

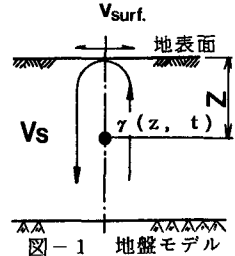
(33) 地盤内せん断ひずみの簡易推定法に関する一考察

建設省土木研究所 佐々木 康

〇 福岡 浩明

1. まえがき 地震時に地表近くの地盤内で発生する不安定現象は震源域で放出されたエネルギーが地盤内を伝播することに起因し、地震波の伝播にともなって地盤内にはひずみが発生する。基礎構造物及び土構造物を設計する場合には、最大加速度のみならず地盤に生じるSH波によるせん断ひずみを如何にして把握または抑制するかが、耐震設計上の重要な課題である。

表層地盤のせん断ひずみを推定するには、各種の地盤応答解析プログラムが提案されているが、入力用の地震動の設定等には非常に煩雑な手続き及び高度な判断を必要とする。本報告は入力地震動を設定せずに、工学的誤差の範囲内で直接的にマグニチュード・震央距離・地盤種別・地盤条件（せん断波速度）の4条件から地盤内に発生するせん断ひずみを推定する手法を検討したものである。



本推定法は、表層地盤を図-1に示す一層系地盤として表層のごく浅い部分のせん断ひずみを対象としたものである。また、地盤内での液化化・破壊・沈下等の現象を主たる対象と考え、発生するせん断ひずみの最大値ではなく、せん断ひずみの累積値の推定を試みた。

2. 地盤内せん断ひずみの計算法 地盤内せん断ひずみの推定には以下の仮定を設けた。

- ①一層系地盤を仮定し、表層の浅い範囲（10m～20m以内）を推定の対象とする。
- ②地盤内せん断剛性は一定である。（線形状態）
- ③地震波は伝播方向が鉛直な弾性波として、重複反射理論を使用する。（粘弾性地盤と考える）

上記の仮定は、地盤を最も単純化したものであるが適用範囲を限定すれば十分に適用性はある。たとえば土岐¹⁾の研究によれば、表層10m～20m以内では地盤の持つ減衰の影響は小さいとの報告もあり、金井²⁾は線形状態での重複反射理論により、計算波形と観測波形との一致性を確かめている。また、表層の浅い部分にインピーダンス比の高い中間層が存在することもきわめて少ないと考えられる。

この地盤モデルにおいて、深度：Z (m)、時刻：t (秒)での地盤内せん断ひずみ：γ (%)は、重複反射理論より(1)式で表現される（図-1参照）。

$$\gamma(z, t) = \frac{1}{2 \cdot V_s} \{ V_{surf}(t + \frac{Z}{V_s}) - V_{surf}(t - \frac{Z}{V_s}) \} \quad (1)$$

$V_{surf}(t)$: 地表での水平速度記録 (cm/s)

V_s : 地盤のせん断波速度 (m/s)

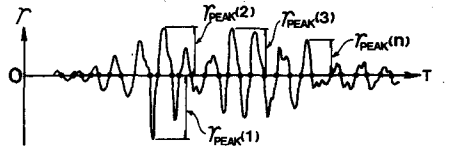


図-2 せん断ひずみ波形の繰返しの定義

3. 累積せん断ひずみの定義 地盤内での地震時の不安定挙動として液化化現象があるが、この現象の程度（間隙水圧比）は地盤内でのせん断ひずみの累積値で推定できるという報告³⁾がある。また、地盤の安定性を検討する場合は、地震動継続時間内での地震動最大値よりも繰返し特性の影響が大きい場合が多い。

したがって、ここでは最大せん断ひずみではなく、せん断ひずみの累積値を推定する。図-2に示すようなひずみ波形が零線と交わった瞬間から次に零線と交わる瞬間の半波を1回の繰返しとし、半波内でのピーク値を $\gamma_{peak}(n)$ とする。このひずみのピーク値を大きい順に総繰返し回数分、抽出すると次式となる。

$$\gamma_{peak}(1) \geq \gamma_{peak}(2) \geq \dots \geq \gamma_{peak}(n) \geq \dots \geq \gamma_{peak}(N_{max}) \quad (2)$$

