

強制排水による細骨材表面水の急速低減技術の開発

増岡 健太郎*1・平塚 裕介*1・山本 肇*1・下茂 道人*2・新井 博之*3

Keywords : RCD method, fine aggregate, vacuum drainage, multi-phase flow, well point

RCD 工法, 細骨材, 真空排水, 気液二相流, ウェルポイント

1. はじめに

ダム施工技術のひとつである RCD (Roller Compacted Dam) 工法は、硬練りコンクリートを締め固めて堤体を構築するため、一般に表面水率の低い (6%程度) 細骨材が用いられる。したがって、RCD 工法によるダム施工の高速化には、低水分量の細骨材を安定的にコンクリート製造プラントに供給する事が必要とされる。ところが、所定の表面水率まで低下させる方法は、仮置き時の自然排水 (重力排水) に依存しているのが現状である。たとえば、貯蔵形式が野積み方式である場合には、骨材ヤード床面のコンクリートに傾斜をつけて自然排水を行う。その場合、材料物性や気温、湿度、風力などの気象条件によって排水量は大きく変動し、所定の水分量まで排水するのに長時間を要することもある。排水に長時間かかる場合でも、骨材ヤードの数を増加すれば、低水分量の細骨材を高速に安定的に供給することは可能であるが、広い面積の仮置き場所が必要となり、敷地の確保、整地、全範囲を覆う屋根の設置など、多額の設備投資が必要となる。

上記の問題を解決する方法として、ウェルポイントを用いた強制排水による細骨材表面水の急速低減技術が考案され (図-1)、予備的な現場試験によりその有用性が確認されている¹⁾。具体的には、野積み形式の骨材ヤード底面に排水口を設け、さらに細骨材山の裾部分にウェルポイントを設置し、それぞれを簡易ウェルポンプに接続して強制排水を行った。その結果、所定の水分量になるまでの排水時間を、自然排水だけである場合と比較して約 24 時間短縮できた。

しかし、今後、本技術を異なる材料、含水条件、貯

蔵条件の現場で活用していくには、データ実績だけでなく、脱水メカニズムを明らかにして定量的な予測評価技術と、品質を一定に保つための表面水管理方法を確立することが必要である。そこで、著者らはウェルポイントを用いた強制排水による細骨材表面水の急速低減技術の開発を目的とし、現場試験、室内カラム試験、および数値シミュレーションを実施した。

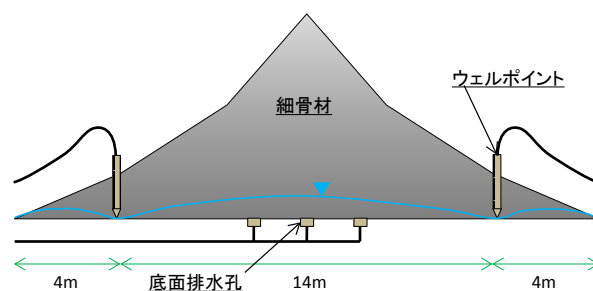


図-1 急速低減技術の概要

Fig.1 Schematic diagram of the rapid draining method

2. 現場強制排水試験²⁾

2.1 目的

ここでは、強制排水による細骨材表面水の急速低減技術の脱水メカニズムの解明と、細骨材山の裾に設置した電極間の電気抵抗による表面水管理方法の適用性の検討を目的とした。

2.2 試験方法

試験の概略を図-2 に、試験ケースと試験条件を表-1 に示す。細骨材貯蔵は野積み方式であり、ストック形状は、直径約 20m、高さ約 7m、体積約 700m³の円錐形である。試験では、自然排水の後に、骨材ヤードの底面に設けた直径約 140mm の 5 箇所排水口と細骨材山の裾に設置された 20 本のウェルポイントに簡易ウェルポンプへ接続して強制排水を行った。各排水量はノッ

*1 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室

*2 技術センター 土木技術研究所

*3 土木本部 土木技術部

チタンクへ集めて測定した。細骨材山の中心から平面方向へ約 3m、底面から鉛直上方へ 1m、2m、3m、4m の位置にテンシオメーターと誘電率型土壌水分センサー (Decagon 社製 EC-5) を設置し、排水中における細骨材山の内部のサクシオン圧および体積含水率の変化を測定した。また、細骨材山の裾には、印加電圧自動平衡型の電気探査計 (PZ110N) の加圧電極と測定電極を図のように設置し、排水中の測定電極間の電気抵抗を測定した。測定電極の設置高さは、底面から鉛直上方へ約 1m とした。

認するために、強制排水は骨材投入完了から約 18 時間後に開始した。骨材投入完了から試験終了までは、ケース 1 は約 70 時間、ケース 2 は約 100 時間である。各ケースの初期含水比は、製砂設備のベルコン上から採取した試料の平均値 [n=3] より、ケース 1 で 22.8%、ケース 2 で 24.8%であった。測量で求めた細骨材山の体積とベルトスケールの記録より、ケース 1 の乾燥密度は約 1.7g/cm³、ケース 2 で約 1.5g/cm³であった。

2.3 試験結果

2.3.1 排水量

各試験における排水量と測定電極間の電気抵抗の変化を図-3 に示す。骨材の投入開始から強制排水開始までの間における自然排水量は、ケース 1 が骨材投入完了後約 18 時間で 49m³、ケース 2 が約 18.5 時間で 61m³であった。

