

既設開削トンネルのためのポリマー免震工法のモデル化に関する一考察

桐生 郷史¹・室野 剛隆²・盛川 仁³

¹ジェイアール東日本コンサルタンツ 技術本部 (〒171-0021 東京都豊島区西池袋一丁目1-1)

E-mail: kiryu@jrc.jregroup.ne.jp

²鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38)

E-mail: muro@rtri.or.jp

³東京工業大学大学院准教授 総合理工学研究科 (〒226-8502 神奈川県横浜市長津田町4259-G3-7)

E-mail: morika@enveng.titech.ac.jp

著者らは、既設開削トンネル外側の側面に免震層（変位吸収層）を配置して地震外力の低減を図る工法を開発してきており、免震層の材料としては、ポリビニルアルコール系ポリマー材（以下、ポリマー材）という柔軟な材料を用いることで、実用性を高めた工法（以下、ポリマー免震工法）としている。本論文は、ポリマー免震工法を検討する際、ポリマー材の非線形モデルとして既往の土の非線形モデルを適用できる可能性について検討した。非線形モデルの骨格曲線の違いは、地震時の構造物の応答に影響を与えるが、履歴減衰の違いは、ほとんど影響を与えないことが示された。その結果、地震時の構造物の応答は、ポリマー材に既往の土の非線形モデルを用いて十分に推定できることを確認した。

Key Words : cut and cover tunnel, isolation, polymer material, skeleton curve, hysteresis damping

1. はじめに

著者らは、これまでに開削トンネル側面に地盤の約1/100のせん断剛性の免震材を壁状に配置することによって、地震時に開削トンネルに作用する地盤変位を減少させる免震工法を開発してきた。この工法は、免震層の材料（以下、免震材）として実用性の高いポリビニルアルコール系ポリマー材¹⁾を用い、かつ、開削トンネルの側部のみに免震層を配置することで、施工性に配慮した工法（以下、ポリマー免震工法）である²⁾。

免震工法に関しては、地震時に地盤変形が構造物に伝達するのを遮断する免震工法³⁾や、トンネル外周に滑動シートを設けて構造物と地盤間に作用する相互作用力を減少させる方法など^{4),5)}多様な工法が開発されてきている。その材料についても、ウレタン系やアスファルト系など多くの種類が提案されている。また、設計において、免震層のモデルは、材料試験等の結果から適切な非線形特性を設定することとされている^{6),7)}。著者らの開発した免震工法の免震材であるポリマー材は、一般的な地盤と比べてせん断剛性や減衰が非常に小さく、変形特性がよい

という特性を有している。これまでの検討では、このポリマー材のモデルに、一般的な土の非線形モデルである双曲線モデル⁸⁾を用いて評価してきた。しかしながら、双曲線モデルのポリマー材への適用性について十分な検討を行った上で評価に用いてきたわけではない。

そこで、本論文では、ポリマー材の非線形モデルの骨格曲線、履歴減衰に着目し、そのモデル化の違いが地震時の構造物の応答に与える影響について解析的に検討した。なお、本研究の目的は、材料を厳密に評価する非線形モデルを構築することではなく、ポリマー材の非線形モデルとして既往の土の非線形モデルを用いた評価の可能性を検討することにある。既往の土のモデルをポリマー材のモデルとして利用することができれば、汎用の解析ツールなどを用いて耐震性能の評価を簡便に行なうことができるようになるため、本研究で得られる知見は設計等でも有用であると考えている。したがって、本研究では、既往の土の非線形モデルを拡張して用いることを前提として検討を進める。

