

シールドトンネルの免震効果とすべり挙動の 応答変位法による評価

小池 武¹ ・ 寺本 正²

¹正会員 工博 川崎製鉄株式会社鋼構造研究所 (〒263-0005 千葉県稲毛区長沼町 351)

²正会員 工修 川崎製鉄株式会社エネルギー・水道事業部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3 日比谷国際ビル)

本報告は、レベル2地震動を受ける地中構造物の耐震対策として用いられる「免震層」による外力低減と構造物・周辺地盤間の土の弾塑性特性に基づく「すべり」による外力低減の、トンネル地震時ひずみに及ぼす低減効果について比較検討を行ったものである。

ここでは、立坑近傍および異種地盤境界近傍に免震層を設置したシールドトンネルの地震時ひずみを応答変位法により評価する手法を提案し、数値計算により両者の低減効果を比較検討した。

Key words: Seismic isolation method, slippage, shield tunnel, response displacement method, ground stiffness, shear strain

1. はじめに

シールドトンネルのような地中構造物が大きな地震力を受けた際の耐震対策として、従来は構造物継手部に伸縮継手を挿入することで変形性能を向上させる方法が採用されてきたが、近年構造物と周辺地盤の間に免震層を挿入して構造物に作用する外力を低減する工法が提案されるようになった。後者の工法を考える時、「免震層」による外力の低減と構造物・周辺地盤間の「すべり」による外力低減の二種類の低減効果について明確にしておくことが、免震対策を効果的に実施する上で有用と考えられる。

ここでは、立坑近傍および異種地盤境界近傍に免震層を設置したシールドトンネルの地震時ひずみを応答変位法に基づいて算定する手法を提案し、数値計算により両手法の低減効果の比較検討した結果について報告する。

2. 応答変位法による免震効果の簡易評価手法

(1) 一様地盤に設置された免震層を持つトンネルの地震時挙動

シールドトンネルを含む地盤が震動するとき、図1に示すように免震層を有する場合は剛性の小さな免震層と相対的に剛性の大きな周辺地盤がせん断変形を分担している。この時、周辺地盤と免震層のそれぞれの剛性をばねで表現できるとすると、周辺地盤ばね K_A と免震層ばね K_B から合成される合成地盤ばね K_A^* は次式で与えられる。

$$K_A^* = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B} \quad (1)$$

図2に示す免震層を持つシールドトンネルの解析モデルを用いると、構造物の変位挙動 v_s は図3に示すように免震層区間と非免震層区間ごとに次の釣り合い式が得られる。

$$\rho \frac{\partial^2 v_s}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 v_s}{\partial x^2} = \pi D \tau_G \quad (2)$$

ここで、 ρ, A, E, D, τ_G は、それぞれトンネルの密度、断面積、弾性係数、口径、せん断応力である。さらに、図2の L, W および v_G は、それぞれ地震波波長、免震層区間幅そして地震動変位振幅である。

$$\pi D \tau_G = \begin{cases} K_A(v_G - v_s) & ; 0 \leq x \leq \frac{L}{4} - \frac{W}{2} \\ K_A^*(v_G - v_s) & ; \frac{L}{4} - \frac{W}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (3)$$

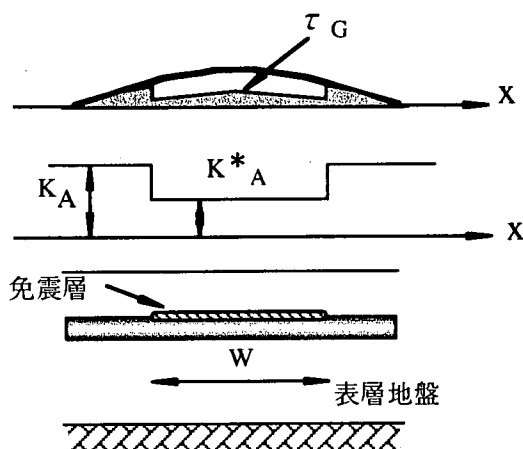


図2 免震層を持つシールドトンネルの解析モデル

両区間でのトンネル変位の一般解は次式で表現できる。

$$v_s(\xi) = \beta v_G \sin \xi + A \sinh\left(\frac{\lambda \xi}{k_L \cos \phi}\right) + B \cosh\left(\frac{\lambda \xi}{k_L \cos \phi}\right) \quad (4)$$

$$v_s^*(\xi) = \beta^* v_G \sin \xi + A^* \sinh\left(\frac{\lambda^* \xi}{k_L \cos \phi}\right) + B^* \cosh\left(\frac{\lambda^* \xi}{k_L \cos \phi}\right)$$

