

## 7. ダム

### 7.1 概説

1994年1月17日に発生した米国ノースリッジ (Northridge) 地震 (M 6.7) の震源付近のベンチュラ郡 (Ventura County) とロサンゼルス郡 (Los Angeles County) には、117のダムがある。内訳は、アースダムとロックフィルダムが88、コンクリートダムが29である。そのうち震央地点から25マイル以内には、約65のダムが存在する。

地震時において、ダムは全般的に良好な挙動を示した。20以上のダムにおいてクラック、小変位、漏水量の一時的な増加等の変状が生じたが、ダムの安全性に関わる重大な被害は生じなかった。これは、1971年に発生したサンフェルナンド地震 (San Fernando Earthquake) によるダムの被害経験を契機にして既設ダムの安全性再評価が実施され、その適切な措置が今回の地震によるダムの変状が軽微であったという状況に反映されたと言える。

今回の地震では、ダム堤体およびダムサイトにおいて多数の地震加速度が記録された。震源から近距離に位置するダムでの記録など貴重なデータも記録された。

### 7.2 ダムおよびダムサイトでの実測地震動

今回の地震により図 7.2.1 に示すダムで、堤体、付属構造物およびダムサイトにおいて地震加速度が記録された。カリフォルニア州保全局鉱山地質部 (State of California, Department of Conservation, Division of Mines and Geology) によるカリフォルニア強震観測協議会 (California Strong Motion Instrumentation Program)<sup>1),2)</sup>、米国地質調査所 (United States Geological Survey) による米国強震ネットワーク (National Strong-Motion Network)<sup>3),4)</sup>、カリフォルニア州水資源局 (State of California, Department of Water Resources)、そして、ロサンゼルス市電力水道局 (City of Los Angeles, Department of Water and Power)<sup>4),5)</sup>により収集された、ダムおよびダムサイトで観測された最大加速度記録を表 7.2.1 に示す。図 7.2.2 にはダムサイト地盤で観測された水平最大加速度 (2成分のうち大きい加速度を採用) と鉛直最大加速度の震央からの水平距離減衰を示す。これらの文献ではダムサイトの地形、地質、地盤条件や地震計設置状況が示されていないため、これまで日本のダムサイト基盤で観測された最大加速度記録と直接比較することは困難である。

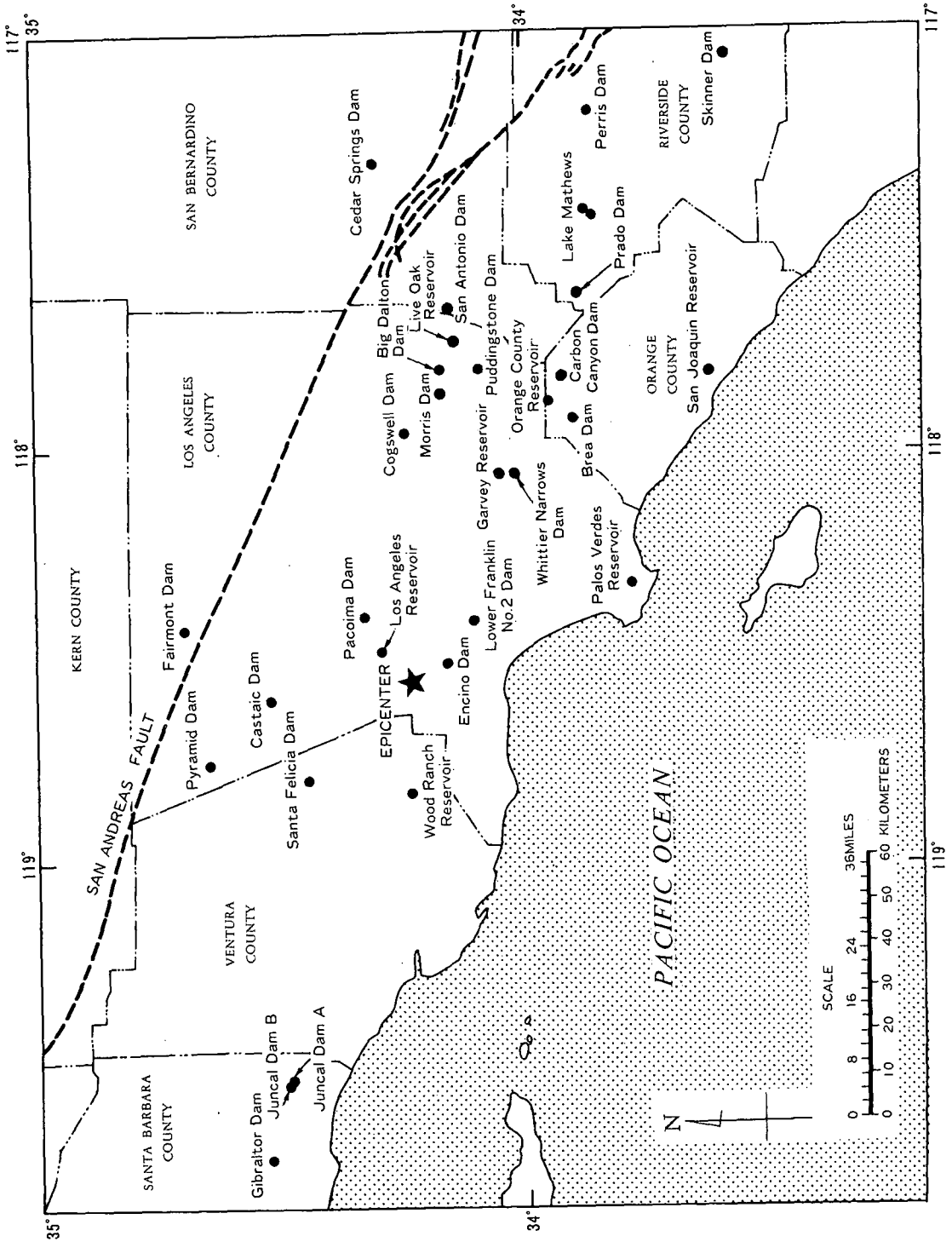


図 7.2.1 地震加速度が観測されたダムの位置図

表 7.2.1 ダムおよびダムサイトで観測された最大加速度記録 (文献 1)~5)をもとに筆者作成) (その 1)

ダム名	型式	堤高 (m)	震央 距離 (km)	所有者	地震計設置位置	方向	最大 加速度 (g)
Encino Dam	フィル	51.2	7	ロサンゼルス市	左岸アバットメント	水平	0.23
Los Angeles Reservoir	ガン型 フィル	39.6	10	ロサンゼルス市	本ダム天端	水平 1	0.56
						水平 2	0.43
						鉛直	0.39
					本ダム右岸アバットメント	N200° E	0.32
						N110° E	0.43
						鉛直	0.32
					本ダム基盤	N 64° E	0.32
						N154° E	0.28
						鉛直	0.13
					北部副ダム天端	水平 1	0.65
						水平 2	0.56
						鉛直	0.38
	水平 1	1.34					
	水平 2	1.18					
	鉛直	0.29					
Lower Frank- lin No.2 Dam	均一型 アース	14.9	18	ロサンゼルス市	天端	水平	0.42
					基盤	水平	0.22
Pacoima Dam	アーチ	113	19	ロサンゼルス郡 公共事業局 (Los Angeles County Depart- ment of Public Works)	天端中央から右岸へ堤頂長 の 1/6	ダム軸直角	>1.42
					天端中央	ダム軸直角	2.01
						ダム軸	1.76
						鉛直	>1.60
					天端中央から左岸へ堤頂長 の 1/4	ダム軸直角	2.32
					堤体 80% 標高 中央から右 岸へ堤幅の 1/6	ダム軸直角	2.33
					堤体 80% 標高 中央から左 岸へ堤幅の 1/4	ダム軸直角	1.59
					堤体底部	ダム軸直角	0.49
						ダム軸	0.54
						鉛直	0.43
					右岸アバットメント	EW	>1.04
						鉛直	≥1.83
					左岸アバットメント	EW	1.54
						NS	≥2.04
						鉛直	1.40
					左岸アバットメント上部	N194° E	1.29
	N104° E	1.59					
	鉛直	1.23					
ダムサイトより約 130m 下 流の地盤	N265° E	0.44					
	N175° E	0.42					
	鉛直	0.20					

表 7.2.1 ダムおよびダムサイトで観測された最大加速度記録 (その2)

ダム名	型式	堤高 (m)	震央 距離 (km)	所有者	地震計設置位置	方向	最大 加速度 (g)				
Wood Ranch Reservoir Main Dam and Dikes	アース		28		本ダム天端中央	N245° E (上下流)	0.22				
						N335° E (ダム軸)	0.23				
						鉛直	0.18				
						副ダム天端右岸	N245° E	0.39			
										N335° E	0.28
										鉛直	0.17
									副ダム天端左岸	N245° E	0.24
										N335° E	0.25
										鉛直	0.18
									洪水吐	N245° E	0.21
										N335° E	0.22
										鉛直	0.17
Santa Felicia Dam	Z型 アース	64.9	34	水総合管理地区 組合 (United Water Conservation District)	天端中央	N355° E	0.30				
						N 85° E	0.27				
					下流地盤	鉛直	0.13				
						N175° E	0.27				
						N265° E	0.21				
鉛直	0.13										
Castaic Dam	Z型 フィル	103.6	39	カリフォルニア 州水資源局 (California State Department of Water Resources )	天端	N 26° E (ダム軸直角)	0.24				
						N116° E (ダム軸)	0.35				
						鉛直	0.24				
					堤体法先	N 26° E (ダム軸直角)	0.21				
						N116° E (ダム軸)	0.23				
						鉛直	0.20				
					取水塔	N148° E	0.83				
						N238° E	0.76				
鉛直	0.20										
Elderberry Dam			40	ロサンゼルス市	天端	N349° E	0.25				
						N 79° E	0.45				
					アバットメント	鉛直	0.19				
						N349° E	0.36				
						N 79° E	0.35				
鉛直	0.14										

表 7.2.1 ダムおよびダムサイトで観測された最大加速度記録 (その3)

