# 均質化法を用いた互層岩盤の 地震応答解析手法の開発とその検証

伊藤 公人1·和仁 雅明2·齋藤 政治3·鈴木 峻4·寺田 賢二郎5

 <sup>1</sup> 非会員 中部電力株式会社 原子力本部 原子力土建部 設計管理グループ (〒461-8680 愛知県名古屋市東区東新町1番地)
E-mail: Itou.Kouto@chuden.co.jp

<sup>2</sup>正会員 中部電力株式会社 原子力本部 原子力土建部 設計管理グループ(同上) E-mail: Wani.Masaaki@chuden.co.jp

<sup>3</sup>非会員 株式会社シーテック 土木建築本部 技術コンサルタント部 解析グループ (〒455-0054 愛知県名古屋市港区遠若町三丁目 7 番地の 1) E-mail: se.saitou@ctechcorp.co.jp

<sup>4</sup>学生会員 東北大学大学院 工学研究科 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻朝青葉 6-6-06) E-mail: shun.suzuki.q7@dc.tohoku.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1) E-mail: tei@irides.tohoku.ac.jp

本研究では、互層岩盤の堆積構造に起因する直交異方性の力学特性を再現可能なミクロおよびマクロス ケールの弾塑性構成則の定式化、および均質化法に基づく分離型マルチスケール解析のスキームを活用し た地震応答解析手法を開発する.定式化にあたっては、ミクロ構成則を用いた数値材料試験による結果を 元に、マクロ構成則の材料パラメータを同定する.また、本手法を用いて、仮想的な岩盤トンネルを対象 に地震応答解析を実施し、一般的に用いられる逐次非線形解析による地震応答解析と比較することで、本 手法の妥当性および適用性を検証する.

**Key Words:** layered sedimentary soft rock, homogenization method, multi-scale analysis, seismic response analysis, orthotropic, elasto-plasticity

# 1. はじめに

日本の海岸付近に分布する新第三紀の堆積軟岩を基礎 地盤とした,原子力発電所やダム等の大型構造物や,地 下発電所やトンネル等の岩盤構造物の設計においては, 岩盤の力学特性の把握が重要である.

岩盤の力学特性は、構成材料である岩石の力学特性と 不連続面が定める構造特性の二つの要因に支配される<sup>1)</sup> <sup>2)</sup>が、亀裂等の不連続面が少ない均質な堆積軟岩では、 岩石から切り出した供試体を用いた室内試験により同定 した力学特性を用いて、岩盤の変形性や安定性を評価す る事例が報告されている<sup>3)~5</sup>.

ただし、堆積軟岩は岩石レベルでは等方体とみなせて も、岩盤としては堆積構造による直交異方性の力学特性 を有することに留意し、設計においてはその影響につい て適切に考慮することが望ましい. 先述のような構造物の耐震設計に用いられる地震応答 解析の手法としては、等価線形解析や逐次非線形解析が 一般的である <sup>の~8</sup>が、これらの手法において、岩盤は平 均的な力学的特性を有する等方体を仮定しており、一部 の研究的な事例を除き直交異方性を直接考慮することは できない.

等方的な材料レベル(ミクロスケール)での挙動を平 均化し、直交異方性を持つ岩盤レベル(マクロスケール) の挙動として適切に表現する手法として、均質化法<sup>9~10</sup> が挙げられる.均質化法は、ミクロスケールとマクロス ケールの関係を記述するための数学的手法であり、この 均質化法に基づくマルチスケール解析により、マクロ構 造に周期的に現れるミクロ構造の幾何性状などの非均質 性を用いてマクロ構造の変形・強度特性を評価すること ができ、同時にミクロ構造の挙動も数値的に評価するこ とが可能となる. これまでの岩盤を含む地盤材料を対象とした均質化法 に関する研究では,静的解析を対象としたものは数多く ある<sup>12~14</sup>ものの,動的解析を対象とした研究は改良地 盤を対象としたものが数例ある程度である<sup>1516</sup>.

# 2. 本研究の目的

本研究では、前章で挙げた課題を背景とし、互層岩盤 の堆積構造に起因する直交異方性の力学特性を考慮可能 なミクロ構成則(等方性弾塑性構成則)およびマクロ構 成則(異方性弾塑性構成則)をそれぞれ定式化し、均質 化法に基づく分離型マルチスケール解析のスキームを活 用した地震応答解析手法を提案することを目的とし、仮 想的な岩盤トンネルを事例に地震応答解析を実施するこ とで、本手法の適用性を検証する.