ここで、 ϕ は入射角。 $\xi = k_L x \cos \phi - \omega t$, $k_L = 2\pi/L$

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_A}{EA}}, \lambda^* = \sqrt{\frac{K_A^*}{EA}} \quad (5)$$

$$\beta = 1 / \left\{ 1 + \left(\frac{k_L \cos \phi}{\lambda} \right)^2 \right\}, \beta^* = 1 / \left\{ 1 + \left(\frac{k_L \cos \phi}{\lambda^*} \right)^2 \right\}$$

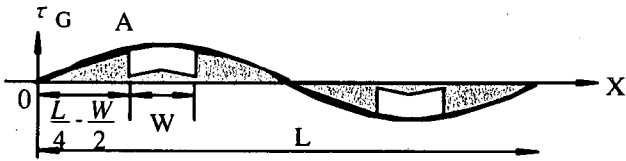


図3 免震層区間でのせん断応力分布の低減

免震層・非免震層の境界部分(図3のA点)での変位、たわみ角の連続性およびそれぞれの領域での正弦波としての境界条件:

$$v_s(\xi_w) = v_s^*(\xi_w), \left[\frac{\partial v_s}{\partial \xi} \right]_{\xi_w} = \left[\frac{\partial v_s^*}{\partial \xi} \right]_{\xi_w}, v_s(0) = 0,$$

$$\left[\frac{\partial v_s^*}{\partial \xi} \right]_{\xi = \frac{\pi}{2}} = 0, \text{ ここで, } \xi_w = \frac{L}{4} - \frac{W}{2} \quad (6)$$

から未定係数 A, A^*, B, B^* を決定すると、トンネルに発生する最大軸ひずみ ϵ_m は、 $x=0$ で最大値をとることから次式で算定することができる。この式の第一項は非免震状態でのトンネルひずみを示し、第二項の λA は免震層による低減効果を示す。

$$\epsilon_m = \beta \epsilon_G + \lambda A \quad (7)$$

ただし、 ϵ_G は自由地盤のトンネル軸方向最大ひずみ、そして係数 A, A^* は次式より算定される。

$$\begin{bmatrix} \sinh \zeta & -\sinh \zeta^* + \frac{\cosh \zeta^*}{\tanh\left(\zeta^* \frac{\pi}{2\xi_w}\right)} \\ \frac{\zeta}{\xi_w} \cosh \zeta & -\frac{\zeta^*}{\xi_w} \left(\cosh \zeta^* - \frac{\sinh \zeta^*}{\tanh\left(\zeta^* \frac{\pi}{2\xi_w}\right)} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ A^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\beta^* - \beta) v_G \sin \xi_w \\ (\beta^* - \beta) v_G \cos \xi_w \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{\lambda}{k_L \cos \phi} \xi_w, \zeta^* = \frac{\lambda^*}{k_L \cos \phi} \xi_w, \xi_w = k_L \left(\frac{L}{4} - \frac{W}{2} \right) \cos \phi - \omega t \quad (9)$$

(2) 立坑近傍の地震時挙動 (図4)

立坑とそれに接続するシールドトンネルが剛結ではなく、トンネル軸方向移動が非拘束である場合を検討する。この場合には、立坑は地盤と同一の挙動を行い、トンネルは立坑とは独立に挙動することになる。

