「AtlasX」で取得した高度品質管理データを用いた盛土の性能照査手法に関する検討

前田建設工業 株式会社	正会員	○平田 昌史	正会員	津田 啓史
	ﾌｪﾛｰ会員	石黒 健	正会員	大塚 悠大
株式会社 大林組	正会員	古屋 弘	正会員	稲川 雄宣
	正会員	松崎 晃	正会員	寺本 昌太

1．はじめに

著者らが開発を進めている「AtlasX」[1),2)]は，盛土等の土構造物に対する転圧施工時に，既往の振動ローラ加速度応答法[3)]（α システム）による計測を中心に，自走式散乱型 RI ロボットによる地盤物性の計測や 3D レーザースキャナによる沈下計測も併せて実施し，クラウド上にデータを蓄積・処理するシステムである（**図-1** 参照）．本システムでは，密度や含水比，地盤剛性や沈下量といった地盤情報を面的に取得することが可能なため，これまでは現場土工における高度な品質管理へと利用されてきたが，将来的にはこの品質管理データを用いた性能設計・性能照査まで適用範囲を拡大したいと考えている．具体的には，**図-2** に示すように「AtlasX」で取得した品質管理データをデータベースに蓄積し，各種データベースから DPP（Data Processing Platform）によりデジタルツインを生成，数値シミュレーションによる予測結果を現場にフィードバックすることを想定している[4)]．このような性能設計・性能照査の流れを実現するには，「AtlasX」により取得した高度品質管理データを数値シミュレーションに必要な材料パラメータに変換して受け渡すことが必要になる．そこで本研究では，「AtlasX」で取得した各種品質管理データを数値解析に必要な材料パラメータへと変換する方法や，数値解析技術との連携方法について検討した．ここでは，不飽和土の構成モデルを用いることで「AtlasX」の品質管理データから材料パラメータを導出する手法を示すとともに，試験盛土に対して材料パラメータを推定した事例や，仮想的な盛土に対して実施した FEM 解析結果について紹介する．

2．不飽和土の構成モデルを用いた“間隙比～飽和度～地盤剛性”関係の導出

(1)「締固め管理図」を用いた関係式の導出

「AtlasX」で取得した品質管理データから数値シミュレーションに必要な材料パラメータを導出するにあたり，太田ら[5),6)]が提案する「締固め管理図」を利用する．「締固め管理図」とは，**図-3** に示す 4 象限のグラフであり，右上が横軸を含水比，縦軸を乾燥密度とした締固め過程を表すグラフ，左上が横軸に先行圧縮応力，縦軸に乾燥密度とした圧密（圧縮）過程を表すグラフ，左下が縦軸を締固め土の強度としたせん断過程を表すグラフとなっている．現場の盛土材に対して事前に圧縮（圧密）試験とせん断試験を実施し「締固め管理図」を作成しておけば，現場で計測した乾燥密度ρ_dと含水比wを右上の締固め過程のグラフに入力値としてプロットし，圧縮過程～せん断過程を



図-1　「AtlasX」の構成

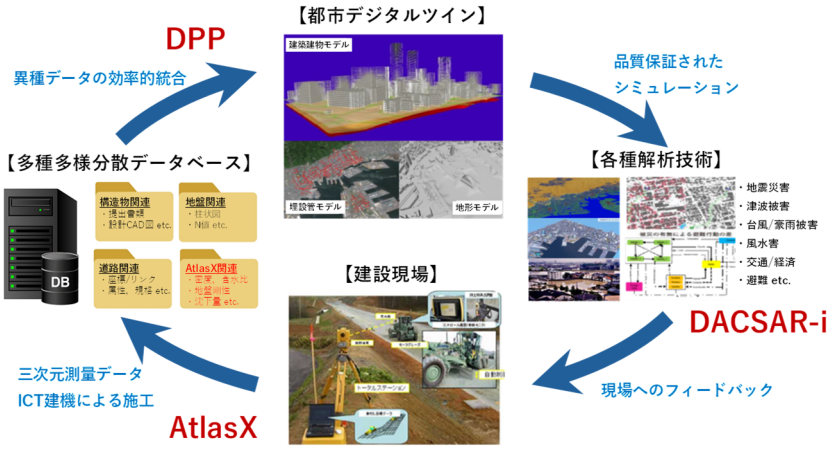
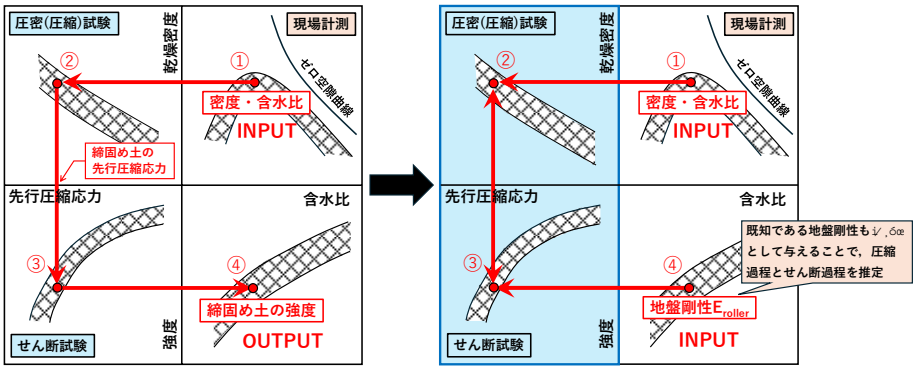


