

4.2.5 1994年ノースリッジ地震における地震動増幅（吉田望、末富岩雄（佐藤工業（株）））

4.2.5.1 はじめに

1994年1月17日、アメリカ、California州Los Angeles近郊San Fernandoで発生したノースリッジ地震は、総額150～300億ドルと推定されるアメリカにおける最大の自然災害被害を生じさせた。地震の諸元は次のとおりである。

- ・発生時刻 1994年1月17日4時30分55.4秒（現地時間）
1994年1月17日12時30分55.4秒（グリニッジ標準時間）
- ・震央位置 北緯34°12.53' (34.309°)、西経118°32.44' (118.541°)
- ・震源深さ 18km
- ・地震規模 $M_L=6.4$
 $M_S=6.8$
 $M_W=6.7$
- ・震源機構 南落ち逆断層で走向N60°W、傾斜角35～45°、平均地震モーメント 1.23×10^{26} dyn·cm

この地震はいくつかの面で着目される。その一つは、都市部を襲った地震で、1971年がライフライン耐震工学元年といわれるようになった原因である1971年San Fernando地震とほぼ同じ地域を被害域としており、23年間の都市のライフラインの耐震性の進歩が試されることである。また、アメリカでは1989年サンフランシスコに大きな被害を与えたLoma Prieta地震以来の大地震であり、非常に多くの地震記録が得られていることも着目される。

California州における大きな地震観測機関は、CDMG（California Department of Conservation Division of Mines and Geology）によるCSMIP（California Strong Motion Instrumentation Program）とUSGS（United States Geological Survey）によるものである。この地震では、CSMIPで震央距離5～270kmに至る193観測点（地盤116、構造物77）、USGSでも約100観測点（地盤60、構造物77）で記録が得られている。これらの観測記録は、加速度波形およびその最大値は速やかに公表された（CDMG、1994a；USGS、1994）。図4.2.5.1に主要な記録の最大加速度を示す。観測記録はアナログデータの公表のみならず、デジタル波形についても順次公表されており、CDMGからは現在、30地点の記録が公開されている（CDMG、1994b）。

1989年Loma Prieta地震では、サンフランシスコ周辺の軟弱な埋立地で大きな被害が発生したのが一つの特徴であった。この原因として軟弱な埋土層における地震動の増幅と液状化の発生が挙げられている。また、サンフランシスコ周辺に広範囲に分布する軟弱な粘土層（ベイマッド）も地震動増幅に大きく貢献していた。

これに対して、ノースリッジ地震の被害範囲は山間部であり、ベイマッドのような広範囲に分布する軟弱な地盤は存在しない。また、液状化についても、いくつかの地点で発生したことは報告されているが、その数はLoma Prieta地震に比べれば少なく、また、大きな被害ともなっていない。したがって、軟弱地盤の地震動増幅という観点から見て着目すべき事例がそれ程多いわけではない。

地震記録の中で特に着目されるものの一つにTarzanaの記録がある。ここでは、最大加速度1.8gという非常に大きな記録が得られている。Sylmarの郡立病院の記録も着目されるものの一つである。ここでは最大加速度も約830cm/s²と大きな値であるが、最大速度が約130cm/sと非常に大きな値が得られている。

これらのサイトは必ずしも本委員会で扱っている軟弱地盤とはいえないかもしれないが、地震動の増幅という観点からは着目されるものである。特にTarzanaの最大加速度、Sylmarの最大速度は、地震や耐震設計に携わる技術者のこれまでの常識を越える値といってもよい。とすれば、「技術者が通常用いている武器（地震応答解析）でこのような現象が再現できるのか」という事は、非常に重要な事となるので、これら

の地点の解析をすべきであるという意見が、委員会の席上、伯野委員長より出された。これを受け、地盤の状況がよく分からない、必要な材料特性データが十分ではない、入力地震動が明確に定義できないなどの悪条件があることは承知の上で、解析を行ってみることにした。というのは、これらの点で得られた加速度は、これらの不明確さを考慮しても、技術者が通常用いている武器で予測出来る限界を超えていそうに考えられたからである。

この様な状況で行われた解析であるので、この解析の結果が正しそうだということはいえないかもしれない。現在の地震応答解析の限界を示す一つの試みとしての意義はあると考えている。