ダム名	型式	堤高 (m)	震央 距離 (km)	所有者	地震計設置位置	方向	最大 加速度 (g)
Garvey Reservoir			43	メトロポリタン 水地区組合 (Metropolitan Water District)	天端  アバットメントの建物地盤	N114° E	0.16
						N 24° E	0.18
						鉛直	0.08
						N114° E	0.14
						N 24° E	0.12
					鉛直	0.07	
Whittier Narrows Dam			49	陸軍工兵隊 (U. S. Army Corps of Engi- neers)	天端  上流地盤	N208° E	0.19
						N298° E	0.21
						鉛直	0.07
						N180° E	0.22
						N270° E	0.15
					鉛直	0.08	
Pyramid Dam	ロック フィル	117.7	51	カリフォルニア 州水資源局	天端  堤体法先	N 94° E (ダム軸直角)	0.19
						N184° E (ダム軸)	0.17
						鉛直	0.11
						N 94° E (ダム軸直角)	0.03
						N184° E (ダム軸)	0.03
					鉛直	0.04	
Cogswell Dam	コンクリート 表面遮 水壁ロ ックフ ィル	63	53	ロサンゼルス郡 公共事業局	天端中央	N 65° E (上下流)	0.32
						N155° E (ダム軸)	0.30
						鉛直	0.18
					天端右岸	N 65° E (上下流)	0.35
						N155° E (ダム軸)	0.32
					右岸アバットメント	鉛直	0.28
						N 65° E (上下流)	0.11
	N155° E (ダム軸)	0.15					
	鉛直	0.07					
Palos Verdes Reservoir	アース	25	53	メトロポリタン 水地区組合	天端  アバットメントの建物	N210° E	0.12
						N120° E	0.15
						鉛直	0.07
						N210° E	0.15
						N120° E	0.12
					鉛直	0.10	

表 7.2.1 ダムおよびダムサイトで観測された最大加速度記録 (その4)

ダム名	型式	堤高 (m)	震中 距離 (km)	所有者	地震計設置位置	方向	最大 加速度 (g)
Fairmont Dam			56	ロサンゼルス市	右岸アバットメント	N360° E	0.06
						N 90° E	0.04
						鉛直	0.03
Morris Dam			61	メトロポリタン 水地区組合	左岸アバットメント	N246° E	0.04
						N156° E	0.03
						鉛直	0.03
Big Dalton Dam	マルチ プルア ーチ	46.6	68	ロサンゼルス郡 公共事業局	天端中央	NS (上下流)	0.09
						EW (ダム軸)	0.11
					天端右岸	NS (上下流)	0.09
						EW (ダム軸)	0.12
					天端左岸	NS (上下流)	0.06
						EW (ダム軸)	0.18
鉛直	0.03						
Brea Dam	アース	26.5	68	陸軍工兵隊	天端	N132° E	0.14
						N 42° E	0.23
						鉛直	0.09
					左岸アバットメント	N132° E	0.08
						N 42° E	0.10
					下流地盤	鉛直	0.08
						N132° E	0.19
N 42° E	0.12						
鉛直	0.05						
Orange County Reservoir	アース	31.4	68	メトロポリタン 水地区組合	天端	N 90° E	0.20
						N360° E	0.19
						鉛直	0.09
					アバットメント	N 90° E	0.11
						N360° E	0.11
鉛直	0.05						

表 7.2.1 ダムおよびダムサイトで観測された最大加速度記録 (その5)

ダム名	型式	堤高 (m)	震央 距離 (km)	所有者	地震計設置位置	方向	最大 加速度 (g)
Puddingstone Dam	アース	43.3	69		天端中央	NS (上下流)	0.21
						EW (ダム軸)	0.12
					天端左岸	鉛直	0.07
						NS (上下流)	0.13
					右岸アバットメント	鉛直	0.06
						NS (上下流)	0.06
					左岸アバットメント	EW (ダム軸)	0.05
						鉛直	0.02
					下流地盤	NS (上下流)	0.07
						EW (ダム軸)	0.08
Carbon Canyon Dam			72	陸軍工兵隊	天端	N131° E	0.11
						N 41° E	0.19
					右岸アバットメント	鉛直	0.08
						N131° E	0.14
						N 41° E	0.14
						鉛直	0.06
Live Oak Reservoir			73	メトロポリタン 水地区組合	アバットメント	N180° E	0.04
						N 90° E	0.03
						鉛直	0.01
San Antonio Dam			80	陸軍工兵隊	下流地盤	N 90° E	0.05
						N360° E	0.09
						鉛直	0.03
Prado Dam			90	陸軍工兵隊	天端	N 90° E	0.09
						N360° E	0.10
					下流地盤	鉛直	0.07
						N 90° E	0.20
						N360° E	0.18
						鉛直	0.06
San Joaquin Reservoir			92	メトロポリタン 水地区組合	天端	N 87° E	0.04
						N357° E	0.04
					左岸アバットメント	鉛直	0.02
						N 87° E	0.12
						N357° E	0.14
						鉛直	0.07

表 7.2.1 ダムおよびダムサイトで観測された最大加速度記録 (その6)

ダム名	型式	堤高 (m)	震央 距離 (km)	所有者	地震計設置位置	方向	最大 加速度 (g)
Juncal Dam A	アーチ		94		堤体	N 70° E	0.05
						N160° E	0.01
						鉛直	0.01
					地盤	N 70° E	0.05
						N160° E	0.03
						鉛直	0.01
Juncal Dam B	マルチ プルア ーチ		94		堤体	N 60° E	0.05
						N150° E	0.05
						鉛直	0.02
Lake Mathews Main Dam	アース	61	108	メトロポリタン 水地区組合	天端右岸	N260° E (ダム軸直角)	0.15
						N350° E (ダム軸)	0.12
						鉛直	0.07
					天端左岸	N260° E (ダム軸直角)	0.06
						N350° E (ダム軸)	0.08
						鉛直	0.04
Lake Mathews Dike	アース	36.6	109	メトロポリタン 水地区組合	左岸アバットメント	N345° E (ダム軸直角)	0.04
						N 75° E (ダム軸)	0.04
						鉛直	0.02
Gibraltor Dam	アーチ		111		堤体	N185° E	0.04
						N275° E	0.05
						鉛直	0.02
					地盤	N185° E	0.02
						N275° E	0.03
						鉛直	0.02
Cedar Springs Dam	ロック フィル	71.9	131	カリフォルニア 州水資源局	天端	N 21° E (ダム軸直角)	0.05
						N111° E (ダム軸)	0.08
						鉛直	0.03
					取水塔	N328° E	0.05
						N 58° E	0.08
						鉛直	0.01
Perris Dam	アース	39.6	141	カリフォルニア 州水資源局	天端	N224° E (ダム軸直角)	0.11
						N314° E (ダム軸)	0.11
						鉛直	0.03
					堤体法先	N224° E (ダム軸直角)	0.04
						N314° E (ダム軸)	0.03
						鉛直	0.02
Skinner Dam			153	メトロポリタン 水地区組合	左岸アバットメント	N178° E	0.01
						N 88° E	0.01
						鉛直	0.02



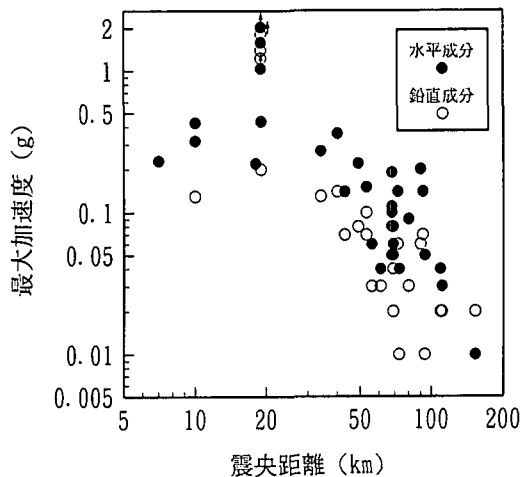


図 7.2.2 ダムサイト地盤で観測された最大加速度の距離減衰

### 7.3 各ダムの挙動

地震発生後、カリフォルニア州水資源局ダム安全部 (State of California, Department of Water Resources, Division of Safety of Dams) により震央から 47 マイル以内のカリフォルニア州管轄の 108 ダムが点検 (発生後 5 日以内に 105 ダム, その後 1 週間以内に 3 ダムを追加) された。さらに, 震央から近距離のダムについては, 約 2 か月後までフォローアップ調査が行われた。また, 連邦政府によっても数日以内に調査が行われた。

以降に, 地震により被害および変状を生じた各ダムの地震時の挙動について述べる。ダムの位置を震央と合わせて図 7.3.1 に示す。ここに, 個別に記述する 16 ダムは, 文献 6) と 7) に報告されているものであり, 今回の地震による被害・変状は主に, 上記文献より引用した。

#### 7.3.1 パコイマダム (Pacoima Dam) <sup>9)</sup>

パコイマダムはカリフォルニア, サンフェルナンドの北約 8 km のサンガブリエル山 (San Gabriel Mountain), パコイマ峡谷に位置する。当ダムは, 堤高 113 m, 堤頂長 195 m の変半径コンクリートアーチダムである (写真 7.3.1)。パコイマダムの平面図を図 7.3.2 に, 断面図を図 7.3.3 に示す。完成した 1929 年当時には, 米国で 1 番高いコンクリートアーチダムであった。現在, ロサンゼルス郡公共事業局治水地区組合 (Los Angeles County, Department of Public Works, Flood Control District) により, 所有・管理されている。ダムの目的は, ロサンゼルス郡の洪水調節と, 地下水資源の保全である。ダムは, サンガブリエル山の変質片麻岩層のきり立った峡谷に位置し, ダムサイトの岩質は片麻状の石英閃緑岩である<sup>9)</sup>。

パコイマダムは, 2 次アーチ (secondary arches) に対してケイン法 (Cain method) やヤコブセン法 (Jakobsen's method) を用いて設計された。設計荷重は貯水圧のみであり, 地震荷重は, 考慮していなかった。1928 年には, 荷重分割法のクラウン片持梁法を用いた応力解析で堤体設計のチェックが行わ

