

室内実験に基づく現地捨石層の 透水係数の評価

黒滝 秀平¹・佐貫 宏²・鵜飼 亮行³・関 祐治⁴・宮崎 敏弘⁵

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: shuuhei.kurotaki@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: hiroschi.sanuki@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: akiyuki.ukai@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 五洋建設(株) 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: sukeharu.seki@mail.penta-ocean.co.jp

⁵ 正会員 五洋建設(株) 東京土木支店 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)
E-mail: toshihiro.miyazaki@mail.penta-ocean.co.jp

遮水シートを使用した管理型埋立護岸において、最終締切を遮水シートで行う場合は捨石マウンド等の石材の間を水が通って海水交換が行われるが、石材から損失を受けることで内外水位差が発生し、堤内水位が低い場合においては遮水シートに揚圧力が作用する。ポンプ注水により堤内水位を高くすることが対策となるが、ポンプ台数等を決定するために必要な石材の透水係数の設定が課題であった。既往研究では、碎石程度の小さい粒径について実験しているが、現地規模粒径についてはなされていない。そこで、現地規模に近い粒径を用いて透水実験を行い、Dupuit-Forchheimer 則による計算値と比較し、適用性について検討した。その結果、粒径が大きい場合でも DF 則は適用でき、現地観測結果との比較から実規模粒径にも DF 則は実用上適用可能であることを示した。

Key Words : permeability coefficient, rubble stone, laboratory experiment, disposal site, Dupuit-Forchheimer law, field observation, numerical simulation, water level fluctuation

1. はじめに

遮水工を持つ管理型廃棄物埋立護岸では、遮水工の最終締切時に潮位変動に起因して、締切前の限られた開口部から大きな通水が生じることが考えられ、その対策が必要となる。

図-1 および図-2 に平面形状と構造を示す処分場では、余水吐のケーソン締切を行った後、遮水シートを用いて

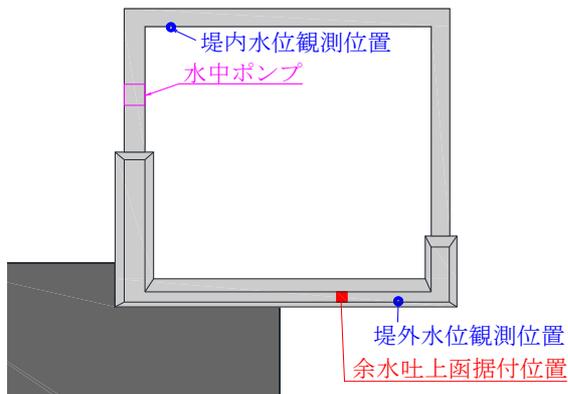


図-1 遮水護岸平面図

通水部となる捨石や裏込石の最終締切を行う。ケーソン締切後は、潮位変動に伴う堤内外の海水の流出入は遮水シート開口部を通ることでのみ行われるが、石材内の損失により内外水位差が発生し、堤外水位が高い場合にお

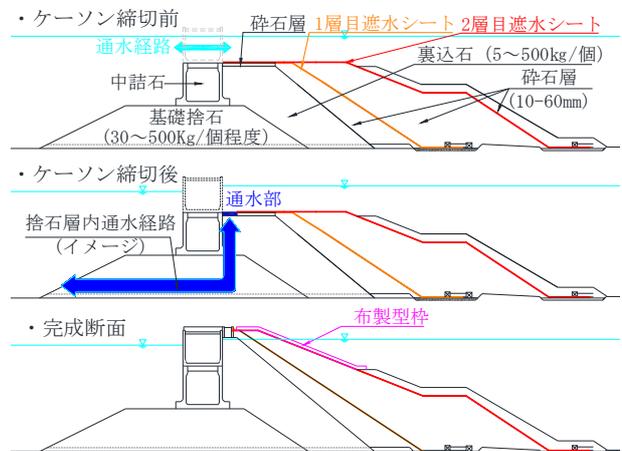


図-2 混成堤断面図

表-1 実験ケース

	使用粒径 (mm)	透水距離 (mm)	計画水位差 (mm)	備考
case1	50~80	1000	50,100,150	
case2	10~20	1000	50,100,150	
case3	10~20	500	50,100,150	粒径毎2層
	50~80	500		
case4	10~20	1000	50,100,150	粒径2種類混合
	50~80			