N_{max} : ひずみ波形継続時間中の総繰返し回数

次に、せん断ひずみに起因する現象の過程を表現する指標として累積せん断ひずみ (%) を(3)式で定義する。

$$\sum_{n=1}^{N_{max}} \gamma_{peak}(n) = \gamma_{peak}(1) + \gamma_{peak}(2) + \dots + \gamma_{peak}(n) + \dots + \gamma_{peak}(N_{max}) \quad (3)$$

4. 累積せん断ひずみ換算係数の定義

2. に示した様に地盤上での速度記録をベースとして重複反射理論

により、地盤内のせん断ひずみを推定するために、(4)式で示す累積せん断ひずみ換算係数(R)を定義する。

$$R(\Delta t) = \frac{\Sigma^{**} [v_{surf}(t+\Delta t) - v_{surf}(t-\Delta t)]}{\Sigma^{**} [v_{surf}(t)]} \quad (4)$$

Δt : 深度(Z:m)に対応する時間ずれ量 ($=z/V_s$) (秒)

$\Sigma^{**} []$: 3. で定義した累積方法を表わす。

したがって、任意深度における累積せん断ひずみ(%)は(1), (4)式より次式となる。

$$\sum_{n=1}^{N_{max}} \gamma_{peak}(n) = \frac{1}{2 \cdot V_s} \cdot R(\Delta t) \cdot \Sigma^{**} [v_{surf}(t)] \quad (5)$$

(5)式中の地表速度記録の半波を対象としたピーク値の累積値 ($\Sigma^{**} [v_{surf}(t)]$) には、物理的意味は無いが、一種のパワー的な量であることはわかる。そこで、G.W.Housner⁴⁾が定義したS I値(減衰定数20%, 一自由度系の速度応答スペクトルにおける周期 0.1~ 2.5秒までの平均値)と比較したのが図-3である。表層に泥炭層が存在したり、30m以上の軟弱層を持つ地盤上観測箇所(a, b)及び谷地形や斜面近傍での観測箇所(c, d)を除くと、速度ピークの累積値は概ねS I値に比例した地震動強度を表現しているものと考えられる。

5. 累積せん断ひずみ換算曲線の特徴

(4)式において累積せん断ひずみ換算係数(R)は、分子・分母のいずれも累積回数(N_{max})を含むが、 N_{max} の設定の影響は非常に小さい。したがって、Rの値はひずみ算出深度に対する時刻ずれ量(Δt)を変数とし、

速度記録の特徴のみを表現する関数と考えられる。速度記録のデータ間隔でR(Δt)の値を時刻ずれ領域で連ねたものを累積せん断ひずみ換算曲線(以下、R曲線)と定義する。

R曲線を67観測地点、既往の197組394成分の地盤上強震記録について整理した。代表的な強震記録に対するR曲線を0.35秒までプロットすると図-4となる。曲線形状は概ね図-5の4タイプに分類されることが判明した。各観測所での地盤条件と照合すると、表層地盤が厚い程また軟弱な程、タイプ-4の傾向が現れる。

同一観測所での記録を比較すると震央距離が大きい程、タイプ-4に近い形状になる(図-6)。この特徴は(1)式から判断して、上記の条件により地表速度記録が長周期化する