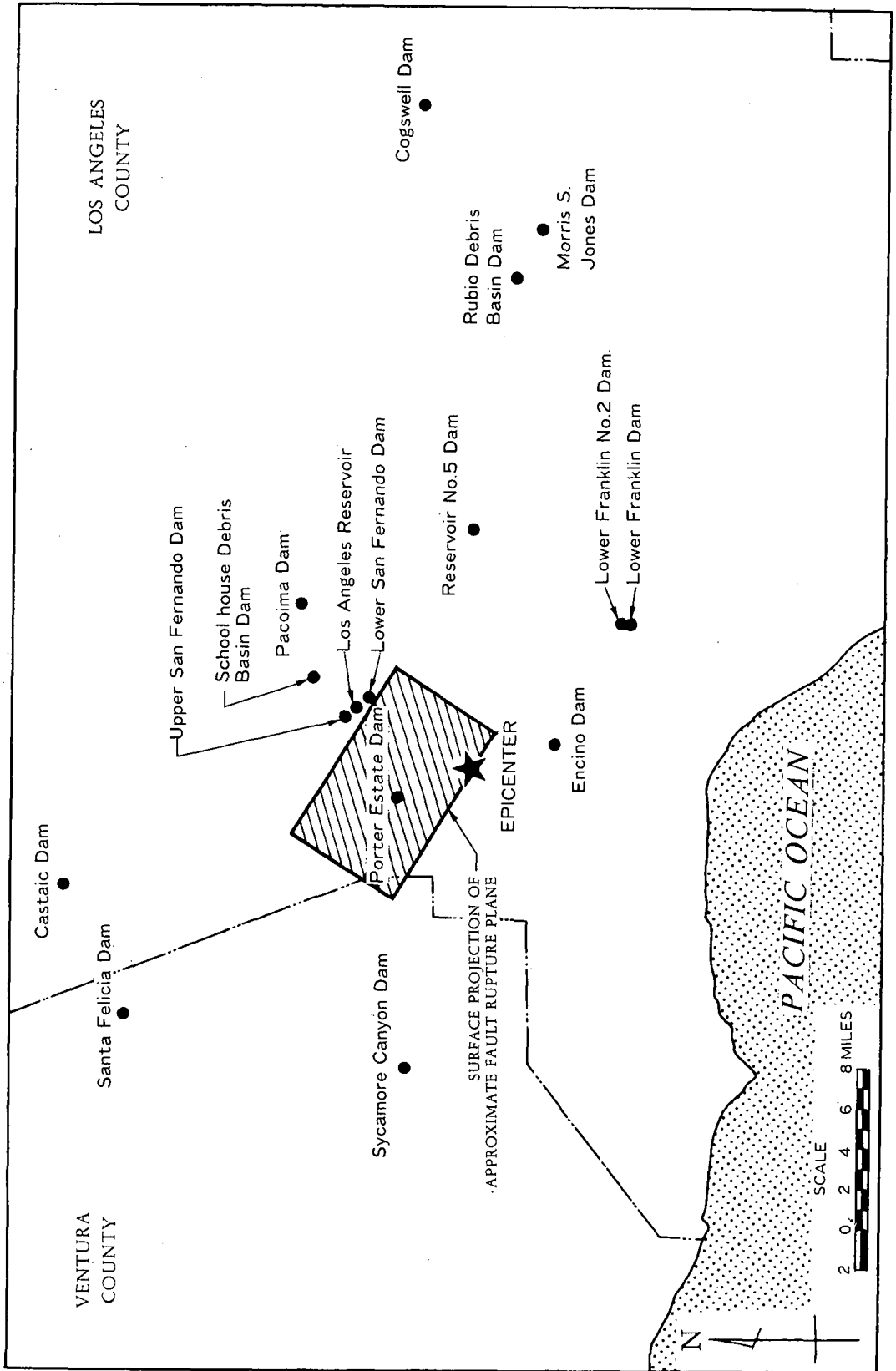


図 7.3.1 7.3 で記述する変状の生じたダムの位置図

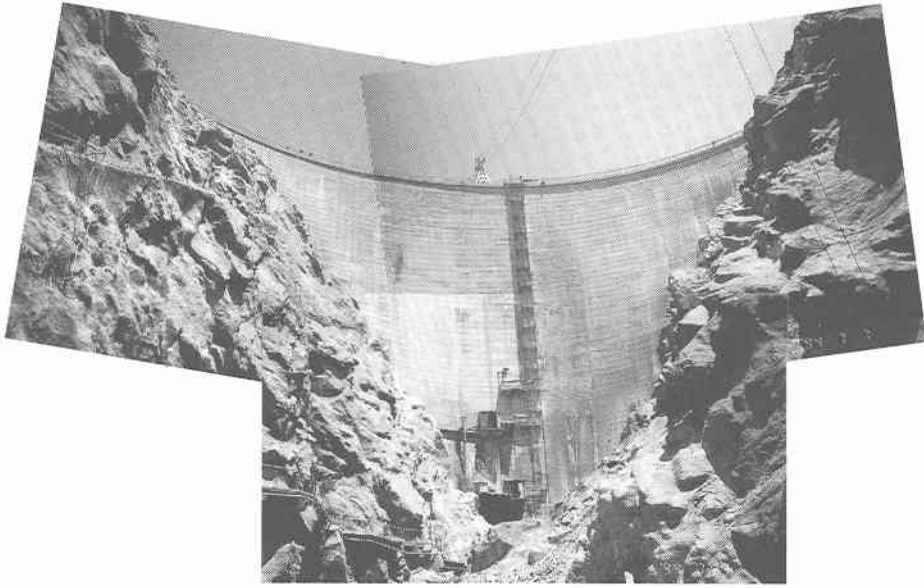


写真 7.3.1 パコイダムの下流面 ((株)建設技術研究所 荒川昭治氏より提供)

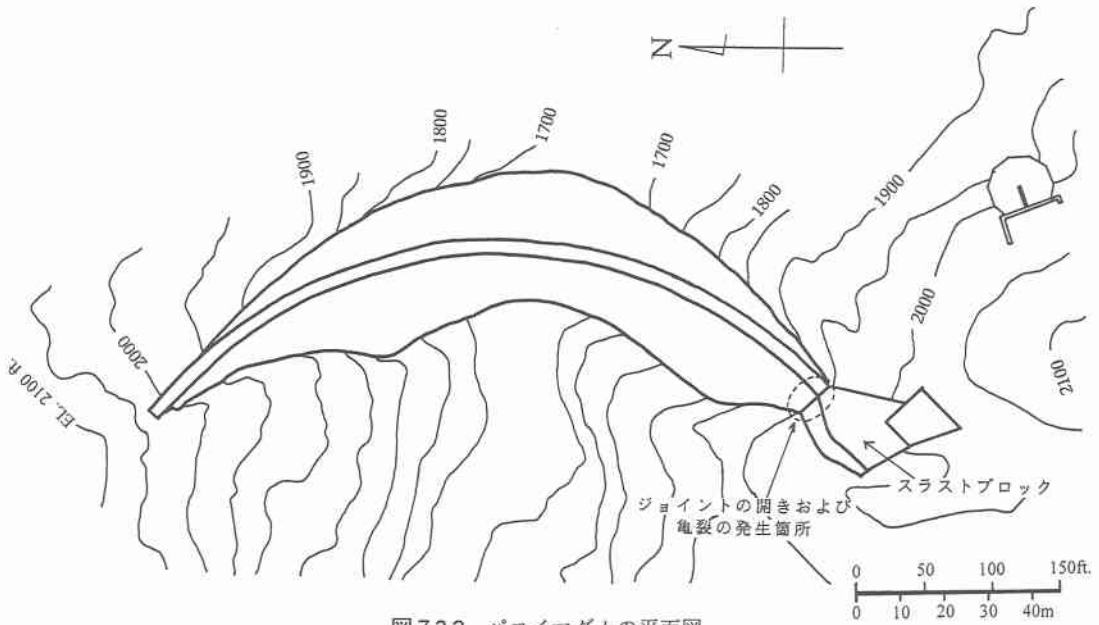


図 7.3.2 パコイダムの平面図

れた。やせ尾根である左岸アバットメント部は、基礎岩盤としては強度が小さいため、重力型スラストブロック (low gravity thrust block) を設置し、ダム本体のアーチスラストを支持するとともに、鉛直荷重を増やすことにより、アバットメント部のすべりに対する安定性を増加させた。左岸アバットメントには止水性増強もかねて 100~150 フィート深のボーリング孔からコンソリデーショングラウトが施された<sup>8),9)</sup>。

1967年から1968年にかけて、ダムの安全性の再評価が行われた。調査としては、左岸アバットメ

ントの地質調査、堤体コンクリートやアバットメントのボーリングコアの試験による物性調査および安定解析が実施された。安定解析手法は、荷重分割法の半径方向調整計算が用いられ、入力荷重としては、満水時の貯水圧のほか、加速度0.15gの水平地震力を加味した。ダム堤体の圧縮破壊、および引張破壊に対する安全率は、それぞれ6.8および5.8であった。一方、左岸アバットメント部のすべりに対する安全率は、1.0程度しかなかったため、グラウト補強を行い安定性を増加させた<sup>8),9)</sup>。

1971年2月9日にサンフェルナンド地震(San Fernando Earthquake)が発生した。この地震は、リヒターマグニチュードが6.6と今回のノースリッジ地震とほぼ同じ規模の地震であった。パコイマダムは、その震央地点から約6kmと近距離、かつ断層面の推定破壊域内に位置していた。左岸アバットメント上部に設置されていた地震計は、水平最大加速度で、1.25gを記録した。サンフェルナンド地震により、ダム堤体およびダムサイトに生じた主要な変状を下記に示す<sup>8),10)</sup>。

- ・ダム本体とスラストブロック間の鉛直横継目が、0.25～0.38インチほど開いた。
- ・スラストブロックにクラックが生じた。
- ・ダム付近の局地的な岩盤変動により、ダムアバットメントの左右岸間隔が0.94インチ狭まり、ダム軸が時計回りに30秒回転し、堤体右岸天端が左岸天端に対し0.68インチ沈下した。
- ・左岸アバットメントの岩塊が弱部に沿って下流方向に若干変位した。

地震によるこれらの変状に対して、以下のような補修および補強が行われた<sup>8),9),11)</sup>。

- ・ダム堤体とスラストブロック間のジョイントの開き、およびスラストブロックのクラックに関しては、スラストブロックに削孔しグラウトを施した。また、上下流面には、エポキシ材でコーキングを施された。
- ・変位を生じた左岸アバットメントに、35本のポスト・テンション方式のロックアンカーが施工され、安定化された。
- ・グラウトカーテンを補修するために、基礎とアバットメントに追加グラウトが施された。
- ・放流設備の容量が増強された。

サンフェルナンド地震後、左岸アバットメントの安定性については、図解法および岩盤力学的手法により検討が行われた。ダムの構造安定性については、荷重分割法の完全調整計算および3次元有限要素法による、静的、動的応答解析が行われた。これらの解析には3つの最大可能地震(Maximum Credible Earthquake)に対する地震動が入力された。最大可能地震としては、①パコイマダムから約20マイルに位置するサンアンドレアス断層(San Andreas Fault)で発生するリヒターマグニチュード

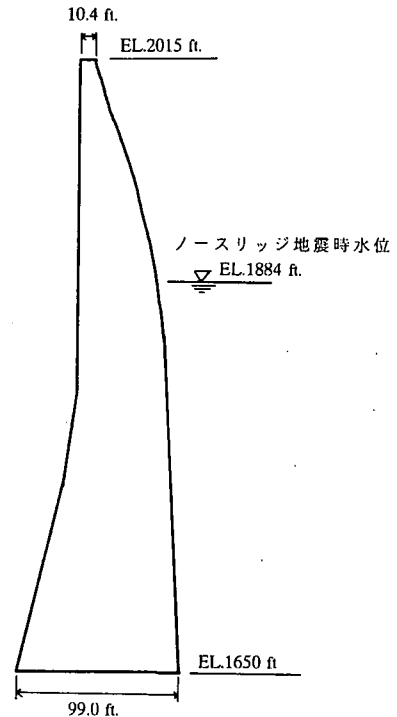


図 7.3.3 パコイマダムの断面図

8 以上の大規模な地震、②サンフェルナンド地震を引き起こしたシエラマドレ断層系 (Sierra Madre Fault system) 内でダムから 10~15 マイルで発生するサンフェルナンド地震と同規模 (M 6.5) の地震、③サンフェルナンド地震と同震央で同規模の地震の 3 地震が設定された。3 つの最大可能地震による地震動の最大地盤加速度と継続時間はそれぞれ 0.33 g, 0.32 g, 0.83 g および 40 秒, 15 秒, 15 秒である。また、解析における設定貯水位は、最大可能地震①②に対しては満水 (EL.2 015 フィート)、③に対しては EL.1 870 フィートである。解析の結果、最大可能地震②に対してダム天端付近の一部で静的応力を考慮した応答圧縮応力が許容動的応力 (静的終局強度の 70% である 2 520 psi (約 183 kg/cm<sup>2</sup>)) を一瞬超過した程度であり、地震時安定性は問題ないことが確認された<sup>11)</sup>。また、サンフェルナンド地震後、パコイマダムでは最高水位が低く設定し直された。