いては遮水シートに揚圧力が作用することが懸念される。

そこで、水位差発生対策として堤内へのポンプ注水を行い、常に堤内水位の方が高い状態を保持することとした。しかし、ポンプの数や吐出量等の条件を設定するための重要なパラメータである裏込石や捨石層の透水係数の設定が課題であった。捨石層内透水係数に関する既往の研究では、砕石程度の裏込石等に比べて小さい粒径についての実験はなされているが、現地規模に近づけた粒径についてはなされていない。

本研究では、現地規模に近い粒径(50~80mm)を用いて透水実験を行い、Dupuit-Forchheimer 則(以下、DF 則)を用いた計算値と比較し、その適用性について検証を行う。その後、現地水位観測結果と DF 則を用いたシミュレーション結果を比較し、粒径実規模(石材重量 5~500kg 程度の球と仮定: 152mm~707mm, 単位体積重量 2.7t/m³)における DF 則の適用性について検討した。

2. 室内透水実験

室内透水実験を行い、透水係数の実験値(ダルシー則)と計算値(DF則)との関係を確認した。

実験では、より現地規模に近い粒径を有した石材を使用して実験を行うことが目的であるため、実験装置で使用可能な限り大きな粒径として、50~80mm程度の粒径の石材を使用することにした。また、高橋ら(1996)によるDF則を用いた計算結果と比較するために(図-3)、粒径が10~20mm程度である5号砕石を使用し、この時の透水係数についても確認を行った。前述の通り、粒径が50~80mm程度のものを使用した場合を基本ケース(case1)とし、既往研究との確認を行う粒径の小さいケースをcase2とした。

また、現地においては粒径が大きい捨石層の上に、粒径が小さい砕石層を有する断面が存在したため、通水経路の途中で粒径が変化する場合としてcase3を設定し、その変化を確認した。

case4では現地において5~500kg/個程度の石が使用されており、粒径が広い範囲にわたって分布していることから、case1・2による石材の粒径による変化だけでなく、異なる2種類の粒径を混合してより粒径の分布を広くすることによる透水係数の変化を確認した。

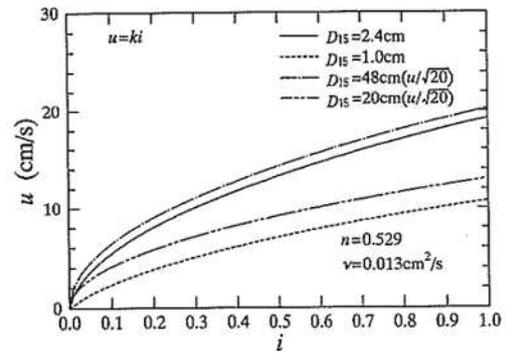


図-3 動水勾配とマウンド内の流速(高橋ら, 1996)



図-4 使用石材

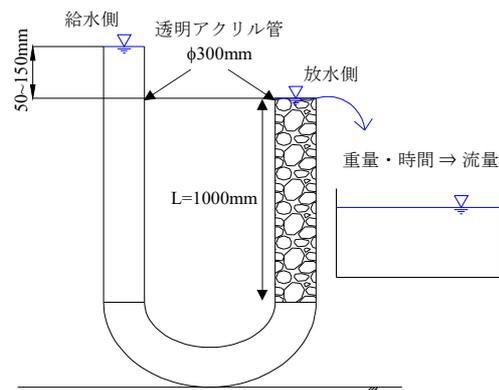


図-5 室内透水実験概要図



図-6 室内透水実験状況

DF則では計算において空隙率をパラメータとして使用するため、事前に各ケースについて計測したところ、捨石の標準的な空隙率である0.4程度になった。本実験における実験ケースおよびそれぞれに該当する空隙率を表-1, 使用した石材を図-4に示す。

