

(76) 強震記録に基づいた地盤非線形化分析 —手法と事例—

(財) 鉄道総合技術研究所 中村 豊
(株) システム アント データリサーチ 渡辺 保宣

1. はじめに

表層地盤の地震動増幅特性を把握することは、土木構造物の地震時挙動や被害の推定を行う上で重要である。中村³⁾は、常時微動微動を用いて簡便に表層地盤の地震動特性を把握する手法を提案している。しかし、これはあくまでも線形挙動の範囲内であり、大地震動時の地盤・構造物の被害を精度よく想定したり、分析したりするには表層地盤の非線形特性を把握する必要がある。こうした観点から、中村ら²⁾は地盤表面での地震動記録を用いて表層地盤の非線形特性を推定する方法を提案している。提案当時は非線形性が明確に現れた大きな記録はほとんどなかったが、近年大きな地震が多発し、0.5 Gを越える強震記録が多数収集されている。そこで、すでに提案した方法を改良するとともに、これらの記録を用いて、表層地盤の非線形特性の時系列的な変化を検討したので報告する。

2. 基本的な考え方

中村らによれば、表層地盤のせん断歪 γ は次式で推定される (CF. 参照)¹⁾。

$$\gamma = K \alpha_B / (\pi V_B)^2 \cdots (1)$$

ここに、 $K = A^2 / F$ 、 α_B は基盤加速度、 V_B は基盤のS波伝播速度である。

地表面加速度 α_s を用いる場合には、次のようになる。

$$\gamma = K^* \alpha_s / (\pi V_B)^2 \cdots (2)$$

ここに、 $K^* = A / F$ 、 $\cdots (2)$

$$F = V / (4H) \text{、ゆえに } V = 4HF \text{、となる。}$$

また、 $V = (G / \rho)^{0.5}$ であるから、初期剛性を G_0 とすれば、剛性低下は次式で与えられる。

$$G / G_0 = (\rho V^2) / (\rho V_0^2) = (4HF)^2 / (4HF_0)^2 = (F / F_0)^2 \cdots (3)$$

減衰定数 h は増幅倍率 A と次の関係にある。

$$h = 1 / (2A) \cdots (4)$$

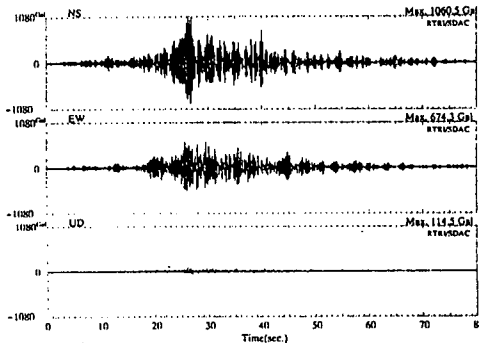


図 1 a 強震記録波形(厚岸941004)

地 点	震源時	震央位置	規模	深さ	震央距離	最大値	表 層	液 状	微動QT
			M	km	km	gal	地 質	状 態	A F Hz
八戸	870109	岩手県 北部沿岸	6.6	72	77	N 632 E 654		無	倍 7.6
	941228	三陸はるか沖本震	7.5	0	179	N 636 E 705	粘性土	無	
	950107	三陸はるか沖余震	6.9	50	73	N 1123 E 953		無	
豊頃	930115	釧路沖	7.8	34	103	N 612 E 664	砂質土 ? 軟岩	無	4.7:13.2 6.0:10.9
黒松内	930712	北海道 南西沖	7.8	34	92	N 400 E 498	砂質土 軟岩	無	3.6:4.81 2.9:4.79
厚岸	941004	北海道 東方沖	8.1	20	253	N 1061 E 674	砂質土	有	13.1:5.54 11.9:5.22
音別					328	N 145 E 169	砂質土	無	3.1:1.05 2.8:1.10
※-174 ソフトCL 鷹取	950117	兵庫県 南部	7.2	20	20	N 341 E 284	砂質土 埋立地	有	1.6:0.59 1.8:0.54
					14	N 659 E 733	砂質土	有	3.2:1.78 4.2:1.81

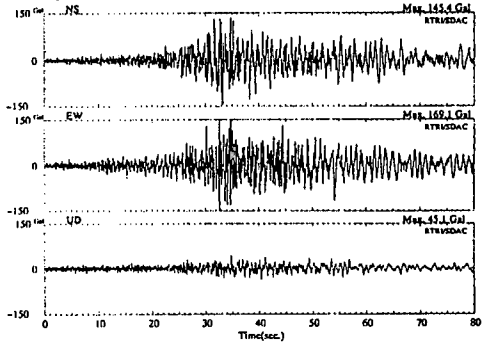


図 1 b 強震記録波形(音別941004)

