

(1) 微小地震記録のコーダ波に基づく地盤増幅特性評価

○鹿島建設小堀研究室 加藤研一
同(正員) 武村雅之

1. はじめに

観測記録に基づき地盤増幅特性を評価する場合、強震記録のS波主要動部分が多く用いられている。しかし、これらの記録を蓄積するには時間を要する地域も多く、強震記録に代わる新たな地盤増幅特性の評価法が望まれる。本報は、その1つの試みとして観測頻度が高い微小地震記録のコーダ波部分からも地盤増幅特性が評価できる可能性を示し、地震工学において活用されなかった微小地震記録の新たな活用方法を示す。具体的には、米国南カリフォルニアのTERRAscopeアレーで得られた記録(Kanamori *et al.*, 1991)を用い、コーダ波から求めた地盤増幅率とS波主要動部分から求めた地盤増幅率の振幅および振動数依存性を比較する。

2. 解析に用いた地震と観測点

米国カリフォルニア州で1992年に発生したLandersおよびBig Bear地震の65余震(1992年10月~12月)に対し、TERRAscopeアレーの4観測点(PAS, PFO, SVD, GSC)で得られた計708波の速度波形を解析対象とした。図1に震央と観測点位置を示す。これらの余震のマグニチュードは3.3~5.4、震源深さは10km以下であり、震源距離は20~140kmの範囲にある。観測点の詳細な地盤構造は不明であるが、地質年代的にはSVDが沖積世に、他の地点は白亜紀に属している。各観測点には広帯域地震計(STS-1またはSTS-2)が設置されており、24-bitのデジタイザーにより80Hzサンプリング(SVD地点)または20Hzサンプリング(他の地点)された波形を用いた。なお、本震の波形はS波部分が飽和している観測点があったため検討対象から除外した。使用した記録の1例をPFO地点について図2に示す。

波形処理は以下の手順に従って実施した。まず目視によりS波の立ち上がりを読み取った後、5~10秒のウィンドウによりS波主要動部分を抽出し、FFTによりフーリエスペクトルを求めた。さらに、中心振動数0.75、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、6.0Hzに対して $\pm 0.25\text{Hz} \sim \pm 1.0\text{Hz}$ のバンド幅を仮定してスペクトル振幅を平均し、各々のスペクトル値とした。次に、発震時から70~100秒間のコーダ波部分について、長さ5秒のウィンドウを2.5秒づつ移動させながら計11区間に対するスペクトルを求めた。これらの区間は発震時から観測点へのS波到達時間の約2倍以上であり、コーダ波振幅が時間に対して安定的に減少するとされる部分(Rautian and Khalturin, 1978)に対応している。発震時から5秒以前の部分に対して求めたスペクトル振幅をノイズレベルと定義した。以後の解析には、S波またはコーダ波部分のスペクトル振幅がノイズレベルの2倍以上の部分のみを用いた。

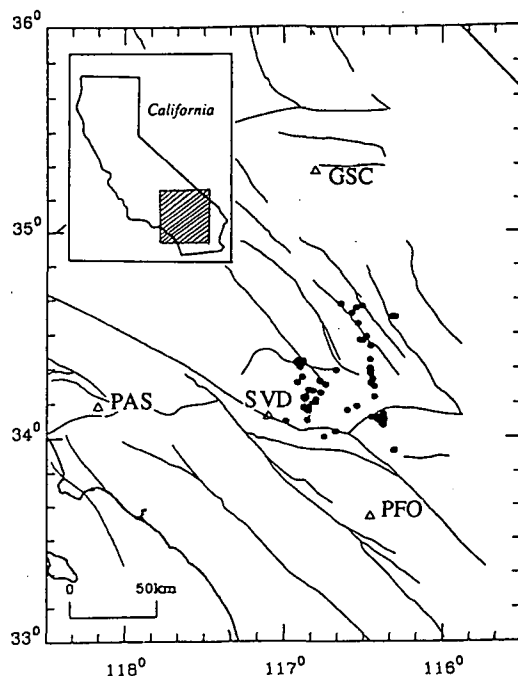


図1 解析に用いた地震と観測点

3. コーダ波に基づく地盤増幅特性評価

Aki and Chouet (1975) は発震時を基準にした経過時間 t および振動数 f に依存するコーダ波スペクトル振幅 $A_{ij}(f, t)$ を(1)式でモデル化した。

