

不連続性岩盤の異方粘弾性特性の評価

鈴木 健一郎 平間 邦興

Anisotropic Viscoelastic Properties of Discontinuous Rock Masses

Kenichirou Suzuki Kunioki Hirama

Abstract

Anisotropy in rock masses leads to local concentration of loads or uneven settlement. This behavior is time-dependent so the anisotropic viscoelasticity is required to evaluate it. The more important a structures is, the more detailed and accurate should prior geological surveys be, thus producing more information on discontinuous planes. The prediction accuracy of the creep behavior of rock masses will depend on how such information is utilized. This paper derives an equivalent anisotropic viscoelastic constitutive law for a discontinuous rock mass in terms of hereditary integrals, which take into account both joint geometry and time-dependent deformability of a single discontinuity. Some behaviors of discontinuous rock masses are derived analytically and the applicability of the proposed constitutive law is demonstrated by comparing the analytical values with experimental results from rock block tests.

概 要

大深度プロジェクトや海峡横断道橋梁基礎といった大規模・重要構造物の安定性評価には、長期的なあと荷や不同沈下の予測のために岩盤の粘弾性特性の評価が要求される。重要構造物になるほど事前の地質調査は高精度となり、不連続面に関する情報は増加するので、その情報を利用して岩盤の異方性を考慮した粘弾性構成則を展開することを考えた。この報告は、不連続面の幾何学的な分布と時間依存変形特性を岩盤全体の構成式に直接取り込み、等価な異方弾性構成式として定式化できることを示したものである。大型岩石ブロック試験結果とこの構成式を導入した SIGNAS の解析結果との比較により適用性が示された。

1. はじめに

岩盤の粘弾性特性把握の重要性が多くの岩盤構造物において指摘されている。例えば、米国トンネル委員会と米国岩盤力学委員会がまとめた大深度プロジェクトにおける技術¹⁾では、岩盤の物理的特性と挙動に関して、設計および施工においてクリープ特性の影響を評価する必要があるとしている。同時に、不連続面を含む地質構造特性も重要な影響要因として取り上げられている。既設地下発電所における地質調査項目と実施試験項目では地質調査の重要項目として節理調査があげられ、変形特性の

把握の中ではクリープ試験が必ず実施されている²⁾。これは岩盤の粘性的特性が、掘削により構造物に発生する“あと荷”に影響するためである。岩盤に異方性が存在するとあと荷も構造物に均等に作用せず集中することが予想される。また、今後展開される海峡横断道路プロジェクトにおいても、大規模橋梁基礎の場合、これまでの本州四国連絡橋の例³⁾に見られるように基礎のクリープ変形量の推定が必要となる。この場合は、岩盤の異方性が基礎の不同沈下の原因の一つとなる。このように岩盤の粘性的特性把握の重要性が指摘されるものの、不連続面の存在により、変形特性が異方性を持つような岩盤に

おける粘性について、不連続面の影響を考慮する方法は確立されていないのが現状である。

岩盤のクリープ特性の把握について実験的には、主に原位置の平板載荷試験が実施されてきた。クリープ挙動に関する構成則の研究は、二つの立場から行われている。一つは、単純体の仮定より、時間 t での応力やひずみの状態が履歴積分によって過去のそれぞれひずみや応力の全履歴によって決定されるとして導かれる線形粘弾性体として理想化する立場である⁴⁾。また、塑性論と同様な観点から、流れ則や硬化則を導入するという観点、微分形の構成則が体系化されている非線形粘弾性体として扱う立場がある⁵⁾。しかし、これらの研究はほとんど岩盤を等方性で考えている。不連続性岩盤に注目した場合、不連続面のクリープ特性に直接注目している研究⁶⁾は非常に少ない。これらの研究も非線形ではあるが、異方性体までの理想化まではされていない。これは、多くの粘弾性定数を決定してまで岩盤を3次元の異方粘弾性体として有限要素解析まで持ち込む意味が薄いということがその大きな理由であると考えられる。しかし、我国の複雑な地質構造から、不連続面の発達した岩盤においては強度や変形特性が異方的である例は多い。また、規模が大きく、重要な構造物においては、事前にかんがりの地質調査が実施され不連続面に関する情報量も多い。弾性解析においてはこれらの地質情報を有効に利用しようとする考えより、クラックテンソルなどにより不連続面の幾何学的特性を評価し、それを基に等価な異方弾性体として岩盤を理想化する試みが成されている。このように瞬間変形を異方弾性体で考慮するのであれば、その後のクリープ変形も異方性として扱うことが適当であると考えられる。

