

地盤の不整形性に起因する地震動増幅特性の評価方法

千葉光¹・田村敬一²・本田利器³

¹正会員 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

³正会員 工修 建設省土木研究所 振動研究室 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

地形や基盤の深さ、土質定数等の地盤条件が急激に変化する地盤においては、局所的な地震動の増幅が生じるといわれている。本研究では、このような不整形性を有する地盤を単純な形でモデル化し、地震動増幅特性の評価手法について検討を行った。

解析に用いた地盤モデルとしては、軟質層と硬質層の二層からなる片側傾斜基盤及び両側傾斜基盤を基本として、いくつかのパラメータを変化させて設定した。また、地震動増幅特性の評価方法について、地盤の不整形性に起因する地震動の増幅程度を把握するため、二次元地震応答解析及び一次元地震応答解析の比較を行い、評価式の提案を行った。

Key Words : *Irregularly Layered Ground, Ground Motion Amplification, Estimation Method*

1. はじめに

合理的な耐震設計や正確な地震被害の想定を行うためには、地震動の特性を正確に把握することが重要である。しかしながら、地震動の特性については不明な問題も多く、そのような問題の1つに、不整形地盤での地震動増幅特性が挙げられる。不整形地盤とは、地形や基盤の深さ、土質定数等の地盤条件が急激に変化する地盤のことをいい、このような地盤においては局所的な地震動の増幅を生じることが過去の被害事例の検討や強震記録の解析等から指摘されている。

不整形地盤における地震動増幅のメカニズムは多くの要因が影響し複雑であるため、正確な増幅特性の把握は困難である。しかしながら、不整形地盤において地震動の増幅が生じることが既知であるため、多少の精度は低下するとしても地震動の増幅程度を把握することは重要である。

本研究は、不整形性を有する地盤を単純な形でモデル化し数値解析を行い、その結果に基づき、不整形地盤での地震動増幅特性を明らかにするとともに、その評価手法について検討するものである。

2. 地盤モデル及び解析条件

1) 地盤モデル

解析に用いた地盤モデルは、軟質層と硬質層の二層からなる片側傾斜基盤と両側傾斜基盤(図-1(a)(b))を基本とした。ケース設定に用いた主なパラメータとその設定範囲は①軟質層の厚さ $H1$ (10 ~ 40m)、②基盤の傾斜区間の長さ Ls (20 ~ 1440m)、③両側傾斜基盤軟質層底辺の長さ $L2$ (50 ~ 600m)、④軟質層のせん断弾性波速度(100 ~ 200m/s)及び硬質層のせん断弾性波速度(180 ~ 405m/s)、等である。これらのパラメータを変化させて片側傾斜基盤を40ケース、両側傾斜基盤を30ケース設定した。

また、基盤が軟質層下に埋没していることの影響を調べるために、埋没片側傾斜基盤と埋没両側傾斜基盤(図-1(c)(d))を、前述のパラメータと⑤基盤の埋没深さ $H3$ 及び $H4$ (10 ~ 20m)、等を変化させて、それぞれ8ケースと9ケース設定した。

2) 解析条件

地盤モデルにおいて軟質層と硬質層の土質定数のひずみ依存特性については岩崎、龍岡ら^{1) 2)}の値を用いた。入力波形は、茨城県南部の地震(1983年)の際に土木研究所(Ⅱ種地盤)で観測された波形と、宮城県沖地震(1978年)の際に開北橋(Ⅰ種地盤)で観測された波形の2波形を最大加速度が100galにな