3方向の地震動波形のランニングスペクトルから時々刻々のQTスペクトル（水平／上下スペクトル比で表層地盤の伝達特性を近似している¹⁾）を算出し、各時刻における表層地盤の卓越振動数Fと増幅倍率Aを計測する。このF、Aおよび当該時刻区間の記録最大加速度（ベクトル合成値）を使って、各時刻における、歪 γ （（2）式により）、剛性低下 G/G_0 （（3）式により）、減衰定数 h （（4）式により）を算定する。

これから、 $G \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ の図上で時間経過とともに表層地盤がどのように非線形化するか、また、回復するかを可視化することができる。

具体的には、1024個（約10秒間）の区間長の強震波形を5秒ずつづつらしながら、それぞれのフーリエスペクトルとQTスペクトルを算出した。ランニングQTスペクトルの例を図2に示す。また、それぞれの成分毎のフーリエスペクトルとQTスペクトルの第1次ピークの変化を図3に例を示す。

トリガー式記録では、記録はある程度大きくなってからしか記録されていない。遅延メモリがある場合でも、地震波到着以前のデータは十分な精度を持っていないので、規準となる固有振動数は常時微動測定によるものを採用した。また、常時微動測定を行っていない観測点についてはランニングスペクトル中最も高い卓越振動数を採用した。

3. 分析に用いた強震記録

今回の分析に用いた強震記録の地震諸元などのデータを表1に示す。この中には八戸観測点のように同じ場所で、異なる地震の記録も含まれている。図1に記録波形例を示す。分析には最大164秒間のデータを使用した。なお、神戸ポートアイランドの記録は神戸市で観測されているものを「関西地震観測研究協議会」（以下、関震協と略称する）を経由して入手した。

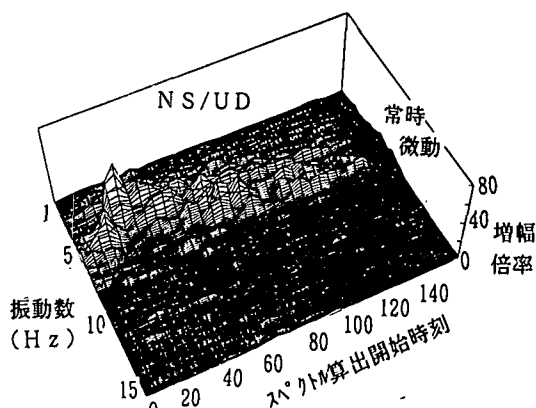


図2 ランニングQTスペクトルの例(厚岸941004)

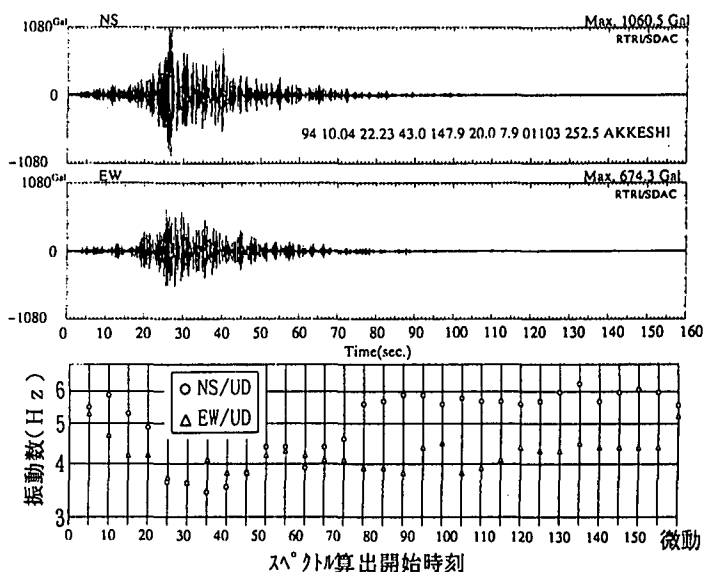


図3 ランニングQTスペクトルのピーク変動と波形の対応(厚岸941004)

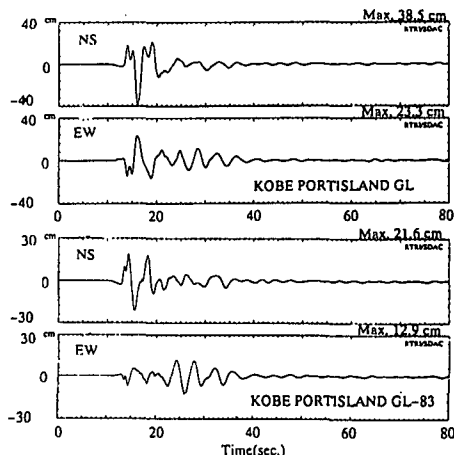


図4 ポートアイランド変位変換波形(地表, GL-83m)