$$A_{ij}(f, t) = S_i(f) G_j(f) C(f, t) \quad (1)$$

ここで $S(f)$ は震源スペクトル、 $G(f)$ は地盤増幅率を、添え字 i は地震、 j は観測点をそれぞれ示す。 $C(f, t)$ はコーダエンベロープと呼ばれ、震源と観測点の位置に依存しない項(Aki and Chouet, 1975)である。従って、同一地震の同一経過時間における2地点間 j, k (ここで k は基準観測点) のスペクトル比を取れば $S(f)$ と $C(f, t)$ が相殺され、相対的な地盤増幅率の評価が可能となる(Mayeda et al., 1991; Koyanagi et al., 1992)。

$$\frac{A_{ij}(f, t)}{A_{ik}(f, t)} = \frac{S_i(f) G_j(f) C(f, t)}{S_i(f) G_k(f) C(f, t)} = \frac{G_j(f)}{G_k(f)} \quad (2)$$

ただし、(2)式を実データに適用するには、 $C(f, t)$ が震源と観測点の位置に依存しないことを確かめる必要があるが、用いたデータセットに対してはKato et al. (1995)により確認済みである。PFOを基準観測点にとり、(2)式から地盤増幅率を評価した結果とその $\pm 1\sigma$ を図3に●と縦線で示す。

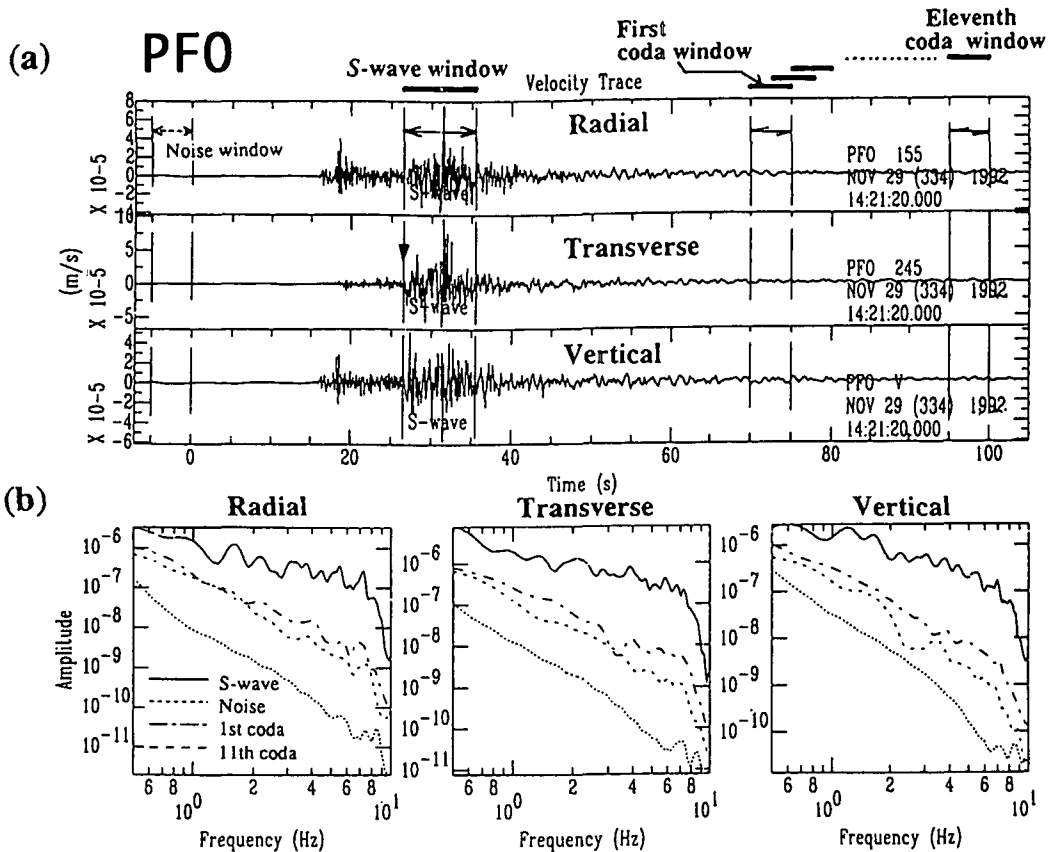


図2 使用した記録の一例 (基準観測点 PFO)