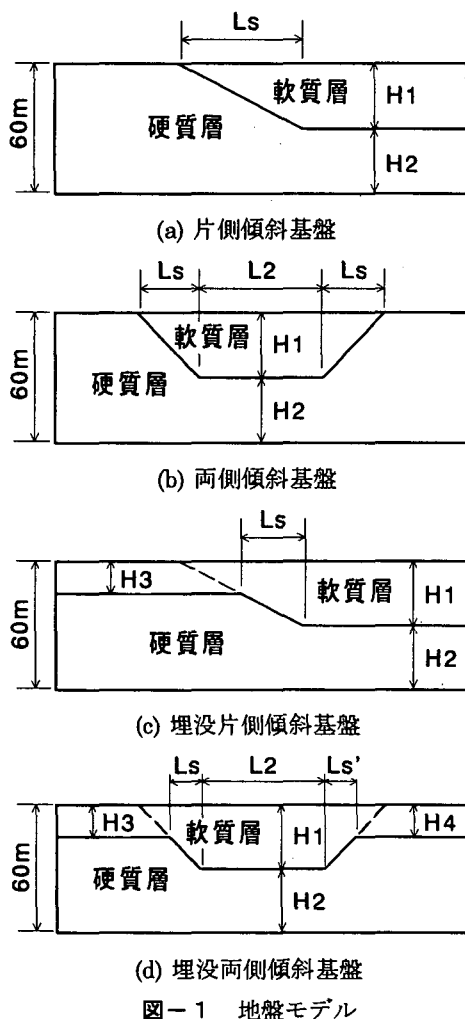


図-1 地盤モデル

るように調整したものを用いた。二次元地震応答解析は、有限要素プログラム FLUSH³⁾を用いて行った。また、比較のために行う水平成層地盤を想定した一次元地震応答解析には、SHAKE⁴⁾を用いた。

3. 増幅程度の評価方法

1) 地盤の不整形性に起因する増幅程度の評価指標

地盤の不整形性に起因する増幅程度を評価するため、その指標として $R_{max}(Sa)$ を次のとおり定義する。まず、地盤モデル地表上のある任意の地点において、二次元解析及び一次元解析により求められる地震動の加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を $Sa(T)_{2D}$ 、 $Sa(T)_{1D}$ とし、両者の比を $R(Sa(T))$ とする。

$$R(Sa(T)) = Sa(T)_{2D} / Sa(T)_{1D} \quad (1)$$

次に、 $R(Sa(T))$ の固有周期 $T = \{0.1 \text{ 秒} \sim 5 \text{ 秒}\}$ における最大値を増幅率 $R(Sa)$ とする。

$$R(Sa) = \max_{\{T=0.1 \sim 5.0\}} \{Sa(T)_{2D} / Sa(T)_{1D}\} \quad (2)$$

なお、 $R(Sa)$ は、2. 2) で示した 2 種類の入力波形から算出される値の平均値とした。

以上より、地盤モデル上の全ての地点において定

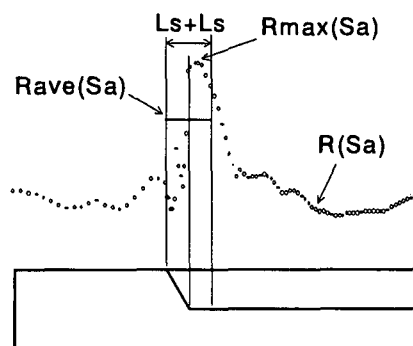


図-2 片側傾斜基盤の平均の取り方

義される $R(Sa)$ のうち、その最大値を $R_{max}(Sa)$ と定義する。

$$R_{max}(Sa) = \max\{R(Sa)\} \quad (3)$$

なお、基盤の形状により増幅率 $R(Sa)$ の分布形状が複雑に変化する等の理由から、上記の $R_{max}(Sa)$ は、耐震設計で考慮すべき地震動の増幅程度を評価する指標としては、必ずしも適切でない可能性もある。そこで、増幅率が大きくなると考えられる区間での $R(Sa)$ の平均値 ($R_{ave}(Sa)$ とする。)を増幅程度の評価値とする検討も行った。平均を取る区間は、片側傾斜基盤については基盤が傾斜している区間を軟質層側に Ls だけ延長した区間 (図-2 の $Ls+Ls$ の区間) とし、両側傾斜基盤については軟質層の区間 (図-1 (b) の $Ls+L2+Ls$ の区間) とした。

2) 地盤の不整形性の評価指標

地盤の不整形性の程度を示す指標として $\Delta T_0[s]$ を用いた。なお、 ΔT_0 は道路橋示方書⁵⁾に示される地盤の特性値 T_0 を用いて、次の通り定義される。