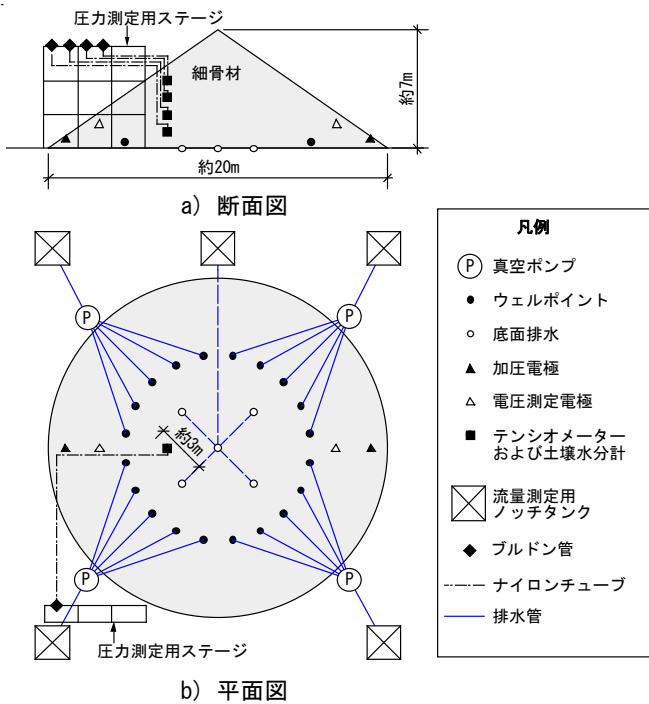


図-2 現場試験概要

Fig.2 Schematic diagram of the site experiment

表-1 現場試験ケース

Table 1 Site experimental cases

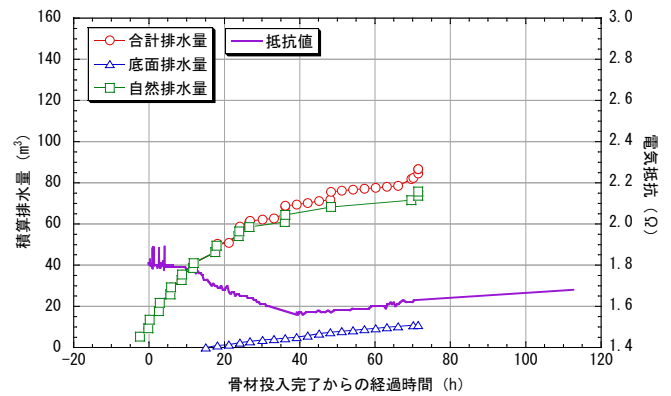
項目	ケース 1	ケース 2
体積 ^{※1} [m ³]	700	694
高さ ^{※1} [m]	7.15	6.85
初期含水比 ^{※2} [%]	22.8	24.8
乾燥密度 ^{※3} [g/cm ³]	1.7	1.5
強制排水位置	底面	底面 5ヶ所＋ ウェルポイント 20本
強制排水開始時間[h]	15.0	17.8

※1 試験終了後の測量結果による

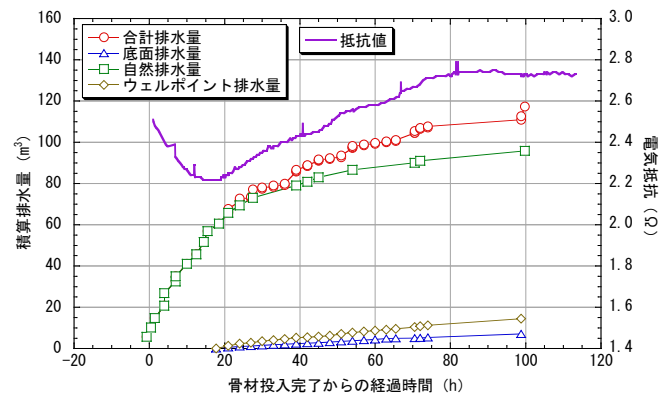
※2 骨材製造時のベルコン上から採取した平均値 [n=3]

※3 ベルトスケールのデータによる

試験は、底面排水口のみで強制排水を行った場合 (ケース 1) と、ウェルポイントと底面排水口の両方で強制排水を行った場合 (ケース 2) の 2 ケースを実施した。ただし、各ケースとも、自然排水の効果を確



a : ケース 1



b : ケース 2

図-3 排水量と電気抵抗の変化

Fig.3 Changes of each drainage and electric resistance

自然排水終了後、強制排水を開始した。その結果、ケース 1 では、骨材投入完了後から約 71 時間の排水量は、自然排水量 76m³、底面排水口の強制排水量 11m³であり、自然排水量と強制排水量の合計は 87m³となった。また、ケース 2 では、骨材投入完了後から約 100

時間の排水量は、自然排水量 96m^3 、底面排水口の排水量 7m^3 、ウェルポイントの強制排水量 15m^3 、自然排水量と強制排水量の合計は 117m^3 となった。

2.3.2 電気抵抗

電気抵抗は、各ケースとも試験開始直後に低下し、その後上昇する傾向を示した(図-3)。

ケース 1 (図-3 a) では、初期値として約 1.8Ω を示した後、骨材投入完了後 10 時間まではほぼ初期値のまま推移し、その後、低下傾向へ転じて強制排水の途中で約 1.6Ω の最低値を記録した。そして、約 40 時間後から緩やかな増加傾向へ転じ、試験終了時は初期値より 0.1Ω 程小さい約 1.7Ω となった。

