

遮水処理材としての膨潤性止水材の 膨潤率および膨潤圧に関する実験的検討

稲積 真哉* 木村 亮**
若月 正*** 小林 賢勝***

Experimental Study for Swelling Ratio and Pressure of Water Swelling Material as an Impermeable Material

by

Shinya INAZUMI*, Makoto KIMURA**,
Tadashi WAKATSUKI*** and Masakatsu KOBAYASHI***

A water swelling material is one of the rubbery impermeable materials which mixed synthetic resin elastomers as a base material, high absorbency polymers, filler and solvents. In this study, swelling characteristics of the water swelling material on the water polluted with COD and BOD, as an impermeable material at coastal waste landfill site, are examined by laboratory swelling ratio test. Furthermore, the factor in which it influences the swelling pressure of water swelling material is clarified by measuring the swelling pressure. As the results, the COD nor the BOD concentrations in the soaked water influence the swelling ratio of the water swelling material. When the thicknesses of water swelling material are 2 and 3 mm, the maximum swelling pressure of 0.5 and 0.7MPa that correspond to hydraulic pressure by depth of 50 and 70 m is possessed, respectively.

Key words: BOD, COD, Swelling ratio, Swelling pressure, water swelling material

1 緒 言

膨潤性止水材は合成樹脂エラストマーを母材とし、高吸収性ポリマー、充填剤および溶剤等を配合した流動性ならびに自己修復性を有する止水材である。なお、膨潤性止水材の乾燥塗膜から抽出された水は水道法に基づく水質基準を満たし、環境に適合するものである。

土木分野において膨潤性止水材は、鋼矢板や鋼管矢板の継手箇所の止水性を高めるために、継手遮水処理材として多用されている (Fig. 1 参照)^{1), 2)}。なお、継手箇所に塗布もしくは接着された膨潤性止水材は、地盤中の水と接触することで膨潤して継手内通水空間を塞ぎ、結果的に継手箇所の遮水が図られる。ただし、これまで膨潤性止水材は主に仮設用遮水材として適用されることが多かった。これは、膨潤性止水材に対する膨潤メカニズムの解明が途上であり、遮水処理材として経験的に適用されてきた背景がある。そこで、膨潤性止水材の膨潤率および膨潤圧特性の解明は、鋼矢板継手や鋼管矢板継手の高遮水化に留まることなく、他用途における膨潤性止水材の本設適用へ多大に貢献できると考えられる。

本論文では、膨潤性止水材が海面廃棄物埋立処分場に

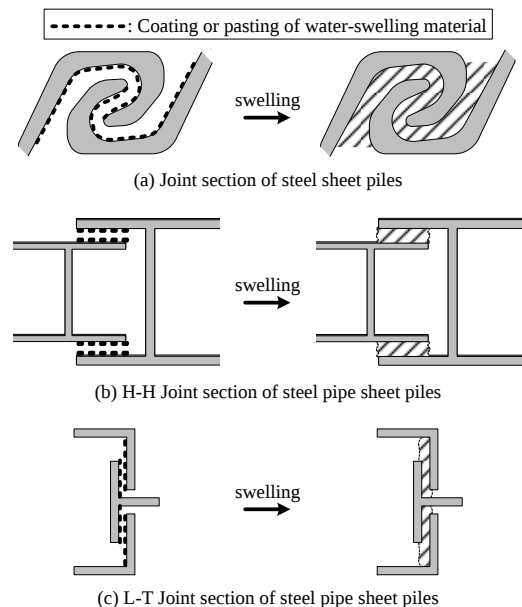


Fig. 1 Water cut-off treatment on joint section of steel sheet piles or steel pipe sheet using water swelling materials

+ 原稿受理 平成22年 月 日 Received

* 正 会 員 京都大学大学院工学研究科 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂Cクラスター, Grad. Sch. of Engineering, Kyoto Univ., Nishikyo, Kyoto, 615-8540

** 非 会 員 京都大学産官学連携センター 〒615-8520 京都市西京区京都大学桂ローム記念館, Innovative Collaboration Center, Kyoto Univ. Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8520

