

(80) 工学的基盤上の加速度距離減衰と表層地盤における増幅特性に関する考察

熊谷組技術研究所 正会員 鈴木 猛康

熊谷組技術研究所 正会員 田中 港

1. まえがき

表層地盤における地震動を推定するために、強震観測結果に基づいた統計解析により距離減衰式や応答スペクトルが種々提案され、実務設計にも採用されている。しかし沖積地盤では、地盤構成によって地震動増幅特性のばらつきが大きいため、表層地盤の卓越周期に基づいて与えられた距離減衰式あるいは応答スペクトルは、とくに第三種地盤 ($T > 0.6$ 秒) においては当該地盤の震動と大きく異なるケースが予想される。本論文では、 $V_s = 600 \sim 700$ m/secのいわゆる工学的基盤における地震動の距離減衰特性のばらつきと、表層地盤における増幅特性のばらつきを、Loma Prieta地震の強震観測記録を用いて検討し、考察を加える。

2. 解析対象記録

USGS及びCDMGよりデジタル値として公表されている強震記録^{1), 2)}のうち、Free Field上で観測されたものを選定した。選定した観測サイト数は、USGSより27地点、CDMGより47地点、計74地点であり、そのうち岩盤もしくはそれに近い硬質地盤上の観測点(以下Rock Site)が27地点、沖積および洪積表層地盤上の観測点(以下Soil Site)が47地点である。図1に震央及び観測サイトの分布を示した。強震記録のうち加速度の水平2方向成分を用いて、振幅の平均パワーの共分散が最大となる方向を求めてこれを振動主軸とし³⁾、この振動主軸方向成分をもって各サイトの地震動を代表させた。以下の解析ではすべてこの成分を用いて検討を行った。

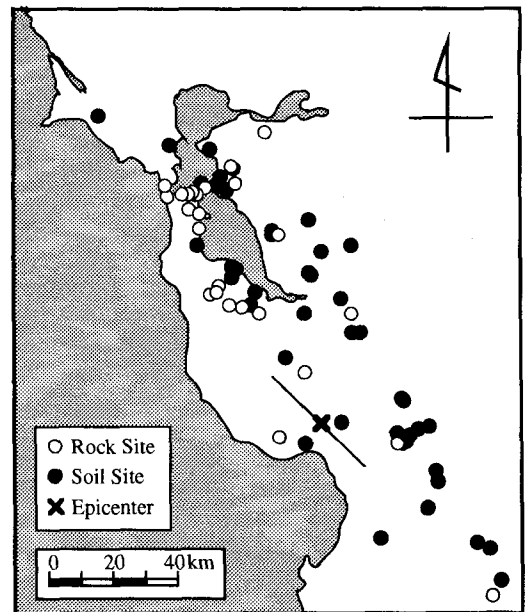


図-1 観測サイト

3. 地震応答解析

USGSではいくつかの観測サイトでPS検層を実施し、観測サイトの地盤構造を明らかにしている⁴⁾。これによれば、USGS及びCDMGによってRock Siteと分類されている観測サイトのせん断波速度 V_s は、600~700

m/sec程度と推測される。Californiaの強震観測網でRock Siteと分類されている地点のせん断波速度 V_s がこの程度であれば、Rock Siteの地震動距離減衰特性から、工学的基盤の地震動距離減衰のばらつきをある程度推定することが可能であろう。このことを確認するために、ここではまず表-1に示す断層最短距離が比較的近いRock SiteとSoil Site 4組について以下の検討を行った。選定されたSoil Siteでは、PS検層により地盤構造が明らかであるため⁴⁾、Soil Siteをモデル化し、観測により得られた加速度波形を地表から入射した時の工学的基盤上 ($V_s = 600 \sim 700$ m/sec程度)の加速度波形を、重複反射理論による地震応答解析 (SHAKE) によって求めることができる。

表-1 最大加速度の地震応答解析とRock Siteの観測記録との比較 (gal)

Case	Soil Site	Max. Acc.	Simurated	Rock Site	Max. Acc.
1	Treasure Island	148.81	69.60	Yerba Buena Island	68.78
2	San Francisco Int. Airport	376.51	110.19	So. San Francisco - Sierra Pt.	105.78
3	Oakland - Outer Harbor Wharf	319.15	113.51	Piedmont - Jr. High School	96.75
4	Stanford Parking Garage, G. L.	320.46	128.78	Woodside - Fire Station	104.32

