

(59) 地盤の地震時発生せん断応力の簡易評価法

株式会社応用地質調査事務所

同上

同上

正員

正員

正員

今井 常雄

○ 殿内 啓司

兼森 孝

1 はじめに

地盤内の地震時発生せん断応力の評価は、構造物の耐震設計や砂質土の液状化問題を検討していく上で重要であり、これを導くために、波動理論に基づく方法、あるいは有限要素法等を用いて、地盤の地震時応答解析が行われる。また一方で、こういった複雑な方法とは別に、Seed (1971) の提案に代表される簡易な地震時発生せん断応力の評価法もよく用いられている。この方法は、地盤内の単位土柱を剛体と仮定してのベースシアー $\tau = a \cdot G_v / g$ (a : 加速度, G_v : 上載圧, g : 重力加速度) をもとに、実際には剛体でないことによる違いを補正するための低減係数 γ_d を用いて評価するものである。この低減係数 γ_d の値については、Seed のほか、岩崎, 他 (1978) によっても提案されているが、それほど詳細な検討がなされていないのが実情である。そこで、筆者らはこの問題をとりあげ、波動理論に基づく方法を用いた応答計算結果をもとに、低減係数 γ_d について検討を重ねてきた (兼森, 他 (1980), 殿内, 他 (1981))。ここでは、これまでの検討結果をふまえて、一つの簡易な評価手順を提案し、それを用いて地盤の地震時発生せん断応力を評価した例について報告する。

2 低減係数 γ_d に関する検討

低減係数 γ_d についての既報の検討結果をとりまとめると以下のとおりである。

- ① 検討に際しては、筆者らが数多く実施してきたS波の重複反射理論に基づき動的変形特性の存在性を考慮に入れた応答解析の中から、図-1に示す5種類の入射波形による計143ケースのデータを用いた。
- ② 応答解析から得た γ_d を、図-2 (a) (b) には比較のために既報の提案を示す) に示すように従来の深度表示法で整理してみたが、 γ_d は極めて広い範囲に分布しており、既報の提案のように各深度で一定なものではなく、入力条件や地盤条件等に支配されて変動するものであることが明らかとなった。
- ③ 縦軸を地表面からの深度で表わした深度表示法に対し、地表面からのS波の走時 (深度/S波速度) に着目して、これを縦軸とした時間表示法で整理すると (図-3)、入射波形ごとに γ_d 分布の傾向は異なるが、それぞれの分布曲線はよく集中することから、 γ_d は波形ごとにS波の走時を変数として表現できそうである。
- ④ 波動論の立場から、半無限一様媒質を仮定すると、 γ_d は次式のように算かれる。

$$\gamma_d = \frac{1}{\omega T} \sin(\omega T) \text{ ----- (1)}$$

ただし、 $\omega = 2\pi f$, $T = z/V_s$ で、 f は周波数 (Hz), z は深度 (m), V_s はS波速度 (m/sec) である。

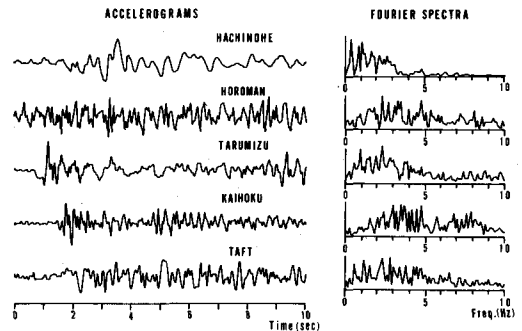


図-1 入射波形一覧

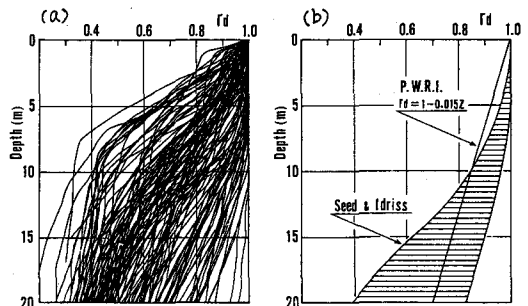


図-2 深度表示の γ_d 分布

ところで、(1)式は定常的な波動を取扱った場合であり、地表面で反射した下降波が到達しない時間($t < z/v_s$)においては、上昇波のみを考えて、 r_d は次のようになる。