図-2　「AtlasX」を用いた性能設計の流れ（飯塚[4)]に加筆）

キーワード　締固め，不飽和土，構成モデル，FEM 解析，性能照査

連絡先　〒302-0021　茨城県取手市寺田 5270　前田建設工業 ICI 総合センター　TEL0297-85-6171



(a) 従来の「締固め管理図」　(b) 「AtlasX」を適用した場合

図-3　「締固め管理図」への「AtlasX」の適用方法

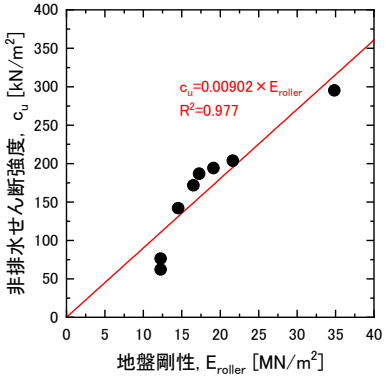


図-4　c_u～E_{roller} 関係

経ることで，締固め土の強度を推定することができる．一方，「AtlasX」では加速度応答法（α システム）から地盤剛性E_{roller}を計測しており，「締固め管理図」の圧縮過程～せん断過程を介さずに締固め土の強度を取得することができる．よって，「締固め管理図」に「AtlasX」を適用した場合，乾燥密度ρ_dと含水比wの他に地盤剛性E_{roller}も入力値として与えることができ，圧縮過程～せん断過程を推定することができる．圧縮過程～せん断過程を不飽和土の構成モデルで表せば，構成モデルの材料パラメータを求めることも可能である．そこで，不飽和土の構成モデルを用いて圧縮過程～せん断過程をモデル化することで，“間隙比e～飽和度S_r～地盤剛性E_{roller}”関係の誘導を試みた．ここでは，不飽和土の構成モデルには大野ら[7]が提案する Se-Hardening モデルを用いる．Se-Hardening モデルの降伏関数fは次式で表される．

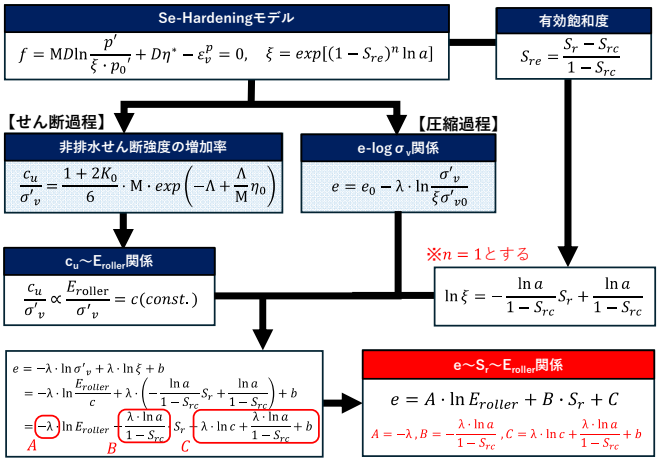


図-5　不飽和構成モデルを用いた関係式導出フロー

$$f = \mathrm{M}D\ln\frac{p'}{\xi\cdot p_0'} + D\eta^* - \varepsilon_v^p = 0, \qquad \xi = \exp[(1-S_{re})^n \ln a], \qquad S_{re} = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \tag{1}$$

Mは限界応力比，Dはダイレイタンシー係数，η^*は一般化した応力比である．また，ξは有効飽和度S_{re}による強度増加を表す関数であり，式中のnおよびaはフィッティングパラメータである．なお，有効飽和度S_{re}は飽和度S_rの関数であり，S_{rc}は限界飽和度である．ここで，式(1)に示した降伏関数から圧縮（圧密）過程における$e\sim\log\sigma'_v$関係式を求めると，次式のように表される．

$$e = e_0 - \lambda\cdot\ln\frac{\sigma'_v}{\xi\sigma'_{v0}} \tag{2}$$

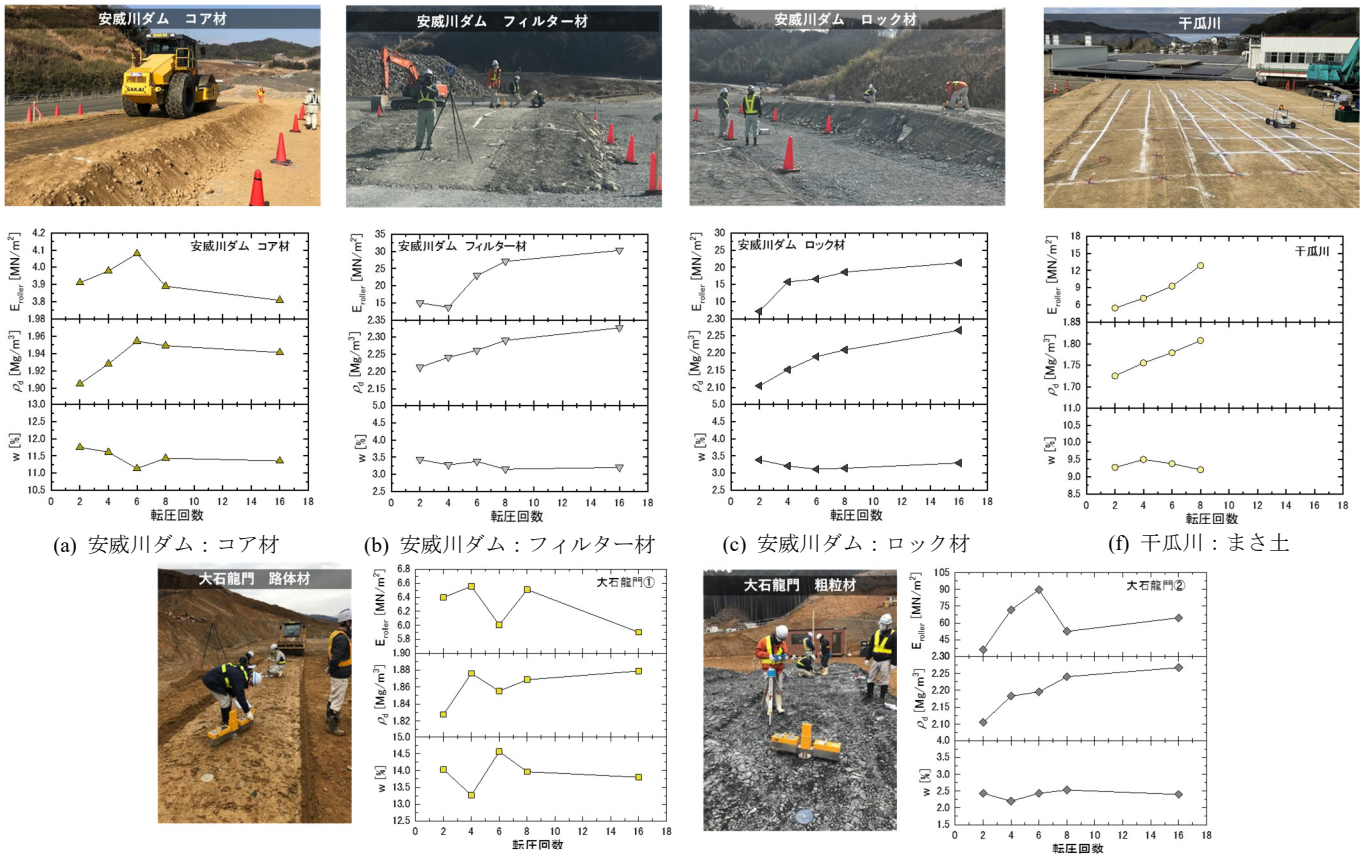
eは間隙比，λは圧縮指数，σ'_vは圧縮応力である．また，式中のe_0は先行圧縮応力σ'_{v0}の時の間隙比である．せん断過程については，式(1)に示した降伏関数から Ohta et al.[8]を参考に，非排水せん断強度の増加率c_u/σ'_vを次のように求める．