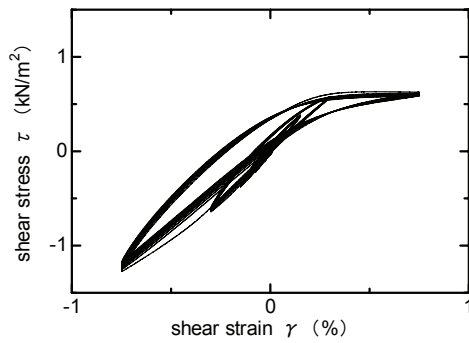


図-1 ポリマー材のせん断応力-せん断ひずみ関係

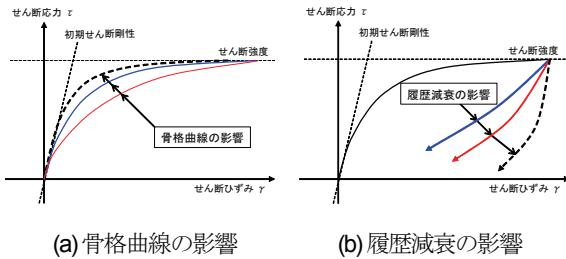


図-2 検討概念図

2. ポリマー材の非線形特性とモデル化の課題

(1) 室内試験におけるポリマー材の応力-ひずみ関係

図-1は、ポリマー材の供試体に対して、非排水繰返し三軸試験によりせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係（以下、 τ - γ 関係）を求めたものである。この試験結果で最も特徴的なのは、一般的な土の応力-ひずみ関係と異なり、履歴減衰が非常に小さいことである。なお、ここで示した τ - γ 関係は、等方な応力場の下での結果であるが、実際の地震時には地盤の初期応力の異方性などの影響によって図-1とは異なる挙動を示すことが考えられる。ところが、 τ - γ 関係から G/G_0 - γ 、 h - γ 関係を求めると、地盤の等方性と異方性の違いがほとんど見られなくなることが広く知られている⁹⁾。しかし、これまでに G/G_0 - γ 、 h - γ 関係についての多くの研究上の蓄積があり、種々の地盤材料との比較が容易であることを鑑みて、本論文においても τ - γ 関係の代わりに G/G_0 - γ 関係を用いて検討を行う。

(2) ポリマー材のモデル化に関する課題

検討概念図を図-2に示す。材料試験から定義された初期せん断剛性 G_0 、せん断強度 τ_f の下で、どのような骨格曲線、履歴曲線を辿るかが、非線形特性の違いを表現するものであり、このモデルの違いが、ポリマー免震層の地震時挙動の違いを表現することになる。

図-1に示した τ - γ 関係から、骨格曲線については、典型的な土に対して提案されている双曲線モデルや、Ramberg-Osgoodモデルなど^{10,11)}を用いて表現することが

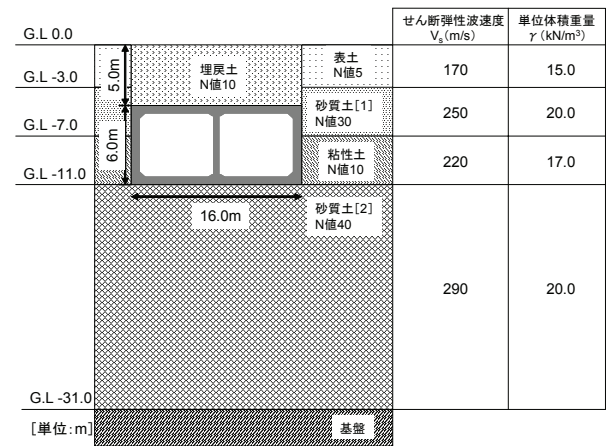


図-3 ポリマー材のせん断応力-せん断ひずみ関係

可能であると考えられる。しかし、一般的な土の履歴曲線のモデルは、土の履歴法則としてMasing則を用いた紡錘型の曲線で表現されるのが一般的であるため、既往の非線形モデルを用いた場合には、実際のポリマー材の非線形特性に比べて、履歴減衰が過大に評価されてしまうことが問題となる。

ただし、ポリマー免震工法は、地震時に構造物法線方向に作用する地盤変位を免震層を介して強制的に変位を吸収する（接線方向に力を逃がす）効果に期待した工法であり、材料そのものの減衰に期待したものではない。このことから、構造物側壁の法線方向に作用する力に直接的に影響すると考えられる骨格曲線を適切にモデル化することができれば、構造物の応答の評価は可能であると考えられる。また、ポリマー免震層は地盤に対して非常に薄い層であるので、地震時の構造物の応答に履歴減衰は影響しないという可能性もある。

3. ポリマー材の解析のための非線形モデル

ポリマー材の非線形特性は、一般的な土の非線形モデルとは大きく異なるが、地震時の構造物の応答を評価するという目的に対しては、ポリマー材の非線形モデルとして既往の土のモデルを用いることができる可能性がある。そこで、図-2で示したように材料の非線形特性の違いを表現する骨格曲線、履歴減衰に着目して、ポリマー材の非線形モデルの違いが地震時の構造物の応答に与える影響について検討する。