$$\Delta T_0 = T_0^{max} - T_0^{min} \quad (4)$$

ここで、 T_0^{max} は軟質層が最も厚い部分の T_0 、 T_0^{min} は軟質層が最も薄い部分の T_0 である。

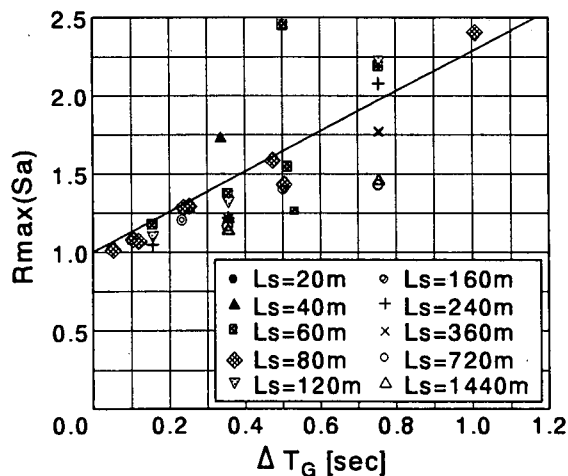
4. 解析結果

1) 増幅特性の定式化

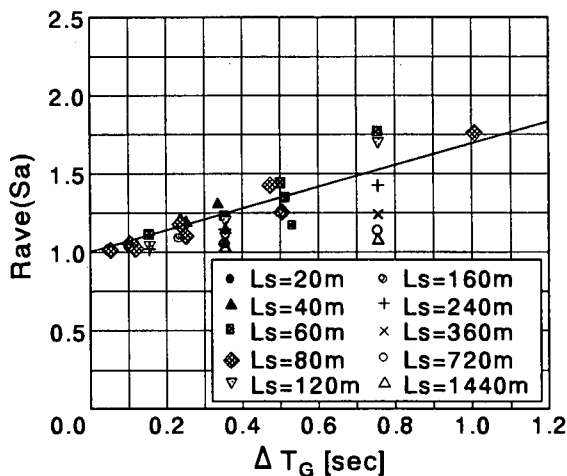
過去の検討より⁶⁾ 片側傾斜基盤の増幅程度について、①基盤の傾斜角度によらない、② ΔT_0 との相関が高いことがわかっているため、その結果も考慮して種々の不整形地盤における地震動の増幅と ΔT_0 の関係を調べた。以下に片側傾斜基盤と両側傾斜基盤について結果を示す。

a) 片側傾斜基盤

片側傾斜基盤について、 Ls が異なるケースの増幅率と ΔT_0 との関係を図-3 (a)(b)に示す。 $Ls \geq 360\text{m}$ では増幅率が低くなることから、 $Ls \leq 240\text{m}$ のケースのみで回帰分析を行い、片側傾斜基盤の評価式として次式を得た。

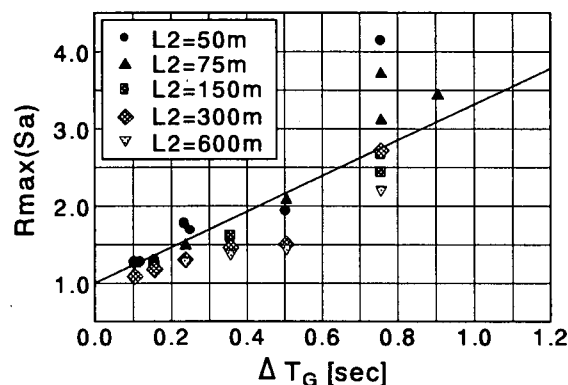


(a) $R_{max}(Sa)$ と ΔT_g の関係

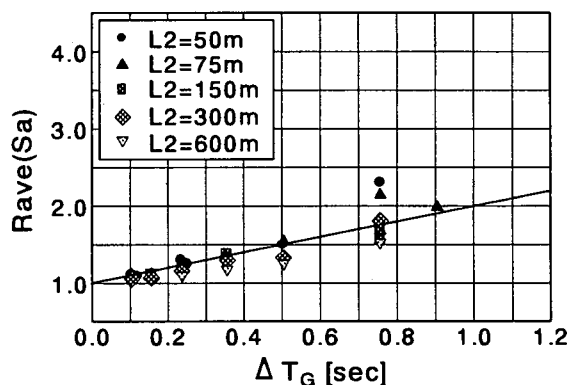


(b) $R_{ave}(Sa)$ と ΔT_g の関係

図-3 片側傾斜基盤の増幅率と ΔT_g の関係



(a) $R_{max}(Sa)$ と ΔT_g の関係



(b) $R_{ave}(Sa)$ と ΔT_g の関係

図-4 両側傾斜基盤の増幅率と ΔT_g の関係

$$R_{max}(Sa) = 1.29 \Delta T_g + 1.0 \quad (5a)$$

$$R_{ave}(Sa) = 0.69 \Delta T_g + 1.0 \quad (5b)$$

(ただし、適用範囲は $L_s \leq 240m$ とする。)

