

3. 遮水シートの耐波安定性

(1) 波高および間隙水圧とひずみの関係

図-3はケース6の波高とシート上下面の間隙水圧の差およびひずみ量の時系列の一例を示したものである。ここで、水圧差はシート上面に作用する水圧から下面での水圧を引いたものである。波高が増加することにより水圧差も上昇しており、波高と水圧差には位相差が見られる。また、波高

表-1 実験ケース

ケースNo.	シート状況	裏込め層 質量(kg)	被覆層 質量(kg)	波高 (m)	周期 (s)
1	新規シート	20~80kg + 間詰め石	1~20kg	0.5	4
2				0.2	
3				0.4	
4				0.5	6
5				0.5	8
6~10	新規シート	20~80kg + 間詰め石	10~40kg	同 ケースNo. 1~5	
11~15				"	
16~20				"	
21~25				"	
26~30	促進劣化 シート	20~80kg + 間詰め石	1~20kg	"	
多数波 作用実験 (20000波)		新規シート	20~80kg + 間詰め石	1~20kg	0.5 4

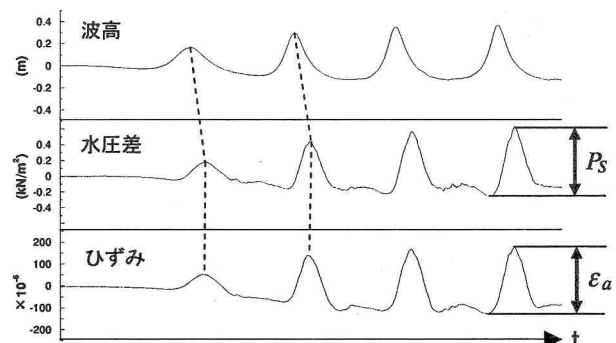


図-3 波高・水圧差およびひずみの時系列

とひずみにも位相差があり、波高に比例してひずみが生じているものの、波形の細部が異なっていることがわかる。一方、水圧差とひずみには位相差がなく、ピークの時間がほぼ同時である。さらに、その波形もよく一致しており、遮水シートのひずみ量はシートの上下面にかかる間隙水圧の差の影響を大きく受けることがわかる。

図中の ϵ_a は後述するひずみの全振幅量を示したものである。シートに取り付けたひずみゲージ付近の割ぐり石の位置や割ぐり石間の空隙の大きさにより、圧縮側もしくは引張側のみに大きくひずむ場合もあり、片側ひずみのみでは安定性を判断できないので、ひずみの全振幅量 ϵ_a を用いて評価することとした。また、ひずみの全振幅に合わせ、水圧差も全振幅量 P_s として論ずる。

(2) 遮水シートによるひずみ量の比較

a) ゴムシートとPVCシート

遮水シートのひずみ量の比較として、シートに使われている材料によるひずみ量の違いを検討した。図-4は、裏込め層の割ぐり石質量を20~80kgとし、被覆層の質量を1~20kgとした断面による実験結果である。図は、波高の変化(20・40・50cm)による水圧差の全振幅量 P_s とひずみの全振幅量 ϵ_a の関係を示したものである。図中のひずみの全振幅量 ϵ_a は各シートにおいて計測した3箇所のひず