(1) 検討条件

対象構造物および地盤の構成を図-3に示す。対象構造物は、幅16.0m、高さ6.0mの1層2径間の開削トンネルである。上床版直上の上載土は、N値10相当の埋戻し土として評価した。解析は、2次元FEM動的解析を

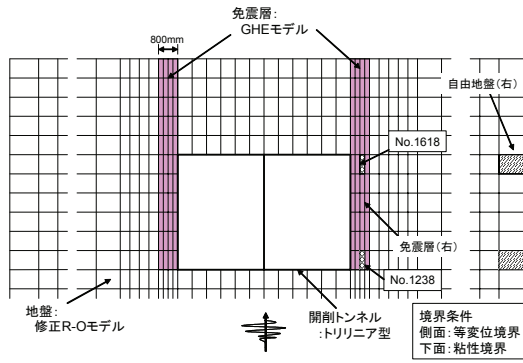


図-4 基本解析モデル

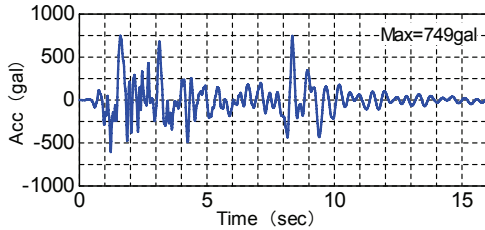


図-5 入力地震動

用いた。解析モデルと検討に抽出した要素番号を図-4に示す。本解析では、地盤および免震層（幅：800mm、設置深さ：地表面から構造物下端）は平面ひずみ要素、開削トンネルは梁要素としてモデル化した。地盤の非線形性は、修正 Ramberg-Osgood モデルで表現した。免震層に関しては、骨格曲線、履歴減衰を設定することのできる GHE モデル^{12),13),14)}および、より簡便な双曲線モデルを用いた。また、開削トンネルの非線形特性は、トリリニアモデル（武田型）¹⁵⁾とした。

解析に用いた入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計¹⁶⁾で用いられている基盤入力用地震波であり、主要動を含む16.0秒間を解析に用いた。その波形を図-5に示す。その他の解析条件として、モデル下端は粘性境界、側方は等変位境界とする。時間積分はNewmark β 法 ($\beta=1/4$)、計算時間間隔は1/1000秒、継続時間は16秒間とする。また、地盤および構造物の減衰定数は、振動数2Hz～5Hzの帯域で5%程度となるReyleigh減衰を用いた。

(2) ポリマー材のモデル化

図-6にポリマー材の室内試験のせん断ひずみ γ が 10^{-1} ～ 10^5 における動的変形係数を求めた結果を示す。図中の○が実験値のせん断剛性比 G/G_0 、□が実験値の減衰比 h である。図中の実線は、GHEモデルでパラメータを設定した結果である。一方、破線は、このGHEモデルと同じ初期せん断剛性と規準ひずみを有する双曲線モデルである。GHEモデルのパラメータについては文献[13]に従った。図-6に示す数値は、室内試験およびGHEモデルのパラメータの設定から求められたポリマー材の初期剛性 G_0 、減衰定数 h_{max} 、規準ひずみ γ_r の値である。

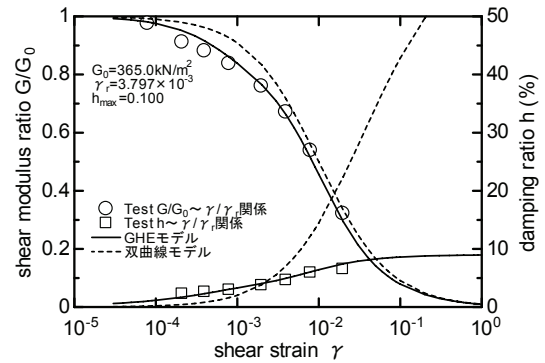


図-6 ポリマー材のせん断剛性比-せん断ひずみ-減衰率関係

表-1 解析ケース

検討項目	ケース	非線形モデル	初期せん断剛性 G_0 (kN/m ²)	減衰定数 h_{max}
基本ケース	1	GHEモデル	365.0	0.10
骨格曲線	2		3650.0	0.10
	3		36.5	0.10
	4		365.0	0.25
	5		365.0	0.50
基本ケース	6	双曲線モデル	365.0	—