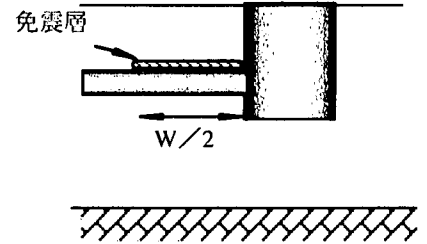


図4 免震層を持つ立坑近傍の解析モデル

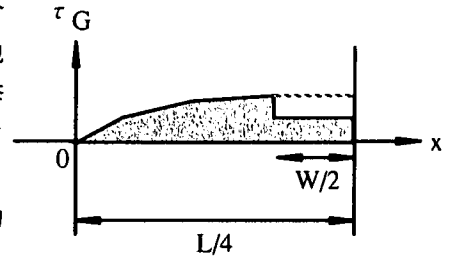


図5 立坑近傍の免震層区間でのせん断応力分布の低減

図5のせん断応力分布を仮定すると、立坑近傍のトンネルに発生する最大軸ひずみは $x=0$ で最大値をとることから次式で求められる。

$$\epsilon_m = \beta \epsilon_G + \lambda A \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \exp(\zeta) & -\exp(\zeta^*) - \exp\left(-\zeta^* + \frac{\pi \zeta^*}{2\xi_w}\right) \\ \frac{\zeta}{\xi_w} \exp(\zeta) & -\frac{\zeta^*}{\xi_w} \left(\exp(\zeta^*) - \exp\left(-\zeta^* + \frac{\pi \zeta^*}{2\xi_w}\right) \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ A^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\beta^* - \beta) v_G \sin \xi_w \\ (\beta^* - \beta) v_G \cos \xi_w \end{bmatrix} \quad (11)$$

この時、立坑とトンネルの相対変位は次式で求められる。

$$\Delta^* = [v_G - v_s^*]_{x = \frac{L}{4}} = (1 - \beta^*) v_G - 2A^* \exp\left(\frac{L\lambda^*}{4}\right) \quad (12)$$

この相対変位は立坑とトンネルが剛結されている場合に吸収しなければならない最大相対変位を概算的に与えることになる。

(3) 異種地盤境界を通過するトンネルの地震時挙動

地震動が異種地盤境界近傍を通過する時、両側の整層地盤を伝播する地震動よりも相対的に大きな変位振幅を生じることが知られている。ここでは、問題を簡単化するため、境界近傍で増幅した地震動変位振幅が v_G であると仮定して以下の定式化を行なう。

境界を挟むそれぞれの地盤での特性値を地震波の波長 L_1, L_2 、免震層区間幅 W_1, W_2 、地盤剛性 K_A, K_B とする。この時、それぞれの地盤におけるトンネルに発生する最大軸ひずみは、2.(1)の手法にしたがって $x_1=0, x_2=0$ で最大値をとることから次式で算定することができる。

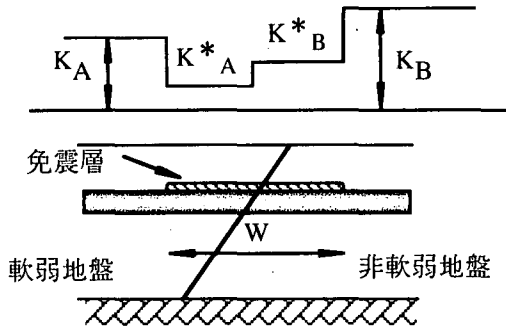


図6 異種地盤境界を通過するトンネルの解析モデル

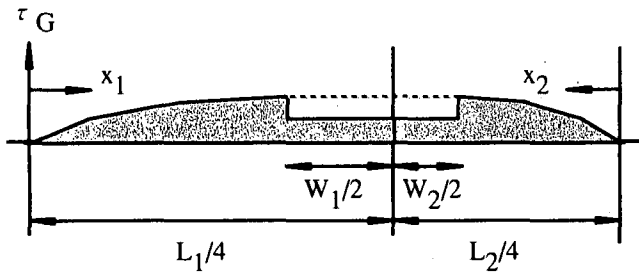


図7 異種地盤境界近傍の免震層区間でのせん断応力分布の低減

$$\varepsilon_m^1 = \beta_1 \varepsilon_G + \lambda_1 A_1, \quad \varepsilon_m^2 = \beta_2 \varepsilon_G + \lambda_2 A_2 \quad (13)$$