ことにより発生するものと思われる。

そこで、震源でのスペクトルの特性を無視して、表層地盤の特性を道路橋示方書第V編(耐震設計編)の地盤種別で分類してみる。ここでの

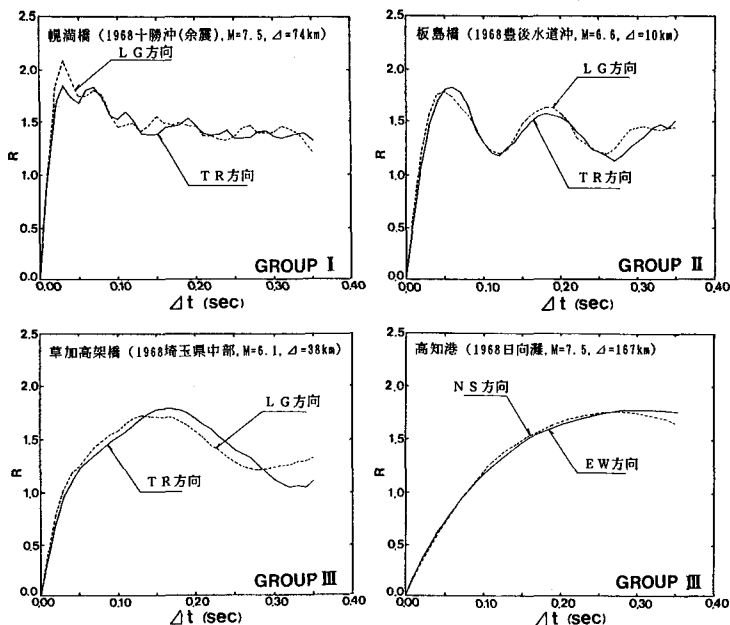
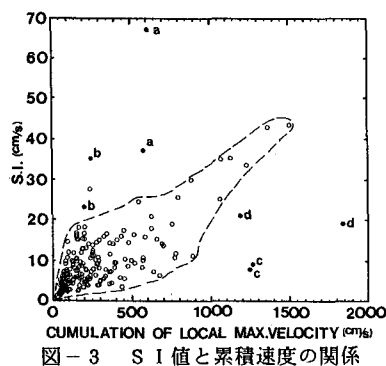


図-4 代表的強震記録のR曲線

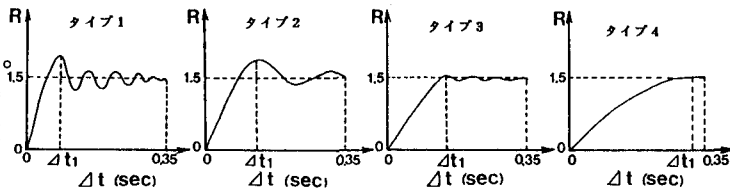


図-5 R曲線形状の代表的タイプ

I, II, III種地盤は、道示による地盤の固有周期で分類した1, 2+3, 4種地盤に対応する。図-7に地盤分類別のR曲線の時刻ずれ領域での、平均値と平均値±標準偏差を示す。3種類のR曲線を比較すると、曲線形状には次の特徴が指摘できる。

- ① $\Delta t = 0 \sim 0.15$ 秒間は、地盤種別の影響を受けていることがわかる。
- ② 最終的には地盤種別によらず $R = 1.5$ 前後に収束する。
- ③ 標準偏差は $0.10 \sim 0.30$ で、III種地盤の分散が大きい。