室内透水実験は図-5, 6に示すような装置を使用した。



図-7 実験ケース毎の石材層

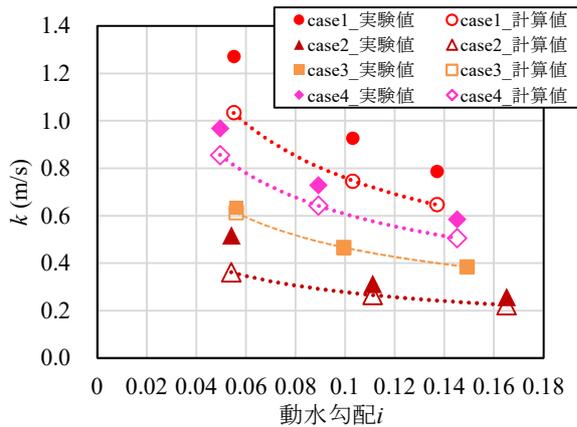


図-8 実験結果に基づく透水係数比較

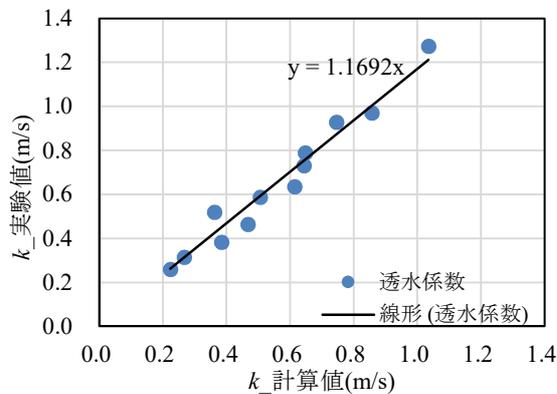


図-9 実験結果とDF則による算定値の関係

実験装置は透明アクリル管を2本立ち上げ、片側には石材を充填し(図-7)、もう一方は常に溢水させることで定水位透水試験を行った。また、動水勾配による変化を確認するために、給水側のアクリル管には高さ5~15cmのアタッチメントを取り付けられるようにした。計測においては、クレーンのフックにロードセルを取り付けることで、放水された水の重量を時系列で計測し、重量と計測時間から流量へと換算した。

表-2は実験結果の一覧およびDF則で使用された空隙率などのパラメータおよび計算により導かれた係数、各

表-2 透水係数比較表

・case1(粒径50~80mm)						
動水勾配 <i>i</i>		v(m/s)		k(m/s)		
計画	実測	実験値	DF則	実験値	DF則	
0.050	0.055	0.070	0.056	1.273	1.016	
0.100	0.103	0.096	0.077	0.928	0.746	
0.150	0.137	0.108	0.089	0.788	0.648	
・DF則計算条件			・レイノルズ数			
係数a	係数b	空隙率n	粒径D(mm)	平均レイノルズ数		
0.0364	16.9657	0.460	60	4409		
・case2(粒径10~20mm)						
動水勾配 <i>i</i>		v(m/s)		k(m/s)		
計画	実測	実験値	DF則	実験値	DF則	
0.050	0.054	0.028	0.020	0.519	0.362	
0.100	0.111	0.035	0.030	0.315	0.267	
0.150	0.165	0.043	0.037	0.260	0.224	
・DF則計算条件			・レイノルズ数			
係数a	係数b	空隙率n	粒径D(mm)	平均レイノルズ数		
0.5371	78.5369	0.410	16	461		
・case3(2層)						
動水勾配 <i>i</i>		v(m/s)		k(m/s)		
計画	実測	実験値	DF則	実験値	DF則	
0.050	0.056	0.035	0.034	0.635	0.614	
0.100	0.099	0.046	0.046	0.463	0.468	
0.150	0.149	0.057	0.057	0.383	0.385	
・DF則計算条件			・レイノルズ数			
係数a	係数b	空隙率n	粒径D(mm)	平均レイノルズ数		
0.1862	41.982	0.435	30	1360		
・case4(粒径2種類混合)						
動水勾配 <i>i</i>		v(m/s)		k(m/s)		
計画	実測	実験値	DF則	実験値	DF則	
0.050	0.050	0.048	0.042	0.970	0.857	
0.100	0.089	0.065	0.057	0.730	0.644	
0.150	0.145	0.085	0.073	0.586	0.506	
・DF則計算条件			・レイノルズ数			
係数a	係数b	空隙率n	粒径D(mm)	平均レイノルズ数		
0.0597	26.179	0.410	60	3416		