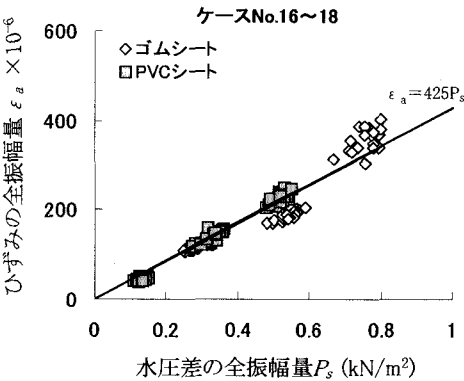


図-4 一般部における水圧差とひずみの関係

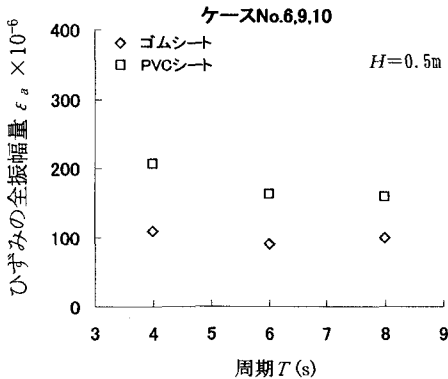


図-5 一般部における周期とひずみの関係

みの中で最も大きなひずみをそのシートの代表値として用いている。図より、ゴムシートとPVCシートを比較すると水圧差に対してほぼ同程度のひずみが生じていることがわかる。また、その傾きは両シートとも $\epsilon_a = 425P_s$ 程度であった。ここで、本実験に用いた遮水シートの1cm幅当たりのバネ定数 k を計測したところ、ゴムシートが5.41(N/cm/mm)、PVCシートは5.18(N/cm/mm)であった。バネ定数 k にほとんど差がないことが、両シートに同程度のひずみ量を生じさせたものと考えられる。これらより、本実験ではゴムシートとPVCシートに耐波安定性の差はほとんどないことがわかった。よって、2種類のシートは施工性等から使い分ければよいと考えられる。安定性の面から考えるとシートのバネ定数が高く、ひずみにくい材料が好ましいが、剛性が高くなると変形性がなくなり、突き破り等の問題が生じ、地震時の変形追随性も失われる。すなわち、遮水シートの安定性と追随性は相反する関係にあり、遮水シートを選定する際には、これらを考慮した十分な検討が必要である。

次に、周期の違いによるひずみ量の変化を検討した。図-5は、波高 H が0.5mのときのゴムシートとPVCシートにおける周期 T とひずみの全振幅量 ϵ_a の関係を示したものである。周期を4, 6, 8sと変化させても、ひずみ量はほぼ一定であり、両シートともにひずみ量と周期には高い関係性がないことがわかった。これは、周期が変化しても、水圧差があまり変わらないためである。

b) 一般部と接合部

図-6はゴムシートとPVCシートの一般部と接合部におけるひずみの全振幅量 ϵ_a を示したものである。一般部と接合部を比較すると、ゴムシート・PVCシートとも接合部のひずみ量は一般部の半分程度である。これは、両シートとも接合部が一般部より厚さが倍になることと、接合による硬化の影響を受けていると考えられ、シートの接合方法や接合部の剛性によりひずみ量が変わることがわかった。安定性においては、ひずみ量の少ないシートが好ましいが、接合部の剛性が高くなると追随性が失われ、接合部付近に応力が集中することになり、そこから破