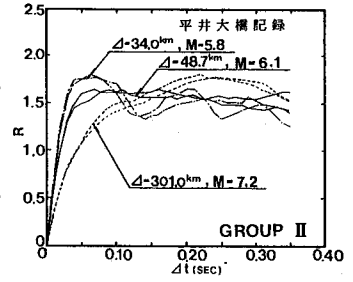


図-6 R曲線と震央距離

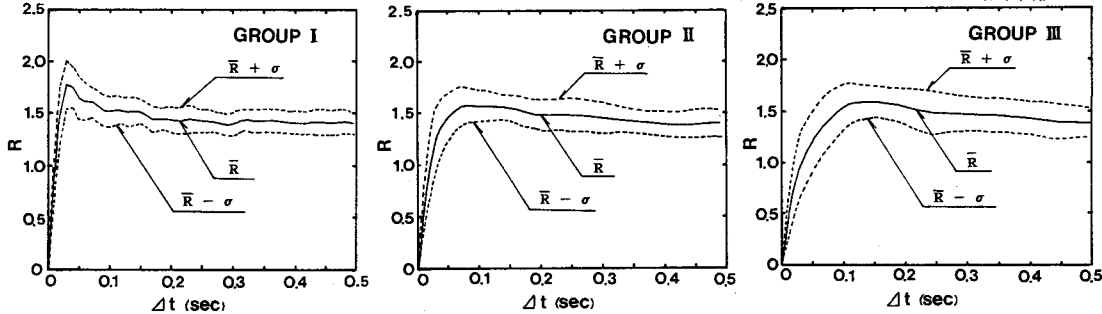


図-7 地盤分類別の平均R曲線

次にR曲線の形状を決定する要因について検討を加える。R曲線は $\Delta t = 0.35$ 秒で約 $R \approx 1.50$ に落ち着くため、図-8中に示す曲線形状を決定する R_{max} と Δt_1 の2変数について統計的に検討を加えた結果を表-1, 2に示す。 R_{max} の平均値はII, III種地盤間には差はなく、 Δt_1 は地盤の固有周期が長くなるにしたがい大きくなっていることから、R曲線形状を支配しているものは Δt_1 であると考えられる。 Δt_1 は速度記録の周期特性と関係があると考えられるので、 Δt_1 と各速度記録のフーリエスペクトル卓越周期と平均ゼロクロス周期： T_z （地震動継続時間を総ゼロクロス回数で除して2倍した値）とを比較した。その結果、 Δt_1 は図-9に示すように速度記録の平均ゼロクロス周期と相関が高いことが判明した。

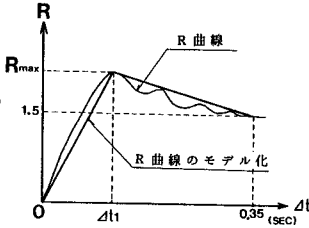


図-8 R曲線のモデル化

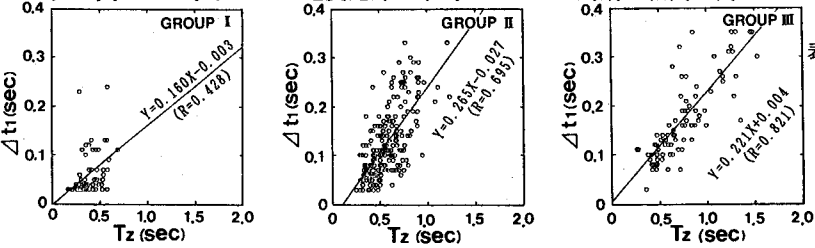


図-9 Δt_1 と平均ゼロクロス周期の関係

6. 地盤内累積せん断ひずみ分布の推定

(5)式より、地表での速度記録の累積値と地盤のせん断波速度(V_s)が求められれば、地盤内の累積せん断ひずみの深度分布が求められる。

地盤上での速度記録の累積値に関しては、最大速度の距離減衰式⁵⁾及び速度の繰返し特性⁶⁾に関する研究より、マグニチュード(M)、震央距離(Δ : km)、地盤種別($G C_i$)から実用的な範囲内の推定は可能である。R曲線に対しても上記の実用性から、 M , Δ , $G C_i$ からの推定法を検

表-1 地盤分類別 R_{max} 値の平均

	平均	標準偏差
I 種地盤	1.8725	0.1651
II 種地盤	1.7509	0.1038
III 種地盤	1.7508	0.0971

表-2 Δt_1 発生頻度分布 単位 成分数

	I 種		II 種		III 種	
$0.00 \leq \Delta t < 0.05$	61	66.3%	17	7.9%	1	1.1%
$0.05 \leq \Delta t < 0.10$	13	14.1	71	33.2	13	14.8
$0.10 \leq \Delta t < 0.15$	16	17.4	58	27.1	28	31.8
$0.15 \leq \Delta t < 0.20$	—	—	29	13.6	21	23.8
$0.20 \leq \Delta t < 0.25$	2	2.2	18	8.4	7	8.0
$0.25 \leq \Delta t < 0.30$	—	—	18	8.4	7	8.0
$0.30 \leq \Delta t < 0.35$	—	—	3	1.4	11	12.5
計	92	100.0	214	100.0	88	100.0
平均	0.0558 sec		0.125 sec		0.169 sec	
標準偏差	0.0413 sec		0.0712 sec		0.0808 sec	

討する価値は高いと思われる。

そこで、既往の 197組の強震記録中のⅡ種地盤 107組の記録に対して、 $\Delta t = 0.02$ 秒でのR値をプロットしたものが図-10である。M, Δ が大きい記録程、R値は小さい傾向を示しているが、データのばらつきは大きい。この特徴は同様にⅢ種地盤でも確認されるが、Ⅰ種地盤ではM, Δ の影響は判断できなかった。