本研究では、異方粘弾性体で岩盤を理想化する場合に、クラックテンソルを用いて不連続面の分布に関する地質情報を取り込み、粘弾性定数も不連続面のせん断方向成分と垂直方向成分2者の定数により直交異方性体として岩盤の構成式を展開できることを示し、3次元の有限要素法による数値解析を実施し、人工不連続性岩盤の二軸クリープ試験結果と比較し、適用性を検証したものである。

2. 粘弾性構成則

粘弾性体の応力とひずみの関係は、単純体 (Simple Body) の仮定から、ある与えられた粒子 P の、与えられた時間 t でのひずみが、その物体に作用した応力の過去の全体の履歴によって決まり、 P のひずみがその微小近傍の応力だけに依存し、応力の全履歴だけで決定されるものとする、その構成式は次のような一般的な形に書ける⁷⁾。

$$\epsilon_{ij}(t) = \int_{-\infty}^t J_{ijkl}(t-\tau) \frac{d\sigma_{kl}}{d\tau} d\tau \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 J_{ijkl} はクリープ関数と呼ばれるテンソル値の特性関数で、

$$J_{ijkl}(t) = J_{jikl}(t) = J_{ijlk}(t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

関係を満足し、応力の決定論の原理によって

$$J_{ijkl}(t) = 0 \quad -\infty < t < 0, \quad \dots\dots\dots(3)$$

である。

式(1)に Laplace 変換を行うと

$$\bar{\epsilon}_{ij}(s) = s \bar{J}_{ijkl}(s) \bar{\sigma}_{kl}(s) \quad \dots\dots\dots(4)$$

となり、変換面上での構成則が得られる。これら弾性コンプライアンス C_{ijkl} は対応の原理による置き換え

$$C_{ijkl} \longleftrightarrow s \bar{J}_{ijkl}(s) \quad \dots\dots\dots(5)$$

により弾性体の構成則である Hooke の法則と全く同じ形で書ける。今、不連続性岩盤の構成式が(6)式のように与えられている⁸⁾。

$$\epsilon_{ij} = C_{ijkl} \sigma_{kl} = \left\{ M_{ijkl} + \left(\frac{1}{K} - \frac{1}{G} \right) F_{ijkl} + \frac{1}{4G} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{jl} F_{ik} + \delta_{il} F_{jk}) \right\} \sigma_{kl} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで K および G は、不連続面の寸法 r および岩盤全体に作用する平均応力と不連続面の平均的な方向に依存する不連続面の垂直方向とせん断方向のばね定数で、それぞれ(7)式および(8)式で与えられる。

$$k_n = \frac{k(\bar{\sigma}_{ij}, \bar{N}_{ij})}{r} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$k_s = \frac{G(\bar{\sigma}_{ij}, \bar{N}_{ij})}{r} \quad \dots\dots\dots(8)$$

k_n および k_s はそれぞれ不連続面の垂直剛性とせん断剛性である(この構成則は SIGNAS に導入済である)。ここでは、時間 $t=0$ における応力状態において決まる K および G はその後は時間の関数であるとして、さらにその逆数として

$$P(t) = 1/G \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$Q(t) = 1/K \quad \dots\dots\dots(10)$$