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} = \frac{1+2K_0}{6}\cdot\mathrm{M}\cdot exp\left(-\Lambda + \frac{\Lambda}{\mathrm{M}}\eta_0\right) = const. \tag{3}$$

K_0は静止土圧係数，Λは非可逆比であり，式(4)の右辺は一定値となる．ここで，「AtlasX」により取得した地盤剛性E_{roller}と非排水せん断強度c_uの間に**図-4** に示す相関関係にあることから，地盤剛性E_{roller}の増加率を次のように定義する．

$$\frac{c_u}{\sigma'_v} \propto \frac{E_{roller}}{\sigma'_v} = c(const.) \tag{4}$$

図-5 に示したフローに従い，式(4)と式(2)を連立して圧縮応力σ'_vを消去すると，“e～S_r～E_{roller}”の関係式が次のように導かれる．



(a) 安威川ダム：コア材　(b) 安威川ダム：フィルター材　(c) 安威川ダム：ロック材　(f) 千瓜川：まさ土

(d) 大石龍門：路体材　(e) 大石龍門：粗粒材

図-6　各試験盛土における「AtlasX」の計測結果

$$e = A \cdot \ln E_{roller} + B \cdot S_r + C \tag{5}$$

なお，式中のA，B，Cは構成モデルの材料パラメータを含む係数であり，以下の式で表される．

$$A = -\lambda, \qquad B = -\frac{\lambda \cdot \ln a}{1 - S_{rc}}, \qquad C = \lambda \cdot \ln c + \frac{\lambda \cdot \ln a}{1 - S_{rc}} + b \tag{6}$$

(2) 試験盛土に対する“間隙比～飽和度～地盤剛性”関係の推定

過去に実施した試験盛土データを用いて重回帰分析を行い，式(6)に示した“e～S_r～E_{roller}”関係の各係数A，B，Cの算出を試みた．ここで対象としたのは，国交省の PRISM で実施した安威川ダム，大石龍門および千瓜川の試験盛土である[1),2)]．各試験盛土での地盤剛性E_{roller}，乾燥密度ρ_d，含水比wの測定結果を**図-6** に示す．安威川ダムではコア材，フィルター材，ロック材の 3 種，大石龍門では土砂を主とした路体材と砕石を主とした粗粒材の 2 種，千瓜川ではまさ土，の計 6 種の試験盛土に対して重回帰分析を行った．重回帰分析による各係数A，B，Cの推定結果を**表-1** に示す．この表を見ると，重相関係数 R は大石龍門①の路体材で低いものの，他は 0.96 以上の有意な結果となっている．**図-7** は，式(6)を用いて推定した間隙比と実測の間隙比を比較したグラフである．推定した間隙比は計測値ともほぼ一致しており，この図からも重回帰分析により導いた各係数が十分な精度を有していると判断できる．以上のことから，式(6)に示した“e～S_r～E_{roller}”関係における各係数A，B，Cを用いて数値シミュレーションに必要な材料パラメータを設定することに問題はないと考えられる．

ちなみに，式(5)に示した“e～S_r～E_{roller}”関係から永井ら[9)]を参考に，含水比～乾燥密度関係に等E_{roller}線を追加した**図-8** に示すようなグラフを作成することも可能である．この**図-8** には，試験盛土のデータも同時にプロットしている．粗粒材である安威川ダムのフィルター材やロック材，大石龍門の粗粒材のグラフを見ると，等E_{roller}線は垂直に立ち上がるようなラインとなっており，乾燥密度が増加しても地盤剛性はほとんど変化しない材料であることがわかる．また，細粒分を多く含む安威川ダムのコア材のグラフを見ると，飽和度が高い位置では乾燥密度が増加しても逆にE_{roller}が低下するオーバーコンパクションとなることがわかる．このように等E_{roller}線を描くことで，締固めにおける強度基準値を設定できるだけでなく，盛土材の材料特性も把握することができると考えられ，性能

表-1　各試験盛土に対する重回帰分析結果

	安威川ダム コア	安威川ダム フィルター	安威川ダム ロック	大石龍門 路体材	大石龍門 粗粒材	千瓜川 まさ土
重相関 R	0.963	0.968	0.991	0.647	0.970	0.999
重決定 R^2	0.927	0.937	0.981	0.418	0.940	0.998
A	-0.090	-0.014	-0.037	-0.122	-0.030	-0.059
B	-0.756	-0.381	-0.378	-0.421	-0.742	-0.307
C	1.738	0.413	0.735	1.854	0.777	1.184