ケース 2 (図-3 b) では、初期値として約 2.5Ω を示したあと、骨材投入完了直後から急激に低下し、強制排水を行う直前で約 2.2Ω の最低値を記録した。なお、ケース 2 での低下勾配は、ケース 1 よりも急となった。最低値への到達後、低下時と比べてやや緩やかな勾配で増加傾向へ転じ、初期値より約 0.2Ω 大きい 2.7Ω 程度まで値が上昇し、試験終了時までほぼ同じ値を示した。

2.3.3 サクション圧

ケース 1 のサクション圧の変化を図-4 に、ケース 2 のサクション圧の変化を図-5 に示す。ここで、サクション圧が負の時は、測定位置に正圧が作用していることを示す。図より、両ケースとも、GL+1m と GL+2m の測定位置は、骨材投入完了時をピークとして、いずれも試験開始初期に正圧を示した。なお、測定値は、両ケースとも GL+1m と GL+2m では GL+1m の方が大きく、その差は約 10kPa で、設置高さの差にほぼ等しい。その後、排水の進行とともに、GL+1m と GL+2m のサクション圧は正圧から負圧に変化した。GL+4m の位置では、両ケースとも間欠的なサクション圧の増減が見られた。ケース 2 では、特にその傾向が強く、サクション圧が 5kPa 付近から急激に 70kPa 付近まで増加し、その数時間後に急激に 5kPa 付近まで戻る現象が見られた。

2.3.4 体積含水率

体積含水率については、ケース 2 の変化のみ図-6 に示す。GL+3m, GL+2m, GL+1m では、排水中、体積含水率が大きく低下した。また、設置位置が高いほど早く低下しはじめた。値が大きく低下した後は、緩やかに低下する傾向が見られた。GL+0m では、値が大きく低下することは無く、試験期間全体を通して高い値を示した。

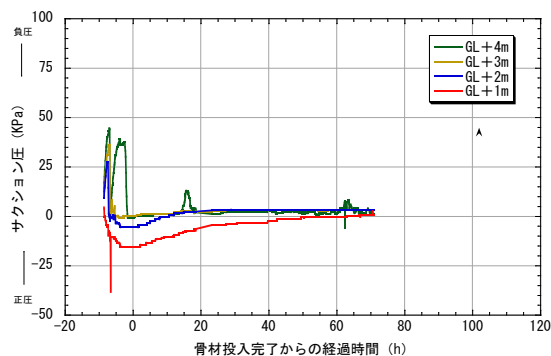


図-4 ケース 1 サクション圧の変化
Fig.4 Temporal change of suction in Case 1

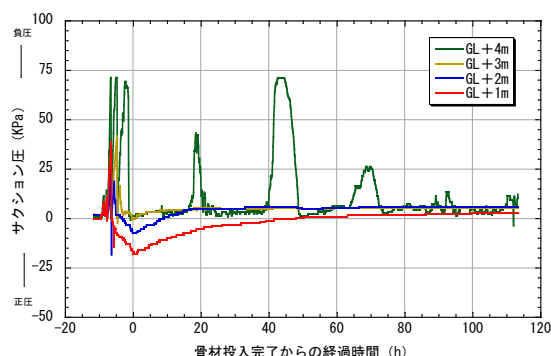


図-5 ケース 2 サクション圧の変化
Fig.5 Temporal change of suction in Case 2

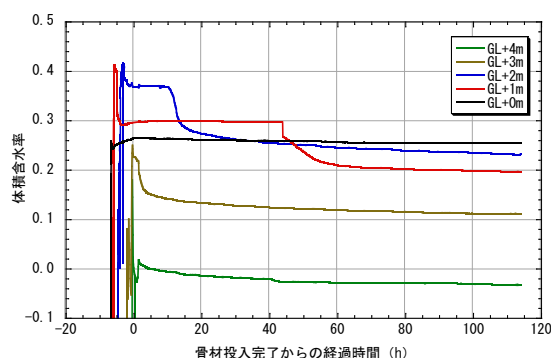


図-6 ケース 2 体積含水率の変化
Fig.6 Temporal change of volumetric water content in Case 2

2.4 考察

2.4.1 細骨材山内部での水の挙動

骨材投入完了時、低い測定位置のサクション圧で正圧が観測され、その後、負圧へ変化する現象は、細骨材山の下側部分が飽和状態から不飽和状態へ変化したことを示していると考えられる。一方、高い測定位置では、試験期間全体を通して負圧が測定されたことから、細骨材山の上側部分は、試験開始時から終了時まで不飽和状態であったと考えられる。したがって、細骨材の投入過程で、細骨材山の内部では重力によって水が下方へ集積し、その結果、細骨材内部に水面が生じたと考えられる。なお、GL+3m で正圧が測定されて

いないことから、両ケースとも、水面の高さは GL+2m～3mの間であると考えられる。

体積含水率に関して、値が急激に低下する前に一定値を示すのは、測定位置が水面より下で飽和状態であることを示していると考えられる。また、値の急激な低下は、細骨材山内部の水面が降下することによって生じると考えられ、測定位置が飽和状態から不飽和状態へ変化したタイミングを示していると考えられる。そして、値が急激に低下した後、徐々に低下するのは、不飽和状態で徐々に水分量が低下する傾向を示していると考えられる。以上の現象は、高い計測位置から順に生じており、さらに体積含水率が低下するタイミングは、サクシオン圧が正圧から負圧に変化するタイミングとほぼ同じである。