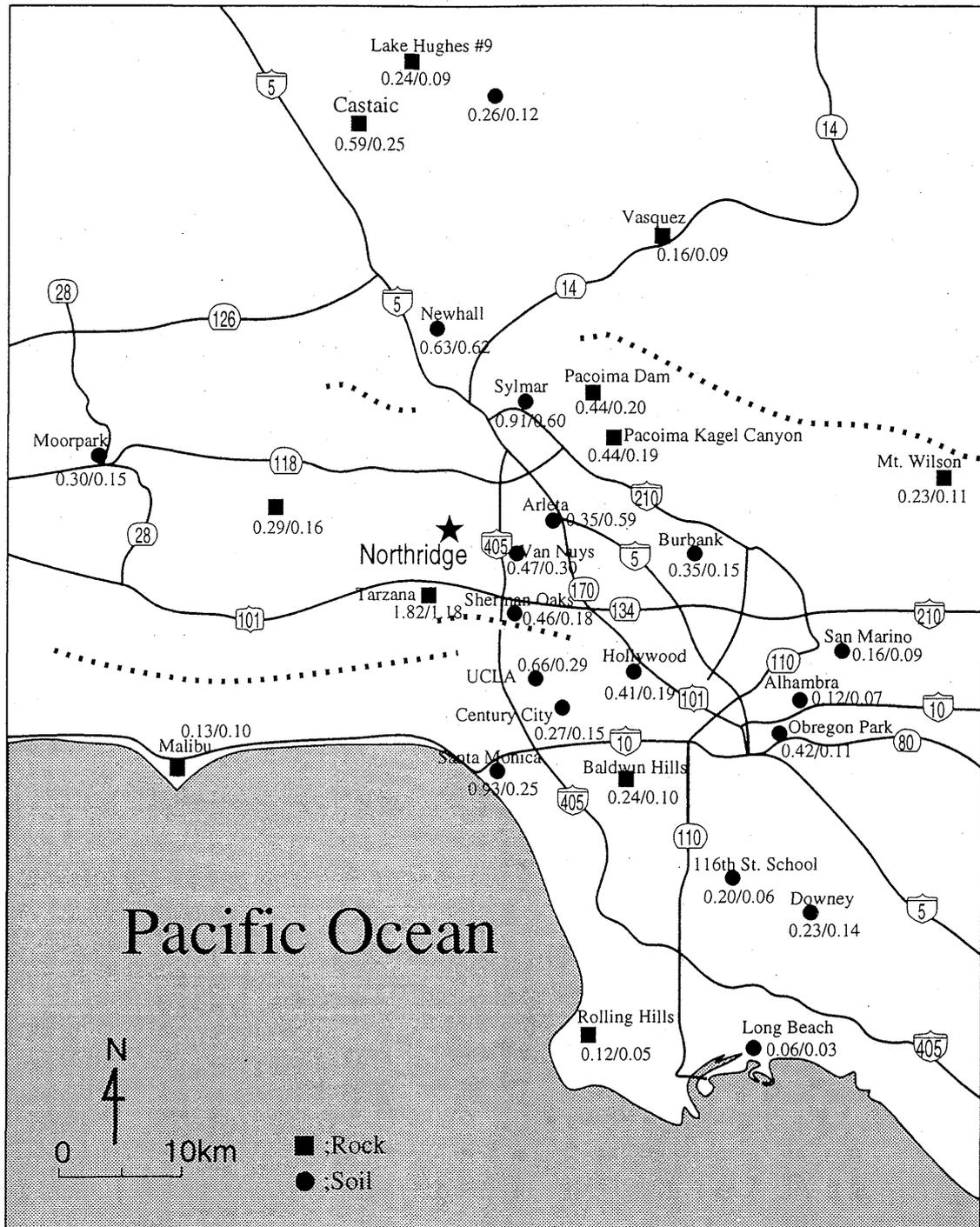


図4.2.5.1 最大加速度分布 (水平/鉛直)

4.2.5.2 Pacoimaダムの地震記録

PacoimaダムはNorthridgeの北東に位置し、震央からは約19km離れている。1971年San Fernando地震の際には、アバットの上で水平1.25g、鉛直0.7gと非常に大きな記録が得られた。この地震の震央はダムの北方約8kmであった。ノースリッジ地震の震央はこれよりも離れているが、水平1.53g（図4.2.5.2）、鉛直1.39gと前回より大きな加速度が記録されている（アナログ値（CDMG, 1994a）とデジタル値（CDMG, 1994b）で最大値には若干の違いがある。以下同様）。これよりダム下流へ130mほど離れた溪谷では岩盤記録で水平0.44g（図4.2.5.3）、鉛直0.2gの記録が得られている。地震動の継続時間は約10秒、また、疑似速度応答スペクトル（図4.2.5.6参照）から見ると、0.4～0.5秒付近に卓越周期がある。さらに、スペクトルで2秒以上の長周期成分でスペクトルの値が一定ないし周期が長いほど大きくなっているのが特徴である。

この記録が、岩盤記録として、解析を行う2地点に最も近いことから、本解析ではこれを解放基盤複合波として地震応答解析を行うこととする。地震応答解析では、水平方向の成分のみを入力する。観測値の最大値と対応させるために、Tarzanaの解析ではEW成分を、Sylmarの解析ではNS成分を入力とした。なお、Sylmar郡立病院は震央から見てPacoimaダムと同方向にあり震央距離も近いが、Tarzanaはこれと反対側にある。破壊のメカニズムを考えると、このサイトへの入力地震動はPacoimaダムの記録とはかなり異なっていることも考えられる。