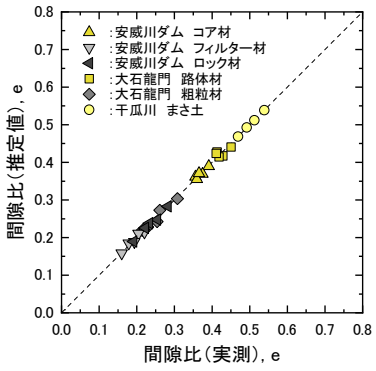
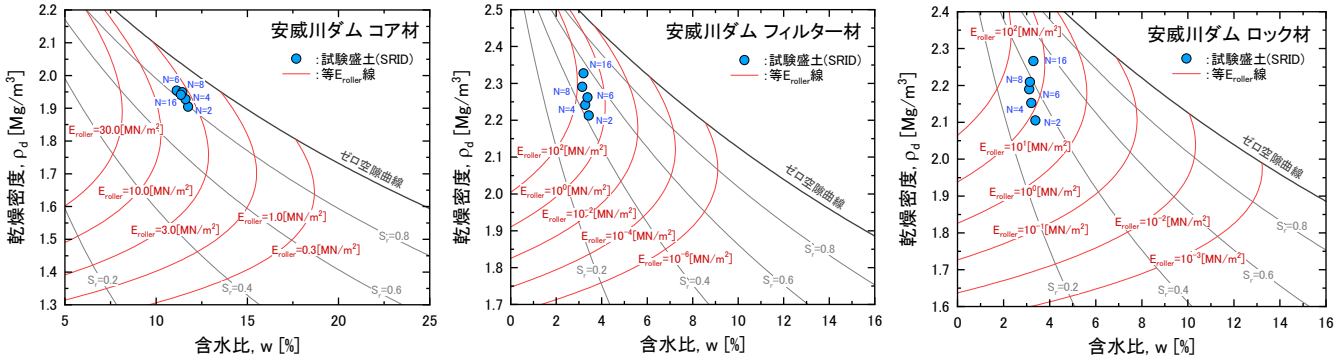


図-7　推定値と実測値の比較



(a) 安威川ダム：コア材　(b) 安威川ダム：フィルター材　(c) 安威川ダム：ロック材

(d) 大石龍門：路体材　(e) 大石龍門：粗粒材　(f) 千瓜川：まさ土

図-8　推定した等 E_{roller} 線と各試験盛土の締固め状況

設計・性能照査への利用だけではなく，高度品質管理に対しても有用な情報が得られることがわかった．

3．不飽和構成モデルに必要な材料パラメータの推定

ここでは，式(5)に示した“e～S_r～E_{roller}”関係における各係数A，B，Cを用いて，数値シミュレーションに必要な材料パラメータの推定を試みる．式(6)に示したように，係数A，B，Cには圧縮指数λや強度増加関数ξに含まれるパラメータa，限界飽和度S_{rc}，地盤剛性の増加率c（$=E_{roller}/\sigma'_v$）といった材料パラメータが多数含まれており，式(6)のみではこれらの材料パラメータを求めることは不可能である．そこで，本検討では圧縮指数λに着目することにした．式(6)に示したように，圧縮指数λは係数Aをマイナスにした値であり，式(6)から直接得られる値である．**図-9** は，**表-1** に示した係数Aの値から各試験盛土の圧縮指数λに変換し比較したグラフである．このグラフを見ると，粗粒材が含まれる安威川ダムのフィルター材やロック材，大石龍門の粗粒材の圧縮指数は，細粒分を含む安威川ダムコア材や千瓜川のまさ土に比べて小さい値を示しており，その値は**図-10** に示す各盛土材の粒度特性の傾向とも一致している．そこで，圧縮指数λを基準として，その他の材料パラメータを推定する．塑性指数I_Pから材料パラメータを設定する Iizuka and Ohta[10]の手法を参考に，塑性指数I_Pを介して有効内部摩擦角ϕ'と塑性指数I_Pの関係，圧縮指数λと塑性指数I_Pの関係は次のように表される．

$$\sin\phi' = 0.81 - 0.233 \cdot \log I_P \qquad \text{Kenney (1959)} \tag{7}$$

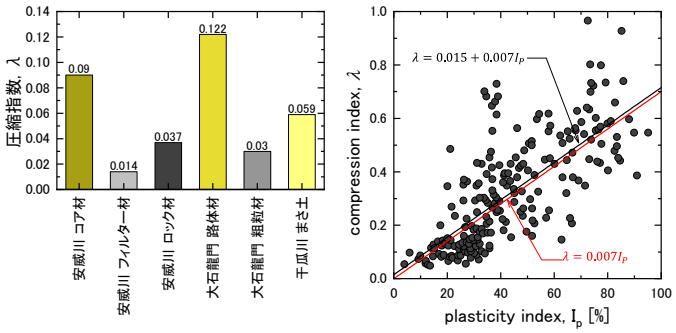


図-9　圧縮指数の比較　　図-11　I_P～λ 関係 [10)]