以上より、細骨材山の内部では、高さ 2m～3m の間に水面が生じ、排水が進行するにつれて水面は下方へ移動したものと考えられる。

なお、GL+4m で体積含水率がマイナスになっているのは、細骨材山内部の密度の違いによる算定誤差と考えられる。本測定器は、誘電率による出力電圧を、事前に求めた校正曲線によって体積含水率を計算する。そのため、空気中での出力電圧が最も低く、水中に浸漬させた状態での出力電圧が最も高くなる。したがって、相対的な水分量の増減は、比較的簡単に求まるが、土の種類や密度によって校正曲線が変化するため定量性に問題があり、密度が低い場合と高い場合では、同じ体積含水率であっても、密度が高い方が出力電圧が高くなる傾向がある。本試験では、高い測定位置ほど土被り圧は小さく密度が小さいと考えられ、土壌水分計の出力値は低くなる傾向が強いと考えられる。そして、各深度で得られる土壌水分計の出力電圧を、一つの密度に対する校正式で体積含水率に換算しているため、密度が小さいと考えられる GL+4m 位置では体積含水率がマイナス値で計算されたと考えられる。

2.4.2 電気抵抗による表面水管理方法の適用性

両ケースとも、試験開始初期に電気抵抗の値が低下した。これは、細骨材山の内部で、重力によって水が下方へ集積したためであると考えられる。その後、ケース 1 では骨材投入完了から約 40 時間頃に、ケース 2 では約 20 時間頃に、電気抵抗は上昇傾向に転じており、細骨材山内部の排水が進んだことを表していると考えられる。

試験後半から試験終了にかけて、ケース 1 では電気抵抗は緩やかな上昇傾向を示したまま初期値以下で試験が終了となった。一方、ケース 2 では初期値を超え

るまで電気抵抗は上昇し、その後、ほぼ一定値で収束した。これは、ケース 1 では、試験終了時までで排水が終了しなかったのに対し、ケース 2 では試験終了時に排水がほぼ終了していたことを示していると考えられる。以上より、表面水の管理手法として電気抵抗を利用できる可能性が示された。

2.4.3 低飽和度領域の水分移動について

強制排水の途中、各ケースとも最上位 (GL+4m) の位置のサクシオン圧に間欠的な増減が見られた。サクシオン圧の最大値は、ケース 1 で約 10kPa、ケース 2 で約 70kPa である。この原因として、低飽和度領域では、真空排水によって地盤中に部分的に高い負圧領域が形成され、それが一時的に開放されて上方の水が下方へ移動したと思われる。そして、水分が下方へ移動した領域は、高いサクシオン圧によって再び周囲の水分を集めることでサクシオン圧が低下し、本試験で得られたようなサクシオン圧の変動が生じたと思われる。

ケース 1 とケース 2 で、サクシオン圧の変動が発生する数や大きさが異なるのは、真空排水条件が異なるためと考えられる。一方、GL+3m 以下の測定点で同様な現象が生じない理由として、GL+4m と比較して水分量が多いためだと考えられる。

3. 室内カラム試験と数値シミュレーションによる不飽和パラメータの同定³⁾

3.1 目的

細骨材表面水の真空ポンプによる強制排水時には、細骨材の内部では水と空気が流動する (気液二相流)。ここでは、室内カラム試験を実施して細骨材の吸引脱水挙動を観察するとともに、その特性を気液二相流の数値シミュレーションにより再現することで、モデルの検証を行った。

3.2 真空排水カラム試験

3.2.1 試験方法

試験の概略を図-7 に示す。現場試験で使用した細骨材と同じものを試料とし、内径 100mm、高さ 1000mm のアクリルカラムに乾燥密度 1.60g/cm³ (間隙率 41%) となるように充填して供試体を作製した。カラム底面からの高さが 10cm、20cm、30cm、50cm、80cm の位置には、現場試験で用いたものと同じ土壌水分センサーとテンシオメーターを設置し、カラム内の体積含水率とサクシオン圧が測定できる構造とした。試料の充填後、カラム内を減圧した状態で供試体の下端から炭酸ガスを通気し、間隙中の気相部分を炭酸ガスで置換