ケースにおける平均レイノルズ数である。動水勾配が計画値と一致していないのは、給水側アタッチメントの取り付け高さにずれが生じたためである。また、実験時は水温一定のもと、粒径の大小によりレイノルズ数が変化したことから、慣性項が卓越していることが分かり、DF則が適用可能であることを確認した。

図-8は実験結果から得られた透水係数の実験値およびDF則による計算値と動水勾配との関係を示している。case1~4において若干のばらつきが見られるが、DF則による計算結果との関係は一致している。case2を見ると、DF則による計算結果は動水勾配が0.1の場合において0.2m/s程度を示しており、既往研究と同等の結果となった。また、それぞれのケースについて確認すると、case1においては透水係数が0.6m/sを上回る値が確認でき、粒径の拡大による透水係数の上昇が確認できた。case3, case4においてもDF則との関係は非常に良く表現されており、case3の透水係数の方が小さいことから、粒度分布の範囲が広い場合よりも、粒径が小さい場合の方が透水係数に与える影響が大きいことが分かった。

図-9にcase1~4における実験結果とDF則による算定値

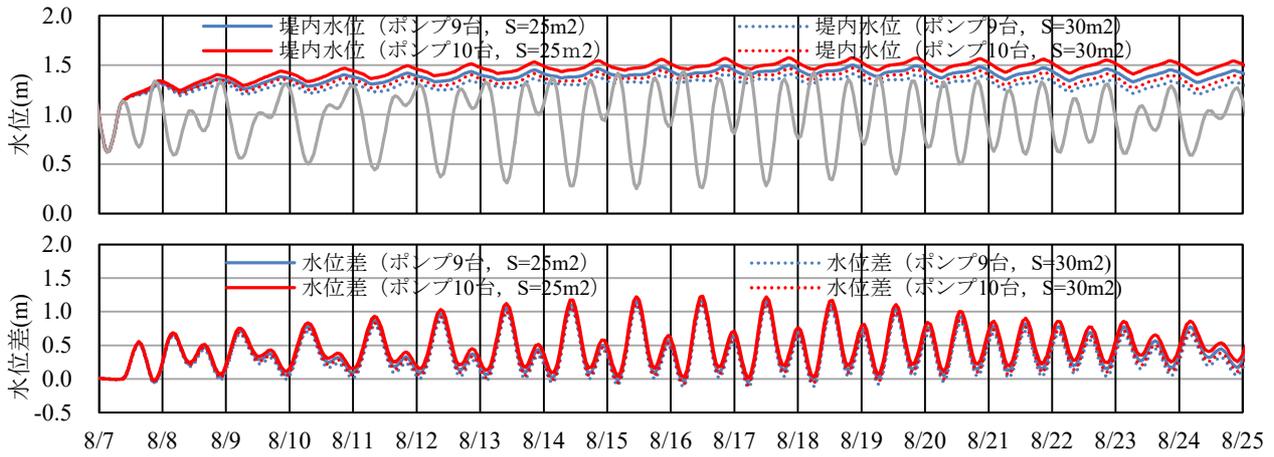


図-11 簡易計算結果 (上: 水位, 下: 水位差)

の関係を示す. ややDF則による算定値の方が過小であるものの, よく一致していると考えられ, 実験で使用した50~80mm程度の粒径を有する石材にDF則は適用可能であることが分かった.

3. ボックスモデルによる数値計算

室内透水実験により, 室内実験を実施可能な粒径におけるDF則の適用性が確認できた. 次に, 現地観測を行い, 数値モデルの妥当性について検証することが適当であるが, すでに現地の大部分において遮水シートによる締切が行われているため, 内外水位差に起因するシートの浮き上がりが懸念された. そこで, 現地観測に先行する形でDF則を用いた堤内水位のシミュレーションを行い, 透水係数や開口可能な面積について確認を行った.