なお、せん断強度 τ_f は $\tau_f = G_0 \gamma_r$ として定義し、基準ひずみ γ_r の値は $G/G_0 = 0.5$ となるせん断ひずみとしている。

(3) 解析ケース

解析ケースの一覧を表-1に示す。CASE-1は、ポリマー材の室内試験結果から初期せん断剛性、減衰定数を定義した基本ケースで、図-6の実線に対応するモデルである。CASE-2、CASE-3は、骨格曲線の違いに着目したケースであり、初期せん断剛性 G_0 を変化させることで表現した。CASE-2の初期せん断剛性 G_0 は、基本ケースの0.1倍、CASE-3の初期せん断剛性 G_0 は、基本ケースの10倍とした。CASE-4、CASE-5は、履歴減衰の違いに着目したケースであり、減衰定数 h_{max} を変化させることで表現した。CASE-4の減衰定数 h_{max} は、基本ケースの2.5倍、CASE-5の減衰定数 h_{max} は、基本ケースの5.0倍とした。CASE-6は、CASE-1と同じパラメータを用いた双曲線モデルの場合で、図-6の破線に対応するモデルである。なお、せん断強度 τ_f はいずれのケースも室内試験における初期せん断剛性 G_0 と規準ひずみ γ_r から求めた値である。

(4) 骨格曲線に関する検討

図-7は、骨格曲線の違いに着目したCASE-1、CASE-2、CASE-3における構造物の最大せん断力分布を示している。CASE-2は、CASE-1に比べて側壁下端付近でせん断力が大きくなっている。一方、CASE-3は、CASE-1に比

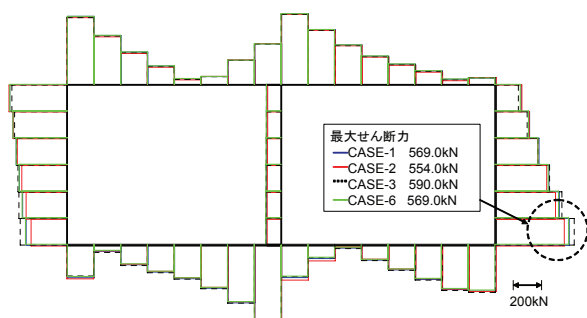


図-7 最大せん断力図（骨格曲線検討）

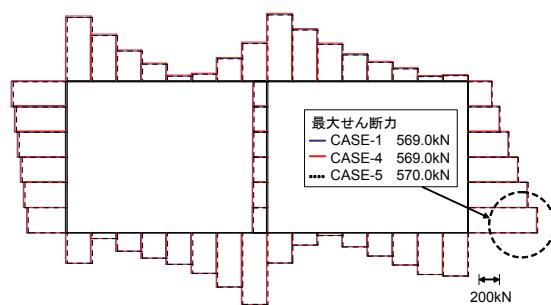


図-9 最大せん断力図（履歴減衰検討）

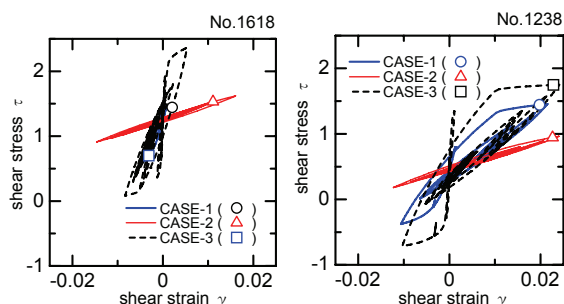


図-8 せん断応力-せん断ひずみ関係（骨格曲線検討）

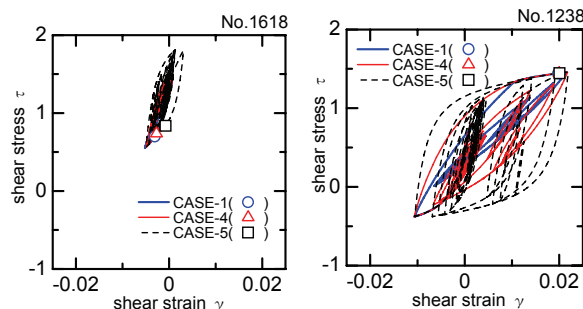


図-10 せん断応力-せん断ひずみ関係（履歴減衰検討）

べてせん断力が小さくなっている。図-8は、側壁上下端付近の免震層の τ - γ 関係を示している。図中の○、△、□は構造物に最大せん断力が生じた時刻の応答値をプロットしている。骨格曲線の違いが免震層のせん断応力の違いに現れていることが分かる。この免震層の挙動の違いが結果的に構造物の応答の違いに表れている。