ここで、定数 A_1, A_2 は以下の関係式より求められる。

$$\begin{bmatrix} \sinh(\zeta_1) & -\sinh(\zeta_1^*) & \cosh(\zeta_1) & -\cosh(\zeta_1^*) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \zeta_1 \cosh(\zeta_1) & -\zeta_1^* \cosh(\zeta_1^*) & \zeta_1 \sinh(\zeta_1) & -\zeta_1^* \sinh(\zeta_1^*) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sinh(\zeta_2) & -\sinh(\zeta_2^*) & \cosh(\zeta_2) & -\cosh(\zeta_2^*) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \zeta_2 \cosh(\zeta_2) & -\zeta_2^* \cosh(\zeta_2^*) & \zeta_2 \sinh(\zeta_2) & -\zeta_2^* \sinh(\zeta_2^*) \\ 0 & \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -\sinh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -\cosh(\zeta_{2p}^*) \\ 0 & \zeta_{1p}^* \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & \zeta_{1p}^* \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -\zeta_{2p}^* \cosh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -\zeta_{2p}^* \sinh(\zeta_{2p}^*) \\ 0 & (\zeta_{1p}^*)^2 \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & (\zeta_{1p}^*)^2 \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -(\zeta_{2p}^*)^2 \sinh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -(\zeta_{2p}^*)^2 \cosh(\zeta_{2p}^*) \\ 0 & (\zeta_{1p}^*)^3 \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & (\zeta_{1p}^*)^3 \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -(\zeta_{2p}^*)^3 \cosh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -(\zeta_{2p}^*)^3 \sinh(\zeta_{2p}^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_1^* \\ B_1 \\ B_1^* \\ A_2 \\ A_2^* \\ B_2 \\ B_2^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$= v_G \begin{bmatrix} (\beta_1^* - \beta_1) \sin(\xi w_1) & \xi w_1 (\beta_1^* - \beta_1) \cos(\xi w_1) & (\beta_2^* - \beta_2) \sin(\xi w_2) & \xi w_2 (\beta_2^* - \beta_2) \cos(\xi w_2) & \beta_2^* - \beta_1^* & 0 & -(\frac{\pi}{2})^2 (\beta_2^* - \beta_1^*) & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{K_{Ai}}{EA}}, \quad \lambda_i^* = \sqrt{\frac{K_{Ai}^*}{EA}}, \quad \beta_i = 1 / \left\{ 1 + \left(\frac{k_{Li} \cos \phi}{\lambda_i} \right)^2 \right\},$$

$$\beta_i^* = 1 / \left\{ 1 + \left(\frac{k_{Li} \cos \phi}{\lambda_i^*} \right)^2 \right\}, \quad \xi_i = k_{Li} x \cos \phi - \omega t, \quad k_{Li} = 2\pi / L_i$$

$$\zeta_i = \frac{\lambda_i}{k_{Li} \cos \phi} \xi_{wi}, \quad \zeta_i^* = \frac{\lambda_i^*}{k_{Li} \cos \phi} \xi_{wi}, \quad \xi_{wi} = k_{Li} \left(\frac{L_i}{4} - \frac{W_i}{2} \right) \cos \phi - \omega t$$

$$\zeta_{ip} = \frac{\lambda_i}{k_{Li} \cos \phi} \frac{\pi}{2}, \quad \zeta_{ip}^* = \frac{\lambda_i^*}{k_{Li} \cos \phi} \frac{\pi}{2}; \quad i=1, 2 \quad (15)$$

3. すべり挙動

周辺地盤の応力ひずみ特性として図8を用いると、すべりが生じた状態のシールドトンネルに作用する

せん断応力は図9となる。この時、トンネル軸方向ひずみおよび地盤・トンネル間の相対変位 Δ は、ひずみ低減係数²⁾ q を用いて次式で求められる。

$$\varepsilon_S = q \beta \varepsilon_G, \quad \Delta = (1 - q^* \beta) v_G \quad (16)$$

ここで、 $(EA)_{eq}$ をシールドトンネルの等価断面剛性とする、トンネル表面に作用するせん断応力 τ_G および q, q^* は次式で与えられる。

$$\tau_G = \frac{2\pi}{L} E t \beta \varepsilon_G = \frac{2\pi}{L} \frac{(E A)_{eq}}{\pi D} \beta \varepsilon_G \quad (17)$$