$$r_d = \frac{1}{2\omega T} \dots\dots\dots (2)$$

結局、半無限一様媒質の r_d は、(1)、(2)式の大きい方の値で表わされることになり、0.5、1、2、5 Hzの各周波数について求めた r_d 分布は図-4(a)のようになる。一方、図-4(b)は同じ半無限一様媒質における上述の5種類の波形の r_d 分布である。両図を比較すると、ある部分は比較的よく似た傾向を示すが、一つの波形の r_d を、すべての走時に対して単一の周波数の r_d では説明できない。

⑤ 単純化した2層地盤モデルを設定して、 r_d に及ぼす入射波形、地盤条件等の影響について調べた結果、インピーダンス比は r_d 分布にあまり影響を与えず、また、 $1/4$ 波長則に基づく卓越周期は r_d 分布に若干の影響を与えるものの卓越周期の変動に対する r_d 分布の変化の一定の傾向は認められなかった。これに対し、減衰定数 h については、図-5に示すように、 h の増加に伴い r_d も増大する傾向を示している。波形によって変化の程度に差はあるものの、変化の傾向は同じである。また、同図には上述の図-3に示した既存の応答解析から得られた r_d 分布の範囲を併記したが、これによると、減衰定数5%あるいは10%の r_d 分布曲線が既存の r_d 分布曲線によく対応しているといえる。

以上の検討より、結局、 r_d 分布を規定する要因として、入射波形、走時(S波の速度構造)および減衰定数が抽出された。しかし、これらの要因のうち、減衰定数に関しては、入射波形や走時と比べて、それ程大きな影響を与えてはいない。したがって、