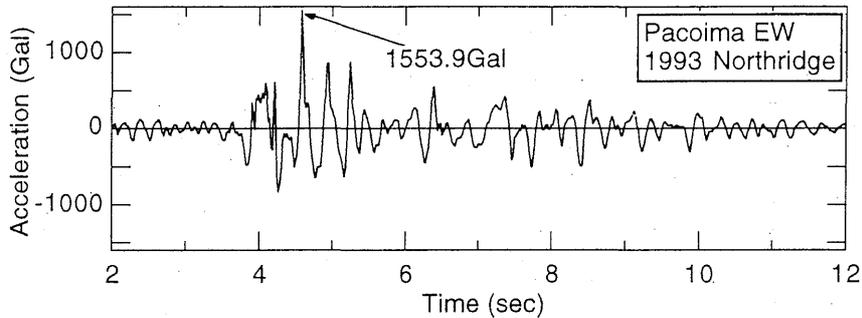


図4.2.5.2 Pacoimaダムアバットの記録

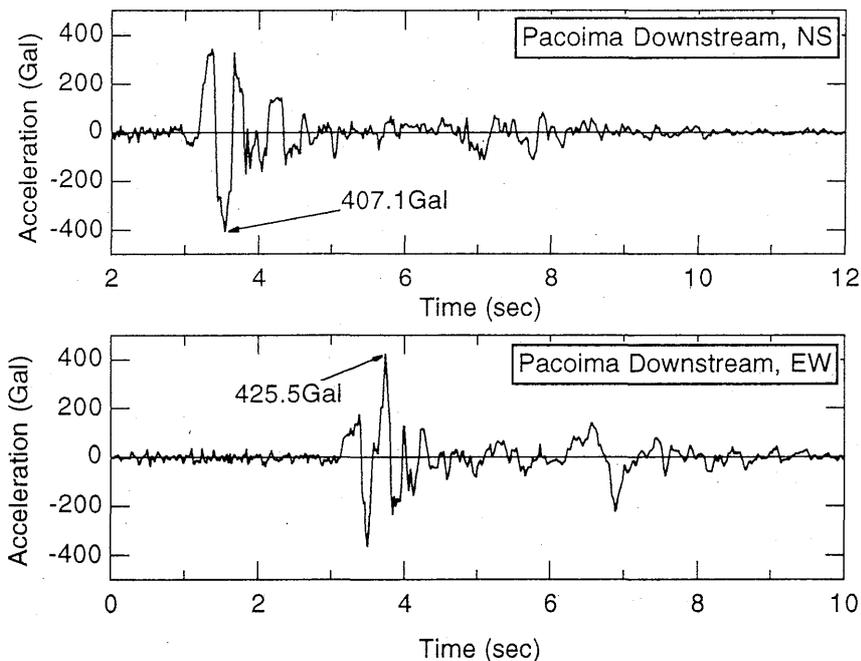


図4.2.5.3 Pacoimaダム下流の岩盤記録

4.2.5.3 Tarzanaの地震記録と応答解析

Tarzanaの強震観測サイトは震央の南側約5kmに位置するTarzana Hillの頂上付近に設けられている。写真4.2.5.1に強震計設置位置付近の状況を、図4.2.5.4に付近の地形図を示す。Tarzana Hillは東西約500m、南北約200mに広がる、高さ約20mの小高い丘である。

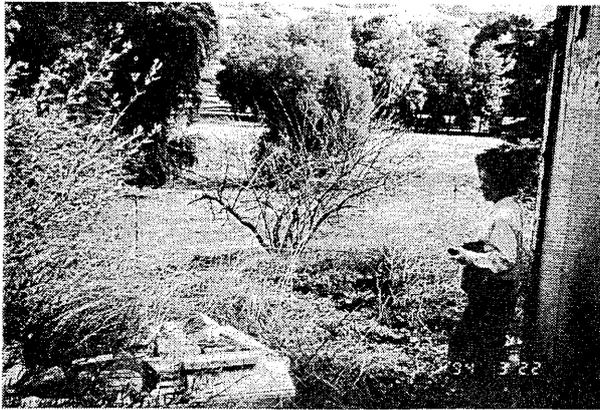


写真4.2.5.1 Tarzana Hillよりの眺望

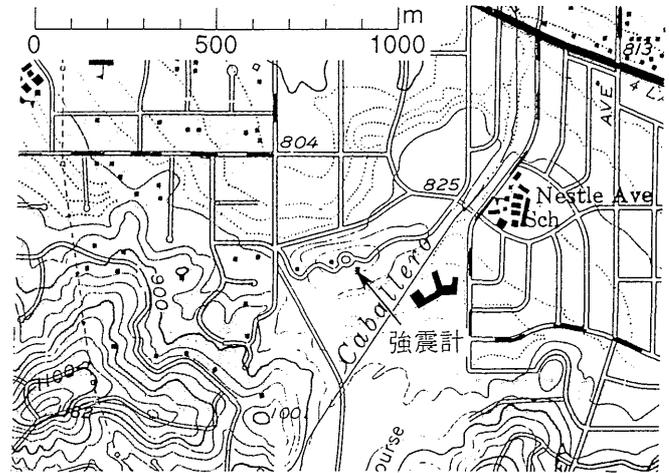


図4.2.5.4 Tarzana強震観測点付近の地形図

図4.2.5.5に観測記録を示す。この地点のデジタル波形はCDMGより公開予定であるが、予定が遅れているため、本稿執筆時点では入手出来ていない。最大加速度は、EW成分が1.82g、上下動でも1.18gに達している。これらの大きな応答は一瞬のピークというわけではなく、例えばEW方向では7~8秒間にわたって1gを越える加速度が現れている。