計算イメージを図-10に示す. 計算に用いた式は以下の通りであり, 連続の式およびダルシー則を用いて水位, 流速を求め, 捨石層等における透水係数の計算はDF則に従っている. なお, 潮位の変化が穏やかなことから, タイムステップを1sと細かく設定し, 150時間程度の助走期間を設けることで透水係数の値を安定させてから本計算を行うようにした. ここで, u : 発生流速, S : 開口面積, k : 透水係数, h_0 : 堤外水位, h_1 : 堤内水位, L : 透水距離, A : 堤内面積, n : 空隙率, ν : 水の動粘性係数

$$\Delta h_1 = \frac{u S \Delta t}{A} = \frac{k i S \Delta t}{A} = k \frac{h_0 - h_1 S \Delta t}{L A} \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{a + b|u|} \quad (2)$$

$$a = \alpha_0 \left\{ \frac{(1-n)^3}{n^2} \right\} \left\{ \frac{\nu}{g D_{15}^2} \right\} \quad (3)$$

$$b = \beta_0 \left\{ \frac{1-n}{n^3} \right\} \left\{ \frac{1}{g D_{15}} \right\} \quad (4)$$

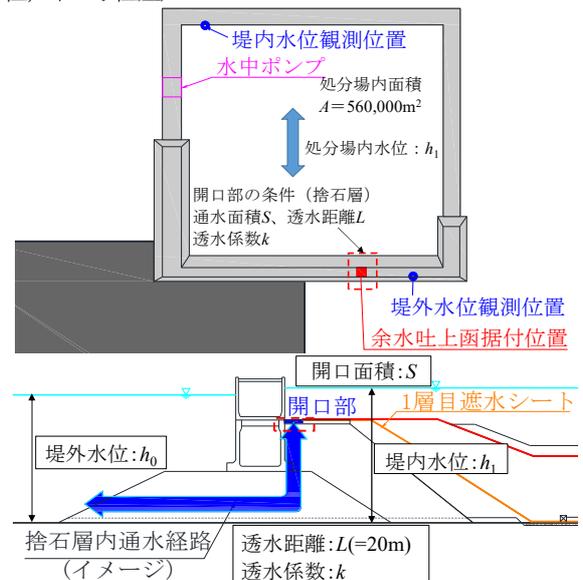


図-10 簡易計算イメージ平面断面図

($=0.0115\text{cm}^2/\text{s}$), g : 重力加速度, D_{15} : 石材の15%粒径 (今回は100kg/個の球とした), $\alpha_0 \cdot \beta_0$: 定数であり, 藤井ら(2002)を参考にそれぞれ1500と1.8を用いた. なお, 現地における透水距離 L は実測不可能であるため, 断面から想定される通水経路長さとして一律20mを与えて計算を行った.

また, 計算の与条件として, 堤外水位は気象庁が配信している天文潮位を与えた. 現地条件として, 使用可能なポンプを10台(吐出量 $20.0\text{m}^3/\text{min}$), 連続注水可能時間を6時から19時までの14時間として計算し, 堤内外の水位が常に逆転しない面積について検討した.

図-11を見ると, 与条件によるポンプ10台の条件のもと, 潮位変動に関わらず常に開口できる面積の最大値は 25m^2 程度であることが想定された.

4. 現地水位の観測方法

現地にOnset社製「HOBOMX2001 ウォーターレベルロ



図-12 水位観測機械と観測状況

表-3 現地透水試験スケジュール

日時	内容	備考
2019/8/7	ケーソン締切実施	
2019/8/9	現地透水試験 (1回目)	通水面積 3.71m ²
2019/8/10	現地透水試験 (2回目)	通水面積 8.39m ²
2019/8/24	現地透水試験 (追加)	通水面積 16.67m ²

