

有限要素法による岩盤用粘弾塑性解析

藤原紀夫 山下幸夫

Elastoplastic-Viscous Analysis for Rock Behaviors by Finite Element Method

Toshio Fujiwara Yukio Yamashita

Abstract

This paper describes a method of elastoplastic-viscous analysis for the purpose of more accurately expressing the behaviors of the surroundings during excavation of rock. The theoretical model of rock was expressed by a Maxwell model with five elements, but spring elements in the model were represented as being non-linear. Consequently, it was made possible to simultaneously consider elastoplastic behaviors accompanying reallocation of stresses and viscous behaviors dependent on time.

Furthermore, the authors made verifications of the theoretical model by high-pressure triaxial creep tests and simulations of an NATM-tunnel constructed in swelling rock, thereby examining the propriety of the analysis method.

概要

この報告は、岩盤掘削時の地山挙動をより適格に表現することを目的とした、粘弾塑性解析方法について述べるものである。岩盤の力学モデルは5要素 Maxwell モデルとし、この中のバネ要素を非線形バネで表わした。この結果、応力再配分に伴う弾塑性挙動と、時間依存による粘性挙動とを同時に考慮することが可能となった。

さらに高圧三軸クリープ試験による力学モデルの検証、および膨張性地山に施工された NATM トンネルのシミュレーション解析を実施し、解析方法の妥当性を検討した。

1. まえがき

近年山岳トンネルの施工に NATM が導入され、我国でも多くの地質を対象に適用が試みられている。ところが軟岩地山などでは壁面変形量が予想以上に大きいため、支保工が破壊されたり、危険な縫返しを余儀なくされる場合も多い。安全で確実な施工を目差すためにも、当初設計あるいは施工途中の修正設計においては、最適な支保形状を決定すると同時に、そのときの壁面変形量および支保工に発生する応力などを正確に予測することが大切である。

岩盤掘削問題を対象とした応力変形解析として、現在実用に供されている主なものは、①弾塑性解析（弾性解析を含む）、②粘弾性解析の二つである。これらの適用にあたっては解析の目的、および周辺地山の变形特性などに応じて両者を使い分けている状況にある。

ただし実際の岩盤、特に軟岩では弾塑性挙動または粘

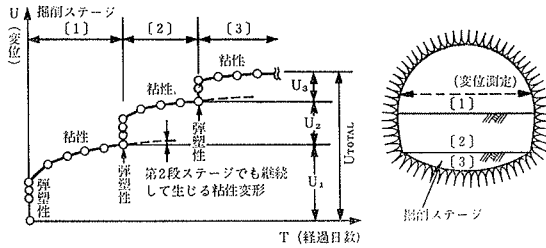
性挙動がそれぞれ単独に見られることは少なく、むしろ両者が合体した挙動を示すものと思われる。そこで岩盤の挙動をより適格に解析できることを目的として、上記①、②を合体した粘弾塑性解析プログラムを開発することになった。

この報告では粘弾塑性解析の考え方と岩盤の力学モデル、および実際に施工された NATM トンネルのシミュレーション解析結果などについて述べる。

2. 粘弾塑性解析の基本的な考え方

図-1 に粘弾塑性解析の概念図を示す。基本的な考え方としては、掘削開始以降の一連した粘性挙動の流れの中に、掘削段階の変更点で弾塑性解析を組込んでいる。言いかえると、弾塑性解析と粘性（クリープ）解析とを交互に実施する解析方法であると言うこともできる。

空洞周辺地山のクリープ変形は、第1段階の掘削から最終掘削段階に至るまで連続的に進行するもので



図一 粘弾塑性解析の概念図

あり、その間、掘削段階の変更により状況の変化はあっても途中で跡絶えることはない。例えば第1段階の掘削によって発生する変形は時間の経過に伴って収束する方向に向かうが、この途中で次のステージ掘削がなされた場合は、これ以降の変形は次の掘削段階でもそのまま継続されることになる。

一方、空洞周辺では掘削に伴って応力が再配分される現象が生じる。応力集中を受ける位置では岩盤が塑性化し物性値が低下することになるが、これらの現象は弾塑性解析により求めることができる。すなわち連続した時間経過の中でステージ掘削が瞬間的に行なわれると仮定し、応力再配分も極めて短い時間内に終了するものと考え、粘性挙動の流れの中に弾塑性解析を組込むことが可能となる。