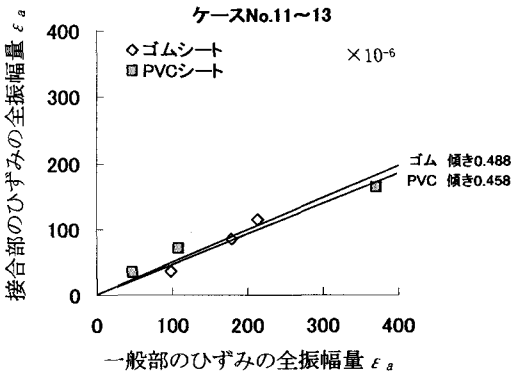


図-6 一般部と接合部のひずみ量の比較

断が生じる恐れがある。よって、一般部とあまりに離れた剛性を有するような接合方法は、遮水シートの破損を助長する危険性があると考えられる。

c) 加熱促進劣化による老化

ゴムなどの高分子材料は温度変化やオゾン等により年々劣化し、その機能も徐々に低下していく。近年の配合技術発達や薬品等の開発により、耐候性のすぐれた高分子材料が作られるようになったが、完全に劣化せず機能を保持し続けられるものはない。遮水シートも例外ではなく、長年使用されることにより機能が低下していくことは否めない。そこで、長期間使われている遮水シートと新規遮水シートでは、ひずみ特性に違いが見られるのか実験を行った。遮水シートの供用期間は、最終処分場の設計対応年数が長くて15年程度とされているので、その倍の30年を目安とした。化学反応速度論⁹⁾に従って、遮水シートを約90℃で43日間加熱して促進劣化させ、約30年間供用したシートを模擬的に作成した。ここで、遮水シートの設置環境温度は水温を10℃と想定している。促進劣化前後における遮水シートの変化として、各シートの一般部の硬さを計測したところ、両シートとも新規より促進劣化のほうが若干硬化していた。

図-7は新規および促進劣化シートに波高20～50cmの進行波を作用させ、生じたひずみ量を比較したものである。表-1の実験ケースとしては、新規がケー

スNo.11～13であり、促進劣化がケースNo.21～23である。ゴムシートおよびPVCシートともに一般部の促進劣化は新規の約7割程度の全振幅量となった。これは、前述した促進劣化による遮水シートの硬化の影響と考えられる。一方、接合部の促進劣化はPVCシートが新規の約7割程度のひずみ量を示し、ゴムシートは約9割のひずみ量であり、接合部のほうが新規と促進劣化における変化が少なかった。接合部は、シートを重ねているので一般部以上に硬化の影響を受けると考えられるにも関わらず、新規と促進劣化のひずみがあまり変わらなかったのは、接合箇所の硬さのほうが促進劣化させた遮水シート一般部よりも高く、促進劣化で与えた硬さ変化はあまり影響しなかったためと思われる。以上のことから、供用期間を増すことによるシートの劣化は、接合部よりも一般部に大きな影響をもたらすと考えられる。

(3) 裏込め層と被覆層の質量の違いによるひずみ量の比較

遮水シートのひずみ量はシートの材質等による影響と、裏込め層や被覆層に使われる割ぐり石の質量および空隙率による影響があると予測される。そこで、裏込め層と被覆層の割ぐり石質量を表-1のケースNo.1～20に示すように変化させ、裏込め層の間詰め石の有無と被覆層の割ぐり石質量の違いがひずみに与える影響について検討した。

割ぐり石質量の違いとひずみ量の変化を図-8に示す。左図がシートの下側に20～80kgの割ぐり石と間詰め石を敷き、シート上側には1～20kgの割ぐり石を敷き詰めたもの、中央図がシート上側の割ぐり石を10～40kgに変化させたもの、右図が下側の間詰め石をなくし、上側の割ぐり石を1～20kgとした際の結果である。これら断面に作用させた波浪条件は全て同じであり、波高20～50cm、周期4sとした。左図と中央図、右図を比較すると傾きが上昇していることがわかり、上載割ぐり石質量の増加やシート下の間詰め石をなくすといった空隙の増加に比例してひずみ量が増加する傾向にあることがわかった。以上から、割ぐり石が小さくなるとひずみ量が減り、大きな割ぐり石には間詰め石を施すことでひずみ量を減少させる効果があることがわかった。よって、比較的小さな割ぐり石を用いるか、間詰め石を設けることにより、遮水シートの安定性が増すと考えられる。

また、図-8に示す3パターンにおける割ぐり石質量の変化をひずみの全振幅量 ϵ_a との関係で示したものが図-9である。横軸は裏込め層と被覆層の平均割ぐり石質量を足したもので、対数で示した。図中の実験値は図-8における ϵ_a と P_s の近似式から得られる同一の水圧差($P_s=1$ (kN/m²))におけるゴムシートのひずみ量である。図より、ひずみの全振幅量 ϵ_a は式(1a)の形で表すことができることがわかる。