した。その後、カラム下端から脱気水を通水し、供試体の間隙内を水で飽和した。最終的に得られた水飽和度は約92%である。

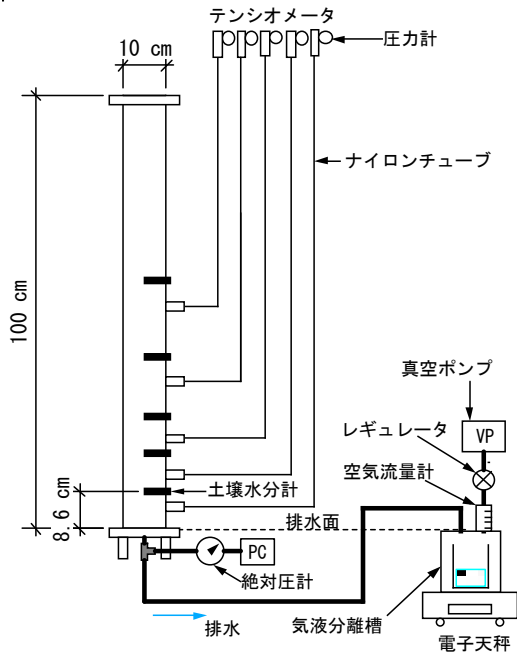


図-7 カラム試験概略
Fig.7 Schematic diagram of the column experiment

試験ケースは、①自然排水時と②自然排水後の強制排水時の2ケースで、①から②は連続して行った。測定項目は、排水量、体積含水率、サクシオン圧とした。試験手順は、はじめに、水で飽和した状態からカラム下端のバルブを開放して自然排水を約19時間実施した。その後、カラム下端のバルブを一旦閉じて真空ポンプを稼働させた。そして、カラム下端の絶対圧力が安定(約50kPa)したことを確認した後、カラム下端のバルブを開き、約3時間の強制排水を行った。なお、強制排水終了後も、約15時間は各測定を続けた。

3.2.2 試験結果

排水量の経時変化を図-8に示す。自然排水時、バルブを開いた直後に急激な排水が生じるが、その後、徐々に排水量は低下し、10時間程で安定した。自然排水時の最終的な排水量は1640mlとなった。強制排水時は、作用させた負圧の影響によって再びカラム内から急激に排水が生じ、その後、2時間程で安定した。強制排水時の最終的な排水量は370mlとなった。

自然排水および強制排水時におけるカラム内の飽和度およびサクシオン圧の分布を図-9および図-10に示す。図-9より、自然排水時は、はじめにカラム上側の水分が低下して徐々に試料の水分特性曲線に漸近し、それ以上は、ほとんど排水されないことが確認できる。

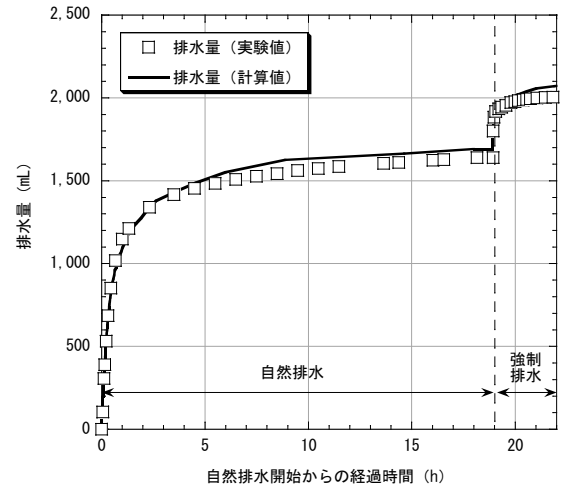


図-8 排水量の経時変化
Fig.8 Temporal change of drainage at the column experiment

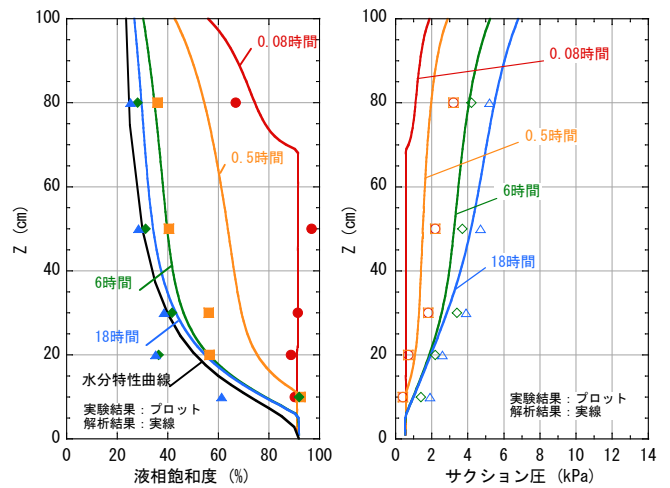


図-9 自然排水時の飽和度とサクシオン圧の分布
Fig.9 Vertical profile of water saturation and suction during gravity drainage

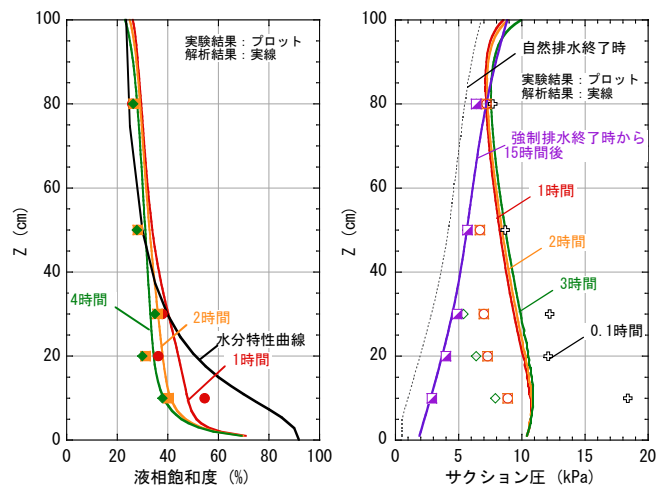


図-10 強制排水時の飽和度とサクシオン圧の分布
Fig.10 Vertical profile of water saturation and suction during rapid drainage