3. 岩盤の力学モデル

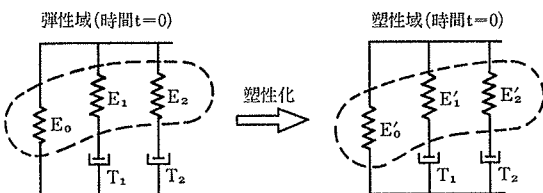
岩盤の力学モデルは5要素 Maxwell モデルとする。ただしモデル内のバネ要素は、岩盤の塑性化による変形係数の低下に伴い、その剛性が変化し得るものとする。すなわちレオロジーモデルのひとつである Maxwell モデルに非線形バネを導入することにより、粘性挙動と弾塑性挙動とを同時に表現しようとするものである。

5要素Maxwellモデルでは緩和関数は次式で示される。

$$E(t) = E_0 + E_1 \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) + E_2 \exp\left(-\frac{t}{T_2}\right) \dots\dots(1)$$

ここに、 E_0, E_1, E_2 はバネ定数であり、 T_1, T_2 は時間の次元をもつもので緩和時間と呼ばれる。

いま第1段階ステージの掘削を例にとり、図一2によって力学モデルをもう少し詳しく説明する。掘削が瞬間的に行なわれると考えると、時間 $t=0$ の状態で(1)式に示す緩和関数は次のようになる。



図二 岩盤の力学モデル

$$E(0) = E_0 + E_1 + E_2 \dots\dots\dots(2)$$

(2)式の $E(0)$ は岩盤の初期変形係数 E_{R0} 、すなわち弾性係数に相当するものである。したがってこの $E(0)$ を用いて弾塑性解析を行なうことができる。弾塑性挙動に伴う空洞周辺地山の変形もまた、瞬間的に終了するものと考え、弾塑性の計算過程はレオロジーを表わすダッシュポット要素の存在とはまったく無関係になる。

以上の方法により弾塑性解析を行なった結果、一部の岩盤は塑性化し、初期変形係数も E_{R0} から降伏後の変形係数 E_{R0}' に変化する。この結果 $E(0)$ を構成しているバネ定数 E_0, E_1, E_2 も変化することになる。新しいバネ定数を E_0', E_1', E_2' とすると、塑性域での緩和関数は(2)式と同様、時間 $t=0$ の状態で次のように表示される。

$$E(0)' = E_0' + E_1' + E_2' \dots\dots\dots(3)$$

したがって降伏後の岩盤に対して、(3)式に示すバネ定数 E_0', E_1', E_2' がそれぞれ独立に求めることができれば、(1)式と同様の緩和関数が決定され、引き続き粘性解析を実施することが可能となる。勿論、弾性域にある岩盤では改めてバネ定数を求める必要はない。

4. 粘弾性定数の取扱い

前章で述べたように、弾塑性解析に引き続いて粘性解析を行なう場合、塑性域の岩盤に対しては(3)式右辺に示す各バネ定数を決定する必要がある。

ここでは変形係数の分割割合を示す係数 R_0, R_1, R_2 を導入し、降伏前後においてこの係数が一定であると考え、次式により塑性域のバネ定数を求める。

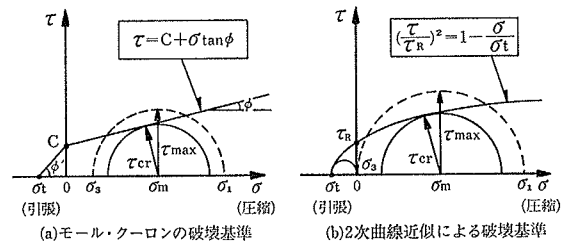
$$\left. \begin{aligned} R_0 &= \frac{E_0}{E_{R0}}, R_1 = \frac{E_1}{E_{R0}}, R_2 = \frac{E_2}{E_{R0}} \\ E_{R0} &= E_0 + E_1 + E_2 = E(0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

$$\left. \begin{aligned} E_0' &= R_0 \times E_{R0}' \\ E_1' &= R_1 \times E_{R0}' \\ E_2' &= R_2 \times E_{R0}' \\ E_{R0}' &= E(0)' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(5)$$