4. 提案手法により推定したせん断歪と実測歪の比較

まず、提案手法により推定した表層地盤のせん断歪を地中と地表面で観測記録した波形から相対変位を算定して得た歪と比較する。用いた波形は、兵庫県南部地震によるポートアイランドの地表と地中(GL-83m)の記録を特性変換⁴⁾した変位波形で、図4に示す。実測歪は水平面内の地表と地中の同時刻の変位差の2乗平均値を求め、表層厚さで除して各時刻毎の相対歪を算出した。推定歪は地表面の記録のみを用いて算定されたもので、基盤S波伝播速度は600m/sと仮定した。

図5は、地表のランニングスペクトルから求めた推定歪と実測歪を比較したものである。これによると、両者は概ね一致しており、提案した方法で表層地盤に生じるせん断歪が的確に算定されることを示している。発生歪は 10^{-6} から 10^{-2} 近くにまで達しており、兵庫県南部地震により大きな歪が発生したことがわかる。

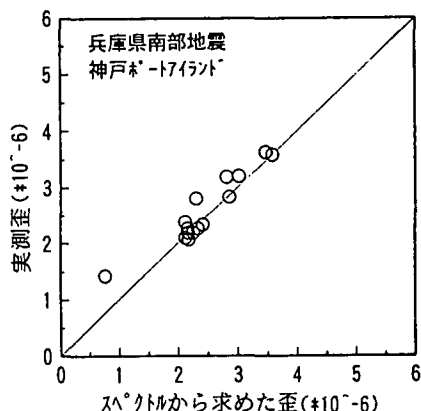


図5 スペクトルから求めた歪と実測歪の比較

5. 発生せん断歪と剛性比の関係

図6は、いくつかの地点の記録から算定された剛性率比 G/G_0 とひずみ γ の関係を示したものである。八戸観測点では、岩手県北部沿岸(654Gal)、三陸はるか沖(705Gal)およびその余震(1123Gal)の地震について計算されているが、非線形化の傾向はいずれもよく似た傾向を示している。

図2は厚岸駅の北海道東方沖の記録(1061Gal)のランニングスペクトルから算定したQTSの卓越振動数の変化をみたものであるが、地震動振幅の増大とともに振動数が低くなり、振幅が小さくなってしばらくして徐々に卓越振動数が高くなっているのがよくわかる。剛性でみると(図6)、 10^{-4} あたりから剛性が低下し始め、 10^{-1} 近くの大きな歪まで一気に30%程度の剛性が低下している。その後、徐々に剛性は回復している。

兵庫県南部地震の際の鷹取駅では、 10^{-2} 程度のひずみが一気に発生して剛性が2割程度まで低下し、地震動が収まると、徐々に剛性が回復し 10^{-4} 程度の歪では50%まで復元している。こうした分析からも鷹取駅は液化化(ないしは塑性化)したことは確実である。

八戸観測点の地盤は粘性地盤、鷹取駅、豊頃駅、黒松内駅、厚岸駅および音別駅は砂質地盤と考えられ、地表面の強震記録から推定される剛性比と発生せん断歪の関係は、これまでに報告されている