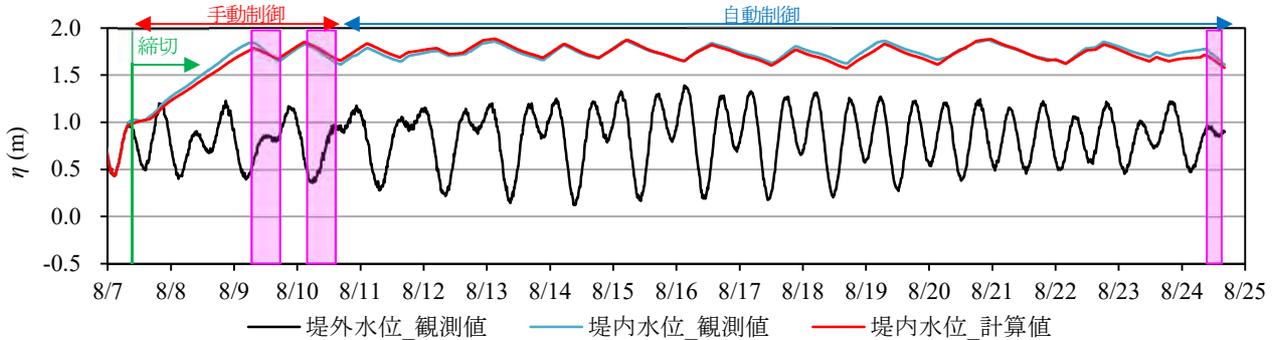


図-13 現地観測結果およびDF則を用いた再現計算結果の比較

ガー」(図-12)を設置し、現地水位の観測を行った。設置箇所は図-1に示す通りであり、現場の施工状況などの兼ね合いから堤内側は北東に、堤外側は南西に1台ずつ設置した。なお、水位計のサンプリングは、毎分の瞬間値を記録している。そのため、データの処理に際しては毎10分の前後10分の平均値を使用した。

現地透水試験は表-3に示す通り行った。堤内水位の変化を捉えるためには開口部からの海水の流出が行われる必要があるため、開口部を設けて強制的に排水を行った。

図-11の結果からは、ポンプを1日あたり14時間稼働することで、25m²の開口までであれば、常時開口している状態でも水位の逆転は生じず、シートに揚圧力が作用しないことを示した。しかし、想定している透水係数よりも大きい場合、内外水位差が発生し、シートの浮き上がりが生じてシートの押さえの表層砕石等が崩壊することが懸念された。そこで、観測実施時以外は設置撤去可能な仮設の遮水シートを設置し、できるだけ堤内の海水が流出しないようにした。また、準備可能であったポンプを10台設置し、現地試験終了時に注水することで堤内水位が高い状態を保持した。現地試験を実施しない場合においては、堤内水位管理をD.L.+1.6m~+1.8m程度の範囲になるように機械による自動制御を実施し、H.W.L.+1.5m未満にならないように水位調整を行った。現地試験以外の期間においては、仮設遮水シートにより開口部を限りなく小さくしているものの、仮設の大型土のうや隅角部の隙間等により完全に塞ぐことができなかったため、水位の低下が確認された。また、観測水位の再現計算を行う際に、ポンプ稼働および停止のタイミングをパラメータとして与える必要があるため水位観測とともに記録を行い、計算に反映することとした。

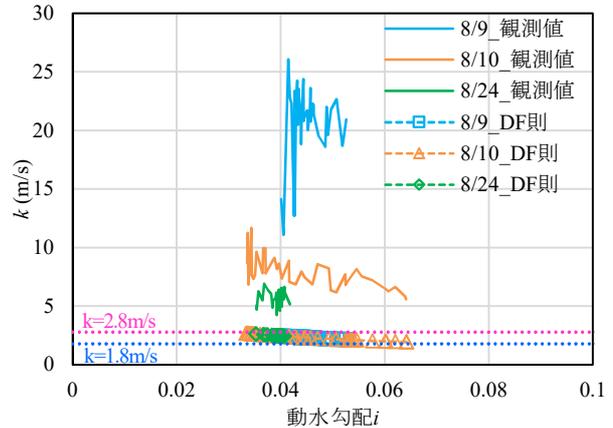


図-14 透水係数実測値とDF則による計算値

5. 現地観測結果と数値計算結果の比較

実験および現地の流れの状況を確認するために、実験結果および現地観測結果から得られた流速を用いてレイノルズ数の比較を行った。粒径の大きなケースにおいては現地同様乱流となっており、この結果からも若干の補正は必要になるもののDF則の適用性が確認でき、現地においてもDF則が適用可能であるものと考えられる。そこで、観測結果と数値計算モデルによる水位の比較を行った。観測結果とボックスモデルによる計算結果の比較を図-13に、その時の透水係数(観測値・計算値)を図-14に示す。前述の通り、計算においてはポンプの稼働・停止、開口部を設けた時間やその時の面積を計算に反映した。また、ポンプの能力試験を現地で行ったところ、平均吐出量23.7m³/minが得られたため、ポンプ稼働時はこの値を計算に反映させた。