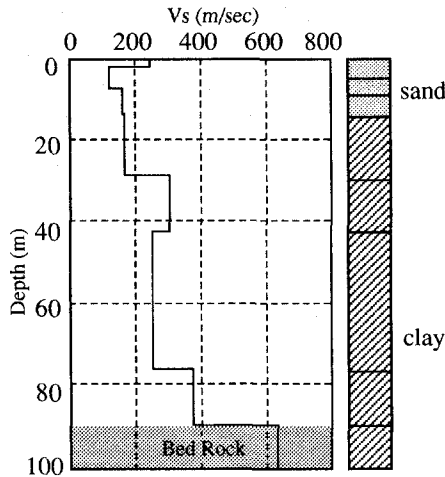


図-2 地盤モデル

従って、得られた波形とこの Soil Site と近接する Rock Site の観測波形との比較を行い両者がほぼ一致すれば、Rock Site を工学的基盤と見なせるか否かの判定がつくと考えた。ただし地震応答解析に用いる地盤のせん断定数と減衰定数のひずみ依存性については、Clay、Sand とともに平均的なもの⁵⁾を用いた。

本解析の一例として、表-1 の Case-1 に示す、"Treasure Island" (Soil Site) に関する地震応答解析について説明する。図-2 に、文献4) に従って作成した地盤モデルを示す。地表面から約30 mまでは $V_s < 200$ m/sec の砂層あるいは粘性土層で、30 m 以深は $V_s = 250 \sim 300$ m/sec の粘性土層で構成されて、地表面下約90mで基盤に到達する。基盤は Franciscan 層の砂岩あるいは頁岩であり、これは "Yerba Buena Island" (Rock Site) の地表を構成する層と一致している。図-3 は、"Treasure Island" についての地震応答解析で得られた各深度における加速度の時刻歴応答波形を、比較対象の Rock Site である "Yerba Buena Island" の観測波形とともに示したものである。"Treasure Island" の地表における加速度波形は、同サイトにおける観測波形で、

本解析の入力波形である。解析により得られた "Treasure Island" の基盤の加速度波形および "Yerba Buena Island" の観測波形は、振幅、位相ともほぼ一致していると思なせることがわかる。他の3ケースについて行った解析についても、表-1 に示されているように同様の傾向を示すことから、California において Rock Site と分類されている観測サイトを、工学的基盤と同等と見なして以下の検討を行うことにした。

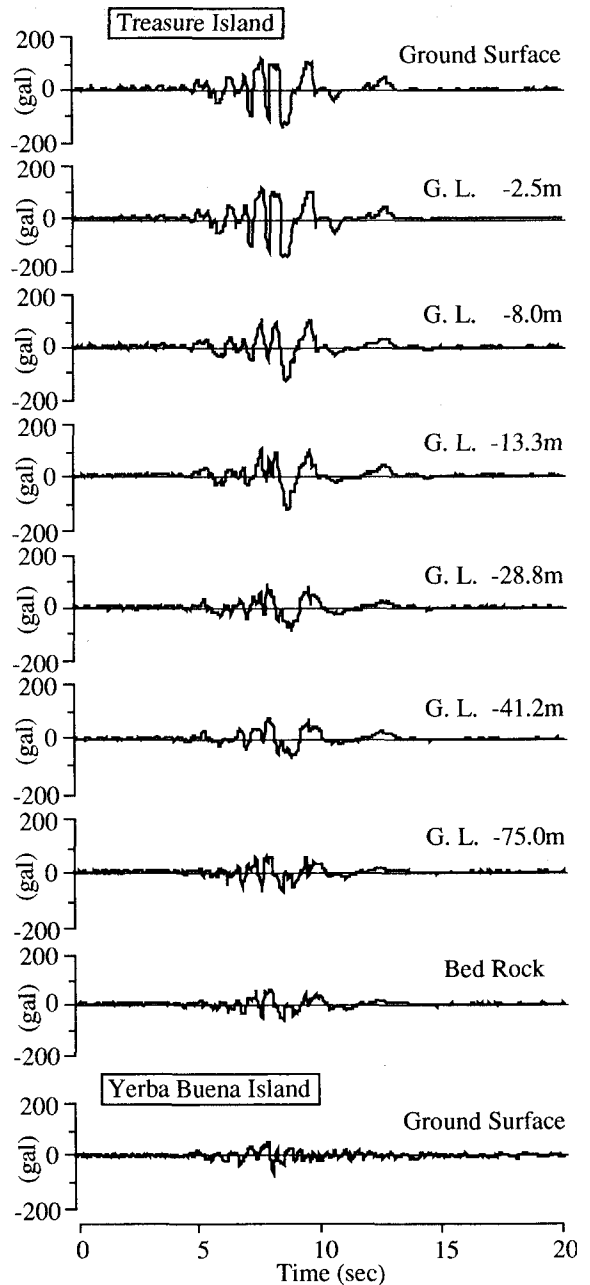


図-3 地盤応答解析と Rock Site の観測記録との比較例

4. 加速度距離減衰特性

Rock Site 27地点、Soil Site 47地点の最大加速度を縦軸に、断層最短距離を横軸にして、Loma Prieta地震の加速度距離減衰特性についてプロットした結果を図-4に示す。図中には、Joyner & Booreによる距離減衰式⁶⁾を破線で、またJoyner & Boore式の係数をRock Site 27地点のデータを用いて調整して求めた(1)式に示す工学的基盤(Rock Site)の最大加速度距離減衰近似式を併せてプロットしている。