このサイトでは、1987年Whittier Narrows地震の際にも0.62gという大きな加速度振幅が得られている。しかし、その余震や、他の地震では特に大きな加速度は得られていない。一方、USGSの余震観測チームは、本震の直後にこの観測点を中心として21台の3成分速度型地震計を、東西、南北両方向に平均35m間隔に設置し、アレー観測を行った。その結果、観測された余震の最大速度は丘の頂上付近から離れるにしたがい小さくなり、わずか50m離れたところで加速度が1/2~1/3程度小さくなること、頂上付近ではふもとと比較して2~6Hzの周波数帯で選択的に増幅が起こり、ピーク値は2~3倍になることなどが分かった（安藤他、1994）。

常時微動計測（安藤他、1994；A Cooperative Investigation Team、1994）によれば、観測地点の卓越周波数は約3Hzであり、丘のふもとに比べてこの周波数帯域での応答が増幅されるとの事である。この周波数帯域は観測記録の卓越周波数ともほぼ対応している。

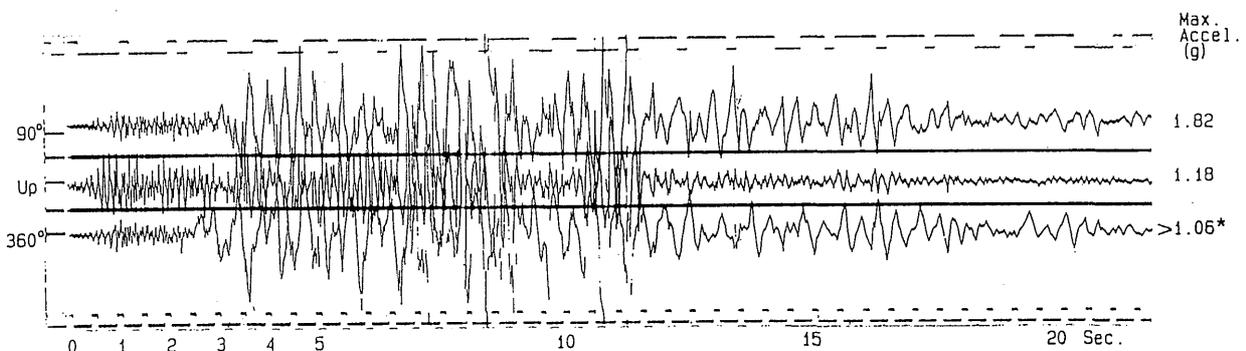


図4.2.5.5 観測記録

これらの情報より、地震動の増幅は丘の形状から来る地形的な要因または丘の頂上付近のごく表層の増幅により生じたと考えられる。しかし、これまでの地震応答解析の常識からして、一次元的なS波の増幅によってのみこのような応答が生じたとは考えにくく、地形的な要因が影響していると考えざるを得ない。そこで、地震応答解析では、地形的な要因が考慮できるよう、二次元解析を行うこととした。また、比較のため、一次元解析も行った。

二次元解析ではEW断面を対象とし、丘の頂部を含む水平方向600mを解析対象とした。3Hz付近の波動を再現したいことから、メッシュ間隔は地山部で5m、丘の部分では2.5mとした。二次元解析では、メッシュ数を減らすために、水平方向に細長い要素を使うことは多々行われるが、それでは水平方向に伝播する波動の分解能が落ちるため、ここでは鉛直、水平両方向とも同じサイズの要素とした。その結果、図4.2.5.6に示すように、節点数1834、要素数1764と膨大なモデルを解くことになった。なお、地表の標高は図4.2.5.4の地形図より読みとったものである。また、断面は次項によって決めたが、丘の付近では卓越周波数が3Hz付近となるように基盤の深さを調整している。

Tarzanaの観測点から西約250m地点のボーリングによれば、地表からGL-5mまではS波速度278m/sのSilty loam、これよりGL-30mまではS波速度409m/sのShaleとなっている（安藤他、1994）。これを基に、表4.2.5.1のように地盤定数を設定した。二次元モデルにおける材料特性は図4.2.5.6に背景色の違いとして区別されている。

解析は弾性計算とし、周波数20Hzより小さい成分のみを考慮した。図4.2.5.6に代表的な地点の最大加速度を示す。また、図4.2.5.7に加速度時刻歴を、図4.2.5.8に丘の頂部の応答スペクトルを示す。

一次元解析では、二次元解析と同じ材料特性を用い、丘のふもとおよび丘の頂上の断面に対し計算を行った。得られた加速度時刻歴および応答スペクトルをそれぞれ図4.2.5.7および4.2.5.8に示す。

最大加速度は丘のふもと（点A）が478cm/s²であるのに対し、丘の頂上（点B）では606cm/s²であり、30%程度大きくなっている。すなわち、地形効果の現れた結果となっている。しかし、余震観測で得られたような急激な増幅は見られない。また、値そのものも本震の最大加速度に比べ1/3程度である。図4.2.5.8でスペクトル値が最も大きいのは周期0.5秒付近であるが、明らかにこの成分は入射波の持っていた成分である。入力波（Pacoimaダム記録）に対するスペクトルの比で見れば、丘の頂上では周期0.2～0.9秒の部分で約1.5倍の大きさとなっている。また、周期0.2秒より小さい部分を除き、丘の頂上の方が丘のふもとより大きな値であり、最大加速度の変化と調和した結果となっている。