また緩和時間 T_1, T_2 は岩盤の降伏前後において変化せず、常に一定であるものと仮定する。

5. 塑性判定

岩盤の破壊基準は図一3に示す2種類である。いずれ



図三 岩盤の破壊基準

も圧縮応力に対する降伏条件を与えると同時に、引張応力による破壊基準も考慮している。

この内、2次曲線近似による破壊基準は図に示すように破壊包絡線を2次曲線で表わしたもので、通常の岩盤に対して適用するものである。三軸圧縮試験を実施すると、応力が大きい場合には塑性流動に近い状態を呈し、包絡線がねてくる傾向を示す。この破壊基準は岩石試料のこのような特性を採り入れたものである。

一方、モール・クーロンの破壊基準は未固結地山または初期地圧がかなり小さい岩盤などに適用される。

6. 高圧三軸クリープ試験による力学モデルの検証

6.1. 検証試験の目的

岩盤の力学モデルとして、非線形バネをもった5要素Maxwellモデルを考え、粘弾塑性解析を行なう方法を提案してきた。ただし次の諸点を確認しておくことが必要である。

(1) 粘性解析では線形粘性を仮定している。この場合、塑性化した岩盤に対してもなお線形性を仮定してもよいかどうか。

(2) 岩盤の塑性化に伴い変形係数は低下する。ここでは力学モデルのバネ定数も変形係数に比例して低下するものとし、各々のバネ定数が弾性域と塑性域で常に同じ分割割合になることを仮定している。具体的には(4)、(5)式に示す R_0, R_1, R_2 を導入し、その時点の変形係数からバネ定数を求めている。また緩和時間は岩盤の降伏により変化しないことも仮定している。このような定数決定方法が容認できるのかどうか。

そこで力学モデルの妥当性の検討および粘弾性定数の決定方法などを確認する目的で、高圧三軸クリープ試験を実施した。

6.2. 試験方法

図-4に高圧三軸クリープ試験の方法を示す。試験は処女状態の供試体について行なう“弾性域クリープ試験”

配合	材料	セメント(早強)	ベントナイト	砂	水
単位量(kg)		200	15	977	260

表-1 モルタル配合表

供試体 No.	寸法(mm) 直径×長さ	重量(g)	かさ比重	試験内容	載荷応力レベル
1	24.90×49.95	46.13	1.90	弾性域クリープ	0.2Sc
2	24.90×50.00	46.67	1.92	〃	0.4Sc
3	25.00×50.25	46.46	1.88	〃	0.6Sc
4	25.00×50.00	47.07	1.92	塑性域クリープ	0.2Sc
5	25.00×50.00	47.21	1.92	〃	0.4Sc
6	25.00×49.95	46.23	1.89	〃	0.6Sc

表-2 試験用供試体

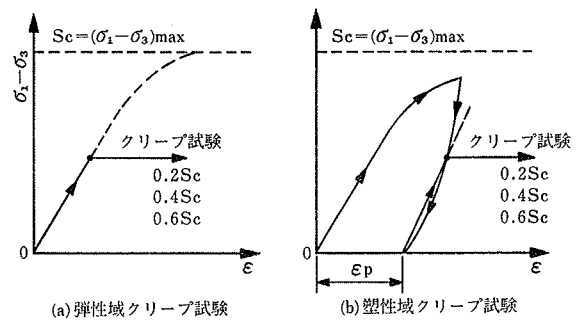


図-4 高圧三軸クリープ試験

試験”と、降伏以上の応力履歴を受けた供試体について行なう“塑性域クリープ試験”である。

図-5は塑性域クリープ試験用の供試体に、あらかじめ与えられた応力履歴を示している。

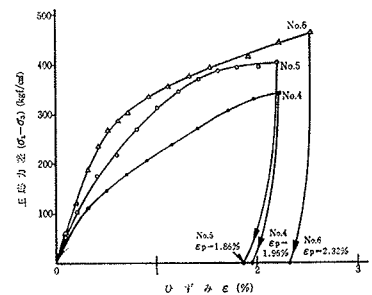


図-5 塑性域クリープ試験のための応力履歴

三軸セルの封圧 σ_3 は、予備試験で得られた一軸圧縮強度 $q_u = 73.8 \text{ kgf/cm}^2$ を参考に、 50 kgf/cm^2 とした。また破壊強度 S_c は高圧三軸圧縮試験により求めたが、明確なピーク強度が得られなかったため、応力～ひずみ曲線の立上がり部分の接線と流動部分の接線との交点を求め、便宜上この点をもって破壊強度と見なした。この場合、 $S_c = 303.3 \text{ kgf/cm}^2$ である。