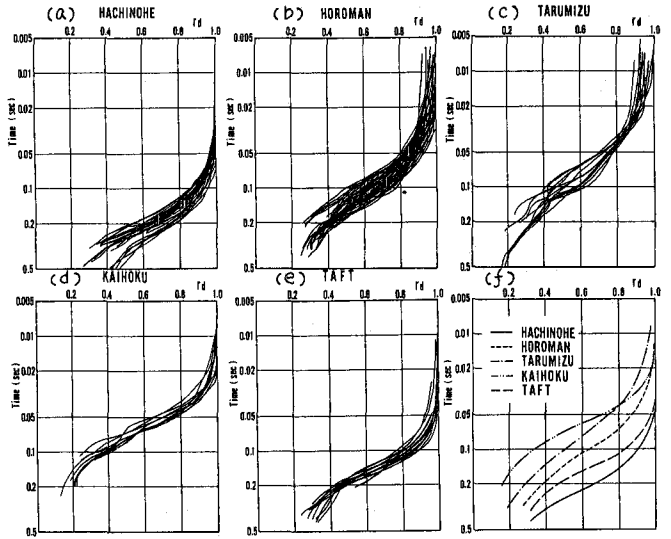


図-3 時間表示の r_d 分布

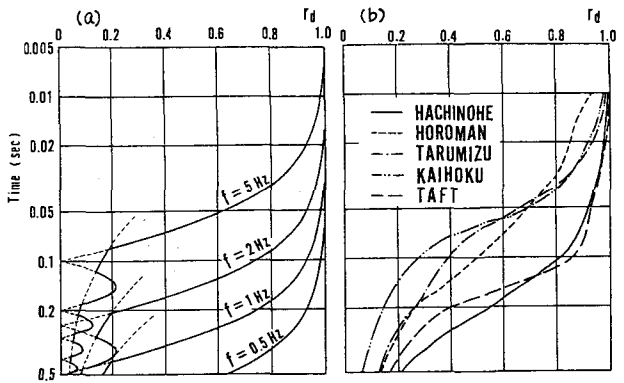


図-4 半無限一様媒質の r_d 分布

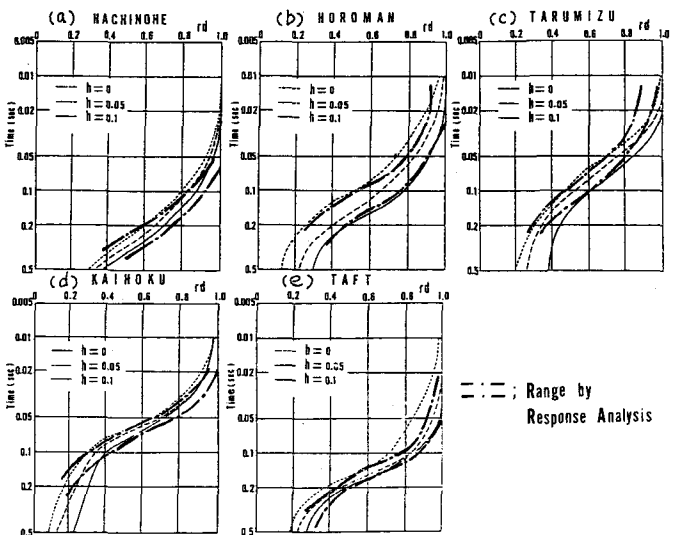


図-5 2層地盤モデルの r_d 分布

簡易法という立場からみれば、入射波形および走時の2つの要因で γ_d を標準化し、分布曲線を規定すれば、実用上精度的にはとくに問題ないと思われる。このようはことから、ここに、図-3(4)に示した入射波形別の γ_d 分布曲線を利用して標準化されたものとして提案する。なお、図-3に示すような数多くの応答解析によるデータのない場合には、図-5に示すような減衰定数5%あるいは10%の2層構造モデルから求める γ_d 分布曲線を用いればよいであろう。

3 地震時発生せん断応力評価の手順

S波速度(剛性率)の依存性を考慮した、せん断応力の評価法として、図-6にその流れ図を示すように、以下の手順による方法を提案する。

- 1) まず、最初に設定したモデルのS波速度を用いて、地表から1尺中自深度までの走時を計算する。
- 2) 別途決定した波形の γ_d 曲線より(1)の走時に対応した γ_d 値を読みとり、せん断応力を算出する。
- 3) せん断応力を剛性率で除してせん断歪を求める。
- 4) 得られたせん断歪を有効歪に変換した後、歪依存曲線(図-8参照)を用いて、その歪に見合うようにS波速度を変更する。
- 5) 新しいS波速度を用いて、上記(1)~(4)の手順をくり返し、発生歪のくり返し率の変動が判定値(10%程度)以内に収束するまで続ける。
- 6) 1尺が収束すれば、2尺、3尺と順次下尺に移り、基盤以浅の各尺の収れんしたS波速度を求める。
- 7) こうして得られたS波速度構造を用いて目的の深度までの走時を計算し、 γ_d 分布曲線から読みとった γ_d 値を用いてせん断応力を求める。

4 評価の実施例

図-7に示す7種類の地盤モデルに、2種類の入射波形(HACHINOHE, KAIHOKU)を入力させ、応答解析を行ってせん断応力を求め、(a)上述の今回提案の方法、(b) γ_d 分布は今回提案の時間表示のものを用いるが、歪依存性を考慮しないで初期モデルのS波速度を使う方法、(c)深度表示の γ_d