*** 賛助会員 日本化学塗料株式会社 〒252-1111 綾瀬市上土棚北4丁目10-43, Nihon Chemical Paints Co., Ltd., Ayase, 252-1111

おける鋼矢板ならびに鋼管矢板継手の遮水処理材として適用されることを想定した上、汚濁水に対する膨潤性止水材の膨潤率特性を検討する。さらに、遮水処理材として膨潤性止水材の膨潤圧を実験的に測定することで、膨潤圧に影響を及ぼす要因を明らかにする。なお、既往研究³⁾では、主として重金属類や有機溶剤による汚濁水に対する膨潤性止水材の膨潤特性を実験的に解明している。

2 膨潤性止水材の概要

2.1 遮水特性

近年では、海面廃棄物埋立処分場における鋼矢板継手¹⁾ならび鋼管矢板継手²⁾の高遮水化において、継手遮水処理材として膨潤性止水材の積極的な適用が試みられている (Fig. 1 参照)。さらに、膨潤性止水材が接着された鋼管矢板継手の遮水性能は、例えば淡水および人工海水 (3% 食塩水) の環境において、換算透水係数 $k_e=1\times 10^{-8}\text{cm/s}$ オーダーの低透水性を確保することが明らかにされている²⁾。また、原位置における膨潤性止水材の剥離や遮水性能等も同時に検証されており^{4), 5)}、概ね良好な結果が報告されている。

膨潤性止水材を継手遮水処理材として適用する場合、シートとして継手内に接着する止水材 (膨潤性シート)、ならびに塗料として塗布する止水材 (膨潤性塗料) があり、現場条件に応じてこれら膨潤性止水材の性状を選択することが可能である。ここで、膨潤性塗料の塗布は止水材と鋼がより密実に合成することで剥離などを防止できる。また、膨潤性シートは品質管理に優れており、所定厚でムラなく鋼へ接着することができる。なお、膨潤性止水材自体の透水係数はシートもしくは塗料による相違がなく、いずれも $1\times 10^{-9}\text{cm/s}$ オーダーである。

2.2 膨潤特性および体膜強度特性

膨潤性止水材の膨潤機構は、主として膨潤性止水材中に含まれる高吸収性ポリマー (高い水分保持性能を有するように設計された高分子材料) の膨潤に依存するものである。なお、高吸収性ポリマーは、イオン性の基を持った高分子電解質を緩く架橋した網目構造である。高吸収性ポリマーが水 (溶媒) に浸漬した場合、高分子電解質と水 (溶媒) が混合するため、水 (溶媒) は次第に高吸収性ポリマーの網目構造内に吸収され、高吸収性ポリマーの膨潤が生じる。

現状において使用頻度の高い膨潤性止水材の組成では、淡水および海水に浸漬すると、24 時間後に重量比でそれぞれ 15~30 倍および 5~7 倍に膨潤する³⁾。

さらに、既往の研究³⁾では膨潤性止水材の組成と膨潤および膨潤体膜強度特性に関して実験的な検討を実施している。既往の研究³⁾から明らかにされた膨潤性止水材の膨潤特性は以下のとおりである。

- (1) 高いエーテル化度 (DS 値) を有する高吸収ポリマーを配合した膨潤性止水材は、人工海水中での膨潤率が大幅に向上する。特に、配合する高吸収ポリマーの DS 値を 0.9m/c6 に改質することで、人工海水

環境下、現行の膨潤性止水材 (高吸収ポリマーの DS 値=0.6m/c6) と比べて約 2 倍の膨潤率が得られる。なお、DS 値とはポリマー構造の結合強さを表す指標であり、高吸収性ポリマーにおけるグルコース ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) 1 ユニット (炭素数 6 個) に対するエーテル化 (ナトリウム化) したナトリウム (Na) の物質質量 (mol 数) である。