パコイマダムは、今回のノースリッジ地震の震央からの距離が 11.4 マイルと近距離に位置している。ダム堤体およびダムサイトには、11 個の地震計が設置されており、21 成分の加速度時刻歴が記録された。そのうち、左岸アバットメント上部の地震計は左岸アバットメントのやせ尾根部に建てられた小屋に設置されている (写真 7.3.2)。この地震計では 1971 年サンフェルナンド地震時に、水平最大加速度 1.25 g, 鉛直最大加速度 0.7 g を記録した。今回の地震では、補正值でそれぞれ 1.59 g, および 1.23 g とサンフェルナンド地震をしのぐ加速度値を記録した。その加速度波形を図 7.3.4 に示す。

ノースリッジ地震によりパコイマダムはサンフェルナンド地震時と同様に、左岸アバットメントと、左岸スラストブロックに大きな変状を生じた。左岸アバットメント部は、モルタル吹付でカバーされているが、写真 7.3.3 に示すように、地震により亀裂が生じた。また、左岸アバットメントに設置されている、天端へ向かう歩道やトラムの軌道にも被害が生じた。左岸アバットメントは、地表より約 20 m の深さにある弱部に沿って岩塊が南西方向に移動し、その変位量は最大で水平方向に 19.3 インチ、鉛直方向に 14.1 インチ沈下した。そのため、サンフェルナンド地震後の補修の際にアバットメントに打ち込んだポスト・テンション方式のロックアンカーが引き伸ばされた。特に、図 7.3.5 に示したすべり岩塊の中央に位置する No.17 アンカーと、スラストブロックに近い No.35 アンカーでは、終局強度に対する引張応力値の比率は、地震前の 1992 年 10 月 8 日には、それぞれ 61%, 71% で

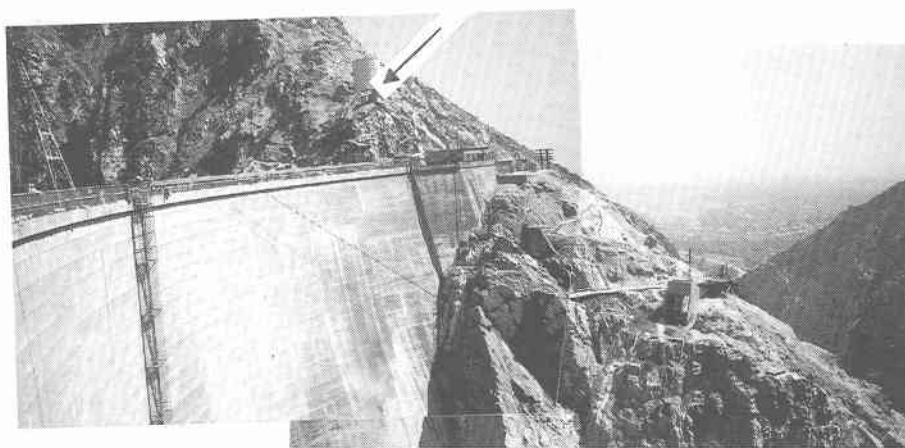


写真 7.3.2 パコイマダムの左岸アバットメントとスラストブロック (矢印の小屋内に地震計が設置されている)  
(株)建設技術研究所 荒川昭治氏より提供)

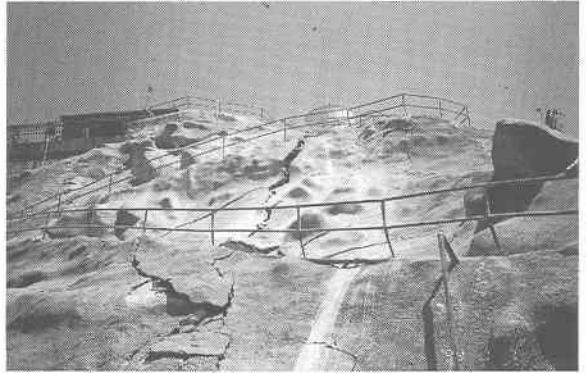
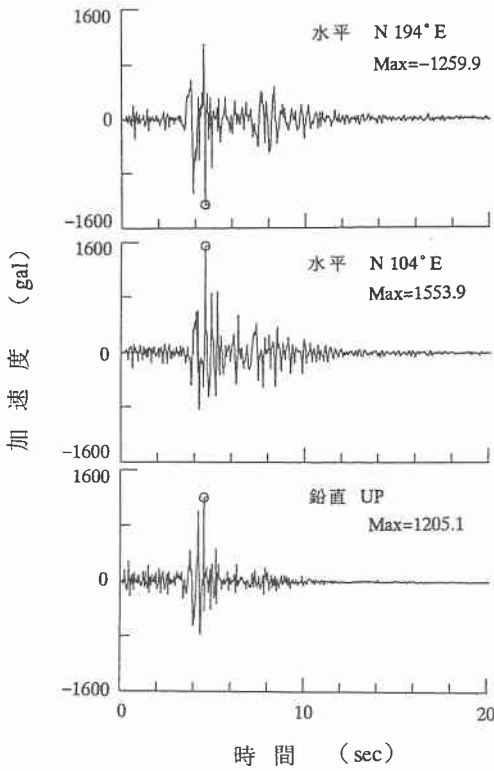


写真 7.3.3 パコイダム左岸アバットメント部の吹付けコンクリートの亀裂  
((株)建設技術研究所 荒川昭治氏より提供)

図 7.3.4 パコイダム左岸アバットメント上部で観測された加速度波形 (文献 2) をもとに作成

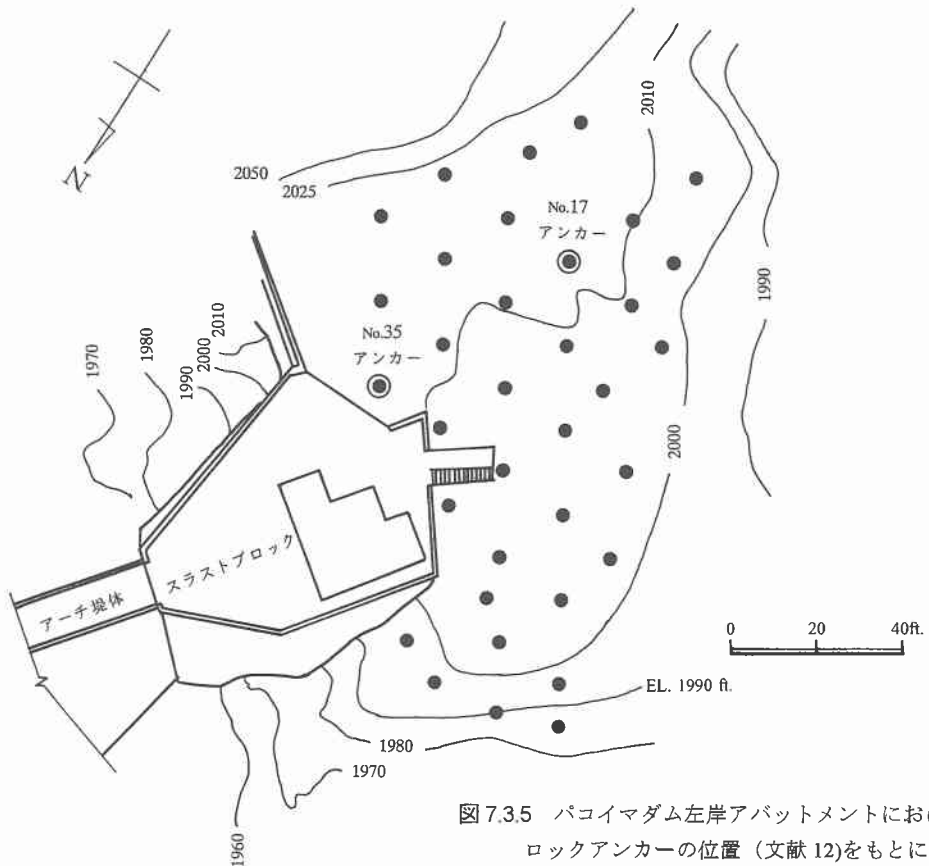


図 7.3.5 パコイダム左岸アバットメントにおけるロックアンカーの位置 (文献 12) をもとに作成



写真 7.3.4 パコイダム左岸アーチ堤体とスラストブロックジョイントの天端での開きおよび段差  
((株)建設技術研究所 荒川昭治氏より提供)

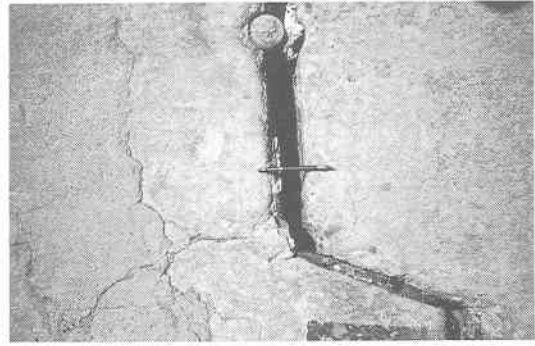


写真 7.3.5 写真 7.3.4 の拡大 (約 2 インチの開き)  
((株)建設技術研究所 荒川昭治氏より提供)