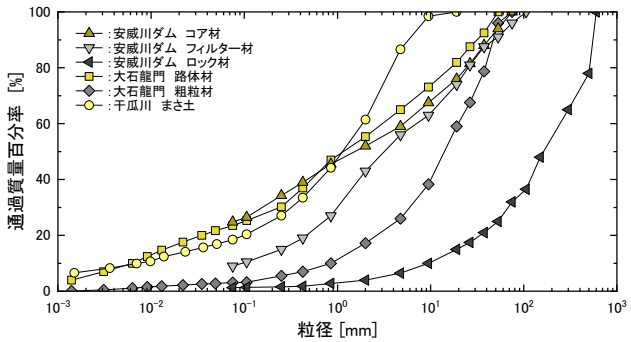


図-10　各試験盛土の粒度分布

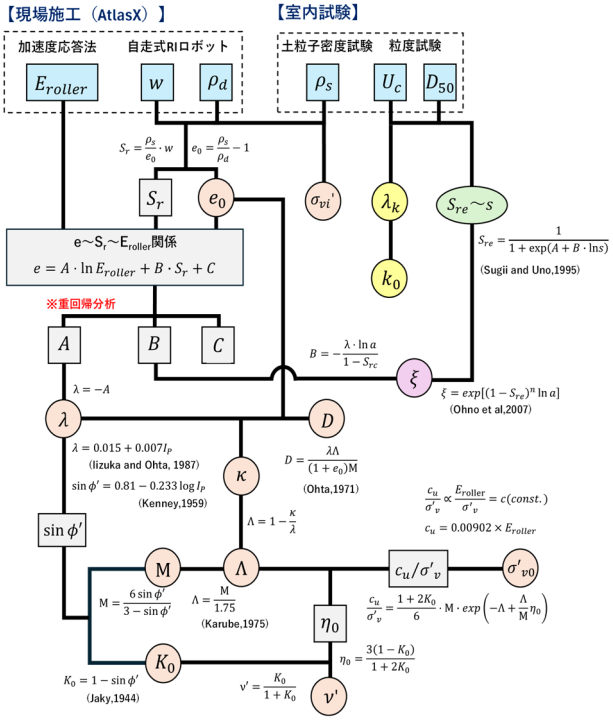


図-12　「AtlasX」を用いたパラメータ設定フロー

表-2　各試験盛土の材料パラメーター覧

		安威川ダム コア材	安威川ダム フィルター材	安威川ダム ロック材	大石龍門 路体材	大石龍門 粗粒材	千瓜川 まさ土
圧縮指数	λ	0.090	0.013	0.037	0.122	0.030	0.059
有効内部摩擦角	sin ϕ'	0.570	0.761	0.694	0.534	0.735	0.625
	ϕ'	34.73	49.55	43.92	32.31	47.27	38.66
限界応力比	M	1.406	2.039	1.805	1.301	1.946	1.578
非可逆比	Λ	0.804	0.950	0.950	0.743	0.950	0.902
静止土圧係数	K_0	0.430	0.239	0.306	0.466	0.265	0.375
有効ポアソン比	ν'	0.301	0.193	0.234	0.318	0.210	0.273
不飽和硬化挙動を制御する	lna	7.54	21.18	9.17	3.12	22.43	4.71
パラメータ	n	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
非排水せん断強度の増加率	cu/σv	0.330	0.399	0.370	0.320	0.388	0.345

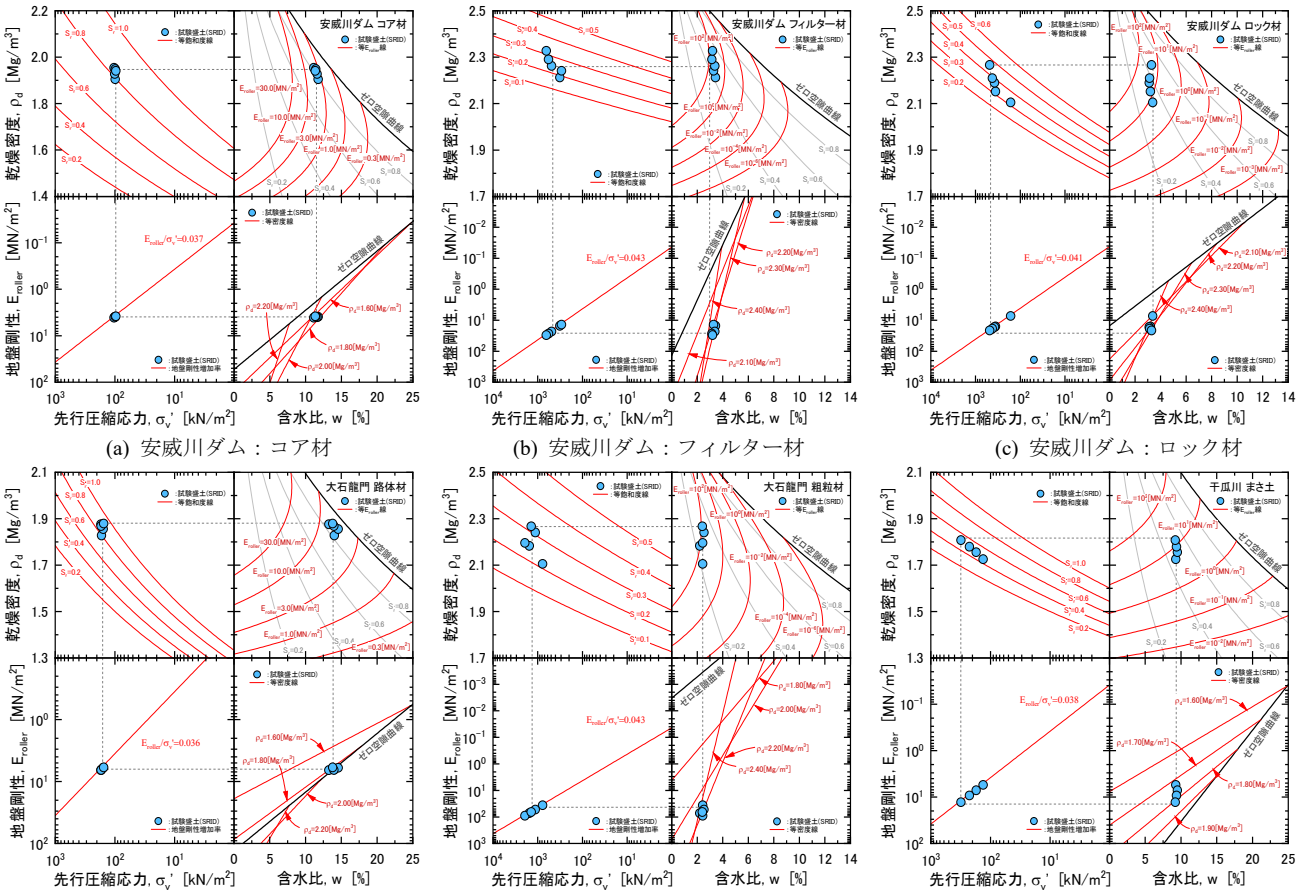
$$\lambda = 0.015 + 0.007 \cdot I_P \qquad \text{Iizuka and Ohta (1987)} \tag{8}$$