- (2) 淡水温の上昇は、膨潤性止水材の膨潤率の増加に影響する一方、人工海水の水温は膨潤性止水材の膨潤率に影響を及ぼさない。また、膨潤性止水材は強酸もしくは強アルカリ領域において膨潤率が低下する傾向にあるが、pH が 4~12 の領域では pH が膨潤性止水材の膨潤率に及ぼす影響が小さい。
- (3) 重金属類が含有された浸漬水中においても膨潤性止水材は淡水中と同程度に膨潤し、浸漬水に含まれた重金属類は膨潤性止水材の膨潤率に大きな影響を及ぼさない。
- (4) 有機溶剤が浸漬水に含まれる場合、有機溶剤が飽和濃度条件下での膨潤性止水材の適用は不可能である。一方、2.0g/L 程度の有機溶剤を含有する浸漬水では、膨潤性止水材の膨潤に対して全く影響が確認されず、十分な膨潤率が得られる。
- (5) 膨潤性止水材の組成成分である合成樹脂エラストマーに関する樹脂含有量の調整は、膨潤性止水材の膨潤体膜強度の向上に貢献する。特に、樹脂含有量を高めた合成樹脂エラストマーを配合した膨潤性止水材は、現行の膨潤性止水材と比べて、淡水ならびに人工海水中での膨潤体膜強度をそれぞれ約 2 倍および 1.5 倍まで高めることができる。なお、膨潤体膜強度とは、膨潤性止水材が膨潤した状態における膜強度である。

3 膨潤性止水材の膨潤率試験

3.1 試験概要

本章では有機汚濁の浸漬水条件において、膨潤性止水材の膨潤率特性を検討するため、独自に組み立てた膨潤率試験を実施した。なお、有機汚濁した浸漬水の再現には、化学的酸素要求量 (COD) および生物化学酸素要求量 (BOD) を指標として設定している。

COD は水中の物質が酸化されることによって消費される酸素の量で表し、湖沼、海域および工場排水等の汚濁度指標の一つである。ここで、生活環境の保全に関する環境基準 (生活環境項目) における COD 濃度では、湖沼において 1~8mg/L 以下、および海域において 2~8mg/L 以下である。一方、BOD は水中の有機物が微生物により分解される過程で消費される水中の酸素量であり、河川の汚濁度指標の一つである。また、生活環境の保全に関する環境基準 (生活環境項目) では、河川の水利用や自然環境保全の点から水質階級 (類型) が設定されており、その類型ごとに BOD 濃度に関する基準値が設定されている。例えば、最も水質が良好な河川区間は類型 AA であり、BOD 濃度は 1mg/L 以下である。一方、

最も汚れた河川区間は類型 E であり、BOD 濃度は 10mg/L 以下となっている。

膨潤率試験では淡水ならびに人工海水（3%食塩水）をベースとして、各々濃度の COD および BOD に調整された水溶液に浸漬した膨潤性止水材の膨潤率を測定している。実施した膨潤率試験の手順は以下のとおりである。

- (i) 膨潤性止水材を一定量乾燥させて 2mm 厚のシート状にし、2×2cm の試験片を準備する。
- (ii) 試験片の初期重量を測定し、淡水ならびに人工海水（3%食塩水）をベースとして、予め各々濃度の COD および BOD に調整された水溶液で満たされた恒温水槽内（20℃）に浸漬する。
- (iii) 2 日間浸漬した後、試験片を取り出して浸漬後の重量を測定する。
- (iv) 膨潤率（浸漬後重量／初期重量）を計算する。

ここで、各々 COD 濃度は過酸化水素水添加量を調整することで準備作成した。また、COD 濃度の検査は簡易的な比色判定する測定方法（アルカリ性過マンガン酸カリウム酸化法）を用いた。さらに、各々 BOD 濃度は河川水を採取し、グルコース（ブドウ糖）を添加した上、空気をバブリングしながら数日間放置し、微生物を培養することで準備作成した。また、BOD 検査は COD の場合と同様、比色判定することができる簡易測定方法（酸性インジゴカルミン比色法）を用いた。

試験に供したシート状の膨潤性止水材は、組成成分である高吸収性ポリマーの DS 値が異なるサンプル A

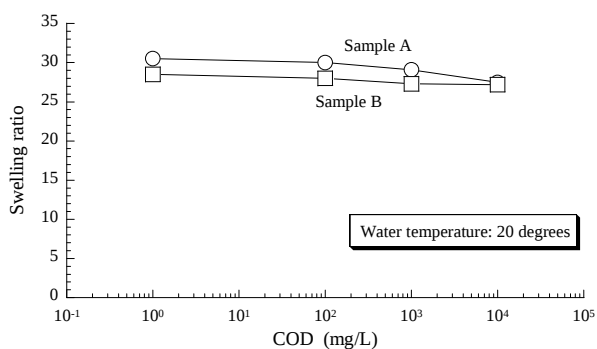
（DS=0.6m/c6）およびサンプル B（DS=0.9m/c6）の 2 種類である。なお、2.2 で述べたとおり、高吸収ポリマーの DS 値の改質は、人工海水中における膨潤性止水材の大幅な膨潤率向上に寄与する。