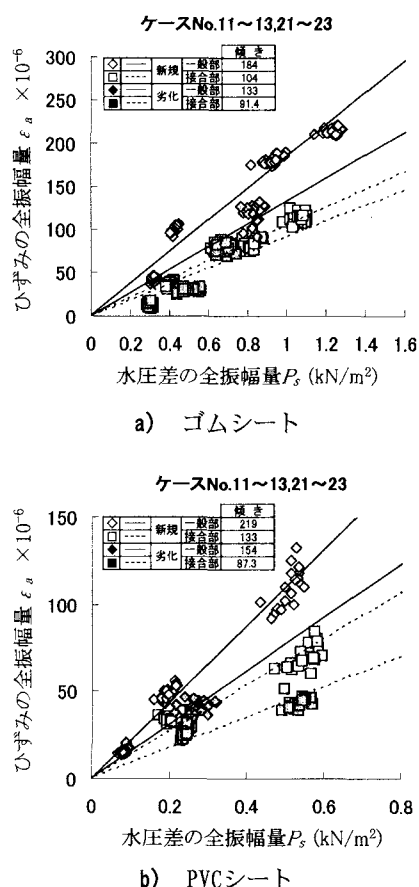


図-7 新規と促進劣化の水圧差とひずみの関係

$$\varepsilon_a = \frac{P_s(a \ln(m_1 + m_2) - b) \times 10^3}{tE} \quad (1a)$$

ここで、 P_s ：遮水シートに作用する水圧差の全振幅量(kN/m²)、 m_1, m_2 ：裏込め層と被覆層の平均割ぐり石質量(kg)、 t ：シートの厚み(m)、 E ：遮水シートのヤング率であり、ゴムは $E = 3.5$ (MPa)とした。また、 a および b は係数であり、本実験では $a = 2.55$ 、 $b = 5.78$ の値を示した。本算定式は割ぐり石質量の和が10kg以下の場合では、ひずみ量が負の値となるが、ひずみ量が小さく考慮しなくてもよい程度であるためである。また、式(1a)はゴムシートの実験値から提案した算定式であり、PVCシートにおいては実験値にばらつきが生じたため、算定することは困難であった。

式(1a)は、実験回数や実験ケースが限られているため、本実験における算定式として提案するものである。ただし、今後さらに検討を行うことで算定式の汎用性が確認されれば、混成堤および傾斜堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧算定式^{1), 2)}から得られる圧力を用いることで、現地遮水シートのひずみ量を算定することが可能となると考えられる。

(4) 多数波作用時の遮水シートの安定性

遮水シートは敷設されたときから半永久的に波の作用を受け続けることとなり、疲労により遮水シートの強度が低下すると考えられる。よって、遮水シートには繰り返しのひずみに対する安定性が必要となる。そこで、多数の波を作用させ、作用波数に対し遮水シートのひずみ量がどのように変化するか実験を行った。実験条件としては、シート下側に20～80kgの割ぐり石と間詰め石を敷き、上側には1～20kgの割ぐり石を敷設した。また、波浪条件としては波高50cm、周期4sの波を総波数20000波作用させた。その結果を示したのが図-10であり、作用波数とひずみの全振幅量 ε_a の関係を示した。ゴムシートとPVCシートの一般部および接合ともに、多少のばらつきはあるもののひずみ量に大きな変化はなく、波数が増すにつれてひずみ量が増減するといった傾向は見られなかった。よって、両シートとも多数の波を受けても安定性を維持し続けることが確認された。ただし、今回の実験では実現できなかったような、より高い水圧差や100万波オーダーの多数波作用時のひずみ量の変化を明確にすることは、今後の検討課題の一つである。