を定義する。(9)および(10)式を(6)式に代入し、Laplace 変換面で書かれた粘弾性体の準静的問題に対する構成関係(4)式のそれぞれの時間関数に対して(5)式の置き換え実施することで不連続性岩盤に関する Laplace 変換面での線形粘弾性体の構成式として(11)式を得る。

$$\bar{\epsilon}_{ij}(s) = \left\{ s \bar{M}_{ijkl}(s) + (s \bar{Q}(s) - s \bar{P}(s)) F_{ijkl} + \frac{s \bar{P}(s)}{4} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{jl} F_{ik} + \delta_{il} F_{jk}) \right\} \bar{\sigma}_{kl}(s) \quad \dots\dots\dots(11)$$

2階、4階のクラックテンソルは、時間に依存しない不変な材料定数であるから(11)式を Laplace 逆変換して最終的に積分型線形粘弾性構成式として(12)式を得る。

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij}(t) &= \int_{-\infty}^t D_{ijkl}(t-\tau) + (Q(t-\tau) - P(t-\tau)) F_{ijkl} \\ &\quad + \frac{P(t-\tau)}{4} (\delta_{ik} F_{jl} + \delta_{jk} F_{il} + \delta_{jl} F_{ik} \\ &\quad + \delta_{il} F_{jk}) \frac{d\sigma_{kl}}{d\tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^t H_{ijkl}(t-\tau) \frac{d\sigma_{kl}}{d\tau} d\tau \quad \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

ここに、特性関数である弾性コンプライアンスが持っている対称性をそのまま維持する。この特性関数は対称性から直交異方性材料である。直交異方性材料の場合独立な特性関数は9個存在するために特性関数決定のためには多くの試験が必要となる。しかしこの場合、異方性は不連続面の幾何学性で表現され、特性関数としては岩石のクリープ関数および単一の不連続面の垂直およびせん断方向のクリープ関数の3つにより岩盤のテンソル値クリープ関数が表現できるものである。

一方、岩盤中の不連続面のクリープ変形挙動を表現するために不連続面の垂直方向およびせん断方向のクリープ関数を Voigt 模型を用いて表現することを考える。一般的な模型を用いることは可能であるが、ここでは比較的シンプルな力学モデルとして用いられる Boltzman Model (図-1) について考えることにする。垂直方向およびせん断方向のクリープ関数はそれぞれ(13)式および(14)式のように表せる。

$$P(t) = P_0 + P_1(1 - e^{-t/\tau_1}) \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$Q(t) = Q_0 + Q_1(1 - e^{-t/\tau_2}) \quad \dots\dots\dots(14)$$

これらを(12)式に代入し、岩石部分の粘弾性特性は不連続面のそれに比べて十分無視できるとすると岩盤のクリープ関数が求められる。この時岩盤は5要素 Voigt 模型により表現される。

(12)式の数値解を求めるためには差分式に書き換え、各時刻に対して解が収束するまでの繰り返し計算が必要となる。ここでは応力変化にも対応して応力およびひずみが求められるように履歴積分を含む差分式に対して、各時間区分内において応力の時間変化を線形と仮定して、

$$\sigma_{ij}(\tau) = \sigma_{ij}(t) + \frac{\Delta\sigma_{ij}(t)}{\Delta t}(\tau - t) \quad \dots\dots\dots(15)$$

差分式の改善を図って有限要素法による解析コード SIGNAS にのせた。岩石自身の粘性についての制約は、力学模型の数を増やせば考慮することが可能であることはいうまでもない。

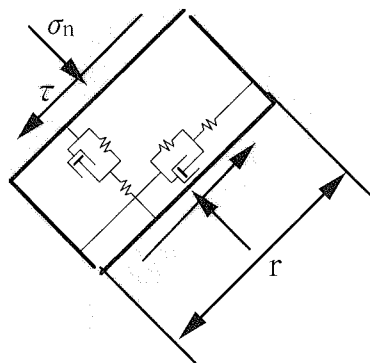


図-1 力学模型 (Boltzman Model)