6.3. 供試体

軟岩程度の強度を有した均質な試料を得るため、ベントナイトを混入したモルタルで供試体を作成した。表-1にモルタルの配合表を、また表-2に供試体寸法と適用した試験内容を示す。材令による強度変化を少なくするため、標準養生はいずれも14日以上とした。

6.4. 試験結果

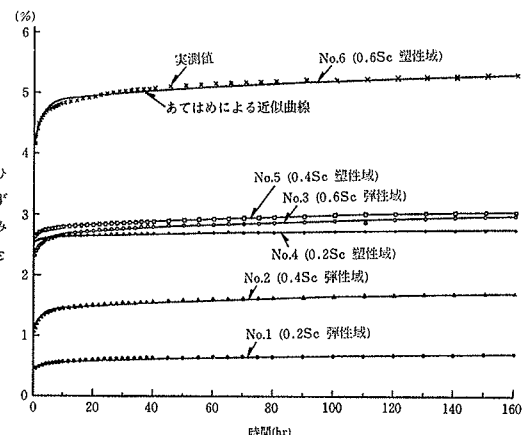


図-6 クリープ曲線

図-6にクリープ曲線を示す。図中のプロットは高压三軸クリープ試験の実測値であり、また実線は後述する粘弾性定数を求めるために“曲線のあてはめ”によって描いた近似曲線である。実際のクリープ曲線に非常によく一致できていることが判る。

なお塑性域クリープについては、図-5に示す残留ひずみをクリープ試験の瞬間応答値(時間 $t=0$ の初期ひずみ)にそれぞれ加えている。

これは3章の力学モデルでも述べたように、弾塑性変形が瞬間的なバネ定数の低下によって生じるとの考えに基づくもので、残留塑性ひずみがクリープ試験の瞬間応答値の一部であることを考慮したものである。

6.5. 試験結果の解釈と評価

6.5.1. 応力～ひずみ関係の線形性 図-7に等時応力～ひずみ曲線

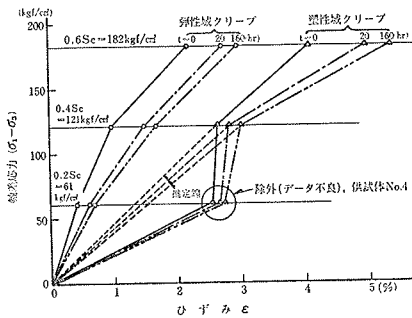


図-7 等時応力～ひずみ曲線

を示す。ここでは代表的な荷重時間として $t=0, 20, 160$ (hr)の各時間を選び、そのときの荷重応力とクリープひずみとの関係を図示している。

ただし供試体 No. 4 については明らかに異常値を示すものと判断されるため、試験結果の解釈からはこのデータを除外して考える。図中には除外したあとの推定線を破線で記入している。

この等時応力～ひずみの関係が直線で表わせる場合、すなわち任意の時間に対して荷重応力とひずみが比例関係にあれば、クリープひずみは応力レベルに対して線形であると言える。したがって線形粘性理論の適用が可能となる。

図-7では弾性域クリープ、塑性域クリープとも同じような傾向を示すが、両者とも応力～ひずみの関係は折れ線となり、完全な直線とはならない。ただし大局的な観点からは近似的に直線と見なすことができる。したがって現状で弾性域クリープの結果に対して線形粘線理論の適用が容認される以上、塑性域クリープの結果もまた、これと同様な取扱いをすることができる。

6.5.2. 粘弾性定数の取扱い 図-6に示すクリープ

試験項目	定数	$E_0+E_1+E_2$	E_0	E_1	E_2	T_1	T_2
		(kgf/cm ²) ①	(kgf/cm ²) ②()内②/①	(kgf/cm ²) ③()内③/①	(kgf/cm ²) ④()内④/①		
弾性域クリープ	0.2Sc No1	20.270	11.900(58.7%)	4.680(23.1%)	3.690(18.2%)	1.54	76.1
	0.4Sc No2	14.960	8.330(55.7%)	4.800(32.1%)	1.830(12.2%)	1.36	81.9
	0.6Sc No3	9.420	6.810(72.3%)	1.600(17.0%)	1.010(10.7%)	1.65	87.1
	平均	[14.883]	[9.013] (60.6%)	[3.693] (24.8%)	[2.177] (14.6%)	[1.52]	[81.7]
塑性域クリープ	0.2Sc No4	—	—	—	—	—	—
	0.4Sc No5	5.562	4.720(84.9%)	306(5.5%)	536(9.6%)	1.89	89.8
	0.6Sc No6	5.096	3.880(76.1%)	791(15.5%)	425(8.4%)	1.69	90.1
	平均	[5.329]	[4.300] (80.7%)	[549] (10.3%)	[480] (9.0%)	[1.79]	[90.0]