ただし、

$$\tau_G \geq \tau_{cr}, \quad q = 1 - \cos \xi + \left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \sin \xi,$$

$$\xi = \arcsin \left(\frac{\tau_{cr}}{\tau_G} \right); \quad \tau_G \leq \tau_{cr} \quad q = 1 \quad (18)$$

$$\tau_G \geq \tau_{cr}, \quad q^* = \left(1 + \frac{\pi^2}{8} - \frac{\xi^2}{2} \right) \cdot \sin \xi - \xi \cdot \cos \xi$$

$$; \quad \tau_G \leq \tau_{cr} \quad q^* = 1 \quad (19)$$

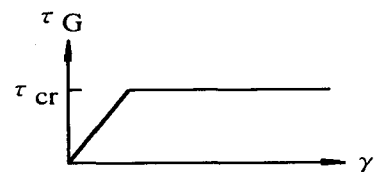


図8 土の応力ひずみ特性のモデル化

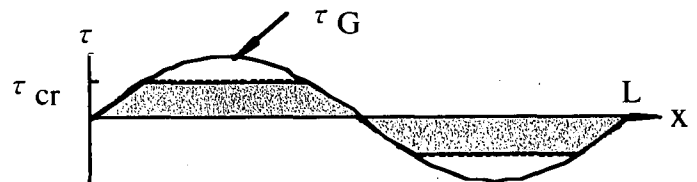


図9 シールドトンネルに作用するすべり状態のせん断応力分布

4. 数値計算例

数値計算では、 $D=2.75\text{m}$, $t=12.8\text{cm}$ の鋼製セメントを用いたシールドトンネル（等価断面剛性： $(EA)_{eq}=3.36 \times 10^9 \text{kgf}$ ）を想定し、免震層の区間幅および剛性の効果を検討した。さらに、免震効果とすべり挙動によるトンネルひずみ低減効果の比較検討も行なった。シールドトンネルの耐震解析に用いる数値（地盤ばね係数、地震波波長、表層地盤基盤面上の速度応答スペクトルなど）は、水道施設耐震工法指針³⁾のレベル2地震動に対する耐震設計法に従った。

図10の ϵ_G , ϵ_{ns} , ϵ_s , ϵ_m はそれぞれ地盤ひずみ、免震層・すべりのいずれの効果も考慮しない場合の構造物ひずみ、すべりを考慮した場合の構造物ひずみそして免震層を考慮した場合の構造物ひずみである。図中の ζ_G , ζ_w はそれぞれ免震層剛性の周辺地盤剛性に対する比および地震波の波長に対する免震層区間幅の比であり、数値計算では $\zeta_G=0.001, 0.01, 0.1$ そして $\zeta_w=0.1, 0.2$ とした。さらに、シールドトンネルのすべり開始限界応力は、トンネル周辺の地盤拘束力やトンネル表面の摩擦特性などの影響を受けるが、主としてその大きさは鉛直土圧に比例する。ここでは、シールドトンネルの埋設置深さをガス導管の土被りの5倍、10倍程度の大きさと想定して、ガス導管のすべり開始限界応力（ $\tau_{cr}=0.1\text{kgf/cm}^2$ ）からシールドトンネルのすべり開始限界応力を $\tau_{cr}=0.5 \sim 1.0\text{kgf/cm}^2$ とした。

図10の3図を比較すると、(1)免震層剛性の効果が小さく、(2)免震層の区間幅を地震波長の20%程度にすると、短周期地盤で比較的大きなトンネルひずみ低減効果が見られる。しかし(3)すべりによる低減効果が免震層以上に大きいことを示している。図11は図10(2)とほぼ同様の傾向を示している。また、図12の相対変位は、免震層(Δ^*)よりもすべり(Δ)の方が小さい値を示しており、立坑接合部の応力緩和は、免震層だけでは必ずしも有効とは言えないように思われる。