強制排水時(図-10)には、飽和度はカラムの下方の低下量が大きくなった。一方、サクシオン圧を見ると、強制排水時にテンシオメータで測定される圧力は、毛管圧と吸引圧を加えた圧力となる。したがって、強制排水中(真空ポンプ稼働中)は、間隙中の気相の圧力低下の影響を受けてカラム下方の値が高くなった。特に、強制排水開始0.1時間後は、同時刻でのカラム下端における負圧が15kPaであるのに対し、10cm位置のテンシオメータで測定される圧力は同程度を示し(図-11)、気相圧力の低下(吸引圧)の影響を受けていることが分かる。また、真空ポンプの停止から約15時間後に再度測定を行うと、真空ポンプによる吸引圧は消散し、カラム下方ほどサクシオン圧が低くなるような真空ポンプ稼働前の分布へ戻ることが分かる。

験結果を Van Genuchten モデルで近似して用いた。ただし、液相の相対浸透率については、自然排水時の積算排水量をもとに修正を加えた。

解析結果と実験結果の比較を、積算排水量の経時変化、飽和度、サクシオン圧の鉛直分布について各々図-8、図-9、図-10 に実線で示す。図より、自然排水、強制排水の全期間を通じて、実測の経時変化が解析により定量的によく再現されていることが分かる。また、下端の気相圧力を-10kPa(約-100cm)としても、水分特性曲線で示される飽和度までは低下しにくい事が分かり、その現象も気液二相流によって再現できている。以上の結果から、細骨材表面水の自然/強制排水過程への気液二相流解析モデルの適用性が確認された。

表-2 カラム試験再現解析入力パラメータ

Table 2 Parameters used in the analysis of the column experiment

	入力値
絶対浸透率 [m ²]	1.3×10 ⁻¹¹
間隙率 [%]	41
初期飽和度 [%]	92
Van Genuchten の式の パラメータ (サクシオン圧)	$\alpha=0.087[\text{cm}^{-1}]$, $n=2.148$ ※1
Van Genuchten の式の パラメータ (相対浸透率)	$\alpha=0.087[\text{cm}^{-1}]$, $n=2.856$ ※2
残留液相飽和度 [%]	16
残留気相飽和度 [%]	8

※1 pF 試験結果のフィッティングにより決定

※2 自然排水時の積算排水量をもとに決定

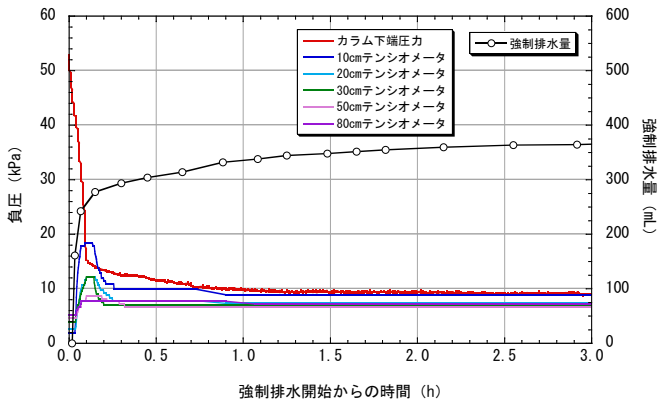


図-11 カラム下端圧力とテンシオメータの変化

Fig.11 Pressure changes of the column bottom and tensiometer

3.3 数値シミュレーション

積分差分法による多孔質・亀裂媒体中の非等温・多成分・多相流体解析コードである TOUGH2/EOS⁴⁾を用い、水と空気の流れを考慮した気液二相流解析によるカラム試験結果の再現解析を行った。計算は、格子間隔 1cm の一次元モデルで行った。モデルの上端は、自然排水時、強制排水時ともに、液相飽和度 0%の大気圧 (101.3kPa) 固定境界とした。モデル下端については、自然排水時は、液相飽和度 100%で気相圧力 101.3kPa の固定境界、強制排水時は、液相飽和度 0%で気相圧力 91.0kPa の固定境界とした。初期条件として、カラム全体の初期飽和度を実験値と同じ 92%を与えた。解析に用いた水理物性値を表-2 に示す。絶対浸透率は、本試験に先立って同じカラムで実施した変水位飽和透水試験結果に基づいて設定した。飽和度と相対浸透率の関係と、飽和度とサクシオン圧の関係(水分特性曲線)は、別途実施した不飽和透水試験および保水性試

4. 細骨材表面水の排水シミュレーション⁵⁾

4.1 目的

気液二相流解析による現場試験の再現解析を行い、強制排水のメカニズムと効率的な排水方法について考察した。

4.2 現場試験再現シミュレーション

4.2.1 解析モデル

本計算には、前章で述べた解析コード"TOUGH2"の並列計算コードである"TOUGH2-MP"を用いた。現場試験の測定データを基に細骨材山を図-12 に示すような円錐形で近似して解析格子を作成した。一つの格子は一辺 0.2m の立方体とした。境界条件は、底面を除く外側境界を大気圧 (101.3kPa) の圧力固定境界とし、底面を不透水境界とした。ただし、強制排水過程では、底面排水口とウェルポイント吸引部を所定の真空度による圧力固定境界とした。全格子数は 86,750 個である。