表-3 粘弾性定数

粘弾性定数は、このクリープ関数を用いて求めることができる。

表-3はこのようにして求めた粘弾性定数を一覧表としてまとめたものである。この結果から粘弾性定数の取扱いに関して次の事項が明らかになった。

(1) バネ定数について バネ定数の和($E_0 + E_1 + E_2$)の中で、それぞれのバネ定数の占める割合、言いかえると分割割合 R_0, R_1, R_2 は平均で次のようになる。

(a) 弾性域クリープ

$$R_0 : R_1 : R_2 = 60.6 : 24.8 : 14.6 \approx 60 : 25 : 15 (\%)$$

(b) 塑性域クリープ

$$R_0 : R_1 : R_2 = 80.7 : 10.3 : 9.0 \approx 80 : 10 : 10 (\%)$$

両者で分割割合が幾分異なっていることが分かる。力学モデルでは岩盤の降伏前後で分割割合が一定になることを仮定しているため、この点については追加試験などにより再検討する必要がある。

(2) 緩和時間について 弾性域クリープおよび塑性域クリープの緩和時間は、表-3にも示すとおり、両者ともほとんど同じである。従って岩盤の降伏前後で同じ緩和時間を用いて解析することは、実用上何ら差しつかえないものと判断される。

7. 粘弾塑性解析プログラム

図-8に粘弾塑性解析プログラムのフ

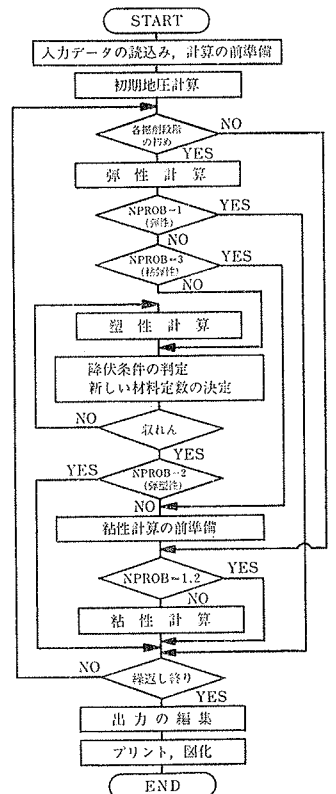


図-8 フローチャート

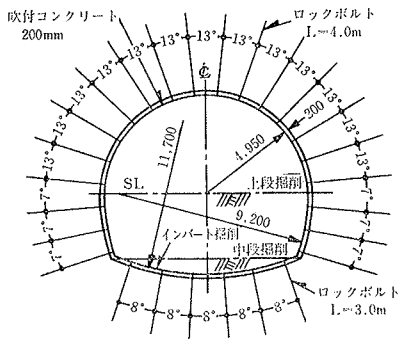


図-9 トンネル断面図

ローチャートを示す。塑性計算は降伏後の岩盤を理想化された完全塑性体と考え、直接反復法により解を求めるものである。また粘性計算は線形粘線理論により、 Δt 時間ごとの逐次解を求める、いわゆる増分法によっている。

この解析プログラムは NATM トンネル、地下空洞などの岩盤掘削問題を対象として、粘弾塑性解析を実施するために開発したものである。ただし解析の目的および岩盤の条件などにより、①弾性解析、②弾塑性解析、③粘弾性解析を、それぞれ単独に行なうこともできる。

8. 実施工への適用～NATMトンネルの解析例

解析方法の妥当性を検討するため、膨張性地山に施工された NATM トンネルを対象に、粘弾塑性解析によるシミュレーション解析を実施した。

図-9 にトンネル掘削断面およびロックボルトの配置を示す。ロックボルトは弾塑性トラス要素によりモデル化した。ただしこの解析では塑性計算を直接反復法によっているため、繰返し計算過程で図-10 に示すような見掛けの変形係数を導入し、その時点でのロックボルトの剛性を評価した。また吹付けコンクリートは空洞壁面を構成するひとつの材料と考え、岩盤と同様の取扱いをした。表-4 は解析のための入力データである。