現在、検討段階ではあるが仮に各 Δt の値でのR値を次式で推定すると、代表的な(M, Δ)の組合せに対するⅡ種地盤のR曲線は図-11となる。

$$R(\Delta t, M, \Delta, GC_i) = e_1 \cdot 10^{e_2 \cdot M} \cdot (\Delta + 30)^{e_3} \quad (6)$$

e_1, e_2, e_3 : 各地盤種別 (GC_i)・時間ずれ量 (Δt)

毎に定まる定数

したがって、M, Δ , GC_i から地盤上の最大速度及び繰返し特性が推定でき、かつ今回の推定を試みたR曲線の精度が高まれば、表層地盤の浅い部分の累積せん断ひずみ分布を直接的に算定することが可能となる。

7. まとめ

弾性波動の重複反射理論を用いた累積せん断ひずみ換算係数(曲線)を定義し、その推定を既往の速度記録から試みた結果、累積せん断ひずみ換算係数には、以下のような特徴があることがわかった。

- ①地盤種別の影響を受ける。
- ②速度記録の周期特性(平均ゼロクロス周期)に影響を受ける。
- ③マグニチュード、震央距離、地盤種別から推定できる可能性を有する。

累積せん断ひずみ換算係数の推定精度が上があれば、表層地盤の比較的浅い部分(10m~20m以内)の累積せん断ひずみがM, Δ , GC_i から直接的に推定できるため、文献3)と組み合わせることによって簡便な液状化程度の推定への適用が考えられる。また、R曲線は地盤上速度記録の周期特性を反映するため地盤区分の指標となる可能性を有する。

しかし、本検討は線形状態を仮定しているため、土の非線形性と共に液状化の程度とせん断波速度の関係とを考慮した検討が必要である。せん断ひずみはせん断波速度に敏感に反応するため、最終的なせん断ひずみ推定の際には、せん断波速度の設定に注意が必要である。また、地表面で観測された地震記録には実体波のみならず表面波成分が含まれているため、その影響も検討しなくてはならず、今後、解決すべき問題点は多く残されている。

なお、本報告は筆者のうちの一人が部外研究員として建設省土木研究所にて行った研究の一部をとりまとめたものである。

【参考文献】

- 1)土岐憲三：地震記録による地盤震動分布の推定，土木学会論文報告集第 207号，1972年，11月
- 2)金井清：地震工学，共立出版
- 3)佐々木，増井：累積せん断ひずみに基づく間隙水圧発生量の算定，土木学会第43回年次学術講演会
- 4)Housner, G. W. et. al: The capacity of extreme earthquake motions to damage structures, in "Structural and Geotechnical Mechanics-A volume Honoring N.W. Newmark" (1977)
- 5)建設省土木研究所：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法(その4)，土木研究所資料，第1993号
- 6)佐々木，田村，福岡：地震動速度の繰返し特性に関する研究，土木学会第44回年次学術講演会(投稿中)

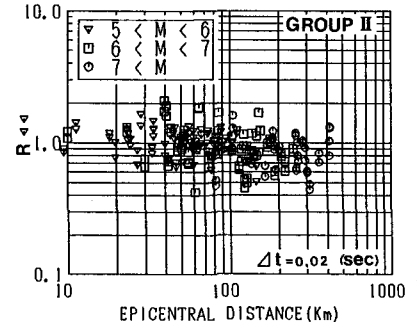


図-10 $\Delta t = 0.02$ 秒でのR値とM, Δ の関係

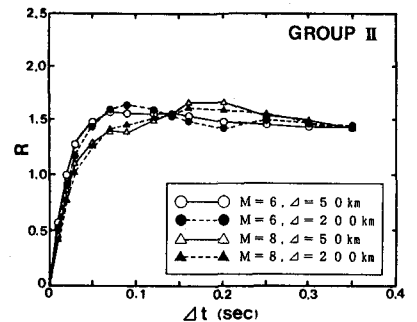


図-11 Ⅱ種地盤での代表的M, Δ の組合せによるR曲線