次に、一次元解析の結果を見ると、弾性計算で丘のふもとは最大加速度564cm/s²、丘の頂上は535cm/s²であり、観測記録とは逆の傾向を示している。応答スペクトルでは地震動の卓越周期である0.5秒付近を含み、0.3秒より長周期の部分では丘のふもとの方が大きな応答となっている。

一次元解析と二次元解析を比較すると、一次元解析では丘のふもとと頂上のスペクトルの差が小さいのに対し、二次元解析では一次元解析より差が大きくなっている部分が多い。特に地震動の卓越周期付近の0.3～0.9秒にかけての部分ではその差は一次元解析の差の倍程度となっている。

これらの結果から、二次元解析では地形効果の影響は明瞭に現れていると考えられるが、一方では観測記録の大きさを説明できるような大きな増幅は得られなかったことが分かる。

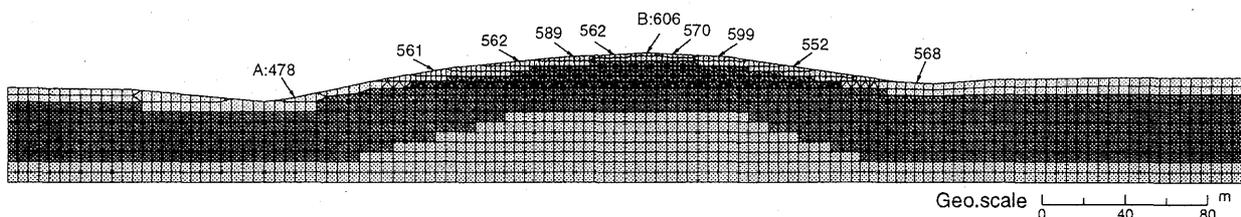


図4.2.5.6 二次元解析に用いたメッシュ分割と最大応答値

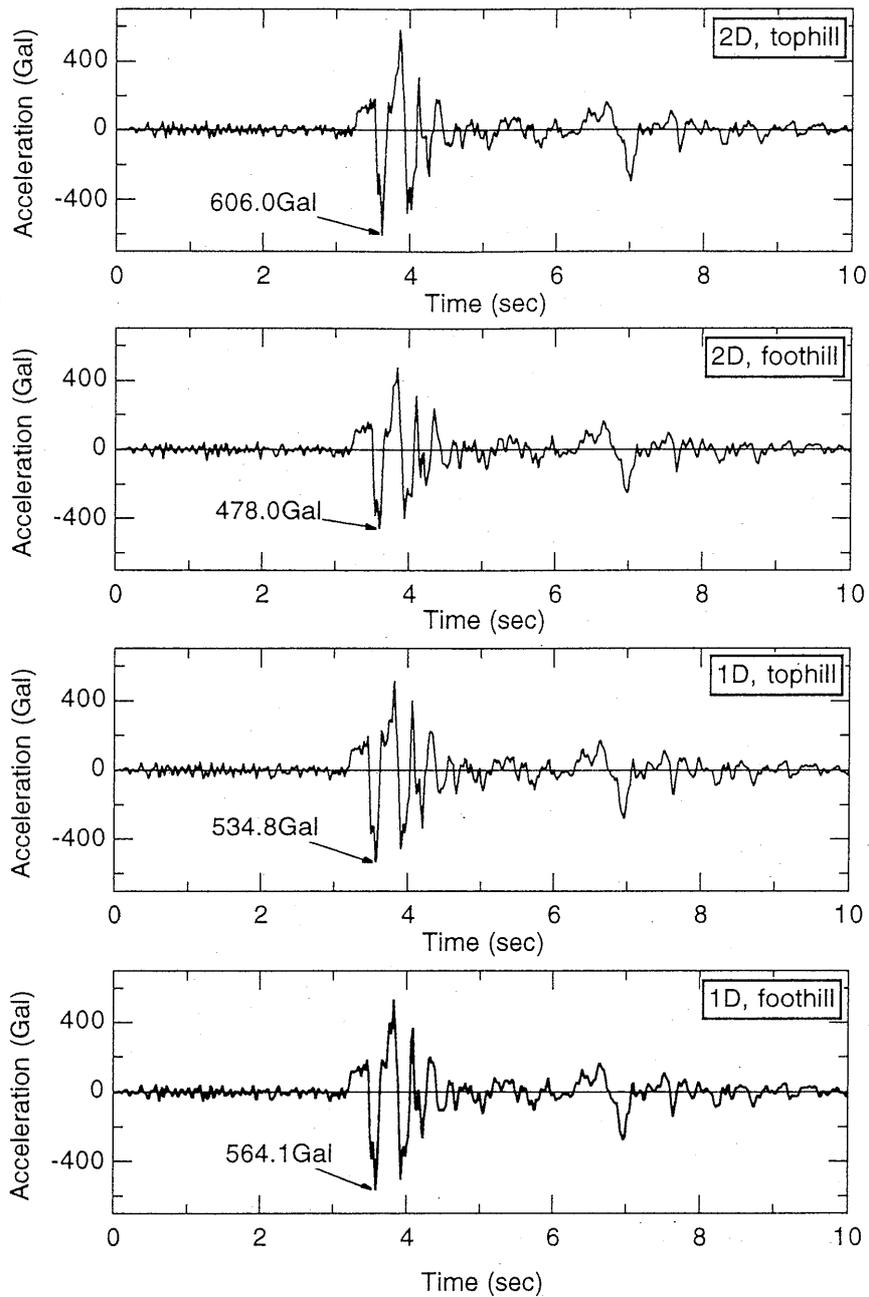


図4.2.5.7 解析で得られた加速度時刻歴

表4.2.5.1 解析に用いた材料定数

層番号	層厚 (m)	単位体積重量 (tf/m ³)	S波速度 (m/s)	減衰定数 (%)
1	5.0	1.8	250	5.0
2	25.0	2.0	400	3.0
3		2.2	700	2.0