本研究における研究フローおよび概念図を図-1 に示 す.

# 3. 材料構成則

図-1 で示す数値材料試験(均質化解析)や局所化解 析(ミクロ解析)で用いる等方性弾塑性構成則(ミクロ 構成則),およびパラメータ同定や地震応答解析(マク ロ解析)で用いる異方性弾塑性構成則(マクロ構成則) は加藤ら<sup>14</sup>から以下のとおりとする.

#### (1) 等方性弾塑性構成則(ミクロ構成則)

一般的な Mises 型の等方性弾塑性構成則を採用する. ひずみ加算分解,応力ひずみ関係,降伏関数,降伏応力, 塑性流れ則,内部変数,内部変数発展則,載荷・除荷条 件は,それぞれ次式で与えられる.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{e}} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{p}} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{C} : \boldsymbol{\varepsilon}^{\mathrm{e}} \tag{2}$$

$$f(\sigma, \alpha) = \|s\| - \sqrt{\frac{2}{3}\sigma_y(\alpha)} = 0$$
(3)

$$\sigma_{\rm y}(\alpha) = \sigma_{\rm y0} + H\alpha + R_{\infty}(1 - \exp(-\beta\alpha)) \quad (4)$$

$$\dot{e^{p}} = \dot{\gamma}N \tag{5}$$

$$\alpha = \bar{\varepsilon}^{\mathrm{p}} = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \left\| \dot{\boldsymbol{e}}^{\mathrm{p}} \right\| \mathrm{d}t \tag{6}$$

$$\dot{\alpha} = \dot{\varepsilon}^{\mathrm{p}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\| \dot{e}^{\mathrm{p}} \right\| \tag{7}$$

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \alpha) \le 0, \ \dot{\gamma} \ge 0, \ \dot{\gamma} f(\boldsymbol{\sigma}, \alpha) = 0$$
 (8)

ここで、 $\varepsilon^{e}$ は弾性ひずみの偏差成分、 $\varepsilon^{p}$ は塑性ひず みの偏差成分、 $\mathbb{C}$ は弾性係数テンソル、sは偏差応力、  $\dot{e}^{p}$ は相当塑性ひずみ速度、 $\dot{\gamma}$ は塑性乗数、Nは流れベク トルであり偏差応力を成分とする単位ベクトル、 $\sigma_{y0}$ は 初期降伏応力、 $R_{\infty}$ 、 $\beta$ は非線形効果パラメータ、Hは 線形硬化係数である.

#### (2) 異方性弾塑性構成則(マクロ構成則)

応力ひずみ関係、降伏関数、Hill応力、降伏応力、塑



性流れ則, 内部変数発展則, 載荷・除荷条件は, それぞ れ次式で与えられる.

$$\boldsymbol{\Sigma} = \tilde{\mathbb{C}} : \boldsymbol{E}^{\mathrm{e}} \tag{9}$$

$$\phi_{\mathrm{p}}(\boldsymbol{\Sigma}, A) = \frac{1}{2} \left( \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{Hill}}^{\mathrm{p}} \right)^{2} - \frac{1}{2} \left( \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{y}}(A) \right)^{2} \le 0 \qquad (10)$$

$$\Sigma_{Hill}^{p} = \sqrt{\boldsymbol{\Sigma}: \boldsymbol{M}_{\boldsymbol{p}}: \boldsymbol{\Sigma}}$$
(11)

$$\Sigma_{y}(A) = \Sigma_{y0} + \widetilde{H}A + \widetilde{R}_{\infty}(1 - \exp(-\widetilde{\beta}A)) \quad (12)$$

$$\dot{E^p} = \dot{\Gamma} M_n : \Sigma \tag{13}$$

(12)

$$\dot{A} = \dot{\bar{E}}^p = \dot{\Gamma} \Sigma^p_{Hill} \tag{14}$$

$$\phi_{\rm p} \le 0, \ \dot{\Gamma} \ge 0, \ \dot{\Gamma}\phi_{\rm p} = 0 \tag{15}$$

ここで、 $\hat{\mathbb{C}}$ は直交異方性テンソル、 $M_p$ は Hill テンソル である.

## 4. 対象とする岩石の変形特性

今回解析対象とする互層岩盤を構成する砂岩と泥岩の 変形特性として、それぞれの圧密非排水条件の三軸圧縮 試験結果のうち応力---ひずみ関係を図-2に示す.