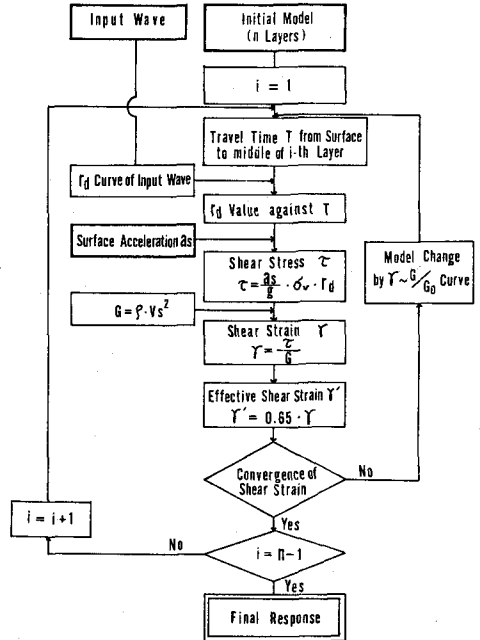


図-6 評価手順の流れ図

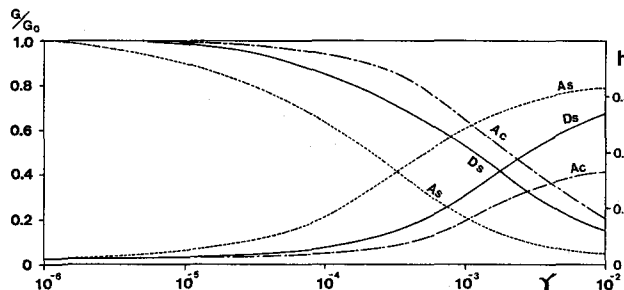


図-8 歪依存曲線

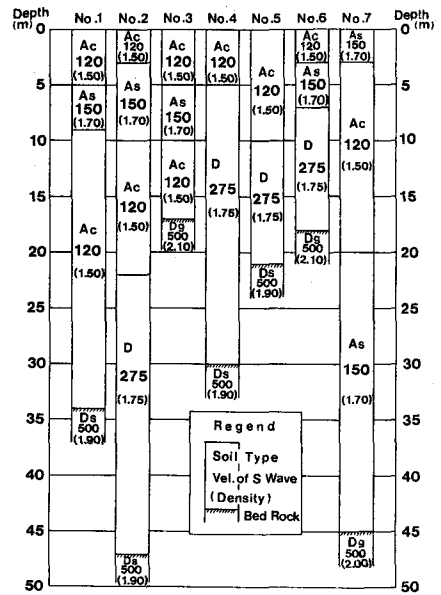


図-7 計算モデル一覽

分布 ($\gamma_d = 1 - 0.015Z$)を用いた従来の方法、の3とありの簡易評価法から求めたせん断応力と比較した。なお応答解析および(a)の方法の計算には図-8に示す有効応力曲線を用いた。さて、種々の方法より得られたせん断応力の比較したものを図-9、図-10に示す。(a)の方法によるものは、いずれも応答計算結果とよい一致をみせている。(b)の方法によるものも比較的よく一致しているが、全体に応答計算結果より大き目である。また、(c)の方法では、一致するものもあるが、応答計算結果と大きく異なるものもある。ちなみに、図-11は(a)の方法で求めさせたS波速度と応答解析の結果の求めたS波速度を比較したものである。両者はよい一致をみせており、この結果からも今回提案の方法の妥当性を評価できる。以上のように、今回提案の時間表示の γ_d 分布を用いる方法は、詳細な応答計算と近似する簡易評価法といえよう。