(a) Radial, Transverse, Vertical 方向の速度波形

(b) 各成分の S 波主要動、コーダ部、およびノイズ部分のフーリエスペクトル

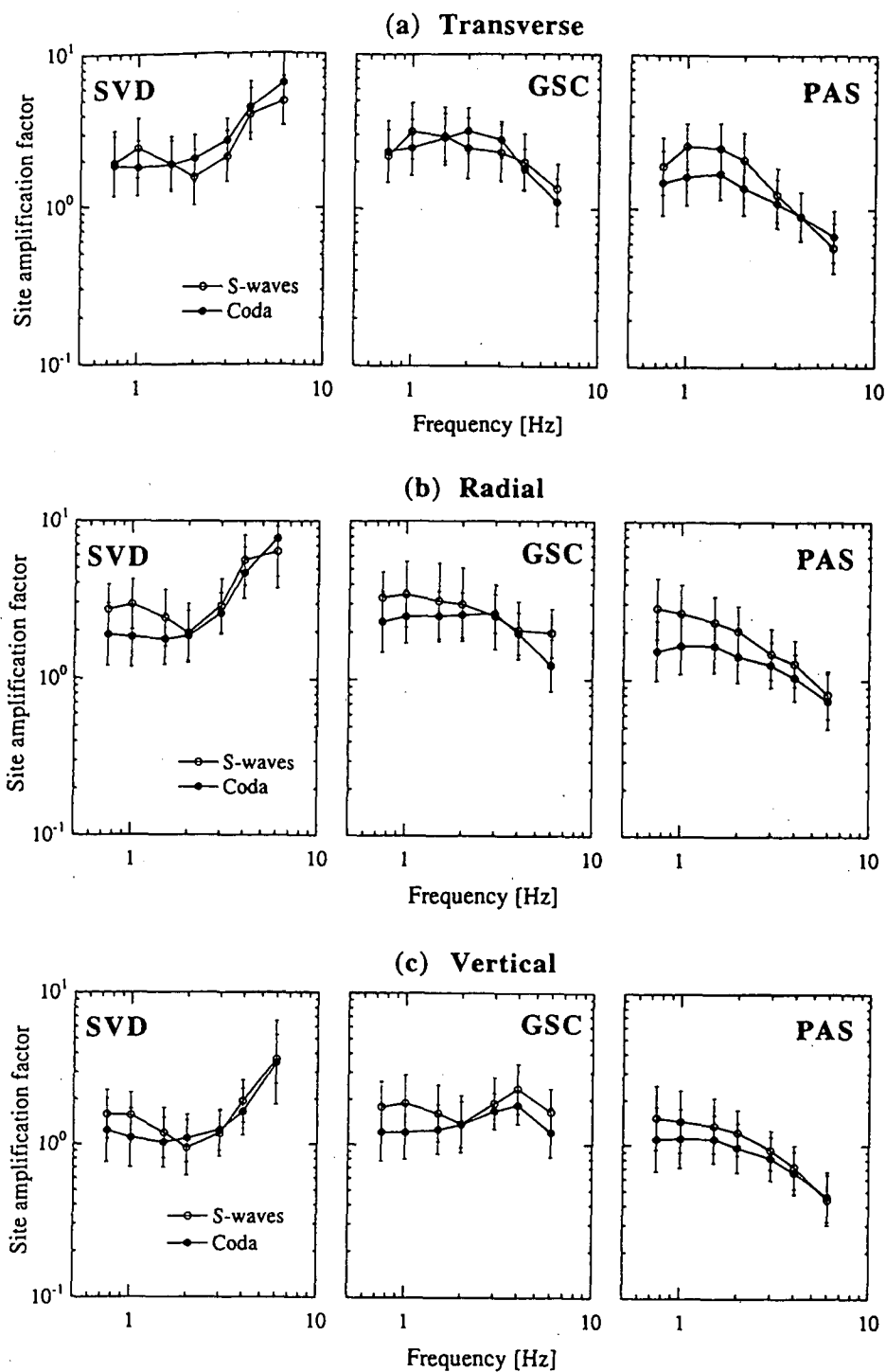


図3 コーダ波から評価した地盤増幅率(●)とS波主要動から評価した地盤増幅率(○)の比較
縦線は各々の $\pm 1\sigma$ を示す。(a) Radial, (b) Transverse, (c) Vertical 方向

4. S波に基づく地盤増幅特性評価

次に、同じ波形の主要動部分から地盤増幅率を評価した。まず、S波主要動のスペクトル振幅 $O_{ij}(f)$ を(3)式でモデル化し、

$$O_{ij}(f) = S_i(f) G_j(f) R_{ij}^{\gamma} \exp\left(-\frac{\pi R_{ij} f}{Q_s(f) v_s}\right) \quad (3)$$