$$\log A = 0.65 - 0.85 \log r - 0.002r$$

$$r = (d^2 + 7.3^2)^{1/2} \quad 5.0 \leq M \leq 7.7 \quad \dots \dots (1)$$

Soil Site における最大加速度の距離減衰特性は、図に示すように断層から離れるほどばらつきが大きくなり、これらのデータから求められた平均的な距離減衰式のばらつきは非常に大きくなることがわかる。これに対して工学的基盤の最大加速度の距離減衰特性のばらつきは比較的小さく、表層地盤における増幅の影響が極めて大であることを考慮すれば、これより上層の表層地盤の地震動を推定するのに用いる入力地震動は、工学的基盤の地震動距離減衰式でも十分な精度を与えよう。

5. 表層地盤による加速度増幅倍率

工学的基盤の最大加速度距離減衰式より、ある断層最短距離 Δ の工学的基盤の最大加速度 $A_b(\Delta)$ が与えられるので、これと断層最短距離 Δ のSoil Siteでの最大加速度 $A_s(\Delta)$ との比として(2)式で与えられる $F_{amp}(\Delta)$ は、工学的基盤上の表層地盤における加速度増幅倍率を表す。

$$F_{amp}(\Delta) = \frac{A_s(\Delta)}{A_b(\Delta)} \quad \dots \dots (2)$$

図-4に示したすべてのSoil Siteの振動主軸方向の加速度記録の卓越振動数を横軸に、加速度増幅倍率 $F_{amp}(\Delta)$ を縦軸にして図-5にプロットした。図より明らかなように、1 Hz前後で増幅倍率のピークが現われ、1.5 Hzからは卓越振動数の増加と共に増幅倍率が漸減している。ただし1 Hz前後における増幅倍率はばらつきが大きく、0.3~4.2倍の広い範囲に分布している。図-6は加速度増幅倍率をそれぞれのSoil Siteの最大加速度 $A_s(\Delta)$ に対して、また図-7は、加速度増幅倍率をそれぞれのSoil Siteの断層最短距離に相当する工学的基盤の最大加速度 $A_b(\Delta)$ に対してプロットしたものである。図-6はSoil Siteにおいてもっとも大きく増幅された結果、加速度は200~400 galに達するケースが多いことを意味している。また図-7は、増幅倍率をもっとも高くなるのは、工学的基盤における入力地震動の最大加速度が100 gal以下の場合が多いことを意味している。また入力地震動が400 galを超えると、最大加速度の比として与えられる増幅倍率のみで見れば、ほとんど表層地盤における増幅は見られないという結果となる。しかしこれらの結果は、表層地盤の非線形性とも深い関わりを有しており⁷⁾、さらに入力地震動が400 galを超えるのは断層の近くであることも考慮に入れて判断すべきであろう。