3.2 浸漬水の BOD および COD 濃度と膨潤率

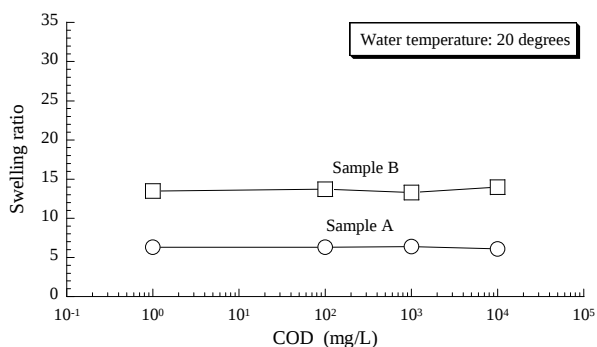
Fig. 2 は、淡水および人工海水（3%食塩水）における COD 濃度と膨潤性止水材の膨潤率を示している。これより、淡水環境では COD 濃度の上昇に伴い、サンプル A および B も膨潤率が若干低下する傾向にある。ただし、COD 濃度が 1mg/L 以下と 10,000mg/L の場合を比較した場合、膨潤率の低下はサンプル A が 10%およびサンプル B が 5%程度であり、COD 濃度が膨潤性止水材の膨潤率に及ぼす影響は実用上小さいと判断できる（Fig. 2(a)参照）。同じく、人工海水環境においても COD 濃度がサンプル A およびサンプル B の膨潤率に及ぼす影響は小さい（Fig. 2(b)参照）。

Fig. 3 は、淡水および人工海水（3%食塩水）における BOD 濃度と膨潤性止水材の膨潤率を示している。これより、COD 水溶液の場合と同様、淡水および人工海水環境において BOD 濃度がサンプル A およびサンプル B の膨潤率に及ぼす影響は小さいと判断できる。

上記のとおり、膨潤性止水材の膨潤に対して浸漬水中の COD および BOD の影響は小さいことが明らかになった。ただし、COD および BOD 濃度の増大に伴って膨潤性止水材の膨潤率が若干においても低下する傾向（Fig. 2 および Fig. 3 参照）は、次のように考察される。浸漬水

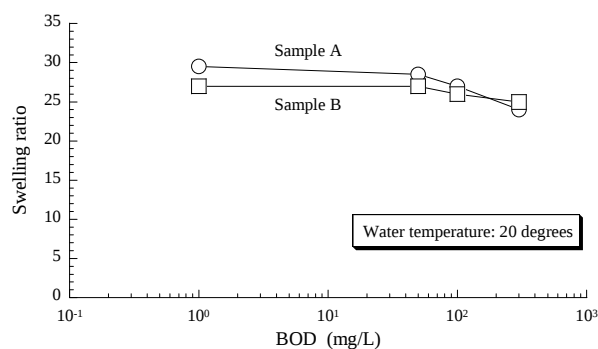


(a) Soak in plain water

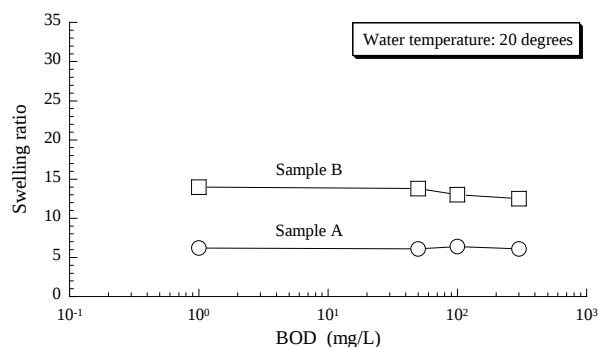


(b) Soak in artificial sea water (3% saline)

Fig. 2 Relationship between swelling ratio and COD concentration of soaking water for water-swelling material



(a) Soak in plain water



(b) Soak in artificial sea water (3% saline)

Fig. 3 Relationship between swelling ratio and BOD concentration of soaking water for water-swelling material