泥岩の応力-ひずみ関係は、圧縮強さまでほとんど直 線的でありそれ以後は顕著なひずみ軟化型である.変形 係数及び圧縮強さの先行圧密応力(σ<sub>0</sub>')依存性は小さ い.

一方,砂岩の応力-ひずみ関係は、圧縮強さ後に顕著 なひずみ軟化の傾向を示さない.変形係数及び圧縮強さ の先行圧密応力依存性が大きい.

# 5. 数值材料試験

図-3に示す泥岩と砂岩の体積比8:2で構成される非均 質岩盤のユニットセルに対して数値材料試験を行った.



図-2 応カーひずみ関係

圧密応力は 0.0Mpa から 1.96Mpa の間で, 0.196Mpa 刻みで 設定し, 11 ケース試験を行った.また,この数値材料 試験を行う前段階として,泥岩,砂岩それぞれに対する 三軸圧縮 CU 試験の結果から式(4)の各パラメータと弾性 定数を圧密応力ごとに同定し,数値材料試験の入力デー タとしている.

図-3 に示すユニットセルに,等方性弾塑性構成則 (ミクロ材料構成則)を用いて図-4 に示す6つの変形 モードに対して,ひずみ量が 2.5%になるまで負荷する. 数値材料試験の結果であるマクロ応力とマクロひずみの 関係から,対応する等価均質体のマクロ異方性弾塑性パ ラメータを同定する.

本研究では、このパラメータ同定手法として、粒子群 最適化法(以下, PSO)を使用しており、同定対象とし たマクロ異方性弾塑性構成則の材料パラメータは弾性定 数、ポアソン比、各方向の降伏応力、硬化係数である. このとき、圧密応力を0.0Mpa、0.98Mpa、1.96Mpaとした ときのx方向、y方向のマクロ応カーマクロひずみ曲線 とこれらに対してPSOを行った結果を数値材料試験の結 果と合わせて図-5 に示す.この結果から、数値材料試 験結果と概ね一致する同定曲線が得られたため、この同 定曲線の材料パラメータをマクロ材料パラメータとして 決定した.

また,実際の地盤における先行圧密応力は,深さ方向 に連続的に変化するため,本研究で仮定した 0.0Mpa か ら 1.96Mpa までの間で補完ができるよう,同定したパラ メータに先行圧密応力を変数とする近似曲線を導入する. この近似曲線は以下の2次関数で示される.

$$\chi = a\sigma_3^2 + b\sigma_3 + c \tag{16}$$

ここで、 $\sigma_3$ は先行圧密応力、左辺の $\chi$ は各パラメータである.同定したパラメータを**表-1**に示す.

## 6. 地震応答解析(マクロ解析)

#### (1) 地震応答解析 (マクロ解析)の概要





図-4 変形モード



図-5 数値材料試験およびパラメータ同定結果

$\chi \equiv a\sigma_3^2 + b\sigma_3 +$	с	а	b	С
弾性定数(軸方向)	$E_{11}, E_{33}$	-56.271	278.86	2229.2
弾性定数(軸方向)	$E_{22}$	-209.74	970.38	1168.8
弾性定数(せん断方向)	$G_{44}, G_{55}$	-76.017	388.50	386.55
弾性定数(せん断方向)	$G_{66}$	-22.795	111.29	904.85
Poisson 比	$\nu_{12}$	0.00005	-0.0008	0.2494
Poisson 比	$v_{23}$	-0.0208	0.0853	0.1314
Poisson 比	$v_{31}$	-0.0002	0.0024	0.2318
降伏応力(軸方向)	$\Sigma_{xx}^{\mathrm{y}}$ , $\Sigma_{zz}^{\mathrm{y}}$	-0.1970	0.7480	3.7501
降伏応力(軸方向)	$\Sigma_{yy}^{y}$	-0.6105	1.9808	2.8224
降伏応力(せん断方向)	$T_{xy}^{y}$ , $T_{yz}^{y}$	-0.2189	0.9480	0.9500
降伏応力(せん断方向)	$T_{zx}^{y}$	-0.1065	0.4080	2.2053
線形硬化係数	Н	-8.7565	73.095	85.837
非線形硬化係数	$R_{\infty}$	0.0377	0.7673	5.4987
非線形硬化係数	β	-24.982	108.31	539.47

前章で同定したパラメータを用いて,仮想的な互層岩 盤内の海底トンネルを対象に、二次元有限要素法(以下, FEM)による地震応答解析を実施した.解析プログラム は、汎用有限要素法解析ソフト T-DAP を用い、入力波 形は図-6 に示す仮想の地震動を模擬した加速度波形と した.また、解析モデルを図-7 に、境界条件を表-2 に 示す.本研究は岩盤の挙動を対象とするものであるため、 海底トンネルについては、構造物モデル化するのではな く、岩盤に空洞を設けることで模擬することとした.