図13は、異種地盤の軟弱地盤側のトンネル最大発生軸ひずみを検討したものである。すべりによるひずみ(ϵ_s)が免震層によるひずみ(ϵ_m)の $\zeta_w=0.2$ の曲線と同程度であることがわかる。以上より、すべり開始限界応力 τ_{cr} が 1.0kgf/cm^2 以下ならば、長周期地盤ですべりによるひずみ低減効果が顕著なことがわかる。

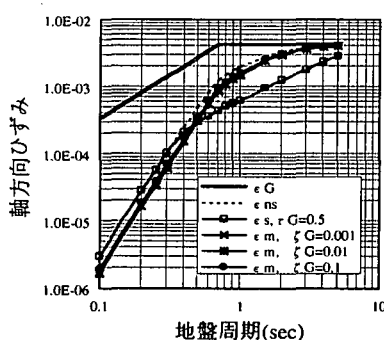
5. まとめ

数値解析結果をまとめると以下のとおり。

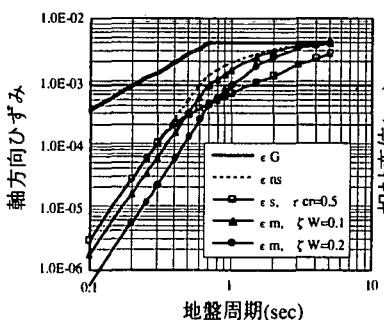
- (1) 限界せん断応力が 1.0kgf/cm^2 以下の場合、長周期地盤側ですべりの方が免震層よりひずみ低減効果大きい。
- (2) 免震層の幅が地震波長の20%程度の時、短周期地盤側でひずみ低減効果が見られる。
- (3) 免震層の剛性を低下させることによるひずみ低減効果は小さい。

参考文献

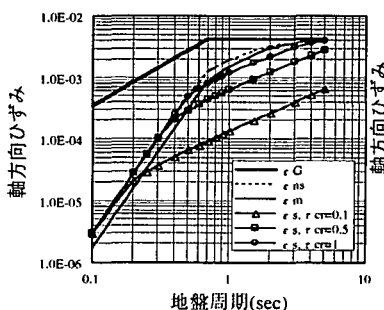
- 1) 千葉 光, 本田利器, 田村敬一, 中尾吉宏: 不整形地盤における地震動の増幅特性, 土木技術資料, 41-1, 1999.
- 2) 小池 武: 埋設パイプラインの地震時ひずみ評価, 土木学会論文報告集No.331, pp.13-24, 1983.
- 3) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針, 日本水道協会, 1997.



(1) 免震層剛性の影響



(2) 免震層区間幅の影響



(3) すべり開始限界応力の影響

図10 一様地盤でのトンネル軸方向ひずみに与える免震層とすべりの効果比較

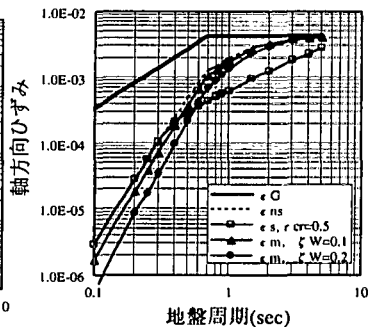


図11 立坑近傍のトンネル軸方向ひずみ

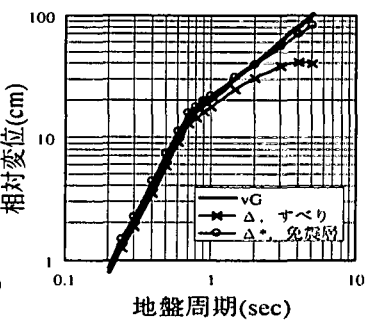


図12 立坑近傍の相対変位

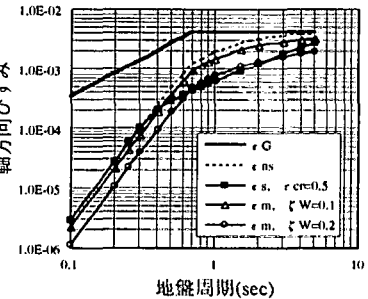


図13 異種地盤境界を通過するトンネル軸方向ひずみ(軟弱地盤側)