(5) 履歴減衰に関する検討

図-9は、履歴減衰の違いに着目したCASE-1, CASE-4, CASE-5における構造物の最大せん断力分布を示している。いずれのケースについても構造物のせん断力は、ほぼ等しい値となっている。図-10は、側壁上下端付近の免震層の τ - γ 関係を示す。構造物が最大応答値を示した時刻における τ - γ 関係の位置を○、△、□でプロットしているが、全てのケースではほぼ同じ位置になっている。免震層の挙動としては履歴減衰の違いが生じているが、履歴減衰が異なっても、構造物の応答値が最大となる時の免震層の応答は同じであることを示している。さらに、図-11に同じ深度における自由地盤と免震層の τ - γ 関係を重ね合わせた結果を示している。免震層は自由地盤に対して非常に剛性が小さいため、その減衰の違いは構造物の応答にほとんど影響を与えないことが分かる。また、免震層は薄いため、ポリマー材の履歴減衰は地盤-構造物系の応答特性に寄与しないと考えられる。

(6) 解析に用いるポリマー材の非線形モデル

ポリマー材の非線形モデルの違いが、構造物の応答に与える影響について検討した結果、骨格曲線の違いは構

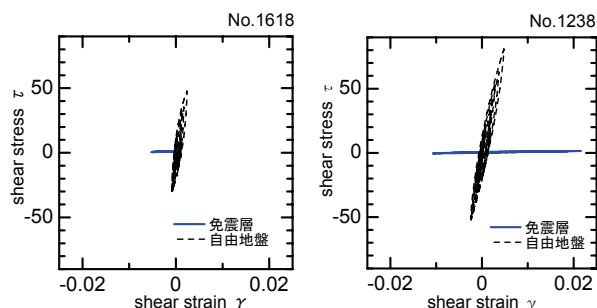


図-11 せん断応力-せん断ひずみ関係（CASE-1）

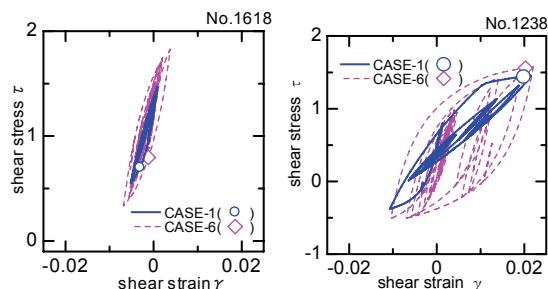


図-12 せん断応力-せん断ひずみ関係
(GHEモデルと双曲線モデル)

造物の応答に影響を与えるが、履歴減衰の違いは構造物の応答にはほとんど影響が無いことが分かった。このことからポリマー材のモデル化には、室内試験から決まる初期せん断剛性とせん断強度を踏まえた骨格曲線を用い

ればよい。そこで、非線形モデルの違いが構造物の応答にどのように影響するかをCASE-1, CASE-6を用いて検討する。

図-7にはCASE-6の結果も合わせて示しているが、最大せん断力はほとんど同じであることが分かる。ところが、CASE-1とCASE-6の $\tau-\gamma$ 関係を示した図-12を見ると、それらの履歴特性は全く異なっている。ただし、最大せん断力が生じた時刻でのせん断応力は、いずれの場合もほとんど同じとなっている。このことは、ポリマー材の初期せん断剛性と規準ひずみが構造物の応答に寄与していて、履歴減衰は影響しないことを意味している。したがって、ポリマー材の初期せん断剛性とせん断強度を適切に設定すれば、図-6に見られる程度の $G/G_0-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係の違いは、構造物の地震時の応答には影響を与えないことが分かる。以上より、構造物の応答を検討する際には、ポリマー材の非線形モデルとして既往の土の非線形特性を表現するモデルを用いることが可能であることが示された。特に、初期せん断剛性と規準ひずみのみがパラメータである非常に簡便な双曲線モデルを用いても十分な精度で構造物の地震時応答を推定できることが分かった。