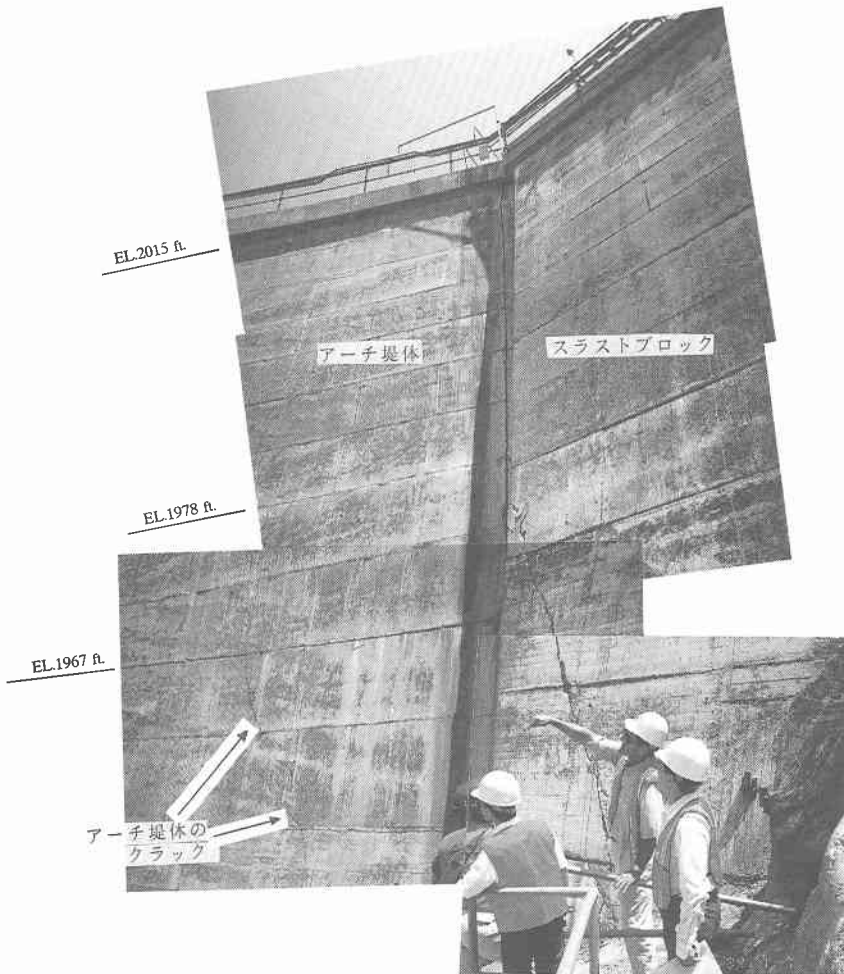


写真 7.3.6 パコイダム下流面における左岸アーチ堤体とスラストブロックジョイントの開きおよびアーチ堤体とスラストブロックの亀裂 ((株)建設技術研究所 荒川昭治氏より提供)

あったのが地震の4日後の1994年1月21日には、82%、84%に上昇した。しかし、応力値はその後減少した。また、左岸アバットメントのスラストブロック付近でピエゾメーターが地震後12フィート上昇した。

左岸アバットメント部に変位が生じたため、左岸スラストブロックも南西方向に移動した。そのため、スラストブロックとアーチ堤体とのジョイント部に開きが生じ（天端で約2インチ）、その相対的な移動量は天端で水平西方向に2.2インチ、鉛直に1.07インチの沈下であった（写真7.3.4, 7.3.5）。ジョイント部の開きは下部にまで達し、EL.1960~1970フィート付近のアーチ堤体とスラストブロックにそれぞれクラックが生じた（写真7.3.6）。アーチ堤体に生じたクラックは微細なヘアークラックであるが、サンフェルナンド地震時には、アーチ堤体にクラックが生じなかった。

地震前後での漏水量の変化を図7.3.6に示す。地震前は1ガロン/分以下であったが、地震後には左岸アバットメントから最大19ガロン/分、右岸アバットメントから最大8ガロン/分程度に上昇した<sup>12)</sup>。量的には少量であり、徐々に減少し1か月後には安定した状態になったが、左岸アバットメントからの漏水量は、地震の2か月後でも10ガロン/分程度にしか減少しないため、グラウトカーテンに被害が生じていると思われる。サンフェルナンド地震後においてもグラウトカーテンの補修が行われているので、今回もグラウトカーテンの補修が必要となると思われる。

以上述べたノースリッジ地震によるパコイマダム被害は、アーチ堤体に生じたヘアークラックを除けば1971年サンフェルナンド地震時とほとんど同じ被害形態であった。地震動が非常に強かったにもかかわらずこの程度の影響で済んだのは、サンフェルナンド地震後に水位を下げている等の対応が幾分功を奏したといえる。また、サンフェルナンド地震後の動的解析による安定性評価<sup>11)</sup>においてわずかな堤体のクラックやアバットメントの移動程度は予期されており、今回のノースリッジ地震でそれらの変状がそのとおりに生じたことは興味深い。今後、左岸アバットメントの山留めはサンフェルナンド地震後の補修以上の補強が必要であると思われる。

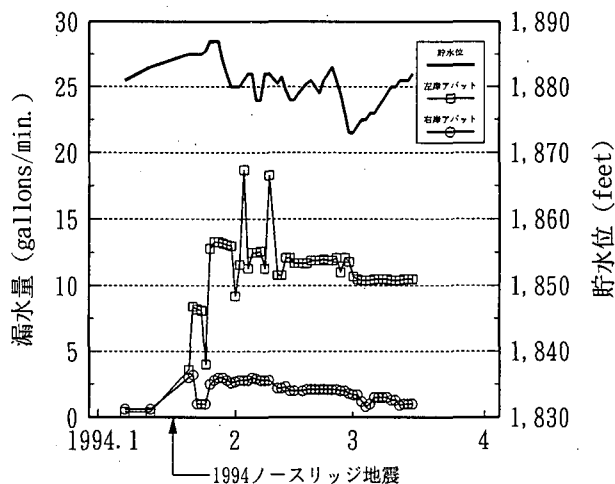


図7.3.6 パコイマダム地震前後の漏水量の変化（文献12）をもとに作成）



7.3.2 サンフェルナンド下ダム (Lower San Fernando Dam) <sup>6),7)</sup>

サンフェルナンド下ダムは、サンフェルナンドバレーの北側に位置するロサンゼルス市の所有するアースダムである。当ダムは、1971年サンフェルナンド地震で被害を受けるまでは、7.3.3で述べるサンフェルナンド上ダムとともに、バンノーマンコンプレックス (Van Norman Complex) を形成し、ロサンゼルス市に水を供給していた。堤体の大部分は1912年から1915年にかけて水締め工法により砂質土が盛立てられた。1916年には、その上に同じく水締め工法により地盤の頁岩が10~15フィート厚に盛立てられた。その後1916年から1930年にかけて、転圧工法により、堤高145フィートまで盛立てられた。さらに、1929~1930年と、1940年に下流法面に押え盛土が施工され、安定性の増強、ならびに浸透量の調節を行った。ダムの基礎地盤は頁岩、シルト岩、砂岩といった堆積岩上の比較的固いシルト、粘土質砂そして礫の最大厚約35フィートの沖積層である<sup>13)</sup>。

当ダムは、1971年サンフェルナンド地震により甚大な被害を受けた。強震動によって上流側の水締め工法での盛立部が液状化し、地震後20~30秒ほど経った後、上流側堤体が貯水池側に大きくすべりを生じた。ダム堤体の天端は、地震時貯水位よりわずかに1.5mほど高く越流による堤体の決壊は免れた。

1971年サンフェルナンド地震後、ロサンゼルス市は、当ダムの常時における貯水池機能を放棄し洪水制御を主目的とすることとした。そのため、ダムの震災復旧は、ダム中央部付近のすべりを生じた部分に転圧による再盛立を施した程度の補強にとどめられた。その結果、堤高115フィート、天端幅60フィートになった (図7.3.7)。またそのほかに、貯水池内に排水しきれないために残った小さな水溜まり池内の取水塔から古い取水塔につなぐ新たな8フィート径の放流管が設置された。

サンフェルナンド下ダムは1994年ノースリッジ地震の震央から、北東に約6マイルの距離に位置している。地震による変状箇所を図7.3.7に示す。天端中央に長さ数100フィート、幅が最大で3.6インチの縦亀裂が生じた (写真7.3.7)。その後のトレンチ調査で深さは15フィートであった。ダムの下流法面には目立った変状はなかったが、上流側の法先から水溜まり池へ広がる、1971年サンフェルナンド地震後に再盛立を施した部分で幅が6インチ程度の亀裂がダム軸と平行に数条生じた (写真7.3.8)。さらにその亀裂に沿った上流側には噴砂が広がっている (写真7.3.9)。その噴砂の成分は、シルト質で細粒分を多く含む砂であった<sup>14)</sup>。

1971年サンフェルナンド地震後の復旧の際に設置された埋設放流管上の地表に大きな陥没穴が生じた (写真7.3.10)。その大きさはダム軸方向に26フィート、ダム軸直角方向に42フィート、最大深さは13フィートである。地震の4か月後の1974年5月に掘削が行われると、埋設されていたコルグ

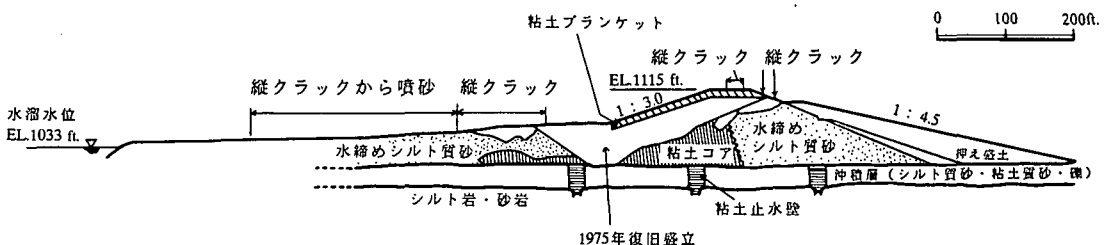


図7.3.7 サンフェルナンド下ダム断面図および変状箇所 (文献7)をもとに作成)



写真 7.3.7 サンフェルナンド下ダム天端中央付近の縦亀裂 (東京工大 大町達夫教授より提供)



写真 7.3.8 サンフェルナンド下ダム法先付近の縦亀裂 (東京工大 川島一彦教授より提供)



写真 7.3.9 サンフェルナンド下ダム法先付近の噴砂 (東京工大 川島一彦教授より提供)



写真 7.3.10 サンフェルナンド下ダム法先付近の埋設コルゲート管上の陥没穴 (東京工大 川島一彦教授より提供)



写真 7.3.11 サンフェルナンド下ダム法先付近の埋設コルゲート管の破損 (株)建設技術研究所 荒川昭治氏より提供)

ート管が写真 7.3.11 のようにつぶれて破損していた。これは地震時に強い横圧を受けたためと推定される。掘削中に埋設放流管に沿って新たな陥没穴が確認されたこともあり、地震により破損した放流管内に周辺の土が流れ込み地下に空洞が生じ、陥没穴を生じたと考えられている。

1993 年 1 月と 1994 年 4 月の測量結果から、ノースリッジ地震により堤体中央付近で天端は 0.66 フィート沈下し、上流方向に 0.33 フィート変位した。

以上のように、今回の地震では、貯水していなかったこともあり、1971 年サンフェルナンド地震時のような大きな被害はなかった。

### 7.3.3 サンフェルナンド上ダム (Upper San Fernando Dam) <sup>6),7)</sup>

サンフェルナンド上ダムは、ロサンゼルス市が所有する堤高 82 フィートのアースダムである。堤体の大部分は半水締め工法 (Semi-hydraulic) で築堤されており、上部 18 フィートの堤体は転圧工法により盛立てられ、1921 年に完成した。ダム基礎は更新世の固結度の低い礫質砂岩の上に 50~60 フィートの固い粘土や粘土質礫からなる沖積層である <sup>13)</sup>。