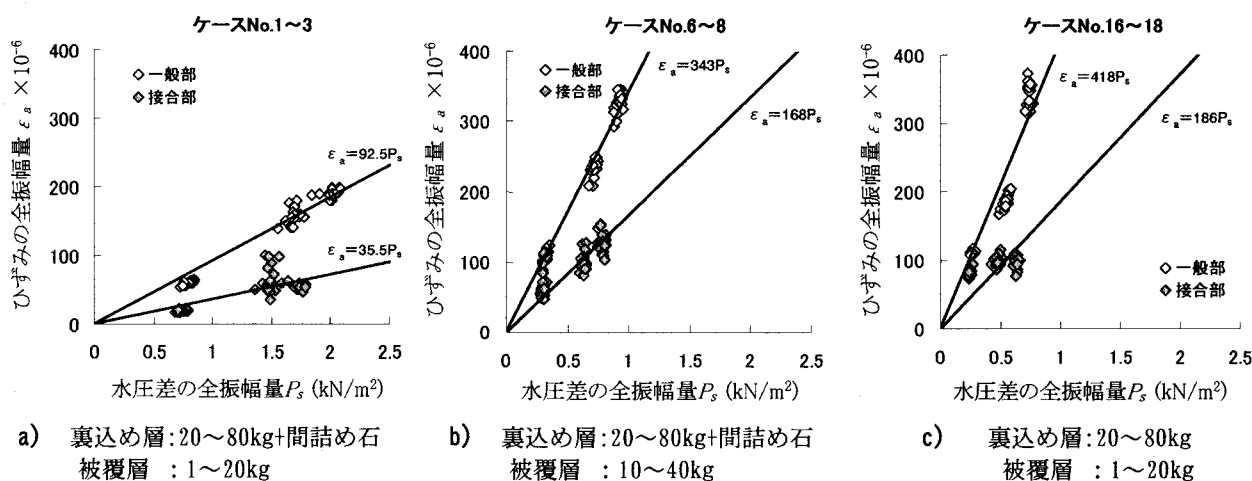


図-8 裏込め層と被覆層の割ぐり石質量の違いによるひずみの変化

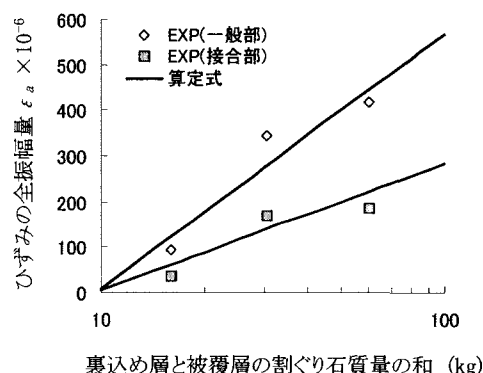


図-9 裏込め層と被覆層の平均割ぐり石質量の和とひずみ量の関係

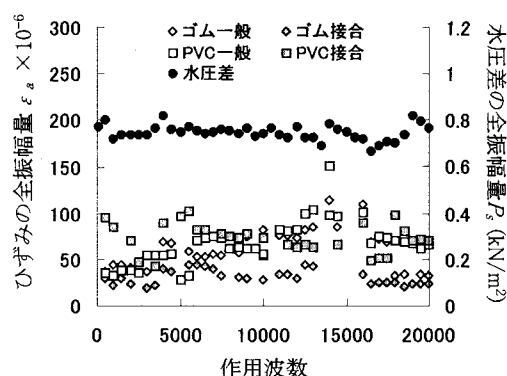


図-10 作用波数とひずみ量および水圧差の関係

4. 遮水シートの耐久性

管理型埋立護岸に敷設された遮水シートは繰り返す波の作用により疲労し、応力の集中する箇所は強度は徐々に低下していく。強度の低下した遮水シートに強い波力が作用すると、そこから亀裂や引き裂きが生じる可能性があり、護岸内の有害物質が漏出する危険性がある。そこで、遮水シートの耐久性を多数波作用実験後のシートの破損状況(引き裂きや突き破りの有無)と実験の前後における遮水シートの材料強度の変化で評価した。材料強度は、一般部の引張強さと接合部のせん断強さの測定を行った。まず、実験後のゴムシート接合部の写真を図-11に示す。図に示した以外の他の遮水シートにおいても、引き裂き等の破損は確認されなかった。また、保護層の不織布にも破断等が生じた痕跡は見受けられなかった。次に、実験前後の材料強度の変化を図-12に示した。ゴムシートの結果を図-12の左側に、PVCシートの結果を同図の右側に示す。ゴムシートの接合部のせん断強度が約10%低下したのが最大で、他の項目はほとんど強度の低下は見られなかった。これらから、本実験では両シートの一般部・接合部ともに実験後も十分な強度を有していることがわかった。耐久性の検討も安定性と同様で、更なる作用回数や圧力の増加による耐久性の検討が課題である。

