

(I - 49) 二層系地盤に斜め入射する S H 波によって生じるひずみ
— 地震動の入射角の影響 —

ハザマ技術研究所 松原勝己

1. まえがき

現在、シールドトンネル、共同溝および地中埋設管などの線状地中構造物の縦断方向の耐震設計は、地盤と構造物を弾性床土上の梁としてモデル化し、せん断波に基づく入射地震動を設定して応答変位法により実施されている。その入射地震動を規定する際には、地震動が線状地中構造物の軸方向に対して45度の角度で入射すると仮定することが多い。本報では、表層地盤での増幅特性を考慮して地震動の入射角の影響を検討する目的で、地盤を成層二層系弾性地盤と仮定し、地震動は基盤からの S H 波による斜め入射波という条件のもとに、地盤に生じるひずみを算定した。すなわち、線状地中構造物が表層地盤中に水平に設置されているものとし、入射地震動（正弦波）の入射角を変化させて、線状地中構造物の縦断方向に曲げを生じさせるような、地表面位置におけるせん断ひずみを求めた。

2. 二層系地盤への S H 波入射に対する変位解

図-1に示すような二層系弾性地盤に対する S H 波入射の表層および基盤層の変位 v_1 および v_2 は、式(1)および(2)で表される。

$$v_1 = A_1 \exp(-i\xi x - i\sqrt{(\omega^2/V_{s1}^2 - \xi^2)z_1 + i\omega t}) + A_2 \exp(-i\xi x + i\sqrt{(\omega^2/V_{s1}^2 - \xi^2)z_1 + i\omega t}) \quad (1)$$

$$v_2 = A_0 \exp(-i\xi x - i\sqrt{(\omega^2/V_{s2}^2 - \xi^2)z_2 + i\omega t}) + A' \exp(-i\xi x + i\sqrt{(\omega^2/V_{s2}^2 - \xi^2)z_2 + i\omega t}) \quad (2)$$

ここに、 A_1, A_2 : 表層の上昇波と下降波の振幅、 A_0, A' : 基盤の入射波と反射波の振幅、 ξ : x方向の波数、 V_{s1}, V_{s2} : 表層と基盤のせん断波速度、 ω : 円振動数 である。

また、入射角 θ と波数 ξ の関係は、式(3)で表される。

$$\xi = \omega/V_{s2} \cdot \sin \theta \quad (3)$$

境界条件については、地表面でのせん断応力がゼロ、表層と基盤層の境界で変位およびせん断応力が連続となる条件から、式(4)～(6)のように表される。

$$z_1 = 0 \quad \text{で} \quad \mu_1 \cdot \partial v_1 / \partial z_1 = 0 \quad (4)$$

$$z_1 = -H (z_2 = 0) \quad \text{で} \quad v_1 = v_2 \quad (5)$$

$$z_1 = -H (z_2 = 0) \quad \text{で} \quad \mu_1 \cdot \partial v_1 / \partial z_1 = \mu_2 \cdot \partial v_2 / \partial z_2 \quad (6)$$

ここに、 μ_1, μ_2 : 表層と基盤のせん断弾性係数 である。

以上より、式(1)および(2)での変位振幅において、 A_0 を入射波の振幅で既知、 A_1, A_2 および A' を未知数として、式(4)～(6)の境界条件より定めることができる。

地表面での変位 $(v_1)_{z_1=0}$ は、式(7)で表される。

$$(v_1)_{z_1=0} = 2A_1 \exp(-i\xi x + i\omega t) \quad (7)$$

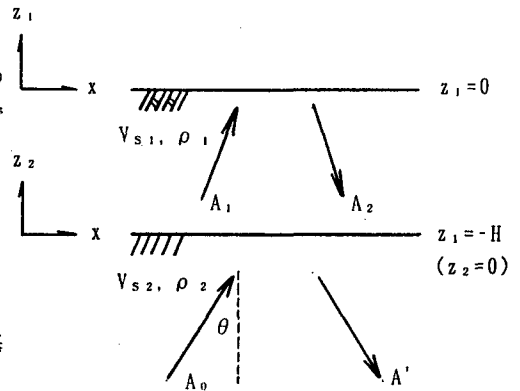


図-1 二層系地盤モデル

ここに、

$$A_1 = \frac{A_0 \cdot \cos \theta}{\cos \theta \cdot \cos(r\sqrt{1-\alpha^2 \sin^2 \theta}) + i\beta \alpha \sqrt{1-\alpha^2 \sin^2 \theta} \cdot \sin(r\sqrt{1-\alpha^2 \sin^2 \theta})} \quad (8)$$

$$\alpha = V_{s1}/V_{s2}, \quad \beta = \rho_1/\rho_2, \quad r = \omega H/V_{s1}$$