当ダムも 1971 年サンフェルナンド地震時に被害を受けた。堤体のすべりは生じなかったが、堤体が下流方向に永久変形を生じた。天端での変位量は、水平下流方向に約 5 フィート、鉛直下方に 3.2 フィートであった。上流法面には数条の縦亀裂が生じた。また、堤体の変形により、半水締め堤体中に設置されているコンクリート製の取水管にクラックが入り、その上部の堤体に陥没穴ができた。

1971 年地震後、当ダムは災害復旧されたが、再びダムに常時貯水することは許可されず、洪水制御および地下水かん養のみを目的として供されてきた。

サンフェルナンド上ダムは、1994 年ノースリッジ地震の震央から北東 6.4 マイルに位置する。地震後に左岸から撮影したダム堤体を写真 7.3.12 に示す。

地震により、上流側の旧貯水池面に噴砂が生じた。天端での最大変位量は鉛直方向に 2.36 フィート沈下し、下流方向に 0.6 フィート変位した。そのため右岸アバットメント付近に、幅約 3 インチ、長さ 50 フィート程度の横亀裂が発生し、左岸アバットメント付近の堤体下流法面には、幅約 2 インチ、長さ 40~60 フィート、深さ 5 フィート (トレンチ調査より) の縦亀裂が発生した。そのほかに、洪水吐や上流法面にも数条の亀裂が生じた。



写真 7.3.12 サンフェルナンド上ダムの地震後の状況 ((株)飛島建設 沼田淳紀氏より提供)

### 7.3.4 ロサンゼルス貯水池 (Los Angeles Reservoir) <sup>9,7)</sup>

ロサンゼルス貯水池は、1971年サンフェルナンド地震により大被害を受けた水締めダムであるサンフェルナンド上ダムおよび下ダムの代替として、ロサンゼルス市に水を供給する目的で、バンノーマンコンプレックスの一部として、その2ダムの上に建設され、1977年に完成した。堤体は、南側に位置する本ダム（堤高 130 フィート）と、北側に位置する北部副ダム（堤高 80 フィート）よりなる。両堤体とも岩盤上に転圧工法により築堤されている。ダム型式は、図 7.3.8 に示すようにゾーン型フィルダムであり、中心軸の上流側には転圧された粘土コアがあり、その下流にドレーンが設置されている。上流法面と天端はアスファルトで覆工されている。当ダムの建設は、サンフェルナンド地震が契機となっていることもあり、カリフォルニア大学バークレー校 (University of California at Berkeley) の H. B. Seed 教授の指導のもとに土質試験と動的解析を伴った耐震設計が行われた。設計地震としてサンアンドレアス断層を震源とするマグニチュード 8 以上の地震、およびダム近傍の断層を震源とするマグニチュード 7.5~7.75 の地震を最大可能地震として考え、それぞれ最大加速度 0.5 g、継続時間 80 秒、および最大加速度 1.15 g、継続時間 40 秒の設計地震動を動的解析に入力した。また、両設計地震に対する堤体の固有周期はそれぞれ 1.84 秒、2.82 秒で解析された。堤体材料の材料強度定数は、粘土コアでは粘着力  $C=360$  psf (pounds/feet<sup>2</sup>)、内部摩擦角  $\phi=26^\circ$ 、および混合シルト質砂では  $C=350$  psf、 $\phi=39^\circ$  である。解析結果は両設計地震に対しても、ひずみは 5%以内となり、耐震性が照査された<sup>15)</sup>。

取水塔連絡橋脇の銘板 (写真 7.3.13) によれば当ダムは 1977年に米国土木学会カリフォルニア支部から“OUTSTANDING CIVIL ENGINEERING ACHIEVEMENT”として表彰されている。

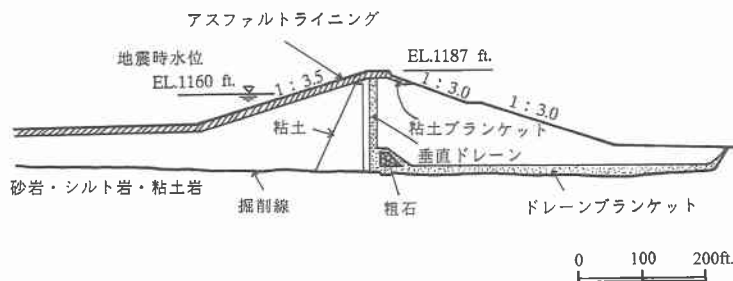


図 7.3.8 ロサンゼルス貯水池本ダムの断面図 (文献 7) をもとに作成)



写真 7.3.13 ロサンゼルス貯水池の表彰銘板 ((株)飛島建設 沼田淳紀氏より提供)



写真 7.3.14 ロサンゼルス貯水池本ダム上流アスファルトライニングの亀裂状況  
((株)飛島建設 沼田淳紀氏より提供)



写真 7.3.15 ロサンゼルス貯水池本ダム上流アスファルト  
ライニングの亀裂 ((株)飛島建設 沼田淳紀氏より提供)

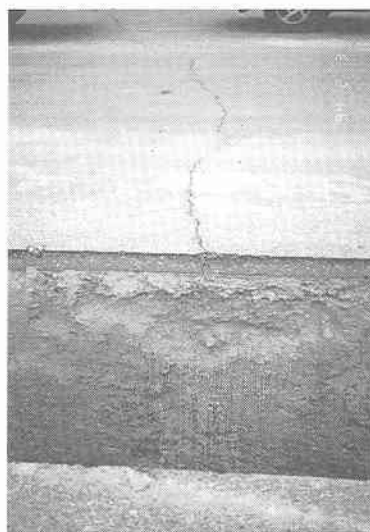


写真 7.3.16 ロサンゼルス貯水池北部副ダム左岸  
取付部近くの天端の横亀裂  
((株)飛島建設 沼田淳紀氏より提供)

ノースリッジ地震の震央から 6.1 マイルに位置し、地震時に貯水位は EL.1 160 フィートであり、洪水吐呑口標高の 15 フィート下であり、天端より 27 フィート下であった。ダム堤体およびダムサイトには地震計が設置されており、水平方向の最大加速度は本ダムの基礎で 0.35 g、右岸アバットメント部で 0.43 g、本ダム天端で 0.56 g、北部副ダム天端で 0.65 g であった。

本ダムの上流法面に覆工されているアスファルトライニングに最大幅 2 インチの縦亀裂が発生した (写真 7.3.14, 7.3.15) が、トレンチ調査より亀裂は浅いことが確認された。また、北部副ダムでは、左岸取付部付近の天端に最大幅 1 インチ、深さ 6 インチの横亀裂が生じた (写真 7.3.16)。管理者はこれらの亀裂を地震 3 か月後に Polyflex Type III でシールし、補修を施した (写真 7.3.17)。地震による変位量は、本ダムの最大断面で 3.5 インチ沈下し下流方向に最大 2.2 インチを観測した。北部副ダム

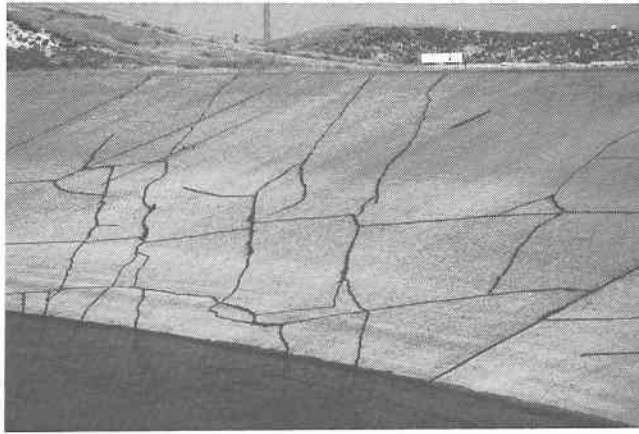


写真 7.3.17 ロサンゼルス貯水池本ダム上流アスファルトライニングの亀裂の補修状況  
(株)建設技術研究所 菅原 捷氏より提供)

は 1.2 インチ沈下し、下流方向に最大 0.02 インチの変位量を観測した。

堤体や基礎のピエゾ水頭は地震直後に上昇し、特に北部副ダムでは 27.6 フィートに上昇した。しかし、その後徐々に減少し安定した。

北部副ダムの西側のドレーンから集水した漏水量は地震前の 1994 年 1 月 13 日には 68 ガロン/分であったが、地震直後の 1 月 25 日には 240 ガロン/分に急増した。中央部ドレーンおよび東側ドレーンからの漏水量も地震前後でそれぞれ 14 ガロン/分から 37 ガロン/分、14 ガロン/分から 17 ガロン/分に微増した。

その後、漏水量は徐々に減少し西側ドレーンでは 100 ガロン/分、中央ドレーンでは 13 ガロン/分、東側ドレーンでは 13 ガロン/分と地震前のレベルに回復し、安定した。本ダムでは、全漏水量が地震前の 1994 年 1 月 3 日の 60 ガロン/分から地震直後の 1 月 20 日には 77 ガロン/分に微増した。その後、1 か月後の 2 月 17 日には 60 ガロン/分に回復した。

本ダム近くには、鉄筋コンクリート製の取水塔があり塔内に設置されている地震計では最大加速度 1.3 g を記録した。地震により取水塔自体には変位はなかったが取水塔への管理用連絡橋の橋脚と取水塔の地震応答の違いにより、取水塔よりの橋桁が支点部で南北方向に 2 インチ、東西方向に 16 インチ水平方向にずれた (写真 7.3.18)。

ロサンゼルス貯水池の上下流に位置するサンフェルナンド上ダム、下ダムは締固め工法で築堤されたダムであるために、ノースリッジ地震により液状化を起し亀裂等が発生し、また、沈下量、水平変位量が大きかったのに対し、ロサンゼルス貯水池の本ダムと北部副ダムは地震による沈下量、水平変位量も小さく、岩盤上に転圧工法で築堤されたフィルダムの耐震性が確認できた。

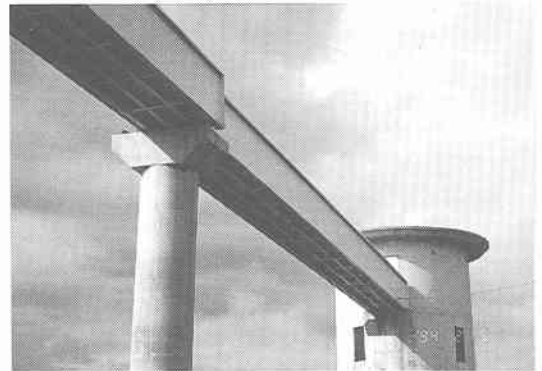


写真 7.3.18 ロサンゼルス貯水池取水塔への管理連絡橋橋桁のずれ (株)飛島建設 沼田淳紀氏より提供)