3. 数値実験および物理実験

3.1 数値実験による粘弾性特性

コードの検証および不連続性岩盤の粘弾性特性を解析的に知るために図-2の様な岩盤モデルのクリープ試験と応力緩和試験を数値実験により行った。不連続面のせん断方向および垂直方向のクリープ関数(単位は1/MPa)は

$$P = 0.0002 + 0.00002\{1 - \exp(-t/200)\}$$

$$Q = 0.0001 + 0.00001\{1 - \exp(-t/100)\}$$

とした。不連続面の2階および4階クラックテンソルは次のようである。

$$F_{ij} = \begin{pmatrix} 0.75 & 0.433 & 0 \\ & 0.25 & 0 \\ \text{symm.} & & 0 \end{pmatrix}$$

$$F_{ijkl} = \begin{pmatrix} 0.56 & 0.1875 & 0 & 0 & 0 & 0.325 \\ & 0.0625 & 0 & 0 & 0 & 0.108 \\ & & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 \\ \text{symm.} & & & & & 0.1875 \end{pmatrix}$$

岩石部分の弾性係数は10GPa ポアソン比は0.2とした。厳密解と解析の比較をそれぞれ図-3と図-4に示す。図-3はX方向とY方向にそれぞれ10MPaの一軸クリープ試験、図-4は同様に瞬間的にそれぞれの方向の応力が10MPaとなるように変位を与えた一軸応力緩和試験である。これらは時間差分の近似度が十分であることおよび異方性が表現されることを示している。次に、三軸応力状態での異方性岩盤の変形挙動を調べるために、同じモデルに対して $\sigma_{ij} = (50, 100, 0, 0, 0, 0)$ の応力を一定に保つクリープ解析を実施した。図-5と図-6は、X方向およびY方向の変形挙動であり、それぞれ不連続面のせん断方向の遅延時間をパラメータとして示した。(垂直方向の遅延時間は100一定である。)特徴的なのは、最大主応力方向の変形は時間に関して単調に収縮方向に増加している。しかし、中間主応力方向のクリープ挙動は、 σ_y の影響で一旦収縮するが、時間遅れを伴い σ_x の影響が現われ、膨張側に推移する。ただし、最

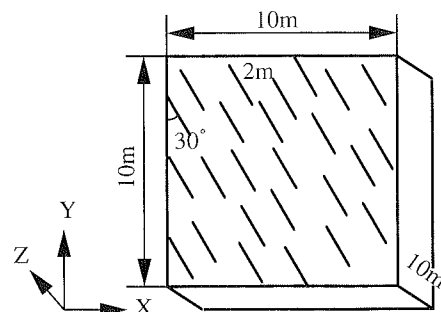


図-2 解析に用いたモデル岩盤

最終的な収束値は一致する。このように異方粘弾性挙動が表現できることが示された。

3.2 岩石ブロッククリープ試験

岩石ブロック試験装置により不連続性岩盤の粘弾性的性質の把握とコードの検証のために、二軸応力状態で一定の応力状態を保ったクリープ試験を実施した。試験体は図-7に示すような一辺30cmの白河凝灰岩をV字型楔を用いた割裂試験により人工的に不連続面を挿入したものである。不連続面のない白河凝灰岩の弾性定数は、ヤング率で12GPa、ポアソン比で0.16である。人工不連続面の幾何学的特性から、2階および4階のクラックテンソルはそれぞれ

$$F_{ij} = \begin{pmatrix} 1.14 & -0.31 & 0.07 \\ & 1.22 & 0.09 \\ \text{symm.} & & 0.78 \end{pmatrix}$$

$$F_{ijkl} = \begin{pmatrix} 0.91 & 0.16 & 0.07 & 0.04 & -0.04 & 0.30 \\ & 1.05 & 0.01 & 0.01 & 0.01 & -0.06 \\ & & 0.70 & 0.04 & 0.10 & 0.02 \\ & & & 0.01 & 0.02 & 0.01 \\ \text{symm.} & & & & 0.07 & 0.04 \\ & & & & & 0.16 \end{pmatrix}$$