上式を連立して塑性指数I_Pを消去すると，圧縮指数λと有効内部摩擦角ϕ'の関係が以下の式で表される．

$$sin\,\phi' = 0.81 - 0.233 \cdot \log\left(\frac{\lambda - 0.015}{0.007}\right) \tag{9}$$

上式から圧縮指数λから有効内部摩擦角ϕ'を求めることができれば，その他の材料パラメータは有効内部摩擦角ϕ'から設定することが可能となる．材料パラメータの設定フローを**図-12** に示す．**表-2** は，各試験盛土に対して求めた材料パラメータの一覧である．表中に示したように，圧縮指数λから求めた有効内部摩擦角ϕ'は約 32～48°の範囲にあり，十分妥当な範囲の値であると考えている．ちなみに，式(8)に示す圧縮指数λと塑性指数I_Pの関係式を見ると，圧縮指数λが 0.015 以下の場合には適用できない．**図-11** は，式(8)を求める際の Iizuka and Ohta[10)]によるグラフであるが，圧縮指数λが 0.015 以下で計算が可能なように切片を考慮しない$\lambda = 0.007 \cdot I_P$の関係式にしても問題ないことがわかる．このため，安威川ダムのフィルター材に対しては，切片を考慮しない式を用いて材料パラメータを算出している．

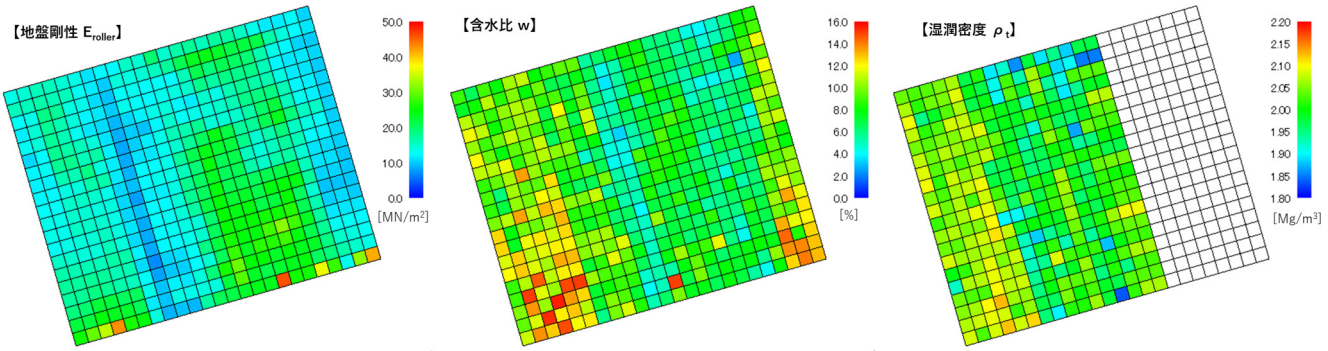
以上のように，「AtlasX」の品質管理データから数値解析に必要となる材料パラメータを設定することができた．なお，この材料パラメータを用いることで，**図-13** に示すような「締固め管理図」を描くことも可能である．



(a) 安威川ダム：コア材　(b) 安威川ダム：フィルター材　(c) 安威川ダム：ロック材

(d) 大石龍門：路体材　(e) 大石龍門：粗粒材　(f) 千瓜川：まさ土

図-13　「AtlasX」データから推定した各試験盛土の「締固め管理図」



(a) 地盤剛性分布（加速度応答法）　(b) 含水比分布（散乱型 RI）　(c) 湿潤密度分布（散乱型 RI）

図-14　千瓜川本施工における「AtlasX」の計測結果コンター図

4．数値シミュレーション

(1) 解析対象現場と解析概要

ここでは，国交省の PRISM で実施した千瓜川の現場計測結果からパラメータを推定して，仮想的な盛土の FEM 解析を試みた．**図-14** は，千瓜川の現場において，試験盛土実施後の本施工エリア（縦 20m×横 24m）で計測した「AtlasX」による地盤剛性E_{roller}と，自走式散乱型 RI ロボットで計測した含水比wと湿潤密度ρ_tのヒートマップである（1.0m×1.0m メッシュ）．なお，湿潤密度は計測時間の都合上，対象エリアの右側 1/3 程度が計測することが出来なかった．**図-15** は，**図-14** に示した自走式散乱型 RI ロボットによる計測結果のグラフである．散乱型 RI の計測結果は非常にバラついており，乾燥密度の推定値と実測値のグラフを見てもバラつきが大きい．これは，本現場が自走式散乱型 RI ロボットを適用した初期事例であり，計測方法や補正方法がまだ確立できていなかったことに起因している．そこで，**図-15** に SRID による計測結果も併せてプロットした．SRID の値は，散乱型 RI に比べ値のばらつきが少ないため，今回はこの SRID の値から材料パラメータを設定した．**表-3** に推定したパラメーター一覧を示