式(8)において、 α 、 β および r はそれぞれ表層と基盤のせん断波速度比、表層と基盤の密度比および無次元振動数である。

3. 地表面でのせん断ひずみの伝達関数

地表面におけるせん断ひずみ $\partial v_1/\partial x$ は、式(9)で表される。

$$(\partial v_1/\partial x)_{z=0} = -2i\xi A_1 \exp(-i\xi x + i\omega t) \quad (9)$$

したがって、地表面でのせん断ひずみ $(\partial v_1/\partial x)_{z=0}$ の単位入射速度に対する伝達関数 $H(\omega)$ は、式(10)で表される。

$$H(\omega) = (\partial v_1/\partial x)_{z=0}/(i\omega A_0) = -2/V_{s2} \cdot A_1/A_0 \cdot \sin \theta \quad (10)$$

式(8)および(10)より、単位入射速度に対する地表面でのせん断ひずみの増幅率 $|H(\omega)|$ は、式(11)で表される。

$$|H(\omega)| = 1/V_{s2} \cdot 2 \sin \theta \cdot \cos \theta / B \quad (11)$$

$$B = \sqrt{(\cos^2 \theta \cdot \cos^2(\pi/2 \cdot p \sqrt{1-\alpha^2 \sin^2 \theta})) + \beta^2 \alpha^2 (1-\alpha^2 \sin^2 \theta)^2 \cdot \sin^2(\pi/2 \cdot p \sqrt{1-\alpha^2 \sin^2 \theta})}$$

(ただし $\sin \theta < 1/\alpha$)

ここに、 $p=2r/\pi$ であり、地盤の一次固有振動数 $V_{s1}/4H$ に対する入射波の振動数の比(入射波の波長に対する地盤の一次固有モードの波長 $4H$ の比)である。

図-2に、せん断波速度比 $\alpha (=V_{s1}/V_{s2})=0.4$ 、密度比 $\beta (= \rho_1/\rho_2)=0.75$ の条件のもとに、せん断ひずみの伝達関数と入射角の関係を示した。図より、 $p=1$ (共振状態)の時に、ひずみが最大値となり、入射角が45度付近で最大値をとることがわかる。また、入射波の振動数(波長)の違いにより、最大値と最大値をとる入射角が異なることもわかる。

4. あとがき

本報では、二層系弾性地盤に斜め入射するSH波によって、線状地中構造物の縦断方向に曲げを生じさせる

ようなせん断ひずみを解析的に算定し、入射波の入射角の影響を検討した。その結果、地盤の共振時(入射波の波長が表層厚の4倍になる時)には、入射角が45度付近でひずみが最大値をとるが、入射波の波長によりひずみの最大値とその最大値をとる入射角が異なることが明かとなった。今後は、線状地中構造物の軸引張に影響を及ぼすSV波に対する検討を実施してゆく予定である。最後に、本報の数値計算と図化に関してハザマ技術研究所の西邦夫氏の協力を得ましたのでここに感謝の意を表します。

<参考文献> 佐藤泰夫：弾性波動論、岩波書店、1978

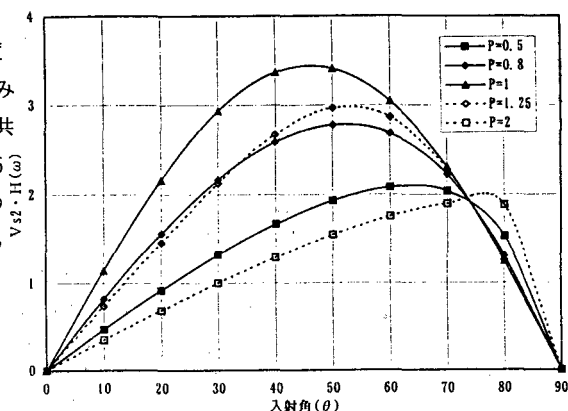


図-2 せん断ひずみの伝達関数と入射角の関係