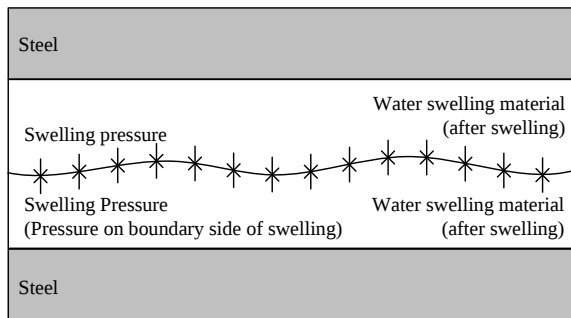


Fig. 4 Image of swelling pressure on swelling boundary side

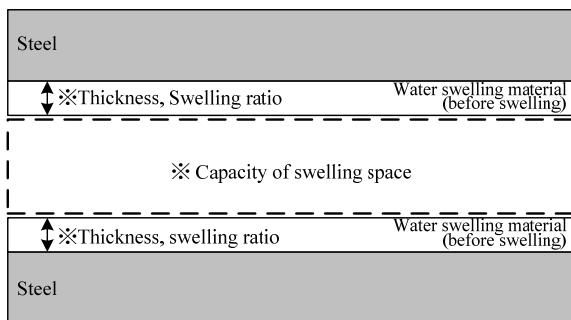


Fig. 5 Factor that influences swelling pressure of swelling still water material

中の酸素量ならびに微生物量の増減は、膨潤性止水材の組成成分である高吸収ポリマーの不溶化を誘発する可能性が考えられる。また、高吸収性ポリマーの不溶化は、高吸収性ポリマーが吸収できる水分量が減少させ、結果的に膨潤性止水材の膨潤を阻害する結果をもたらす。

4 膨潤性止水材の膨潤圧試験

4.1 試験概要

本章では、鋼矢板ならびに鋼管矢板継手に塗布・接着された膨潤性止水材（Fig. 1 参照）の膨潤特性を膨潤圧の観点から検討することを目的とし、膨潤性止水材の膨潤圧試験を実施した。ここで、膨潤性止水材の膨潤圧とは、鋼矢板ならびに鋼管矢板内において膨潤した膨潤性止水材の膨潤境界面における応力である（Fig. 4 参照）。また、膨潤性止水材の膨潤圧は、膨潤性止水材の膨潤量、膨潤空間容量および接着条件に依存すると考えられる（Fig. 5 参照）。なお、膨潤空間容量が等しい条件において、膨潤性止水材の膨潤量（率）の増大は結果的に膨潤圧の増大に寄与する。

膨潤性止水材の膨潤圧試験は、異なる大きさの H 鋼フランジクリアランス（間隔：10mm）の両側へ所定厚（1，2 および 3mm）の膨潤性止水材を接着する。なお、膨潤圧試験では、一般的な鋼管矢板継手内における膨潤性止水材の接着条件ならびに膨潤空間容量を再現している（Fig. 1 参照）^{2), 6)}。Fig. 6 は用いた膨潤圧試験装置の詳細を示している。さらに、試験体の作製方法および試験手順は以下のとおりである。