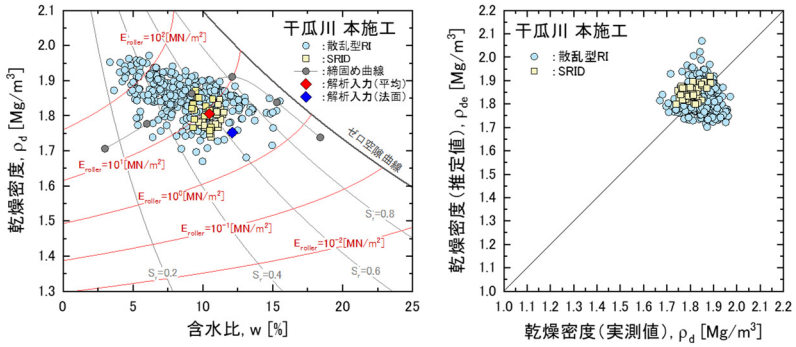


図-15　干瓜川本施工における散乱型 RI と SRID の比較



写真-1　自走式 RI による計測状況（干瓜川）

す．図-16 は，FEM 解析に用いた盛土高 5m，勾配 1:1.5 の道路盛土の仮想モデルである．Case-1 では盛土全体のパラメータに SRID の平均値を用いた．Case-2 では，図-17 に示した法面付近は締固め不足になると仮定し，この範囲のパラメータに SRID の最小値を用いた．解析では降雨強度 10mm/h を 1 週間連続して与え，締固め不足が盛土法面の変形や安定性に与える影響を比較した．不飽和土の変形解析には土／水／空気連成有限要素解析プログラム（DACSAR-i）[11]を使用しており，安定性評価には鵜飼 [12]によるせん断強度低減法（SSRM）による評価を連携させた解析 [13]を実施している．

表-3　FEM 解析に用いた材料パラメーター覧

			盛土(平均)	盛土(法面)
地盤剛性	： E_{roller}	[MPa]	16.5	10.1
含水比	： w	[%]	10.5	12.1
乾燥密度	： ρ_d	[Mg/m^2]	1.805	1.752
湿潤密度	： ρ_t	[Mg/m^2]	1.994	1.964
圧縮指数	： λ		0.059	
有効内部摩擦角	： ϕ'	[deg.]	38.7	
限界応力比	： M		1.578	
非可逆比	： Λ		0.902	
静止土圧係数	： K_0		0.375	
有効ポアソン比	： ν'		0.273	
限界飽和度	： S_{rc}		0.10	
先行時の間隙比	： e_0		0.468	0.513
先行圧密応力	： σ_{v0}'	[kPa]	431.4	264.1
初期飽和度	： S_{r0}		0.59	0.63
不飽和硬化挙動の	： lna		4.71	
制御パラメータ	： n		1.0	

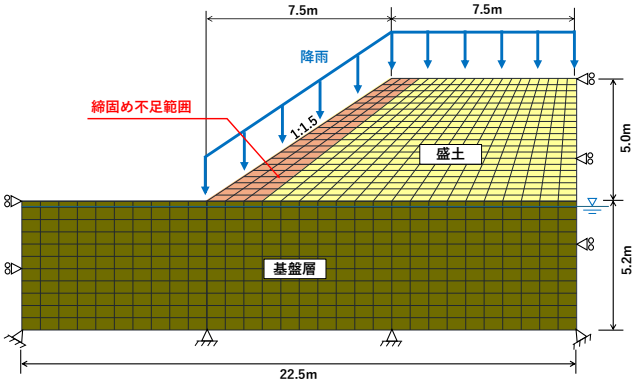


図-16　FEM 解析に用いたメッシュ図

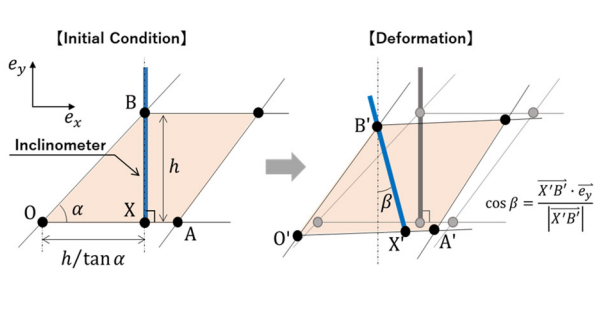
(2) 解析結果

図-17 は，DACSAR-i による解析結果から法面上部の傾斜角の経時変化を示したグラフである．降雨により前方に倒れこむように変形していた法面が，降雨後 2 日後程度で傾斜角が逆方向に進行している．図-18 は，SSRM による安全率の経時変化を示したグラフである．Case-1 では，降雨後 4 日ほどで安全率 Fs＝1.550 に収束するのに対し，Case-2 では降雨後 3 日で安全率 Fs＝0.990 となり盛土が崩壊する結果となった．図-19 は，降雨開始から 3 日後の DACSAR-i による ISTATE と偏差ひずみのコンター図，SSRM による偏差ひずみのコンター図である．ISTATE は計算上の弾性領域と塑性領域を表す指標であるが，法面付近で赤色の塑性領域が広がっている．また，偏差ひずみも塑性領域と同じく法面付近で発生している．なお，Case-1 と Case-2 を比較すると，盛土上部の法面での塑性領域，偏差ひずみに差が生じていることがわかる．SSRM による偏差ひずみ分布はすべり線を示すものであり，法面上部ですべり破壊を起こすことが予測される．

５．おわりに

本報告では，「AtlasX」で取得した品質管理データから，数値シミュレーションに必要な材料パラメータの導出方法について紹介した．また，過去に実施した試験盛土データに対して，材料パラメータを推定した事例についても紹介した．各試験盛土に対して推定した材料パラメータは，盛土材の材料特性を十分に反映していると考えられ，FEM 解析などの数値計算にも十分適用可能であり，施工時の品質管理にも有用なデータが得られることがわかった．推定した材料パラメータを用いて不飽和 FEM 解析を実施した結果，締固めが十分ではない場合には盛土の安定性に違いが生じることが確認できた．