また、今回開発した均質化法に基づく分離型マルチス ケール解析(以下、手法1)に加え、妥当性検証用とし て、地盤の非線形モデルに修正 GHE モデル<sup>17</sup>を用いた 一般的な逐次非線形解析(以下、手法2)について、手 法1と同様の FEM モデルを用いて実施した.さらに、 手法1については、図-8 に示すような互層傾斜角によ る影響を確認するために、互層傾斜角0°と20°の2ケ ースを実施した.解析フローを図-9 に、解析手法の比 較一覧を表-3 に、手法2に用いた解析物性値を表-4 に、 ケース数一覧表を表-5 にそれぞれ示す.

# (2) 解析結果

解析結果のうち、加速度時刻歴とフーリエスペクトル



表-2 FEM モデル境界条件

初期広力破托	側方	鉛直ローラー
作り共分ルンノノ内牛化ト	底面	固定
地雷亡梦初托	側方	等変位境界
地宸心合胜竹	底面	粘性境界

解析手法	手法1:分離型マルチスケール解析(均質化法)	手法2:逐次非線形解析(修正GHE)
物理特性(比重等)	室内岩石試験	室内岩石試験
地盤の非線形モデル	均質化法(直交異方性弾塑性モデル)	修正GHE(ひずみ依存の動的変形特性)
変形特性の評価方法	常時:室内岩石試験(静的三軸) 地震時:同上	常時:室内岩石試験(静的三軸) 地震時:室内岩石試験(動的変形試験)
物性の平均化手法 (泥岩・砂岩→互層岩盤)	常時:均質化法(数値材料試験) 地震時:同上	常時:不要(原位置弾性波(PS検層)) 地震時:同上
変形特性の異方性	常時:考慮 地震時:同上	常時:非考慮 地震時:同上
地盤物性の初期拘束圧依存性	考慮	考慮
減衰	レーリー減衰	履歴減衰+レーリー減衰
局所的な応答評価 (互層岩盤→泥岩・砂岩)	局所化解析にて直接評価可能	常時(静的)の剛性差を元に間接的に評価

#### 表-3 解析手法比較一覧







図-9 解析フロー

を図-10に、トンネルの上下端の相対変位時刻歴を図-11 に、右向き変形最大時刻における変形図および主応カコ ンター図を図-12 に、左向き変形最大時刻における変形 図および主応力コンター図を図-13 に、それぞれ示す.

加速度応答時刻歴は、各ケースで概ね同等の結果を示 しており、均質化法による地震応答解析が、実務で使用 されている一般的な逐次非線形解析に対して、マクロレ ベルにおいて同等の岩盤評価が可能であることが分かる. 相対変位時刻歴については、まず Casel-1(均質化法, 互層傾斜角 0°)と Case2(修正 GHE)の比較では、変

#### 表-4 解析物性值(岩盤)

共通	Case2のみ		
単位体積重量 γ(kN/m <sup>3</sup> )	速度層区分 (m)	初期せん断 剛性G <sub>0</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	動ポアソン比 <sup>v</sup> a
10.7	T.P.0~T.P6	730	0.44
79.7 泥岩:19.4 砂岩:20.8	T.P6~T.P14	930	0.43
	T.P14~T.P32	1100	0.42
泥岩80% 砂岩20%	T.P32~T.P60	1260	0.41
	T.P60~T.P92	1380	0.40

表-5 解析ケース一覧

ケース	Case1-1 (基本)	Case1-2	Case2
解析手法 (非線形モデル)	手法 1 (均質化)	手法 1 (均質化)	手法 2 (修正GHE)
互層傾斜角	0 °	20°	_ (非考慮)

形挙動の位相や最大変形時刻はほぼ同等の結果を示して いる一方で、変形の程度に明確な差異が見られる.これ は、剛性の設定方法の違いによる剛性差に起因すると考 えられる.また、Casel-1 と Casel-2 (均質化法、互層傾 斜角 20°)の比較では、こちらも変形挙動の位相や変 形最大時刻に違いは見られないが、変形の程度にわずか な差異が見られる.これは、互層傾斜角の違いによる異 方性が解析結果に反映されていることの証左と言える.