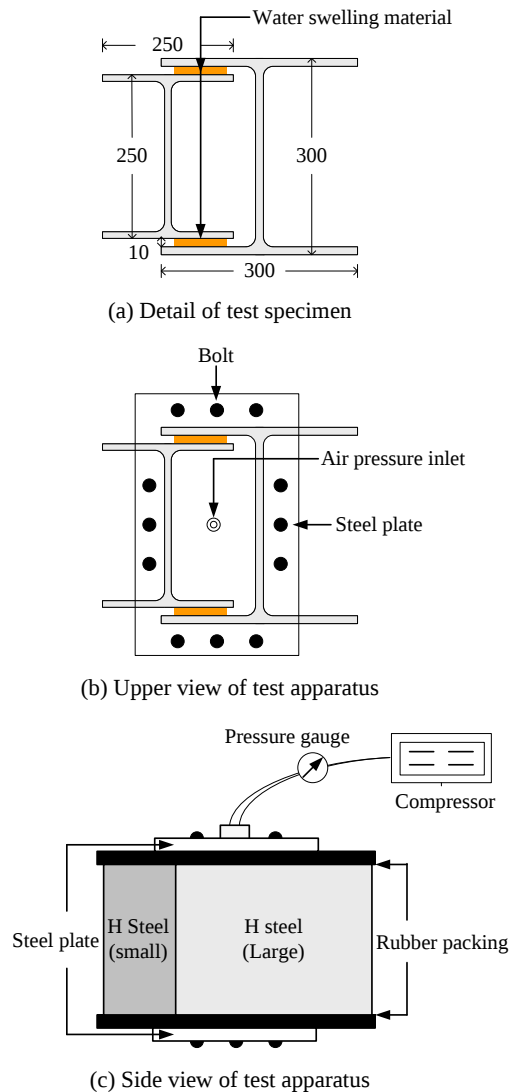
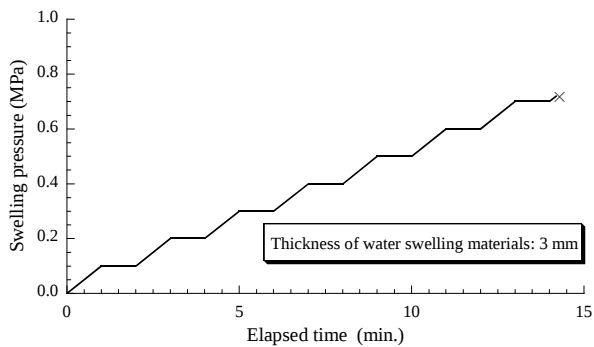
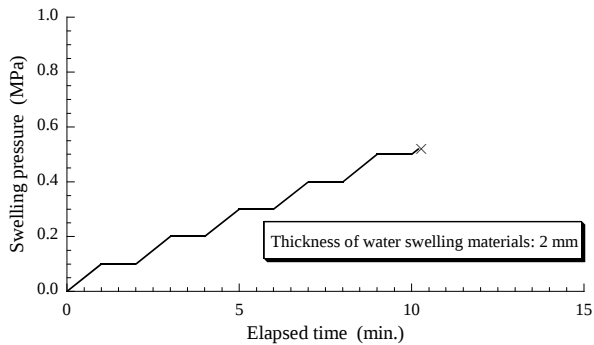


Fig. 6 Outline of swelling pressure test for water swelling material

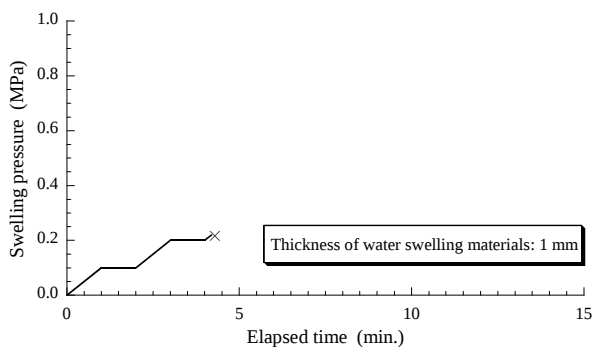
- (i) H 鋼フランジクリアランスの両面に所定厚さの膨潤性止水材を接着する（以降、“試験体”として略称する）。
- (ii) ゴムパッキンおよび鋼鉄製プレートを用いて試験体の上下部を挟み、ボルトによりゴムパッキン、鋼鉄製プレートおよび試験体との間に間隙が生じないように固定する。
- (iii) (ii)で作製された試験体を淡水で満たされた恒温水槽中（20℃）で3日間浸漬し、試験体内に接着した膨潤性止水材を完全に膨潤させる。
- (iv) 鋼鉄製プレート中央に開いた空気圧注入口にエアコンプレッサーを接続する。
- (v) エアコンプレッサーを開き、試験体内部に空気圧を送り込む。この際、空気圧の調節は圧力計で行う。調節方法は、1分毎に0.1MPa増加させ、空気漏れが起こるまで圧力を増加させる。また、空気漏れが発生した時点の空気圧を膨潤圧として推定する。