前に示す、図-3 (a)と(b)を比較すると、 $R_{max}(Sa)$ よりも $R_{ave}(Sa)$ の方がばらつきが少なく、 ΔT_g と良い相関を示している。

b) 両側傾斜基盤

両側傾斜基盤については、図-4 (a)(b)のような結果が得られた。なお、両側傾斜基盤においても $R_{ave}(Sa)$ の方が $R_{max}(Sa)$ よりも ΔT_g と良い相関を示している。

両側傾斜基盤の評価式としては次式が得られた。

$$R_{max}(Sa) = 2.31 \Delta T_g + 1.0 \quad (6a)$$

$$R_{ave}(Sa) = 0.99 \Delta T_g + 1.0 \quad (6b)$$

(ただし、適用範囲は $L_2 \leq 600m$ とする。)

2) 基盤が埋没していることの影響

片側傾斜基盤及び両側傾斜基盤（以下、総称して非埋没基盤という）が軟質層下に埋没している場合の地震動増幅特性について検討を行った結果、埋没基盤における増幅特性は図-1 (c)(d)の点線で示されるような、基盤の傾斜部を延長してできる非埋没

基盤の増幅特性と類似していることがわかった。そこで、埋没基盤の ΔT_g をそれに対応する非埋没基盤の ΔT_g に換算して、(5a)(5b)式及び(6a)(6b)式による評価を試みた。なお、非埋没基盤の換算値 $\Delta T_g'$ は次式で与えられる。

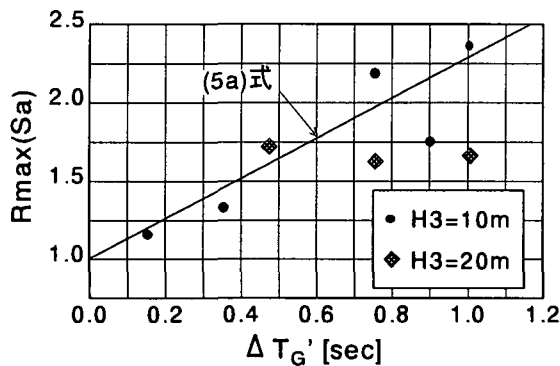
$$\Delta T_g' = \frac{H1}{H1 - H3} \Delta T_g \quad (7)$$

図-5 (a)(b)及び図-6 (a)(b)に結果を示す。結果を見ると、非埋没基盤の評価式は、埋没基盤の増幅率を良く評価できている。しかしながら、このような結果を得られた要因として、地盤モデルの層厚を60mに固定した影響等も考えられるため、今後さらに検討が必要であろう。

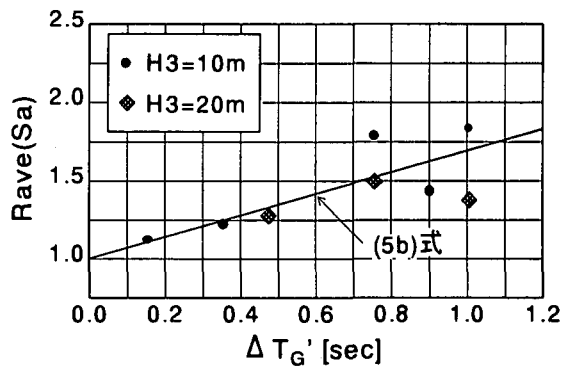
3) 増幅が大きくなる周期帯の評価

地盤の不整形性に起因する地震動増幅特性が大きくなる周期帯について検討を行った。なお、いずれの地盤モデルにおいても増幅が大きくなる周期帯は地点に依らず、ほぼ一定であったので、本検討では、 $R_{max}(Sa)$ が出現する地点の増幅特性を対象とし、その評価指標としては、以下を考えた。