4. おわりに

開削トンネルのためのポリマー免震工法について、ポリマー材のモデルが構造物の応答に与える影響について解析的な検討を行い、以下の結果を得た。

- ・ 免震層の骨格曲線は、構造物の応答に影響を与えるが、履歴減衰の影響はほとんどないことが確認された。
- ・ 免震層のモデルは、室内試験から定まる初期せん断剛性とせん断強度を踏まえた骨格曲線を定義できれば、既往の土の非線形モデルの一つである双曲線モデルを用いることが可能であることが示された。
- ・ 本論文では、モデル化に関してポリマー材に限定して述べたが、ポリマー免震工法と同様に、構造物周辺を柔らかくする変位吸収型の免震工法であれば、他の材料のモデル化についても履歴減衰に依存しないというポリマー材と同様の傾向が得られることが示唆された。

参考文献

- 1) 館山 勝, 矢口直幸, 平山勇治, 花森一郎: ポリマー地盤改良に関する基礎的研究, 鉄道総研報告, Vol.16, No.3, pp.19-24, 2002.3.
- 2) 室野剛隆, 桐生郷史, 館山 勝, 小林正介: ポリマー材を用いた開削トンネル免震工法, 土木学会地震工学論文集, 第28巻, pp.1-8, 2005.
- 3) 河西寛, 佐野祐一, 春海正和: 既設地下構造物の横断面内の免震対策, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.255-260, 2000.
- 4) 鈴木猛康, 勝川藤太: 活動塗料を用いた地下構造物の免震構造, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.311-318, 2000.
- 5) 西山誠治, 川満逸雄, 室谷耕輔, 羽矢洋, 棚村史郎: スリップシートを用いた矩形地下構造物の免震に関する一考察, 第2回免震・制震コロキウム講演論文集, pp.295-302, 2000.
- 6) 建設省土木研究所, 土木研究センター他17社: 地下構造物の免震設計に適用する免震材の開発に関する共同研究報告書(その1), 第154号, p.237, 1997.3.
- 7) 土木学会 地震工学委員会: 減震・免震・制震構造 設計ガイドライン(案), 2002.01.
- 8) Hardin, B. O. and Dmievich, V. P.: Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, *Proc. of the American Society of civil engineers*, Vol. 98, No. SM7, pp.667-692, 1972.
- 9) Yoshida, N. and Iai, S.: Nonlinear site response and its evaluation and prediction, *Proc. 2nd International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, pp.71-90, 1998.
- 10) 龍岡文夫, 福島伸二: 砂のランダム繰り返し入力に対する応力～歪関係のモデル化について(1), 生産研究, 30巻9号, pp.356-359, 1978.
- 11) 龍岡文夫, 福島伸二: 砂のランダム繰り返し入力に対する応力～歪関係のモデル化について(2), 生産研究, 30巻10号, pp.375-378, 1978.
- 12) 西村昭彦, 室野剛隆: GHEモデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証, 第25回地震工学研究発表会, pp.309-312, 1999.
- 13) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp.494-497, 2006.
- 14) 吉田望, 澤田純男, 竹島康人, 三上武子, 澤田俊一: 履歴減衰特性が地盤の地震応答に与える影響, 土木学会地震工学論文集, 第27巻, pp.1-8, 2003.
- 15) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. M.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 96, No. ST12, pp. 2557-2573, 1970.
- 16) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.

MODELING OF NONLINEAR CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIAL WHICH CAN BE USED TO CALCULATE THE DYNAMIC RESPONSE OF POLYMER – ISOLATED UNDERGROUND STRUCTURE

Satoshi KIRYU, Yoshitaka MURONO and Hitoshi MORIKAWA

We have developed the new seismic countermeasure for the underground structure based on new concept. A polymer material whose stiffness is quite flexible is embedded both sides of the tunnel, which we call "polymer isolated method." A nonlinear characteristics of the polymer material are different from those of a soil. We, therefore, examine how to model the nonlinear characteristics of the polymer material, in order to calculate the seismic performance of polymer-isolated underground structure by using dynamic analysis. In this study, the applicability of the constitutive model of the Hyperbolic model and the GHE model for modeling the polymer is examined. It becomes clear that the constitutive model, such as hyperbolic model and GHE model, can be used to analyze the polymer-isolated underground structure.