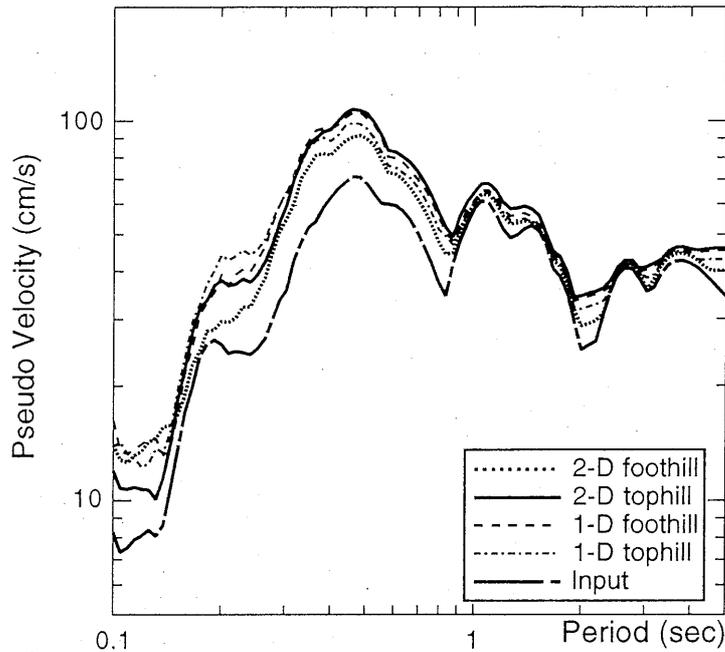


図4.2.5.8 応答スペクトル

4.2.5.4 Sylmarの郡立病院の地震記録と応答解析

この記録は、Sylmarの郡立病院の駐車場で記録されたものである。図4.2.5.9に観測波形を、図4.2.5.11にその応答スペクトルを示す。記録は、表4.2.5.2に示すように、最大加速度 827cm/s^2 、最大速度 129cm/s と、非常に大きな地震動である。大きな加速度という意味では、日本では、1993年釧路沖地震の際釧路気象台で観測された加速度はこれと同程度の規模であるが、速度から見ると、表4.2.5.2からも分かるように、速度の大きい成分でも 43cm/s であり、Sylmarの記録と比べると1/3程度の値である。

観測が行われた郡立病院は、1971年San Fernando地震の際大きな被害を受けたOliveview病院を建て直したものである。1971年のSan Fernando地震の際には、この周辺では、南西側のJuvenile Hall、Sylmar変電所、Van Norman Complex、Jansen浄水場などで大規模な液状化と斜面崩壊が発生している（O'Rourke et al, 1992）。ノースリッジ地震の際にも、液状化の発生などが報告されている。ただし、ジャンセン浄水場では液状化対策が施されていたこと、Juvenile Halでは地下水位が低かったことなどから、1971年の地震に比べれば被害は格段に小さかった。

この付近では、Jansen浄水場でも地震観測が行われており、最大加速度は $0.62g$ である。したがって、Sylmarの記録のみが異常に大きい応答を示しているというわけではない。

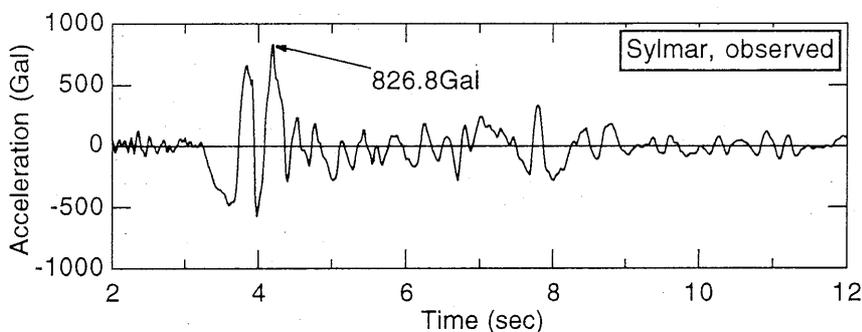


図4.2.5.9 Sylmarの郡立病院の観測波形

表4.2.5.2 地震動の諸元の比較

	Pacoima Dam NS	Sylmar NS 観測値	釧路沖地震 気象台 NS	Sylmar 計算値 モデル1	Sylmar 計算値 モデル2	Sylmar 計算値 モデル3
最大加速度 (cm/s ²)	407.1	826.8	627.8	856.8	479.3	1060.2
最大速度 (cm/s)	44.7	128.9	42.2	70.3	61.6	91.7
最大変位 (cm)	4.6	32.5	7.1	8.5	5.1	7.7
RMS加速度	44.1	72.2	49.2	69.4	40.1	92.5
SI (h=5%)	122.7	387.9	210.5	247.7	145.1	306.5
継続時間 (秒)	3.84	5.24	21.92	3.94	4.42	3.94