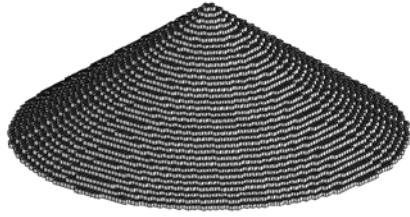


図-12 数値解析用格子 (高さ約7m, 直径約20m)
Fig.12 analytical mesh

4.2.2 水理物性値

計算に使用した水理物性値を解析ケースごとに表-3に示す。間隙率は現場試験での乾燥密度の平均値 $1.6g/cm^3$ と別途実施した土粒子密度試験結果 ($\rho_s=2.699g/cm^3$) から決定した。透水係数および初期飽和度は、現場試験における自然排水過程の排水量の経時変化をフィッティングして求めた。不飽和パラメータは、カラム試験再現解析と同様に、サクション圧には pF 試験結果、相対浸透率には前述した室内カラム試験のフィッティング値を各々採用した。

表-3 現場試験再現解析入力パラメータ

Table 3 Input parameters for the simulation of the site experiment

	現場試験 ケース1	現場試験 ケース2
透水係数 [m/s]	3.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}
間隙率 [%]		41
初期飽和度 [%]	90 ※1	87 ※1
底面排水圧力 [kPa]	81	101.3
ウエルポイント圧力 [kPa]	—	101.3

※1 仮定値

※2 不飽和パラメータは室内カラム試験と同じ

4.2.3 解析結果・考察

現場試験ケース1およびケース2で得られた積算排水量の結果と解析結果の比較を図-13, 図-14に示す。いずれのケースについても、自然排水時および強制排水時の排水量については非常に良く実測を再現できた。一方、強制排水時についても良く実測を再現しているが、これは吸引口の真空度の仮定値により結果が大きく左右された。吸引口を底面排水口のみとしたケース1では、底面排水圧力を $81kPa$ とした場合に試験結果を良く再現でき、底面排水とウエルポイントを併用したケース2では各々の排水圧力を $101kPa$ にした場合に試験結果を良く再現できた。ケース1およびケース2で、共に排水圧力が大気圧に近く真空度が低い結果で現場試験結果と一致した理由は、試験で用いたポンプが簡易型であり、細骨材内部に埋設された吸引部分に高い真空度を与えられていないことが推定される。

また、ケース1およびケース2で底面排水圧力に差が生じた原因には、底面排水口付近の目詰まりやウエルポイントの底面排水への干渉等が考えられる。

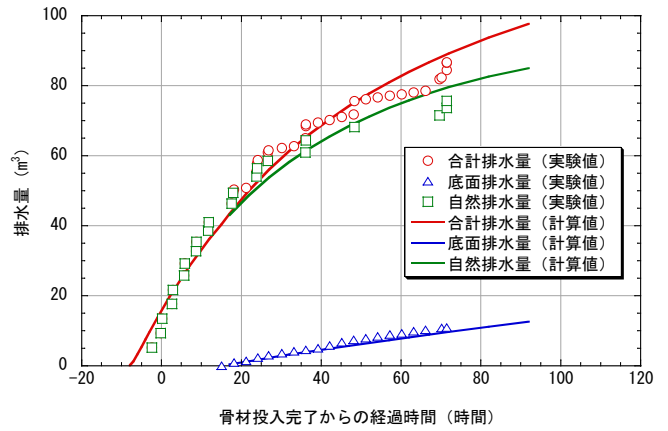


図-13 ケース1 実験結果と解析結果の比較
Fig.13 Comparison of analytical and experimental result in Case 1

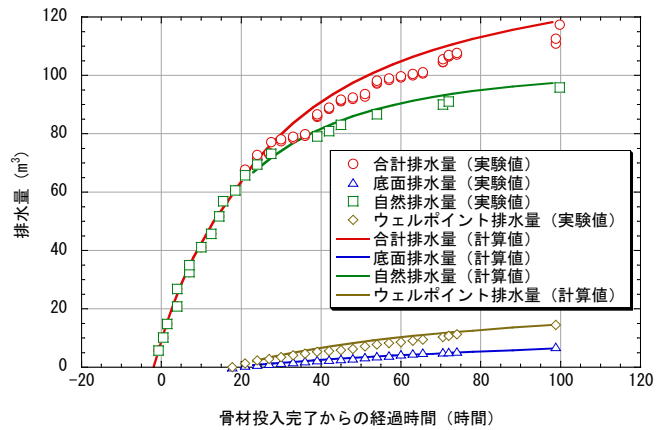


図-14 ケース2 実験結果と解析結果の比較
Fig.14 Comparison of analytical and experimental result in Case 2

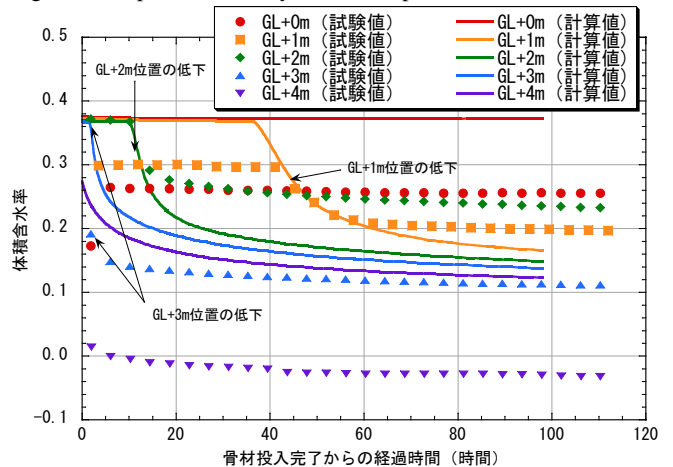


図-15 ケース2 現場試験の体積含水率の変化に対する実験結果と解析結果の比較
Fig.15 Comparison of analytical and experimental result for volumetric water content in Case 2