7.3.5 フランクリン下ダム (Lower Franklin Dam) <sup>6)</sup>

フランクリン下ダムは、堤高 103 フィートの水締めダムである。所有者はロサンゼルス市であり、完成は 1922 年である。サンフェルナンド地震後、ダムの安全性再評価が行われた際、水締めダムである当ダムは、常時においては貯水はせず、洪水調節のみの用途目的とし、代替ダムとして 1982 年にフランクリン第 2 下ダム (Lower Franklin No.2 Dam) が建設された。地震時においても貯水していなかった。

今回の地震の震央からは 11.3 マイルに位置する。地震により、左岸アバットメント取付部より 15 ~ 20 フィートの天端に幅 1/4 インチの微細な横クラックが 1 条発生した。これは特に補修する必要のない程度であった。

7.3.6 フランクリン第 2 下ダム (Lower Franklin No.2 Dam) <sup>7)</sup>

フランクリン第 2 下ダムは、フランクリン下ダムの代替として 1982 年に完成した、堤高 49 フィートの均一型アースダムである。所有者はロサンゼルス市であり、目的は上水の供給である。ダム基礎は堆積岩であり、堤体内には鉛直および水平ドレーンが設置されている。

当ダムはノースリッジ地震の震央から約 11 マイルに位置している。地震時には、基礎と天端でそれぞれ 0.22 g および 0.42 g の水平最大加速度を記録した。地震による変状としては、左岸アバットメント付近の天端のアスファルトに 1 条の横へアークラックが生じたのみであった。

7.3.7 サンタフェリシアダム (Santa Felicia Dam) <sup>8)</sup>

サンタフェリシアダムは、1955 年に完成した堤高 213 フィートのダムである。水総合管理地区組合が所有および管理している。ダム型式はよく締め固めた粘性土コア、フィルターおよび密なシェルからなるゾーン型アースダムである。平面図を図 7.3.9 に、断面図を図 7.3.10 に示す。シェル部の基礎は密な河床砂礫であり、コア部およびフィルター部の基礎は堆積岩である。

ノースリッジ地震の震央から 20.7 マイルに位置している。地震時の水位は天端標高より約 60 フィ

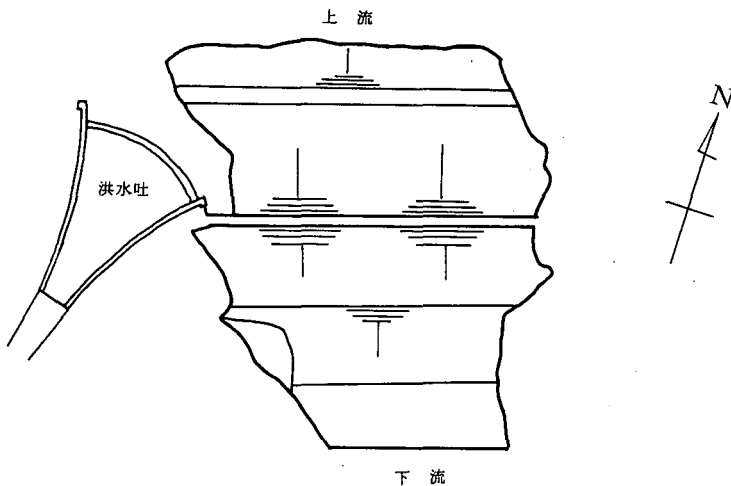


図 7.3.9 サンタフェリシアダムの平面図 (文献 1)をもとに作成)

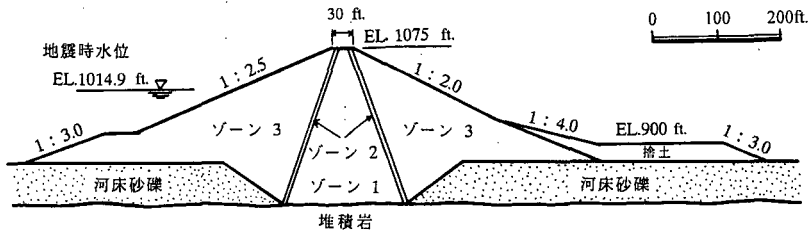


図 7.3.10 サンタフェリシアダムの断面図 (文献 7) をもとに作成)

ート下であった。当ダムには地震計が天端中央と下流アバットメントに設置してあり水平最大加速度はそれぞれ 0.30 g, 0.27 g であった。

地震により、中央部で最大 3/4 インチ沈下し、また左岸アバットメント付近の天端に最大幅 1/16 インチ程度の微細な横へアークラックが生じた。

### 7.3.8 サイカモアキャニオンダム (Sycamore Canyon Dam) <sup>9)</sup>

サイカモアキャニオンダムは、ベンチュラ郡治水地区組合 (Ventura County, Flood Control District) が所有する堤高 40 フィートのアースダムである。完成は 1981 年である。

地震の震央から 15.0 マイルに位置し、地震時は貯水していなかった。右岸アバットメントに幅 1～2 mm、深さ数インチの横亀裂が生じた。この亀裂は径 12 インチの埋設放流管上に位置しており、上流面の 1/2、下流面の 1/3 付近のところまで達している。これは、特に補修を必要とするものではなかった。

### 7.3.9 スクールハウステブリダム (Schoolhouse Debris Basin Dam) <sup>9)</sup>

スクールハウステブリダムは、ロサンゼルス郡公共事業局が所有する堤高 38 フィートのアースダムである。完成は 1962 年である。

震央から 8.6 マイルに位置し、地震時は貯水していなかった。地震により、堤体上下流面に長さ 50～100 フィートの縦亀裂が生じた。そのほかに上流面に 17 個、下流面に 9 個の小さな縦亀裂が生じた。また、余水吐の導流壁ジョイントの 1 つが約 1 インチ開いた。

### 7.3.10 モリス S. ジョーンズダム (Morris S. Jones Dam) <sup>9)</sup>

モリス S. ジョーンズダムは、パサデナ市電力水道局 (City of Pasadena, Department of Water and Power) が所有する堤高 49 フィートのアースダムである。完成は 1952 年である。

当ダムは、震央から 26.7 マイルに位置している。地震により天端の亀裂に沿ってコンクリートルーフ継目に剥離が生じた。この変状は堤体の安全性に影響を及ぼすものではなかった。

### 7.3.11 第 5 貯水池ダム (Reservoir No.5 Dam) <sup>9)</sup>

第 5 貯水池ダムは、バーバンク市 (City of Burbank) が所有する堤高 36 フィートの RC タンク型ダム (Reinforced tank) である。完成は 1949 年である。



震央から 11.9 マイルに位置している。地震後、貯水壁のジョイントより監査廊内へ 1 ガロン/分の漏水が観測されたが、漏水には濁りはなかった。所有者は、貯水池中を潜水調査したが、特に目立った変状はなかった。

7.3.12 コグスウェルダム (Cogswell Dam) ⑨

コグスウェルダムは、ロサンゼルス郡公共事業局が所有している、堤高 266 フィートの投石工法により築堤されたコンクリート表面遮水壁ロックフィルダムである。堤体ロックは花崗岩である。平面図を図 7.3.11 に、断面図を図 7.3.12 に示す。ダム基礎は主に風化の進んだ眼球片麻岩である。完成は 1935 年である。

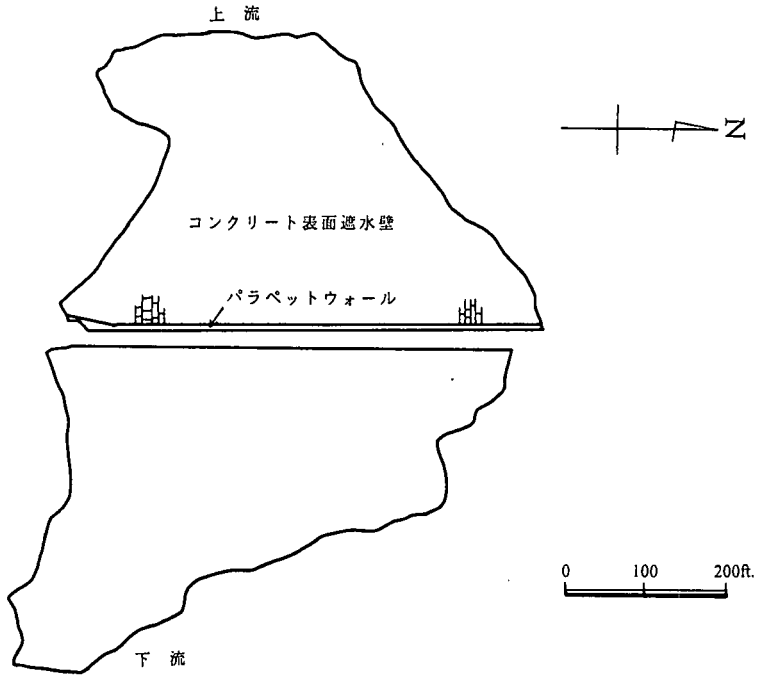


図 7.3.11 コグスウェルダムの平面図 (文献 1)をもとに作成)

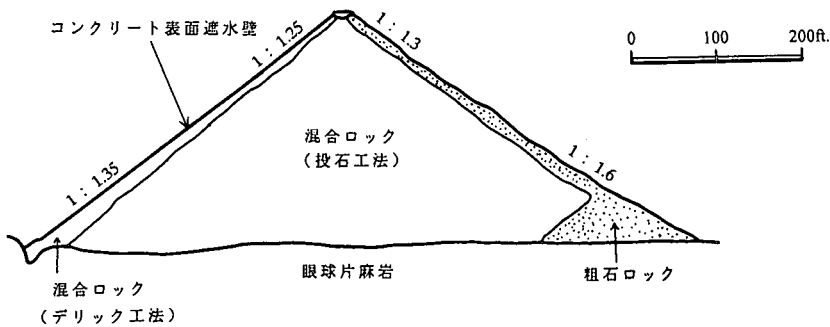


図 7.3.12 コグスウェルダムの断面図

震央からは32.7マイルの距離に位置し、地震時の貯水位はEL. 1 295 フィートで、洪水吐天端高より90 フィート下であった。当ダムには地震計が天端に2か所、右岸アバットメントに1か所設置されており、天端中央では上下流方向に0.32 g、右岸アバットメントではダム軸方向に0.15 gの最大加速度を記録した。

地震により、右岸アバットメント取付部付近の天端アスファルトに、幅1/8～3/16インチ、長さ50フィートの横亀裂が1本発生した。また、その横亀裂付近のパラペットウォールに剥離が見られ、1インチ程度上流側に傾いた。

### 7.3.13 ポーターエステートダム (Porter Estate Dam) <sup>6)</sup>

ポーターエステートダムは、ポーターランチ開発 (Porter Ranch Development) が所有する堤高41フィートのアースダムである。完成は1888年である。

当ダムは今回の地震による堆定破壊断層面上に位置し、震央から北東に3.3マイルの近距離にある。地震時には貯水はされていなかった。地震により天端に幅1/2インチの縦亀裂、および両アバットメント取付部付近に幅1/8インチの横亀裂が生じた。また、上下流法面に浅いすべりが生じた。下流面でのすべりは、落差1フィート、ダム軸方向の延長60フィートであり、上流面では落差6インチ、延長130フィートである。