表4.2.5.3 解析に用いた地盤モデル

層番号	モデル1			モデル2			土質	モデル3		
	層厚 (m)	γ_t (tf/m ³)	Vs (m/s)	層厚 (m)	γ_t (tf/m ³)	Vs (m/s)		層厚 (m)	γ_t (tf/m ³)	Vs (m/s)
1	3.0	1.5	100	2.0	1.6	210	礫混り砂	2.0	1.6	100
2	7.0	1.6	120	8.0	1.8	370	礫混り砂/粗砂/砂質礫	8.0	1.8	200
3	10.0	1.8	200	7.0	2.0	500	粗砂	7.0	2.0	300
4	20.0	1.9	300	23.0	2.0	330	粗砂	23.0	2.0	400
5	-	2.0	700	-	2.2	700	-	-	2.2	700

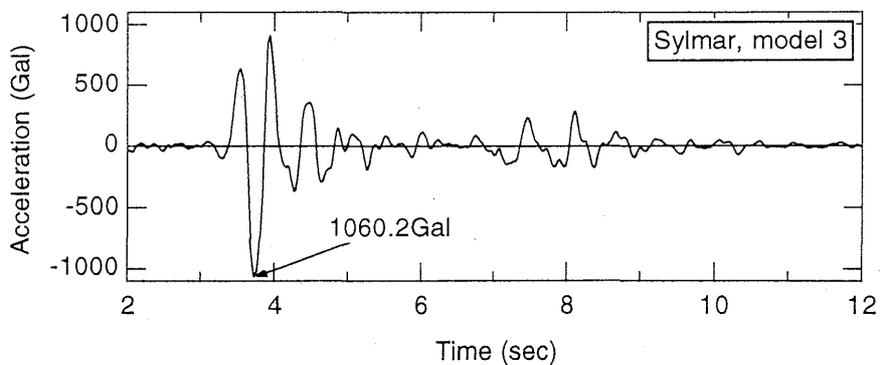
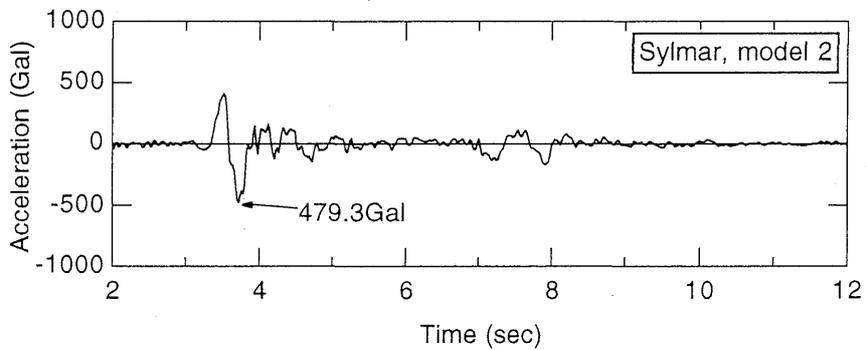
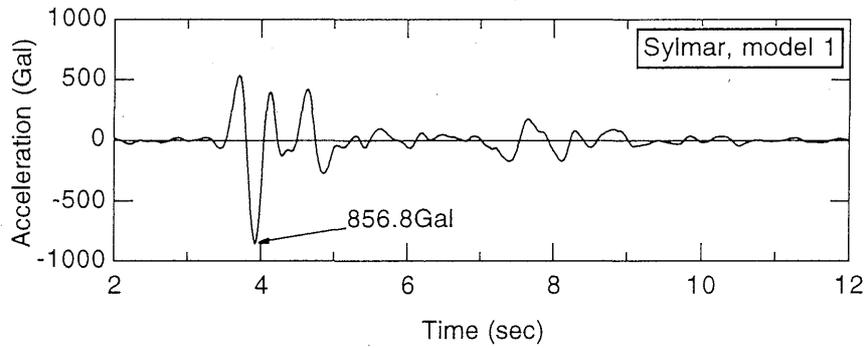