インバージョン手法(Iwata and Irikura, 1988; Takemura *et al.* 1991; Kato *et al.* 1992)を適用して地盤増幅率 $G(f)$ を観測記録から分離した。ここで、 R は震源距離、 $\exp()$ の項は伝播媒質の非弾性的性質による減衰項を示す。幾何減衰項 γ は、実体波を仮定し1.0とした。(3)式のインバージョンから解を求めるには、拘束条件を付加する必要がある。そこで、PFOの地盤増幅率を1.0に拘束してインバージョンを行い、コード波から求めた地盤増幅率とS波主要動から求めた地盤増幅率が直接比較できるようにした。結果および $\pm 1\sigma$ を図3に○と縦線で示す。

5. 議論

コード波から評価した地盤増幅率 $G_c(f)$ とS波主要動から評価した増幅率 $G_s(f)$ は、振幅および振動数依存性とも良く対応し、各々 $\pm 1\sigma$ 以内で一致するのが図3より読み取れる。このことをさらに定量化するために縦軸を G_s 、横軸を G_c に取り、両者の相関関係を調べた結果を図4に示す。解析結果は図中に示した点線 (G_c が G_s の1.5倍、1/1.5倍) 内にはほぼ含まれており、コード波から地盤増幅特性を評価できる指摘(Tsujiura, 1978)を支持する結果が得られた。なお、相関係数は0.92であった。さて、何故 G_s と G_c が良く対応するのであろうか? Aki (1992) はグリーン関数の相反定理を用いて、 P から S 波への散乱エネルギーの変換効率は S から P 波への変換より9倍大きい結果を示している。さらに、Zeng (1993) は P 波の散乱場が時間の経過と共に S 波の散乱場に変換され、コード波部分は S 波により支配されていることを理論的に示した。これらの結果は、コード波から評価した地盤増幅率が S 波入射による地盤の応答を表すことを示唆している。なお、より詳細な議論はKato *et al.* (1995) に記されている。

6. まとめ コード波から求めた地盤増幅率とS波主要動から求めた地盤増幅率がファクター1.5以内で一致すること、およびその理論的背景について議論した。近年、被害地震の観測記録が得られ、そのうちのいくつかは主要動部分が飽和している。本報の結果は、そのような飽和記録に対してもコード波部分に着目すれば地盤増幅率を評価できる可能性を示唆している。

【謝辞】 南カリフォルニア大学安芸教授より貴重な意見を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】 AKI (1992). *BSSA*, 82, 1969-1972.

AKI and CHOUET (1975). *JGR*, 80, 3322-3342.

IWATA and IRIKURA (1988). *JPE*, 36, 155-184.

KANAMORI *et al.* (1991). *Eos* 72, 564.

KATO *et al.* (1992). *JPE*, 40, 175-191.

KATO *et al.* (1995). *BSSA*, 85, 467-477.

KOYANAGI *et al.* (1992). *BSSA*, 82, 1151-1185.

MAYEDA *et al.* (1991). *BSSA*, 81, 2194-2213.

RAUTIAN and KHALTURIN (1978). *BSSA*, 68, 923-948.

TAKEMURA *et al.* (1991). *JPE*, 39, 537-552.

TSUJIURA (1978). *BERI, Tokyo Univ.* 53, 1-48.

ZENG (1993). *BSSA*, 83, 1264-1276.

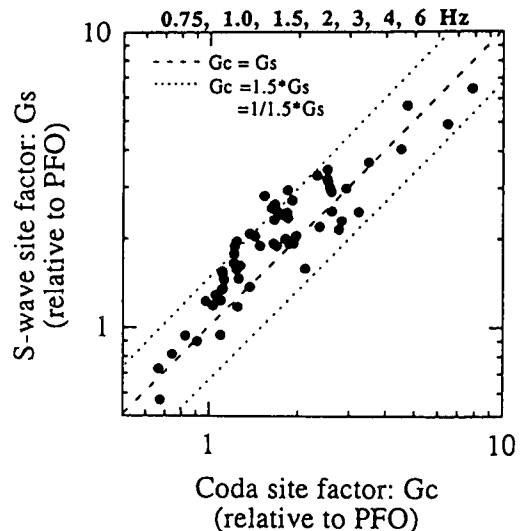


図4 コード波の地盤増幅率(G_c)とS波主要動の地盤増幅率(G_s)の相関関係
破線は $G_c = G_s$
点線は $G_c = 1.5 G_s$, $G_c = 1/1.5 G_s$