一方トンネル掘削では、切羽が到達する以前にその前方ですでに変位が生じていることが確かめられている。この現象は切羽近傍の地山の変形特性と呼ばれ、通常図-11 に示すような特性曲線で表わされる。ここでは切羽到達時の先行変位の割合を40%、コンバージェンスボルト取り付け時を50%、ロックボルト打設時を70%として解析に考慮した。

図-12 に解析結果の一例として、内空変位の経時変化図を示す。実測値と計算値とは比較的良好に一致していると言える。ただしインバートの施工により断面が閉合さ

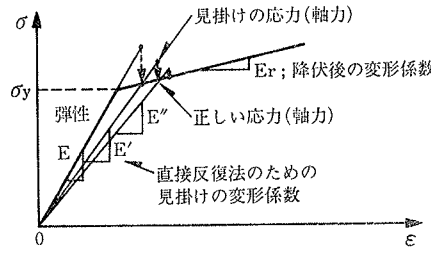


図-10 ロックボルトの力学モデル

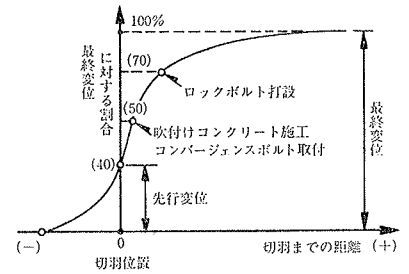


図-11 特性曲線 (模式図)

材 料	岩 盤			吹付けコンクリート		ロックボルト	
	区分	岩石コアによる試験値	解析に用いる定数	割引率	解析に用いる定数		摘 要
変形係数 E (t/m)		109,940	28,000	$(E_0+E_1+E_2)$	材令40日以内 35,000 材令40日以上 50,000	—	
バネ定数 E_0 (%)		41.370	10,500	$\frac{1}{4}$	28,000	40,000	$0.8 \times E$
E_1 (%)		27,300	7,000	—	3,500	5,000	$0.1 \times E$
E_2 (%)		41,270	10,500	—	3,500	5,000	$0.1 \times E$
緩和時間 T_1 (日)		0.1	2	$(\frac{1}{6} \times T_2)$	2	2	岩盤と同じ
T_2 (%)		13	20	1.5	20	20	—
ポアソン比 ν		—	0.35	—	0.20	0.20	—
せん断応力 τ_n (t/m)		180	144	0.8	200	200	—
引張強度 σ_t (%)		120	96	—	100	100	—
単体重量 γ_t (t/m)		1.93	1.93	1.0	—	—	—

表-4 入力データ

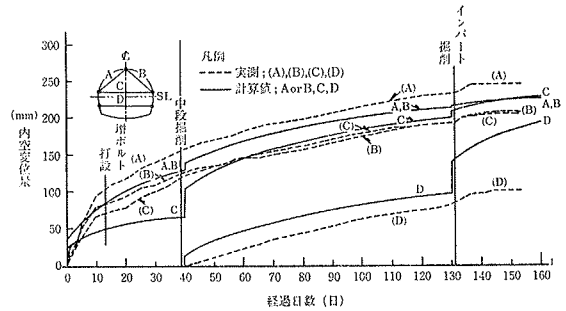


図-12 内空変位の経時変化

れた後、実測値は急速に収束する傾向を示すが、計算値ではまだ変位が継続している。特にインバートに近いD測線では実測値と掛け離れる傾向が強い。これは断面閉合により発揮される、吹付けコンクリートのリング効果が非常に大きいことを意味するものであり、吹付けコンクリートのモデル化について再検討が必要であろう。

9. むすび

本報告では、新しい試みとして Maxwell モデルのバネ要素を非線形バネで表わし、弾塑性挙動と粘性挙動とを同時に考慮できる、いわゆる粘弾塑性解析の方法について述べてきた。高圧三軸クリープ試験による力学モデルの検証および実施工でのシミュレーション解析の結果から、この解析方法が妥当であることが確認できたと判断している。

ただし弾性域と塑性域ではクリープ特性に若干の違いがあることが示唆され、また全く別の角度から吹付けコンクリートのモデル化に対する問題点も提起された。

今後は更に検討を重ね、これらの問題点に対処していきたいと考えている。