① 軟質層から算定される地盤の特性値 $T_g^{Ac}[\text{sec}]$

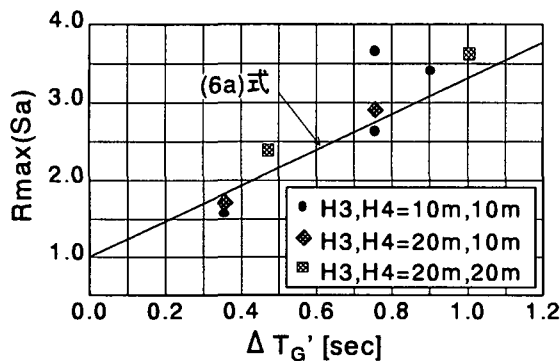


(a) $R_{max}(Sa)$ と $\Delta T_g'$ の関係

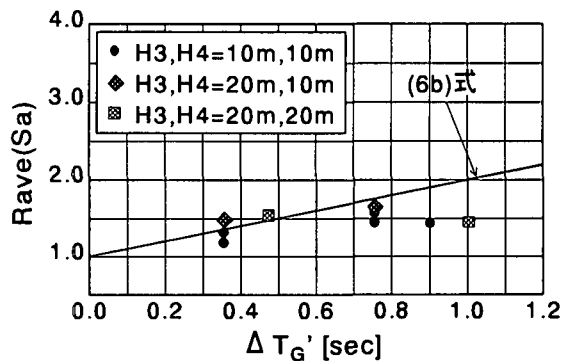


(b) $R_{ave}(Sa)$ と $\Delta T_g'$ の関係

図-5 埋没片側傾斜基盤の増幅率と $\Delta T_g'$ の関係



(a) $R_{max}(Sa)$ と $\Delta T_g'$ の関係



(b) $R_{ave}(Sa)$ と $\Delta T_g'$ の関係

図-6 埋没両側傾斜基盤の増幅率と $\Delta T_g'$ の関係

②レーリー波の群速度が最小となる周期 T_s [sec]

上記指標の妥当性を確認するために、増幅特性を評価する上で有意と考えられる $R_{max}(Sa) > 1.2$ のケースについて、 $R_{max}(Sa)$ を与える固有周期 T と T_g^{AC} 及び T_s の関係を検討した。図-7に示されるように、 T_s は長周期帯で乖離が見られるが、 T_g^{AC} は広い周期帯で T と良く一致している。

5. まとめ

本研究結果として、片側傾斜基盤及び両側傾斜基盤の増幅程度 $R_{max}(Sa)$ 及び $R_{ave}(Sa)$ を ΔT_g で良く評価できることを示し、その評価式を提案した。また、埋没片側傾斜基盤及び埋没両側傾斜基盤の増幅程度は、換算した $\Delta T_g'$ と非埋没基盤の評価式を使って評価できる可能性を示した。さらに増幅率が最大となる周期は、簡単に算出が可能な軟質層の特性値 T_g^{AC} により評価できる可能性を示した。

今後は、評価式の適用範囲及び精度についての検討と、増幅率が最大となる周期や最大値の出現する位置についてのより詳細な検討を行う予定である。

謝辞：本研究に際しては、応用地質(株)土質技術部から多くの協力を得た。ここに託して謝意を表する。

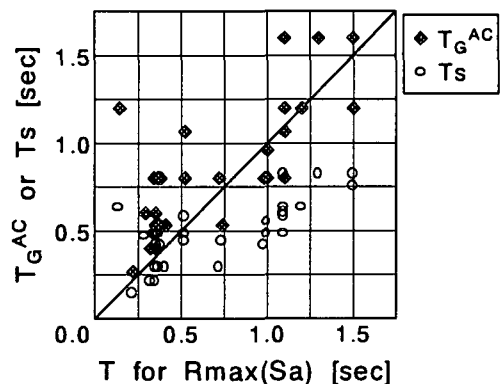


図-7 $R_{max}(Sa)$ を与える T と T_g^{AC} 及び T_s の関係

参考文献

- 岩崎ら：地盤の動的変形特性に関する実験的研究 (Ⅱ)、土木研究所報告、第153号の2、昭和55年3月
- 岩崎ら：沖積粘性土の動的変形・強度特性について、第15回土質工学研究発表会、昭和55年3月
- J.Lysmer, et al. : FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, EERC Report No.75-30, UC, Berkeley, Nov., 1975
- P.B.Schnabel, et al. : SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analyses of Horizontally Layered Sites, EERC Report No.72-12, UC, Berkeley, Dec., 1972
- 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、社団法人日本道路協会、平成8年12月
- 本田ら：軟質層厚さの変化する地盤における地震動増幅特性の評価、土木学会第50回年次学術講演会、平成7年9月