以上の結果から，実現場における材料特性や締固めの差を「AtlasX」で三次元的に取得し，FEM 解析などの数



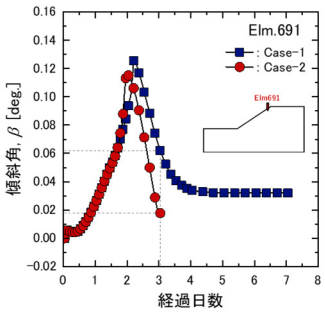


図-17　傾斜角の計算方法と経時変化（DACSAR-i）

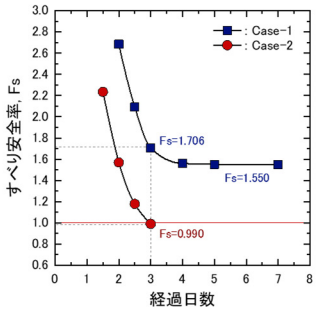
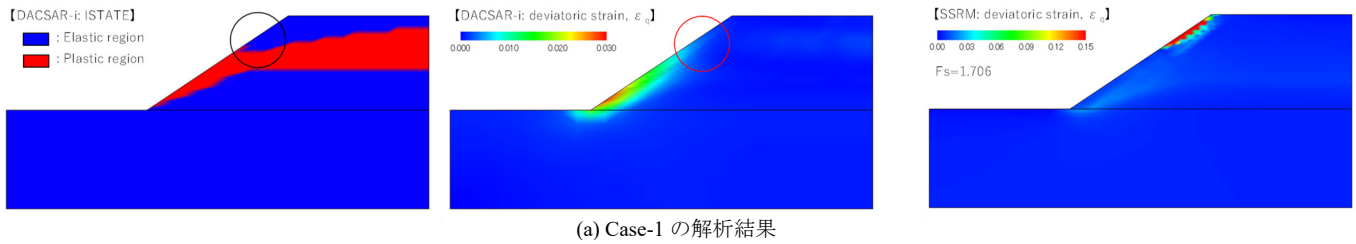
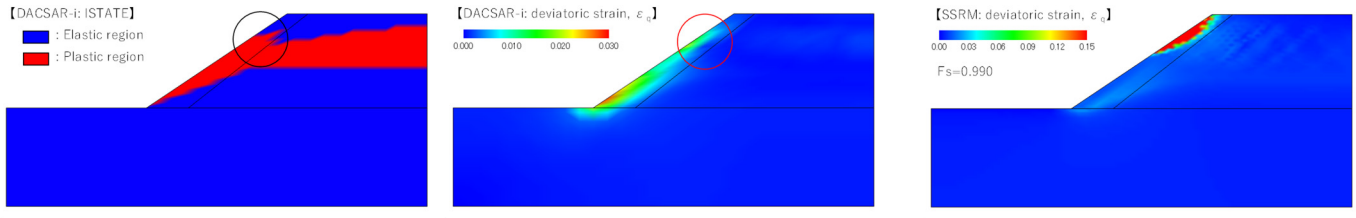


図-18　安全率の変化（SSRM）



(a) Case-1 の解析結果



(b) Case-2 の解析結果

図-19　DACSAR-i による ISTATE 分布および偏差ひずみ分布と SSRM による偏差ひずみ分布（3 日経過後）

値シミュレーションで評価した結果を現場にフィードバックすることで，今後の性能設計・性能照査への適用も十分可能であると考えられる．

［参考文献］

1) 稲川雄宣，古屋弘，松崎晃，石黒健，平田昌史：次世代 α システムの開発（その 1）－新しい盛土品質管理手法の構築－，第 4 回 i-Construction の推進に関するシンポジウム，pp.41-44，2022.
2) 平田昌史，石黒健，古屋弘，稲川雄宣，松崎晃，佐藤寛：ICT 土工現場締固め品質管理手法「次世代 α システム」の開発－国土交通省 PRISM 大石龍門実証工事の実施概要－，土の締固め管理の合理化に関するシンポジウム，1-3，2022.
3) 藤山哲雄，建山和由：振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法，土木学会論文集，No.652，III-51，pp.115-123，2000.
4) 飯塚敦：自然災害への対峙的な防災・減災からの脱却，神戸大学都市安全研究センター研究報告，Vol.25，pp.181-190，2021.
5) 太田秀樹，伊藤雅夫，石黒健，米谷敏：締固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定，土木学会論文集，No.436/III-16，pp.27-36，1991.
6) 伊藤雅夫，太田秀樹，石黒健，米谷敏：礫分を混入する締固め土の先行圧縮応力と強度の推定，土木学会論文集，No.439/III-17，pp.27-36，1991.
7) 大野進太郎，河合克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，Vol.63/No.4，pp.1132-1141，2007.
8) Ohta, H., Nishihara, A. and Morita, Y.: Undrained Stability of K0-Consolidation Clays, Proc.11th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pp.613-616, 1985.
9) 永井裕之，菊池喜昭，野田翔兵，兵動太一，龍岡文夫，小薬はるな，眞壁淳：迅速に測定した地盤剛性指標による盛土の締固め管理の合理化，地盤工学ジャーナル，Vol.16，No.1，pp.75-85，2021.
10) Iizuka, A. and Ohta, H.: A Determination Procedure of Input Parameters in Elasto-viscoplastic Finite Element Analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.
11) Takeyama, T., Tachibana, S. and Fukukawa, A.: A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, International Journal of Material Science & Engineering, Vol.2(1), 2015.
12) 鵜飼恵三：弾塑性 FEM による斜面の全体安全率の計算法，土質工学会論文報告集，Vol.29，No.2，pp.190-195，1989.
13) 平田昌史，大塚悠大，石黒健，丸山憲治，大木拓哉，赤木寛一，小西真治：降雨による斜面崩壊を模擬した遠心模型実験の FEM 再現解析，第 59 回地盤工学研究発表会発表講演集，No.23-13-4-04，2024.