堤内水位の計算結果と観測値を比較すると、全体的に一致する結果となっている。しかし、計算結果における堤内水位の上昇がやや不十分であり、堤外水位の変動に伴いポンプの揚程が変化することで、吐出量が増減することを考慮していないためであると考えられ、さらに再現度を高めるためにはポンプ特性等の考慮が必要であると考えられる。

また、透水係数を比較した図-14を見ると、観測値はかなり過大であるが、これは実測不可能なパラメータである透水距離 L および開口面積 S が大きく関係しているためであると考えられる。DF 則による透水係数の計算値は $1.9\sim 2.8\text{m/s}$ を示しており、実験結果を考慮しても妥当なものであると考えられ、透水距離や通水面積などの評価に課題は残るものの、室内実験結果と現地観測結果における透水係数の関係は妥当なものであり、DF 則は $5\sim 500\text{kg/個}$ 程度の粒径を有する石材にも実用上適用可能であることが確認できた。

6. 結論

本研究では、管理型海面処分場のような遮水構造を有する護岸で使用する石材 ($5\sim 500\text{kg/個}$) に着目し、DF 則が実用的に適用可能か、室内実験、現地観測、数値計算を行うことで検証を行った。

室内透水実験では、既往研究よりも大きい粒径 ($50\sim 80\text{mm}$ 程度) を用いて室内実験を行い、DF 則による計算結果と比較することで、粒径が大きい場合においても DF 則が適用可能であることを確認した。

現地観測結果を数値計算により再現することで、石材重量 $5\sim 500\text{kg/個}$ を有する粒径においても DF 則が実用上適用可能であることを確認した。

現地観測における透水係数の定量的な評価は透水距離や開口面積などを正確に計測することができないため、現地の透水係数については明らかに出来ないが、DF 則を用いて現地透水係数を設定することで、水位や流速の推定が実用上可能であることが分かった。

謝辞：現地観測にあたり、場所の提供、観測の補助をしてくださった皆様に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 鈴木高二朗, 徳淵克正, 岡村知光, 下迫健一郎, 善 功企, 山崎浩之: 護岸の吸い出しに関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告第 35 巻, 2 号, pp.3-63, 1996.
- 2) 藤井敦, 高橋重雄, 小椋進, 宇野健司, 杉山直子, 五月女洋, 伊野同, 鶴飼亮行, 熊谷隆宏: 混成堤式管理型護岸遮水シートに作用する波圧特性および波圧算定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.826-830, 2002.
- 3) 平石哲也, 奥野光洋, 安藤興太: 砂礫層内における長周期の水流動に関する現地観測, 港湾技術研究所資料, No.1130, pp.3-28, 2006.
- 4) 津田宗男, 岩下誠, 森脇等, 高木幸二: 潮位差の大きい海域における捨石護岸最終締切り時の防砂シートの敷設, 土木学会第年次学術講演会, 第 60 回, 第 6 部門, pp.269-270, 2005.
- 5) 近藤一郎, 竹田秀章: 消波構造物, 森北出版株式会社, pp.88-89, 1983.

(Received February 6, 2020)

(Accepted May 1, 2020)

EVALUATION OF PERMEABILITY COEFFICIENT OF ON-SITE RUBBLE STONE LAYER BASED ON LABORATORY EXPERIMENTS

Shuhei KUROTAKI, Hiroshi SANUKI, Akiyuki UKAI,
Sukeharu SEKI and Toshihiro MIYAZAKI

In a reclaimed seawall maintained using water impermeable sheets, seawater is exchanged between inside and outside of the embankment through the rubble mound base which is made up of stone materials. As a result, water level difference occurs between inside and outside of the embankment by seepage through the stone materials and causes an uplift pressure acting on the impermeable sheet when the water level inside the embankment is low. Although raising the water level inside the embankment using water pumps is seen as a countermeasure, determination of the coefficient of permeability of the stone materials necessary for determining the number of pumps becomes an issue. In previous studies, laboratory experiments were conducted using small stone particles, however, experiments using actual particle size found in the site were not conducted. In this study, permeability experiments are conducted using stone particles similar to that found in the site and applicability of the Dupuit-Forchheimer Law is studied through comparison with experimental results. Results of the experiments show that the Dupuit-Forchheimer Law is applicable even for larger particle size. Furthermore, comparison of field observation data with calculation results also shows the applicability of the Dupuit-Forchheimer Law even for stone materials with real scale particle size.