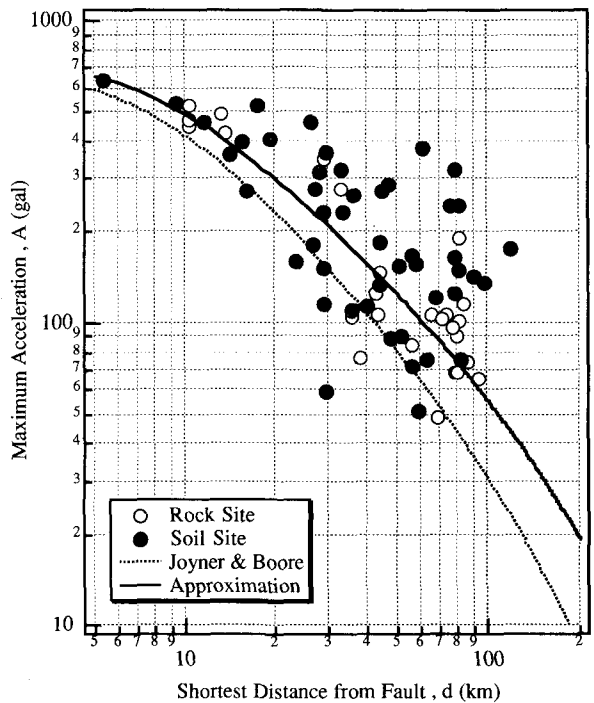


図-4 最大加速度の距離減衰特性

6. まとめ

Loma Prieta地震におけるFree Field上で観測された強震記録を用いて検討を実施した結果、以下の結論を得ることができた。(1) Californiaの強震観測網でRock Siteと分類されているサイトのせん断波速度は600~700 m/secであり、地震応答解析結果からも工学的基盤と見なすことができることが示された。(2) Soil Siteにおける地震動距離減衰特性のばらつきが非常に大きいのにに対して、Rock Site(工学的基盤)のそれは比較的小さい。(3) もっとも大きな増幅倍率は4倍強で、その周波数帯は1 Hz前後であるが、この周波数帯における増幅倍率のばらつきは大きい。(4) もっとも増幅倍率の大きくなるときの地表最大加速度は200~400 galである。(5) もっとも増幅倍率の大きくなるときの工学的基盤上の最大加速度は100 gal以下である。

7. 参考文献

- 1) National Geophysical Data Center : Digital Strong-Motion Data #SM-USCA45 and #SM-USCA56 of the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989, United States Department of Commerce.
- 2) Shakal, A. et al.: CSMIP Strong - Motion Records from the Santa Cruz Mountains (Loma Prieta), California Earthquake of 17 October, 1989, Report No.OSMS 89-06, 1989.
- 3) 松島 豊: 水平地震動の特性の方向による変動, 日本建築学会論文報告集, No.226, 1974, pp.39-44.
- 4) Gibbs, J. F. et al.: Seismic Velocities and Geologic Logs from Borehole Measurements at Seven Strong - Motion Stations that Recorded the Loma Prieta Earthquake, USGS Open - File Report 92-287, 1992.
- 5) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, 1982, pp.198 -199.
- 6) Joyner, W. D. and Boore, D. M.: Measurement, Characterization, and Prediction of Strong Ground Motion, Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Proc. of the Specially Conference sponsored by ASCE, 1988, pp.43-102.
- 7) Sugito, M. et al.: Nonlinear Site-dependent Ground Motion Amplification Factor Based on Strong Motion Record, Proc. Int. Symp. on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Odawara, 1992, pp.293-298.

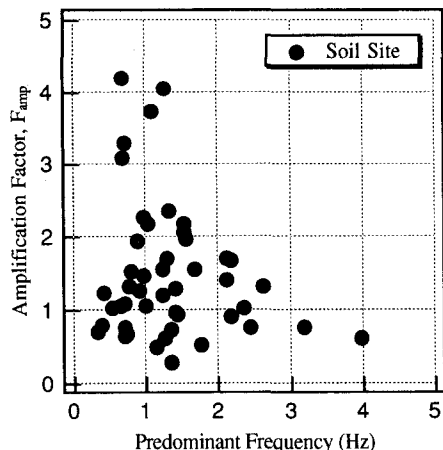


図-5 卓越振動数と増幅倍率

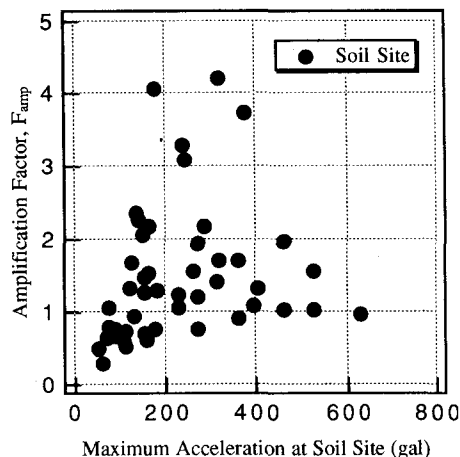


図-6 Soil Siteの最大加速度と増幅倍率

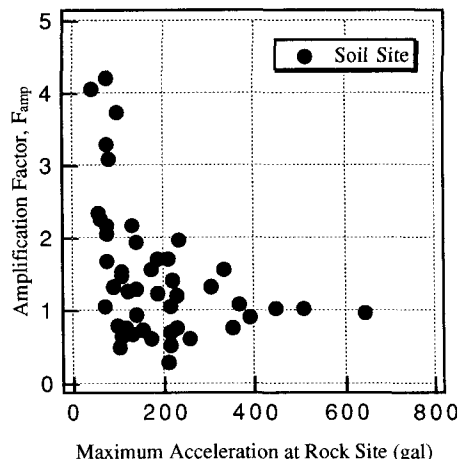


図-7 Rock Siteの最大加速度と増幅倍率