(a) Thickness of water swelling material bonded to both sides: 3 mm



(b) Thickness of water swelling material bonded to both sides: 2 mm



(c) Thickness of water swelling material bonded to both sides: 1 mm

Fig. 7 Swelling pressure of swelling still water material

4.2 膨潤性止水材の膨潤圧

Fig. 7 は、膨潤性止水材の接着厚と膨潤圧の関係を示している。これより、膨潤性止水材の接着厚が薄くなれば膨潤圧は低下し、1mm の接着厚においては膨潤圧 0.2MPa である。一方、膨潤性止水材の接着厚が 2mm および 3mm の場合、それぞれ 0.5MPa および 0.7MPa（水深 50m および 70m での水圧に相当）の膨潤圧を示す。

当該膨潤圧試験と同様の試験条件における膨潤性止水材の透水係数は、膨潤圧以下の作用水圧において $1 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ オーダーであった。すなわち、H 鋼フランジクリアランスの両面に接着された膨潤性止水材の透水係数は、膨潤圧以下の外的作用圧において膨潤性止水材自体の透水係数と同レベルであることが分かる（2.1 参照）。よって、鋼矢板ならびに鋼管矢板継手に対して遮水処理材として膨潤性止水材を適用する場合には、外的暴露条件（暴露水質および作用水圧等）に対する膨潤性

止水材の膨潤圧および膨潤量（率）との関係を確認した上、現場にて必要とされる膨潤性止水材の接着厚・塗布厚を決定することが重要である。そこで、膨潤性止水材の接着厚・塗布厚に関する決定手順を以下に提案する。

- (i) 膨潤性止水材に要求される遮水性能を決定する。
- (ii) 接着もしくは塗布する膨潤性止水材の膨潤空間容量を決定する。
- (iii) 水質ならびに水圧等で代表される外的暴露条件を設定する。
- (iv) (ii)および(iii)において(i)を満足する膨潤性止水材の接着厚・塗布厚を決定する。

5 結 言

本論文では、鋼矢板ならびに鋼管矢板継手の遮水処理材として膨潤性止水材の適用を想定した上、汚濁水に浸漬された膨潤性止水材の膨潤率を検討した。また、遮水処理材として膨潤性止水材の膨潤圧を測定することで、膨潤圧に影響を及ぼす要因を明らかにした。

得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 膨潤性止水材の膨潤率は、淡水および人工海水環境において浸漬水中の COD および BOD の影響を受けないと判断できる。
- (2) 膨潤性止水材の膨潤圧は、1mm の接着厚において 0.2MPa である。一方、膨潤性止水材の接着厚が 2mm では 0.5MPa、さらに 3mm の接着厚では 0.7MPa の膨潤圧を示す。
- (3) H 鋼フランジクリアランスの両面に接着された膨潤性止水材の透水係数は、膨潤圧以下の外的作用圧において膨潤性止水材自体の透水係数と等しい。

4.2 では遮水処理材として膨潤性止水材の接着厚・塗布厚に関する概略的な決定手順を提案した。今後は本研究ならびに既往研究³⁾の成果に基づき、与条件に対する膨潤性止水材の接着厚・塗布厚の決定手順を詳細に検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Oki, T., Torizaki, K., Kita, H., Yoshida, M., Sakaguchi, Y., Yoshino, H.: "Evaluation of impermeability performance of the vertical impermeable walls by using steel sheet piles and steel pipe sheet piles", Proc. of the 5th Japan National Symposium on Environmental Geotechnology, pp.53-58 (2003).
- 2) Inazumi, S., Kimura, M., Too, A.J.K. and Kamon, M.: "Performance of H-jointed steel pipe sheet piles with H-H joint in vertical hydraulic cutoff walls", Proc. of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 4, pp.2269-2272 (2005).
- 3) Inazumi, S., Wakatsuki, T., Kobayashi, M. and Kimura, M.: "Material properties of water swelling material used as water cut-off treatment material at waste landfill sites", J. of Material Cycles and Waste Management, Vol.12, No.1, Accepted for Publication (2010).
- 4) Kimura, M. and Inazumi, S.: "Practical application of

- H-jointed steel pipe sheet piles on bridge pier foundation", Proc. of the 13th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. I, Part I, pp.355-358 (2007).
- 5) Inazumi, S. and Kimura, M.: "On-site verification for installation and permeability of H-jointed SPSPs with H-H joints", Proc. of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol.3, pp.2540-2543 (2009).
- 6) Waterfront Vitalization And Environment Research Center: "Design, Construction and Management Manual for Managed Type Waste Reclamation", Waterfront Vitalization and Environment Research Center, (2002).