である。载荷条件は等方二軸载荷1.3MPaの後、X方向とY方向にそれぞれに軸差5.1MPaの一定応力を保つ、2つの条件でのクリープ試験を実施した。

まず、ブロック中の不連続面の挙動に注目する。図-8がき裂変位計で計測された不連続面の垂直方向とせん断方向のクリープ挙動の例である。○が不連続面のせん断方向、●がせん断方向の結果である。二軸载荷方向に岩石部分のクリープ挙動を調べるためにつけたひずみゲージの結果からき裂変位測定距離(50mm)での変位も併記した。応力の乱れがあるので直接比較はできないが、岩石部分のクリープ変形は試験時間範囲では極わずかで、不連続面のクリープ変形がブロック全体のそれを支配する傾向がうかがえる。次にこれより不連続面の垂直およびせん断方向のクリープ特性を時間の関数として近似する事を考える。材料のレオロジーを研究する分野では、変形を遅延させる要因を、その種類(遅延時間)および数として分類し、物理的意味を持ったモデル定数を決定するという概念がある。そこで数値微分により遅延スペクトルを求めた。図-9に遅延スペクトルの一例を示す。図より垂直方向およびせん断方向ともほぼ同じように短時間で、一つの山が存在する。2番目の山は垂直方向と

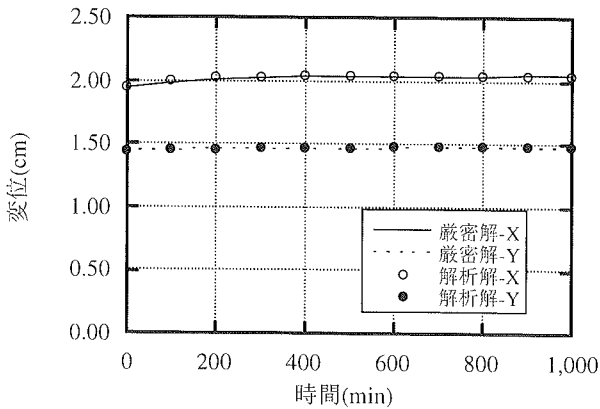


図-3 クリープ挙動の厳密解と解析解

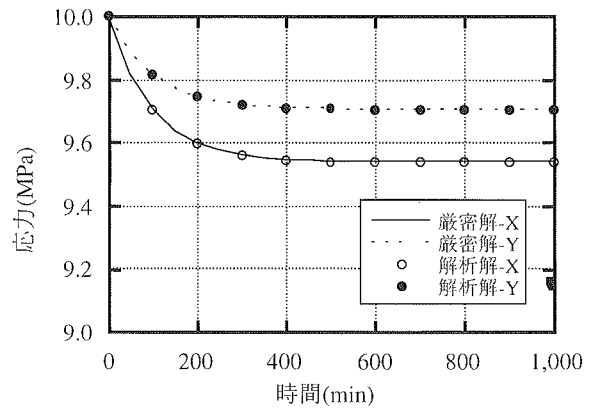


図-4 応力緩和挙動の厳密解と解析解

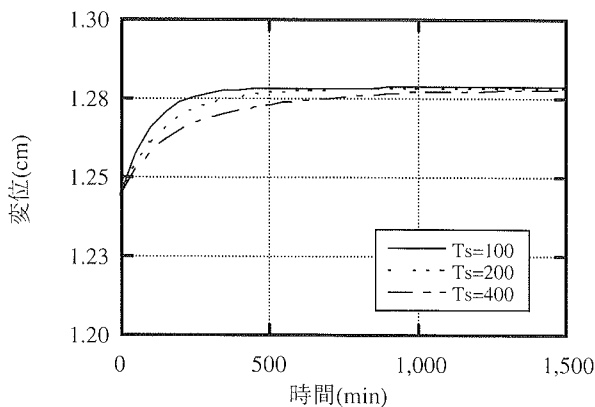


図-5 二軸载荷の場合の最大主応力方向のクリープ挙動

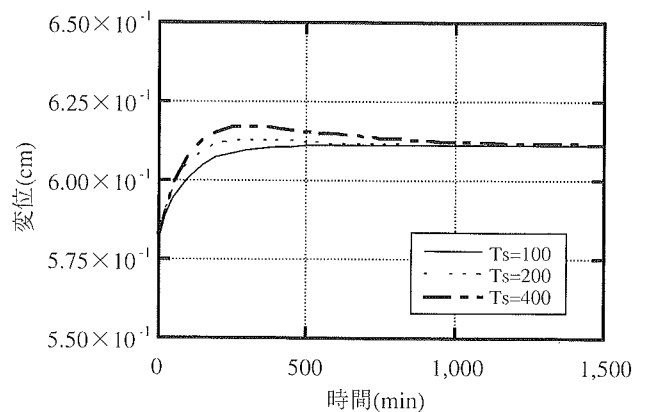


図-6 二軸载荷の場合の中間主応力方向のクリープ挙動