図4.2.5.10 SHAKEによる地表応答値

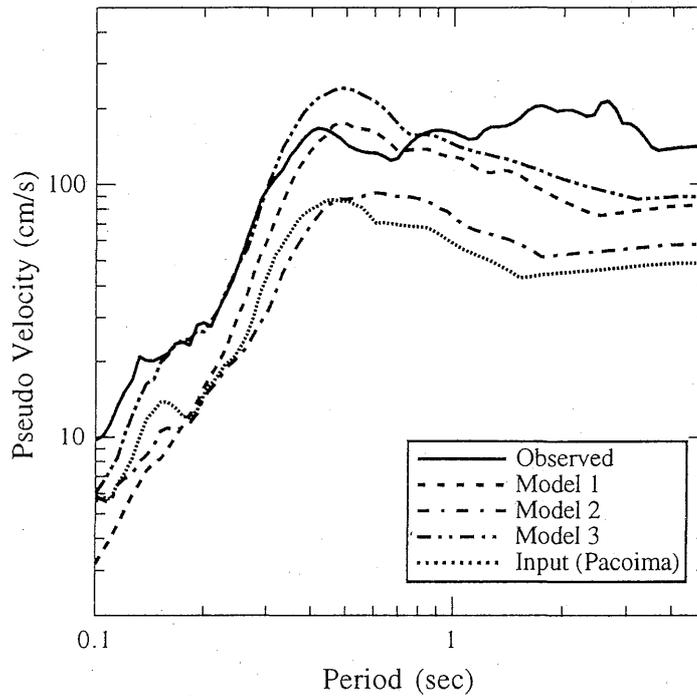


図4.2.5.11 Sylmer地区郡立病院のスペクトル

地震観測の行われた地点の地盤の状況はよく分からない。しかし、この付近の地盤については、いくつかの調査がある。O'Rourkeら（1992）は、1971年の地震の際のJuvenile HallからJansen浄水場にかけての地域の液状化被害について詳細な調査を行っている。また、USGSにより30mまでのS波構造が公表されている地点がいくつかある。これらを検討し、ここでは、地盤構造として、表4.2.5.3に示す3種類を想定した。モデル1はSylmar変電所付近の地盤状況をして想定したもので、GL-10mまで比較的軟弱な地盤となっている。これに対して、モデル2はUSGSによるOliveviewのデータ（安藤他、1994）をそのままモデル化した（ただし、表層の厚さは40mとし、第4層の層厚を調整した）ものである。このデータにはS波速度とP波速度が示されている。P波速度を見ると、GL-27mまでは地下水がない事になる。また、S波速度とP波速度の値が非常に近く、常識的なポアソン比の範囲から離れている。そこで、モデル3としてモデル2と地層構成が同じでS波速度を小さくしたものを作成した。

図4.2.5.10に地表の加速度時刻歴を示す。モデル1は最大加速度が 857cm/s^2 と観測値と近いが、表4.2.5.2に示したように速度、変位は非常に小さい。また、最大値以降の波形を見入ると、観測記録は振幅も比較的大きい波が続いているが、解析では振幅も小さく、周期もかなり長くなっているのが特徴である。図4.2.5.11のスペクトルで見ると、周期0.8秒以上の部分で観測値の方が解析値と比べ非常に大きくなっており、この差が速度と変位に影響したと考えられる。この様な最大応答以降の減衰の大きさと周期の伸びは、等価線形手法で、最大値付近の挙動に着目して剛性と減衰を決めたために、最大値以降については減衰を大きく、また、剛性を小さく評価したためであると考えられるが、非線形法による解析を実施していないことから、明確な結論を出すことは出来ない。

モデル2は最大加速度のみならず波形全体で見ても加速度の値は観測値より小さく、ほとんど現象を説明できていない。スペクトルで見ても、入力を用いた波形とほとんど同じである。これに対して、モデル3ではスペクトルで見ると周期0.3秒程度までは観測値と非常によく一致しているが、入力地震動の卓越周期付近では解析値の方が全体にかなり大きくなっている。一方、周期0.8秒以降の部分については観測値の方が次第に大きくなるのに対し、計算値は小さくなり、大きな差が生じてくる。この様なスペクトル形状の差が、時刻歴では計算値の最大値が大きい結果となったと考えられる。また、最大値以降については、振幅は観測値に比べ小さいが、周波数特性は若干長い程度である。

4.2.5.5 おわりに

ノースリッジ地震で大きい地震動が観測されたTarzanaおよびSylmarの記録について、その値がこれまでの技術者の常識の範囲を超えた値であることから、これが通常地震応答解析で説明できるかの試みを行った。解析の結果は、いずれの場合でも現在よく用いられる地震応答解析では説明できないことが分かった。

本解析では、多くの仮定を用いており、解析の精度にも問題がないわけではない。また、地震記録に対する検討も十分には行わず、デジタル記録をそのまま用いている。しかしながら、2つのケースとも観測値を説明することは出来なかったということは技術者にとっては重要な結論のように見える。今後、さらに詳細に検討したいと考えている。

参考文献

- A Cooperative Investigation Team for Microtremor Measurements in Los Angeles Area (1994): Microtremor Measurements in Los Angeles Area - A Preliminary Study of Seismic Microzoning -, Tokyo Institute of Technology
- 安藤雅孝、入倉孝次郎 (1994) : 地震活動および強震動、1994年ロサンジェルス地震と都市機能障害の調査研究、文部省科学研究費突発災害調査研究研究成果、自然災害総合研究班 (研究代表者・大町達夫)
- CDMG (1994a): CSMIP strong-motion records from the Northridge, California Earthquake of 17 January 1994, Report No.OSMS 94-07
- CDMG (1994b): Processed CSMIP Strong-Motion Data from the Northridge Earthquake of January 17, 1994, CDMG
- O'Rourke,T.D., Roth,B.L. and Hamada,M. (1992): Large Ground Deformations and Their Effects on Lifeline Facilities: 1971 San Fernando Earthquake, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Vol.2, Technical Report NCEER-92-0002, NCEER
- USGS (1994): Accelerograms recorded at USGS National Strong-motion Network Stations during the Ms=6.6 Northridge, California earthquake of January 17, 1994, Openfile Report 94-141