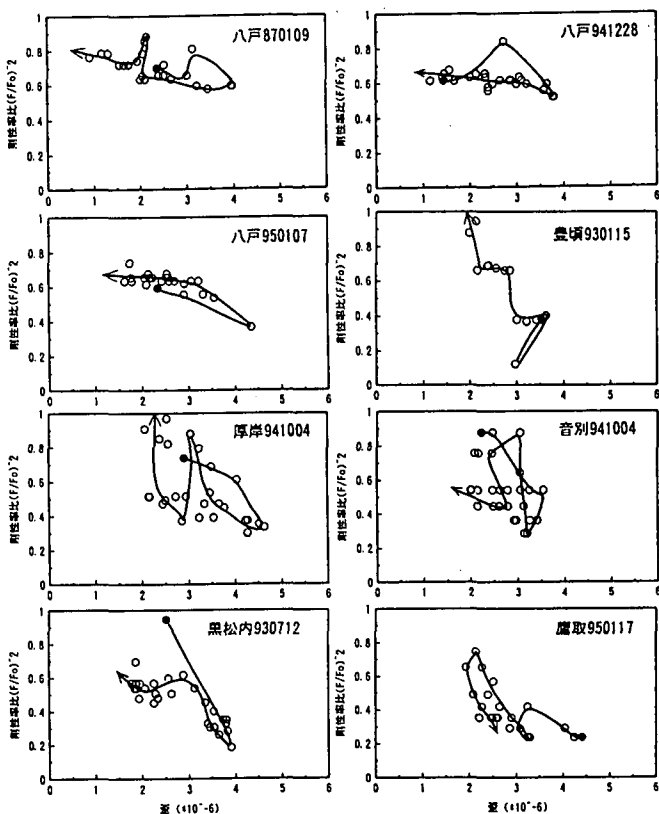


図6 歪と剛性率比の関係

原位置試験や室内における圧密試験などの結果から得られた $G \sim \gamma$ 曲線と大きく矛盾しない。

6. 発生せん断歪と減衰定数の関係

図7は、提案した方法で減衰定数を推定して、発生せん断歪に対してプロットしたものである。これによると、せん断歪の増大とともに減衰定数が低下している。また、減衰定数は数%～6%程度であるが、音別駅では10%を越えている。一般に地盤の減衰は歪の増大と共に大きくなるとされている。しかし、剛性が低下すれば、基盤に対する見かけの増幅倍率は増大することになるから、本分析でもみられたように、見かけ上、減衰は低下するのではなかろうか。今後さらにデータを収集して、土質条件との関係でも検討してみたい。

7. まとめ

ここでは、地表面での強震観測記録に基づいて、表層地盤に発生するせん断歪の大きさを時系列的に推定

する方法を提案した。提案手法を、地表と地中で同時に観測した記録を用いて検証した結果、実測されたせん断歪と地表面のみの記録から推定されたせん断歪がよく一致することが確認された。さらに、さまざまな強震記録を用いて、剛性および減衰定数と発生せん断歪の関係を検討した。その結果、 $G \sim \gamma$ 関係図についてはこれまでの室内試験などとも整合するものが得られた。 $h \sim \gamma$ 関係図については、これまでのせん断歪の増大とともに減衰定数 h が増大する様子は見られず、むしろ増大する傾向が認められた。

今後、強震観測点付近の地盤を採取して、室内試験との比較をするなどして、提案手法の有効性をより直接的に確認することを試みる。

謝 辞：警報地震計を管理されているJR関係者の方々、記録の入手にご協力頂いた「関震協」の方々および神戸市の方々に深謝の意を表します。

参考文献：1) 中村、常時微動計測に基づく表層地盤の地震動特性の推定、鉄道総研報告1988年4月
 2) 中村・佐溝、強震観測データを用いた表層地盤の地震動特性の推定、第20回地震工学研究発表
 3) 中村他、1993年釧路沖地震の被害箇所と常時微動の関係、第22回地震工学研究発表
 4) 中村、1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析、JR地震情報 No. 23c、1995年2月

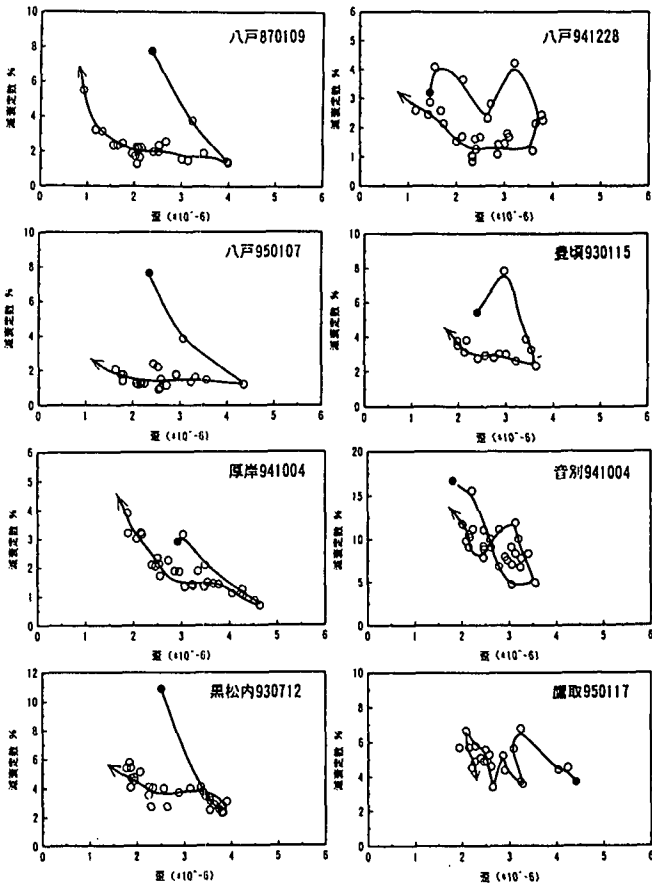


図7 歪と減衰定数の関係