せん断方向で明らかに異なり、せん断方向の遅延時間の方が遅れる。ここでは3要素モデルで各方向のクリープ関数を決定することから、両者の特徴は2番目の山であるとし、それに対して残り2つの定数を計測結果との最小2乗法により決定した。ただし、不連続面に作用する応力はブロック全体に作用する応力が他の不連続面の存在による乱れが無いものとして計算した。解析の入力値を与える場合には、不連続面の寸法に関する影響を除く為に、単位長さ当たりの定数で考える。図-10と図-11にブロック全体の挙動を示す。図-10はX方向のクリー

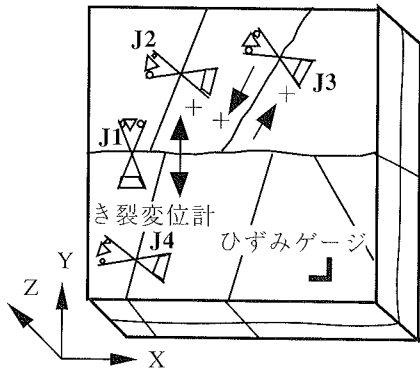


図-7 岩石ブロック供試体

プ応力が6.4MPa、Y方向のクリープ応力が1.3MPaの場合のブロック全体のクリープ挙動、図-11は逆の場合の結果で、横軸に経過時間、縦軸に変位を取っている。これらの結果から、ブロックの時間依存変形挙動をシミュレートした。注意しておかねばならないのは、これらの定数はあくまで不連続面自身の計測結果より得られた値であること、これをクラックテンソルを用いた提案した粘弾性構成式(3)に代入してえられるのは、不連続面を含む岩盤ブロックの粘弾性挙動である。

このように簡単な近似計算であるが、今回提案した構成則により、時間依存変形挙動をうまく表現できており、不連続面分布は等方に近いものであるが、垂直とせん断のクリープ関数の違いによる異方効果が近似できることを示唆している。解析的には中間主応力方向の収縮、膨張の逆転現象が存在するが、実験精度内でも傾向として捉えられたと考える。

4. おわりに

不連続面群の幾何学的な特性と単一の不連続面の粘弾性特性とを考慮した岩盤の粘弾性構成則は、弾性体の構成則から対応の原理を用いて導出することができた。これより、異方性の影響を考慮した粘弾性解析を実施する