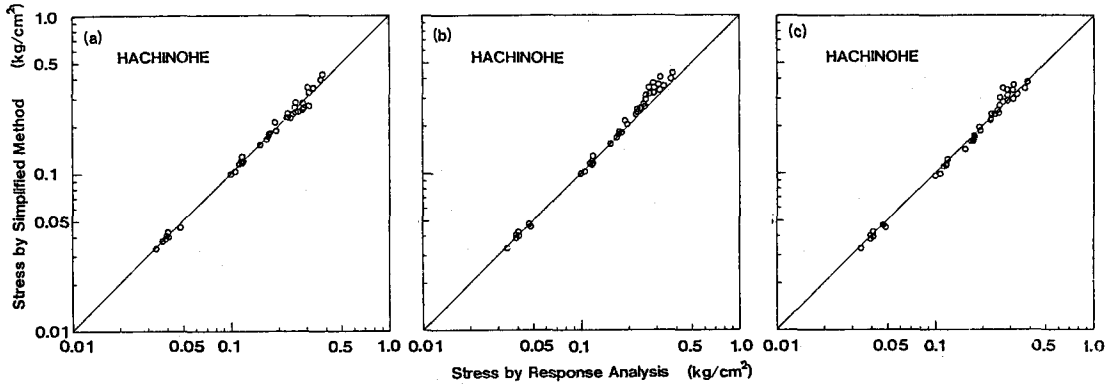


図-9 応答解析と各種簡易評価法から得たせん断応力の比較(入射波: HACHINOHE)

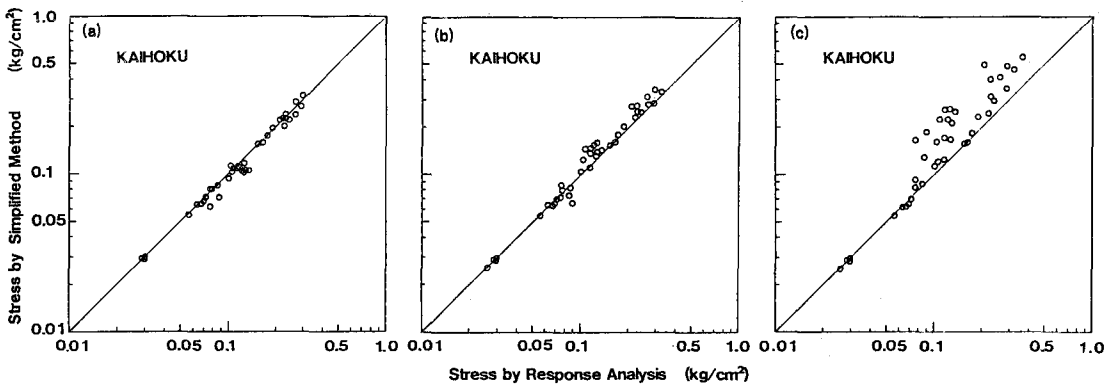


図-10 応答解析と各種簡易評価法から得たせん断応力の比較(入射波: KAIHOKU)

参考文献

- 1) Seed, et. al. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Proc. ASCE, SM 9
- 2) 岩崎, 他 (1978), "地盤の流動化の判定方法", 土木技術資料, vol. 20, No. 4
- 3) 兼森, 他 (1980), "地中の地震時発生せん断応力の評価", 土木学会第35周年記念講演会
- 4) 殿内, 他 (1981), "地中の地震時発生せん断応力の評価(2)", 地盤工学研究報告発表会

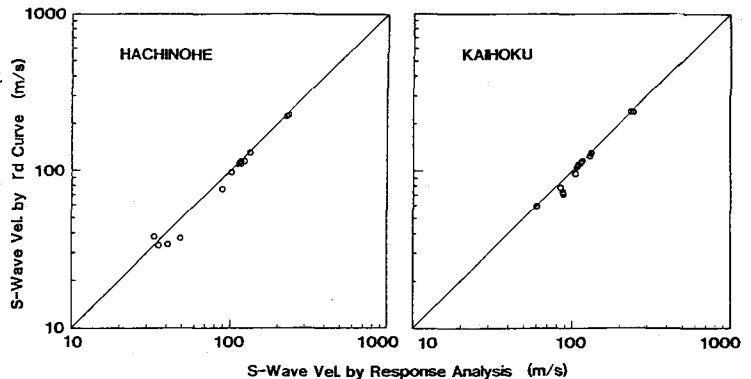


図-11 応答解析と簡易評価法から得たS波速度の比較