### 7.3.14 ルビオデブリダム (Rubio Debris Basin Dam) <sup>6)</sup>

ルビオデブリダムは、ロサンゼルス郡公共事業局が所有する堤高64フィートのアースダムである。完成は1944年である。

当ダムは震央より24.2マイルの距離に位置し、地震時には貯水されていなかった。地震により天端に数条の微細なヘアークラックが生じた。また取水塔内部のコンクリートが局部的に剥離した。

### 7.3.15 キャスタイクダム (Castaic Dam) <sup>7)</sup>

キャスタイクダムは、カリフォルニア州水資源局が所有・管理する、堤高340フィートのゾーン型フィルダムである。断面図を図7.3.13に示す。ダム基礎は堆積岩であるが、左岸アバットメントの部分には崖錐堆積物が残っている。完成は1973年である。

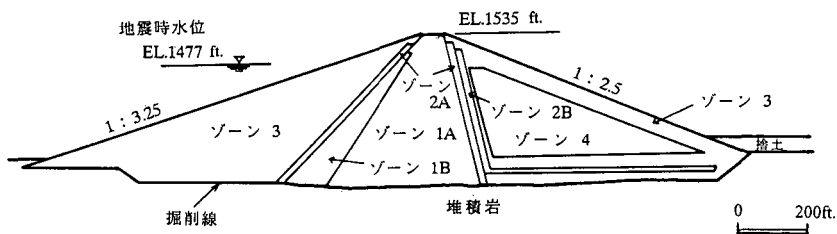


図 7.3.13 キャスタイクダムの断面図 (文献7)をもとに作成)

震央から北に21マイルの距離に位置している。地震時には貯水位は天端より58フィート下であった。また、天端でダム軸方向に水平最大加速度0.35gを記録した。

天端と上流法面保護工のソイルセメントに生じていた古いヘアークラックが今回の地震により、新たに少し延びた。また、取水塔への連絡橋の鉄筋コンクリート橋脚が塔側に3~4インチ変位したために、橋桁が支承からはずれた。

### 7.3.16 エンシノダム (Encino Dam) <sup>7)</sup>

エンシノダムはロサンゼルス市の所有するフィルダムである。当ダムは、1924年に転圧工法により118フィートの堤高を有し完成したが、1960年から1962年にかけて上流側に転圧盛土が施され堤高168フィートのダムに嵩上げされた(図7.3.14)。1924年に完成したオリジナルのダムの基礎は沖積層上に築造されたが、上流側の嵩上げダムの基礎は沖積層は掘削し堆積岩を基礎としている。

当ダムは震央より南へ4.5マイルの距離にあり、左岸アバットメントでは、水平最大加速度0.23gを記録した。

地震により、天端のアスファルトにヘアークラックが発生した。また、下流法面のアクセス道路のアスファルトに微少な横ヘアークラックが生じた。

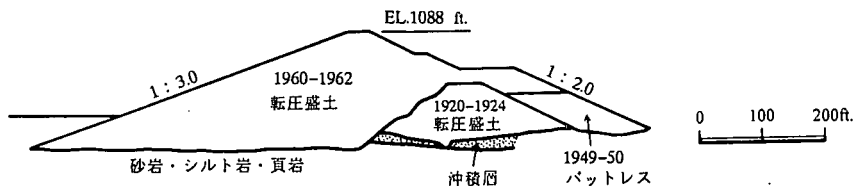


図7.3.14 エンシノダムの断面図(文献7)をもとに作成)

### 7.3.17 その他のダム <sup>16)</sup>

上記の16ダムのほかにも、変状を生じたダムが存在した<sup>16)</sup>。天端にクラックが生じたダムには、マルホランドダム (Mulholland Dam)、マクレイダム (Maclay Dam)、ロウェナダム (Rowena Dam)、シルバー湖ダム (Silver Lake Dam)、ストーン上ダム (Upper Stone Dam) がある。コンクリートライニングにクラックが生じたダムには、エリシアンダム (Elysian Dam)、パシフィックパリスデスダム (Pacific Palisades Dam)、ソラノダム (Solano Dam) がある。地震後、一時的に漏水量が増加したダムは、マルホランドダム、サンタネズダム (Santa Ynez Dam)、ストーンキャニオンダム (Stone Canyon Dam)、ストーン上ダムであった。また、ホリーウッド上ダム (Upper Hollywood Dam) では、取水塔とその連絡橋がわずかに損傷した。

## 7.4 まとめ

米国のダムの耐震設計は、かつては震度法による疑似静的解析によっていた。その際、設計震度は0.05～0.15が採用されていた。その後、米国陸軍工兵隊のレギュレーション<sup>17)</sup>では、コンクリートダムについては、震度法を使うが、地盤加速度が0.15g以上の強震地域では動的応力解析を併用して耐震設計を行うとしている。フィルダムについては、1970年代から震度法に代わって、動的変形解析により耐震設計を行い、その際、堤体盛土および土質基礎の液状化判定も液状化解析により行うとしている。ただし、米国でのダムの耐震設計の規定は、ガイドライン的なものであり、詳細については、個々のダムにおいて“state of the art”に基づき設計解析している。

今回のノースリッジ地震により、震源近傍の多数のダムで強い地震動を受けた。震後点検の結果、20以上のダムにおいて、クラック、小変位および、漏水量の一時的な増加等の変状が報告されたが、安全性に関わる変状ではなく、ダムは地震時に、全般的に良好な挙動を示した。ただし、震央から19kmに位置するパコイマダムでは、左岸アバットメントが移動しスラストブロックとアーチ堤体のジョイントに開きが生じたほか、スラストブロックとアーチ堤体にクラックが発生した。アーチダムの基礎岩盤の安定性は、下流側基礎岩盤（ショルダー）の強度および厚みによって大きく影響されるが、パコイマダムにおいては、もともと左岸アバットメントが薄く、かつ弱部が存在していた。1971年サンフェルナンド地震後、ロックアンカーによる補強が行われたものの、日本のアーチダムで採られているような所要安全率を有する岩盤強度、堅岩の厚みが十分確保されていなかったことが主たる原因であると思われる。

1971年サンフェルナンド地震を契機にして既設ダムの安全性再評価が実施された。再評価により、サンフェルナンド地震で大きな被害を生じた水締めダム（サンフェルナンド上ダム、サンフェルナンド下ダム、フランクリン下ダム等）は、その工法および基礎に砂質土を含む沖積層を残して盛立ててあるため、地震時強度が小さいことにより、代替となるダム（ロサンゼルス貯水池、フランクリン第2下ダム等）を新たに建設し、常時においては貯水しないシステムに変更された。そのため、今回の地震時においても水締めダムでは貯水池は空虚状態であったことが、被害を小さく抑えられたと思われる。また、パコイマダムでも、再評価により最高水位が低く制限されたことが今回の地震時において効果を及ぼしたと思われる。

謝辞：カリフォルニア州水資源局ダム安全部 Vernon H. Persson 氏には、Richard Sanchez 氏がまとめたカリフォルニア州管轄のダムにおける被害調査資料（文献6）や被害・変状ダムの諸元資料を送っていただきました。これらの資料は本報告をまとめるにあたり、大変参考となりました。また、東京工業大学 大町達夫教授ならびに川島一彦教授、そして㈱建設技術研究所 菅原 捷氏、荒川昭治氏、および㈱飛鳥建設 沼田淳紀氏には貴重な写真をご提供していただきました。末筆ながら、ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Shakal, A., M. Huang, R. Darragh, T. Cao, R. Sherburne, P. Malhotra, C. Cramer, R. Sydnor, V. Graizer, G. Maldonado, C. Petersen and J. Wampole : CSMIP Strong-Motion Records from the Northridge, California Earthquake of 17 January 1994, California Strong Motion Instrumentation Program Report No. OSMS 94-07, California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, Office of Strong Motion Studies, 1994.2
- 2) Darragh, R. , T. Cao, M. Huang and A. Shakal : Processed Data for Pacoima - Upper Left Abutment from the Northridge Earthquake of 17 January 1994, California Strong Motion Instrumentation Program Report No. OSMS 94-12A, 1994.6
- 3) Porcella, R., E. Etheredge , A. Acosta, E. Anjal, L. Foote and W. Jungblut : The Ms=6.6 Northridge, California Earthquake of January 17, 1994 : Selected USGS Accelerograms Recorded at National Strong-Motion Network Stations , 1994.1
- 4) Earthquake Engineering Research Institute : Northridge Earthquake of January 17, 1994 Reconnaissance Report, Volume 1, EARTHQUAKE SPECTRA, 1995.4
- 5) Davis, C. A. and J. P. Bardet : Northridge Earthquake - Van Norman Complex Ground Movement, Proceedings of Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Preprint Vol. III, pp.191-203, 1995.4
- 6) Sanchez, R. : Damage to State Jurisdictional Dams by the January 17, 1994 Northridge Earthquake and Aftershocks, California Department of Water Resources, Division of Safety of Dams, 1994.6
- 7) Stewart, J. P., J. D. Bray, R. B. Seed and N. Sitar : Preliminary Report on the Principal Geotechnical Aspects Northridge Earthquake, Report No. UCB/EERC-94/08, 1994.6
- 8) Sharma, R. P. and B. T. Sasaki : Rehabilitation of Earthquake-shaken Pacoima Arch Dam, Transactions, The 15th Congress of the International Commission on Large Dams, Press on Question 59, pp.275-296, 1985
- 9) The U.S. Committee on Large Dams : Development of Dam Engineering in the United States, Section 3 Concrete Arch Dams, 1988
- 10) Swanson, A.A. and R.P. Sharma : Effects of the 1971 San Fernando Earthquake on Pacoima Arch Dam, Transactions, The 13th Congress of the International Commission on Large Dams, Press on Question 51, pp.797-824, 1979
- 11) International Engineering Company : PACOIMA ARCH DAM, Investigation and Evaluation of Effects of San Fernando Earthquake, Volume 1 Report, 1972.8
- 12) County of Los Angeles Department of Public Workes : Report on Initial Assessment of the Effects of the January 17, 1994 Northridge / San Fernando Earthquake on PACOIMA DAM, Morrison Knudsen Corporation 作成, 1994.4
- 13) Seed, H. B., K. L. Lee, I. M. Idriss and F. I. Makdisi : The Slides in the San Fernando Dams during the Earthquake of February 9, 1971, Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.101 No.GT7, pp.651-688, 1975.7
- 14) 小長井一男 : バンローマンコンプレックスでの地盤被害, 文部省科学研究費・突発災害調査研究成果, 1994.3
- 15) Dames & Moore Corporation : Design of Los Angeles Dam
- 16) City of Los Angeles : Field Investigation Report, Damage to Water System Dams from Reservoir Surveillance by Northridge Earthquake, January 17, 1994
- 17) U.S. Army Corps of Engineers: Earthquake Design and Analysis for Corps of Engineers Projects, Regulation No.1110-2-1806, 1983.5