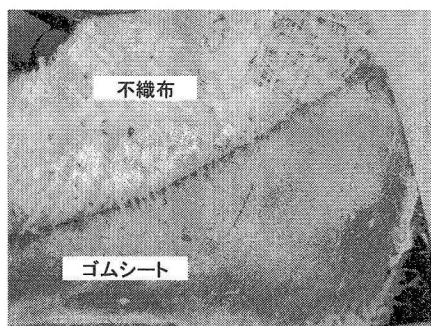


図-11 多数波作用実験後のゴムシート

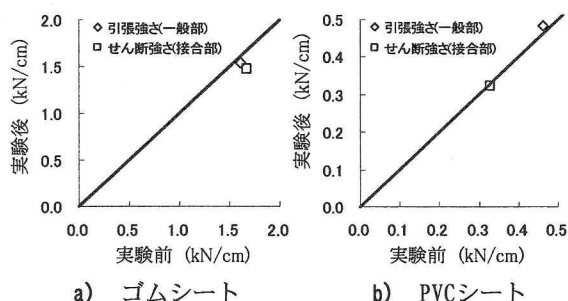


図-12 多数波作用実験の前後における物性値の変化

5. まとめ

本研究では遮水シートの挙動を明らかにすることで遮水シートの耐波安定性ならびに耐久性を検討した。検討結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 遮水シートは表面と裏面の水圧差によりひずみが生じ、ひずみ量は水圧差に比例する。同等の水圧差であっても接合部は一般部の半分程度のひずみ量となる。
- 2) 埋立護岸の裏込め石および被覆層の割ぐり石の質量の増加に伴い、ひずみ量が増加する。また、比較的小さな割ぐり石や間詰め石を施すことにより、遮水シートの耐波安定性が増すと考えられる。
- 3) 供用期間を30年程度と想定して促進劣化を行い、各遮水シートの一般部は、新規の7割程度のひずみ量となった。一方、接合部は7～9割と変化が小さい。接合部は、接合部分の硬さが高いため促進劣化によるシートの硬化の影響を受けにくい。

本研究では遮水シートの耐久性として20000波の波を作用させ、遮水シートの挙動や強度変化から検討を行い、十分な耐久性が確認された。今後は更なる波数と水圧差による耐久性の検討を行うことが課題の一つである。また、提案した算定式について、実験ケースや回数を増すことでより精度を上げ、汎用的なひずみ量の算定式とすることも今後の課題である。

謝 辞：本研究は(独法)港湾空港技術研究所とシバタ工業(株)の共同研究として行われたものである。研究を行うに当たり、同研究所ならびに同社の方々に多大なる御支援および御指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤井敦・宇野健司・北澤壮介・土田孝・五月女洋・伊野同：混成堤式管理型護岸の遮水シート作用波圧特性に関する研究，海洋開発論文集，第18巻，pp.83-88，2002。
- 2) 伊野同・鵜飼亮行・熊谷隆宏・前野詩朗：傾斜堤式管理型護岸の遮水シートに作用する波圧特性およびその評価方法，海岸工学論文集，第50巻，pp.701-705，2003。
- 3) 狩野真吾・諸星一信・小田勝也：廃棄物海面処分場遮水シートの突き破り抵抗に関する研究，国総研資料，142号，154 p，2004。
- 4) 財団法人港湾空間高度化センター 港湾・海域環境研究所：管理型廃棄物埋立護岸 設計・施工・管理マニュアル，2000。
- 5) 日本免震構造協会：免震積層ゴム入門 日本免震構造協会編，pp92-94，1995。