図-15には、ケース2における細骨材山内部での体積含水率の経時変化を、現場試験測定値と比較したグラフである。現場試験で体積含水率計を設置した位置は、細骨材山の中心から平面方向に3m離れた地点におけるGL+0m, GL+1m, GL+2m, GL+3mの位置である。図より、GL+1m以上の測定点において、体積含水率の値が急激に低下する時間が、試験結果と解析結果でほぼ同じであり、本解析により細骨材山内部における水の移動をある程度再現出来ていることが分かる。

4.3 効率的排水方法の検討

強制排水圧力（底面，ウェルポイント），強制排水の開始時期，強制排水箇所の高さに注目し，効率的な強制排水方法について検討した。検討の実施には，前述した現場試験ケース2の解析条件を基本ケースとし，表-4のように条件を変化させ，それらの効果を調べた。

表-4 排水方法検討ケース

Table 4 The numerical experimental cases

	ケース				
	基本	1-1	1-2	2-1	2-2
底面排水圧力[kPa]	101	51		排水なし	
ウェルポイント排水圧力[kPa]	101	51			
ウェルポイント位置[GL+m]	0.3	0.3		0.3	1.3
骨材投入完了から強制排水開始までの時間[h]	17.75	0	17.75	0	

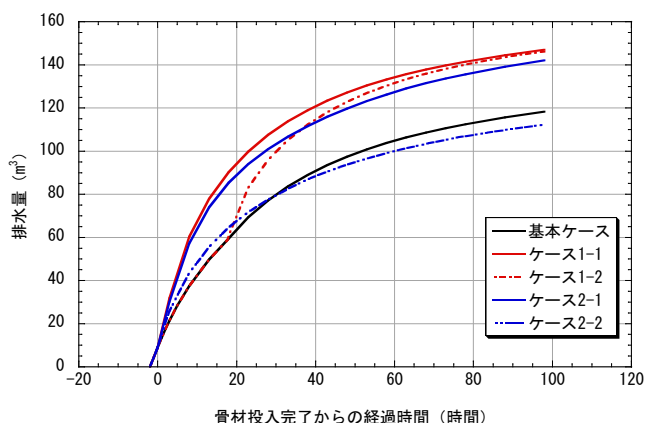


図-16 数値実験での排水量の違い

Fig.16 Temporal change of drainage in the numerical experiment

自然排水と強制排水を合わせた合計積算排水量の比較を図-16に示す。強制排水圧力について，基本ケースと1-2の比較から，真空度を101kPaから51kPaに高めることで，合計積算排水量が2割程増加することが分かる。次に，排水開始時間については，ケース1-1と1-2で60時間頃にはほぼ同じ値となるため，排水開始を遅らせた方が効率が良いと言えるが，急速に表

面水率を低下させる場合には，できるだけ早い段階で強制排水を開始するのが有効であることが分かる。また，ケース2-1と2-2から，ウェルポイントの排水位置が高い場合，ストレーナー位置より低い位置の水を排水することが難しく，最終的な合計排水量が減少することが分かる。

5. まとめ

サクシオン圧および体積含水率の変化から，細骨材貯蔵完了後，細骨材山の内部では重力による下側へ向けた水の流れが生じ，その結果，細骨材山の内部に水面が形成され，自然排水および強制排水によって水面は徐々に低下することが現場試験データから確認できた。また，細骨材山の裾に設置した電極間の電気抵抗測定結果から，表面水の管理手法として電気抵抗を利用できる可能性を示した。気液二相流解析によって，現場試験における強制排水による細骨材表面水の急速低減を再現し，定量的な評価が可能であることを示した。効率的な排水促進に必要な条件として，①排水部の真空度を高め，②排水開始時間を早くし，③排水位置を低くすることが有利であることを解析結果より確認できた。今後は，実施工における排水条件の設計に本技術を利用し，施工計画に反映させていく。

謝辞

末筆ながら，本研究の実施には，発注者である北海道開発局および大成建設札幌支店夕張シェーパロダム堤体建設共同企業体工事作業所の関係各位の多大なるご支援ご協力があったて達成された。付記して謝意を表し，結びとする。

参考文献

- 1) 原山之克，黒木博，黒羽陽一郎：強制排水を利用した水切り時間の短縮について，土木学会第66回年次学術講演会，VI-434，pp867-868，2011。
- 2) 下茂道人，古市雄一，山口嘉一，増岡健太郎：強制排水による細骨材表面水の低減効果に関する現場試験，土木学会第67回年次学術講演会，VI-187，pp373-374，2012。
- 3) 平塚裕介，今野浩二，山口嘉一，山本肇：細骨材表面水の強制排水過程に関する室内試験と数値解析，土木学会第67回年次学術講演会，VI-188，pp375-376，2012。
- 4) Pruess, K., C. Oldenburg, and G. Moridis, TOUGH2 user's guide. Version 2.0. Rep. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA. 1999.
- 5) 増岡健太郎，高橋孝広，山口嘉一，下茂道人：気液二相流による細骨材表面水の排水シミュレーション，土木学会第67回年次学術講演会，VI-189，pp377-378，2012。