主応力コンター図において, Casel-1 と Case2 を比較す ると,右向き変形時,左向き変形時ともに全体的な応力 の分布傾向は概ね一致している一方で,トンネル周辺部 の応力分布については, Casel-1 に局所的な応力集中が ある等,若干の差異が見られる.これは相対変位時刻歴 と同様に,剛性の設定方法の違いによる剛性差に起因す ると考えられる.また, Casel-1 と Casel-2 の比較では,



図-10 加速度時刻歴およびフーリエスペクトル



右向き変形時,左向き変形時ともに全体的な応力の分布 傾向は概ね一致している一方で、トンネル周辺部の応力 分布については、若干の差異が見られる.具体的には Casel-1の右向き変形最大時と左向き変形最大時では、 トンネルの中心を通る縦軸に対して概ね対称的な応力分 布となっている一方で、Casel-2では右向き変形最大時 の方が圧縮応力が大きく出ている.これは、相対変位時 刻歴と同様に、互層傾斜角の違いによる異方性の影響と 考えられる.

# 7. 局所化解析(ミクロ解析)

# (1) 局所化解析 (ミクロ解析)の概要

局所化解析では、6章のマクロ解析のうち均質化法に よる解析ケースである Casel-1 と Casel-2 で得られた、特 定要素のマクロひずみの時刻歴を図-3 のユニットセル に入力することにより、ミクロひずみおよびミクロ応力 の時刻歴を計算した.要素は、右向き変形最大時と左向 き変形最大時に応力が大きく発生するトンネル左下 (631番)と右下(632番)の2要素を選定した.選定



図-12 主応カコンター図(右向き変形最大時)



図-13 主応カコンター図(左向き変形最大時)

した要素の位置を図-14に示す.

# (2) 解析結果

最初に,局所化解析が正しく解析できているか検証す るためにマクロ解析で得られたマクロ応力および局所化 解析で得られたマクロ応力を比較したところ,両者が 概ね一致することを確認した.一例として要素番号 631 番における x 方向のマクロ応力( $\Sigma_{xx}$ ),y 方向のマク ロ応力( $\Sigma_{yy}$ ),xy せん断方向のマクロ応力( $\Sigma_{xy}$ )を 比較した結果を図-15 に示す.

次に、局所化解析の結果のうち、要素番号 631 番および 632 番の泥岩、砂岩それぞれの主応力および最大せん



\_\_\_\_:局所化解析実施要素

図-14 選定要素(631番, 632番)



図-15 マクロ 631 番号要素のマクロ応力比較

断応力の時刻歴の比較を図-16 に、右向き変形最大時お よび左向き変形最大時における主応力と最大せん断応力 のコンターおよび変形図(変形倍率 100 倍)のうち、要 素番号 631 番に係るものを図-17 に、要素番号 632 番に 係るものを図-18 にそれぞれ示す。

一例として、要素番号 631 番の右向き変形最大時にお ける最小主応力コンター図と要素番号 632 番の左向き変 形最大時における最小主応力コンター図を比較する.要 素番号 631 番と要素番号 632 番はトンネルの中心を通る 縦軸に対して対称に位置するため、要素番号 631 番の右 向き変形時と要素番号 632 番の左向き変形時は、マクロ では変形の程度は同等となる.そのため互層傾斜角 0° では、泥岩と砂岩の最小主応力の差は両者で同程度であ るが、一方で、互層傾斜角 20°では泥岩と砂岩の最小 主応力の差は両者で大きく異なる.これは、互層傾斜角 による異方性が解析結果として表現できていることを表 している.以上から、泥岩と砂岩の物性の違いや互層傾 斜角の違いによる発生ひずみや発生応力の違いがよく表 現できており、本結果により、砂岩と泥岩の応力状態を 詳細に確認することが可能であることが分かる.

# 8. まとめ

本研究では、互層岩盤の堆積構造に起因する直交異方 性の力学特性を考慮可能なミクロ・マクロ材料構成則を 定式化し、均質化法に基づく分離型マルチスケール解析 のスキームを活用した地震応答解析手法を開発した.