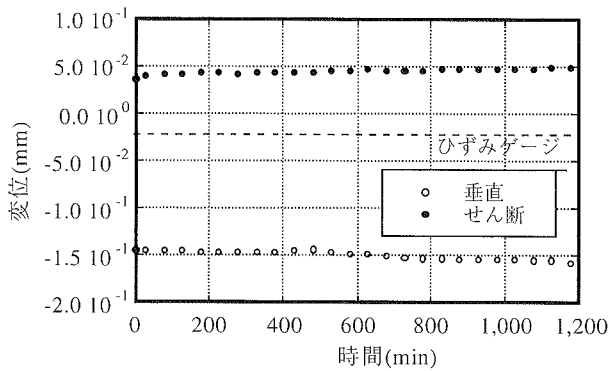


図-8 不連続面の時間依存変形

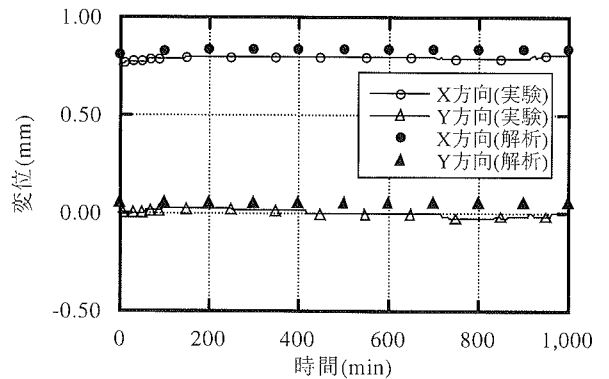


図-10 X方向荷重の実験結果と解析結果

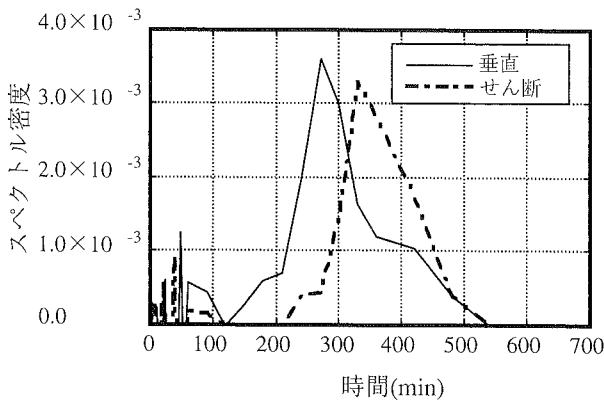


図-9 遅延スペクトル

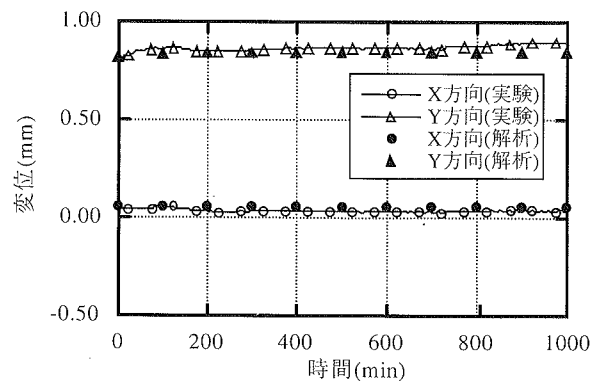


図-11 Y方向荷重の実験結果と解析結果

際の一つの障害であった入力物性評価は、多くのクリープ試験を必要とせず、不連続面を Voigt 模型で近似した場合の垂直方向とせん断方向に関する定数と不連続面の調査から決定されるクラックテンソルの値から評価可能となる。ただし、不連続面の垂直方向およびせん断方向のクリープ関数は応力に依存するため、実際に適用するためには応力条件を考慮した試験とモデル化が必要である。

参考文献

- 1) U. S. National Committee on Tunneling Technology and U. S. National Committee for Rock Mechanics: Advances in technology for the construction of deep-underground facilities, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 3, No. 1, p. 25~44, (1988)
- 2) (社)電力土木技術協会：電力施設地下構造物の設計と施工 第3章地下発電所
- 3) 山縣 守：風化花崗岩上のつり橋基礎，土と基礎，Vol. 28, No. 7, p. 61~66, (1980)
- 4) 赤木知之：岩石のクリープ特性と一般化レオロジーモデルの適用，材料，Vol. 30, No. 336, p. 48~54, (1981)
- 5) Dragonn, A., Mroz, Z.: A model for plastic creep of rock-like materials accounting for the kinetics of fracture, Int. J. Rock MEch. Min. Sci. & Geomech. , Vol. 18, p. 437~443, (1979)
- 6) Amadei, B. and Curran, J. H.: Creep behavior of rock joints, Proc. 13th Can. Symp. Rock Mech., Tronto, p. 146~150, (1980)
- 7) 日本材料学会編：固体力学の基礎
- 8) Oda., M. et.al.: Elastic Stress and Strain in Jointed Rock Masses by Means of Crack Tensor Analysis, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 26, No. 2, p. 89~112, (1993)
- 9) 山田嘉昭：有限要素法の基礎と応用シリーズ 6，塑性・粘弾性，培風館，p. 124~135, (1980)