図-16 ミクロ応力時刻歴比較



図-17 要素番号 631 番 ミクロ応カコンター比較



図-18 要素番号 632番 ミクロ応力コンター比較

また,開発した手法を用いて仮想的な岩盤トンネルの 事例解析を実施し,本手法の適用性を検証した. その結果,一般的な逐次非線形解析とマクロ応答は同等 である一方,ミクロ応答では堆積構造に起因する泥岩・ 砂岩の応力状態の差異を詳細に確認できることを示した.

本研究では岩石の圧縮強さまでをモデル化しており, 圧縮強さ後のひずみ軟化まで評価するには,岩盤の損傷 状態を考慮した動的手法の開発が必要であり,今後の課 題である.

#### 参考文献

- 小早川博亮,伊藤洋:均質化法による岩盤の力学特 性評価におけるユニットセルのモデル化方法-互層 岩盤及び礫質岩盤の場合-,電力中央研究所報告, U03050, 2004.
- 京谷孝史:岩盤の力学挙動に対する数値解析モデル について、日本原子力学会誌 ATOMOΣ, 58巻,8号, 2016.
- (仲村治朗,河村精一,村中健二:大型構造物基礎岩 盤としての互層堆積軟岩の変形・強度特性に関する 考察,土木学会論文集 C, Vol.62, No.2, pp.414-428, 2006.

- 地盤工学会:堆積軟岩の工学的性質とその応用, pp.253-325, 1987.
- 5) 土木学会:原子力発電所の立地多様化技術-人工島 式海上立地技術の高度化-, pp.70-104, 1999.
- 6) 日本電気協会:原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG, 4601, 2015
- 7) 原子力土木委員会:原子力発電所屋外重要土木構造 物の耐震性能照査マニュアル,2018
- 8) 吉田望:地盤の地震応答解析,鹿島出版,2010.
- 9) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門, 丸善, 2003.
- 10) 寺田賢二郎, 菊池昇: 非均質弾塑性体のマルチスケ ール解析のための一般化アルゴリズム, 土木学会論 文集, No.633/I-49, pp.217-229, 1999.
- Terada, K. and Kikuchi, N. : A class of general algorithms for multi-scale analyses of heterogenous media, *Comput. Methods. Appl. Merch. Engrg.*, Vol.190, pp.5427-5464, 2001.
- 12) 石川明,寺田賢二郎,京谷孝史,社本康広:非線形 弾性構成則を用いた複合地盤のマルチスケール解析, 土木学会論文集C, Vol.66, No.1, pp.145-155, 2010.
- 13) 小早川博亮, 京谷孝史: 亀裂に対する連続体弱層モ

デルを用いた均質化法による岩盤の強度特性評価, 土木学会論文集C, Vol.63, No.2, pp.428-440, 2007.

- 14)加藤準治,寺田賢二郎,京谷孝史:マルチスケール 解析による非均質岩盤の力学特性評価,第43回岩盤 力学に関するシンポジウム講演集,pp.244-247, 2015.
- 15) 上田恭平,室野剛隆:均質化法を用いた不均質地盤の地震応答解析に関する基礎的検討,土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp. I\_557-I\_567, 2015.
- 16) 石川明, 浅香美治, 社本康広: 均質化法を用いた部 分改良地盤の等価 S 波速度の簡易評価法, 日本建築 学会構造系論文集, 第 613 号, pp.67-72, 2007.
- 17) 室野剛隆:強震時の非線形動的相互作用を考慮した 杭基礎の耐震設計法に関する研究,鉄道総研報告, 特別第32号, pp.81-86, 1999.

# DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF SEISMIC RESPONSE ANALYSIS METHOD OF LAYERED ROCKS BY USING HOMOGENEIZATION METHOD

# Koto ITO, Masaaki WANI, Seiji SAITO, Shun Suzuki and Kenjiro TERADA

On this study, the micro and macro scale elasto-plastic constitutive law that can consider orthotropic mechanical behavior due to sedimentary structure of layered rocks is formulated, and the seismic response analysis method with the scheme of separated multi-scale analysis based on homogeneization method is developed. In formulating, the material parameters of macro constitutive law is identified by the result of the numerical material test with micro constitutive law. Then the method is verifying validity and applicability by performing seismic response analysis of the virtual rock tunnel and camparing with the result of seismic response analysis by general sequential nonlinear analysis