

サンフェルナンド地震の耐震設計に対する教訓

総括執筆者 久保慶三郎*

話題提供者 大久保忠良**

同 横田潤***

同 田村浩一****

1. 大地震と教訓

われわれは、いままで大地震が起こるたびに、その貴重な経験を生かし、次第に賢くなり、基礎的な研究成果を取り入れながら、耐震性の高い構造物を設計する技術を開発してきた。以下、具体的に大地震とそのときに得た教訓を拾ってみることにする。

明治になって西洋から新しい技術を輸入したが、その技術も4分の1世紀を経て日本に定着しはじめたときに名古屋の北を襲ったのが濃美地震(明治24年)であった。地震のないアメリカ、ヨーロッパの技術は、濃美地震により、地震の多いわが国においてはいかに修正されなければならないかが反省された。成果としては、震災予防調査会が生まれ、その活動から震度法が生み出された。濃美地震の教訓としては、耐震工学の必要性が強調されたことと、静的震度法が生みだされたことである。ついでに震度法の話をする、これを考案されたのは佐野利器博士で、大正4年に「家屋耐震構造論」に発表されたのが最初であって、そのときは震度の値として0.1が推奨されている。その後、材料の許容応力が高くなったときに、震度をすえ置いて部材を設計すると、かなり華奢になってしまうので、この欠点を補うため、0.1の値は0.2に変更された。

大正12年に京浜地方を襲った関東大地震は、非常に多くの教訓を残した地震といえよう。非常に多くの教訓といっても、数量または種類が多いというばかりでなく、質的にも非常に貴重な体験をし、耐震構造においては独

自のものを生み出す契機になった地震で、世界におけるこの分野の指導的地位は、この地震によってつくられたといっても過言ではないであろう。関東大地震で何を知り、何を学びとったかは、土木学会出版の「関東大地震震害調査報告書」(委員長 広井 勇、幹事 井上秀二・青木楠男・沼田政矩)によって、今日においても詳細に知ることができる。この調査報告書は河川・港湾などの部、橋梁・建築物・道路の部、上下水道・鉄道などの部の3巻からできており、震害記述の精密さとその考察の鋭さと正しさは、今日の耐震設計にも非常に参考になる。新潟地震の調査報告書の師表とされたのも関東大地震の調査報告書であった。

関東大地震を契機にして、静的震度法が構造物の設計基準に取り入れられてきた。このことは、この地震の残した最も大きい教訓といえよう。このほか、ヨーロッパからの直輸入のれんが造りの建物は、地震に弱点を暴露し、その弱点に早く気づき、わが国では好ましい構造ではないとしたこと、これに反しアーチの橋は日本橋のように石造であっても十分地震に耐えうることを知り、震害復旧に際し、耐震性の高い構造をつくる時、アーチを多く建設したこと、地震そのものよりも、二次的に発生する火災に、ひどく苦杯をなめたことなどが、この大地震から得た教訓であろう。同報告書には橋台裏の水道管の立上がり部が折損している例が写真とともに説明されているが、先輩の教訓がいまだに十分設計に生かされず、現在においても同じ震害が繰り返されている。

関東大地震以後、郷村断層が発生した北丹後地震、建設中の丹那トンネルの導坑が地震に伴って発生した断層のずれによってくい違い、前が見えなくなった北伊豆地震、昭和19年戦争末期の名古屋を襲った東南海地震、戦後すぐの南海道地震などが発生したが、土木技術者の本格的調査はなく、後世残るような教訓は少なかった。

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所第五部

** 正会員 工博 建設省土木研究所千葉支所 構造橋梁部長

*** 正会員 工博 関西電力(株) 奥多々良木建設所長

**** 正会員 日本国有鉄道構造物設計事務所 次長

ただ、北伊豆地震で清水港の岸壁が震害をうけ、その解析は岸壁の耐震設計、とくに地震時土圧の研究をみられた点で注目される地震である。

昭和 24 年に福井市北方に震源地をもつ地震が発生、鉄筋コンクリート道路橋、れんが造りの橋脚、水道管、盛土などが大被害を受けた。この時期が戦後の虚脱感が消滅しつつある時代でもあったので、福井地震の調査は日本学術会議が音頭とりになって、多くの研究者が調査に参加した画期的な地震であった。とくに土木建築の研究者が震害調査に大々的に参加したのは関東大地震以来であった。鉄筋コンクリート造りの 5 階建の大和デパートが倒壊し、その原因の解析から、ラーメンのハンチの下側の鉄筋の配筋法に欠陥があることを建築の人々が気づいた。それまではラーメンのハンチの下側の鉄筋は柱の内側から伸びて、ハンチの下側をとおり、はりの下端へと一本のおしの鉄筋で配筋されていたのが建築の通常のやり方であった。これは、この鉄筋の応力は 0.2 の地震荷重が建物に作用しても、引張応力にはならないという計算結果に基づいている。しかし、大和デパートの震害から、ハンチの下側の鉄筋は、土木での慣例のように、柱およびはりの鉄筋とは別の鉄筋にすべきことを建築の技術者は教訓として得た。

土木工学の分野では、橋台および橋台裏（橋詰ともいう）の耐震強度が他の部分に比してかなり低いことが、九頭竜川を越える道路橋の中角橋および北陸本線の跨線橋などの震害から知ることができた。福井地震までは、橋台の基礎は橋脚の基礎ほど強くはつくられない例が多かった。たとえば、杭基礎の場合でいうと、杭の長さは橋脚のほうが支持力ならびに洗掘などを考慮してかなり長く打たれている。しかし、震害は予想に反し橋台のほうに発生したので、福井地震以後においては橋台も橋脚と同じ位の基礎をもつように設計されるようになった。橋詰部分の盛土の沈下は至るところにみられ、この対策が考えられたが、これについては現在でもなかなか名案はないようである。アメリカでは 46 年の San Fernando 地震でこの問題が認識され、橋詰部分の耐震強度の向上が強調されてきたのを知り、福井地震で得た経験が思い出された。

福井地震では、電力機器の耐震設計につき変圧器などの重量物の固定の問題、軟弱地盤における送電鉄塔の基礎の設計など、教えられるところが多かったが、数多くの教訓の一つに、構造物には、「地震に強い構造物と弱い構造物とがある」ということがある。この教訓は一見単純であたりまえのこのようにみえるが、実は耐震設計の本質を教えているものであろう。世界地震工学会議会長の Housner も、のちに同じことを述べ、「よく設計され、よく施工された構造物は大地震にも十分耐えられ

るであろう」といっている。耐震強度の高い構造物をつくらうとすると、細部まで念の入った設計をやるのが大切であることを福井地震をとおして教えられたのである。昭和 39 年の新潟地震からわれわれが学びとった最高のものは砂の流動化であった。地震後の研究により、砂が流動化する条件が究明され、砂の流動化の本質を知ることができた。これによって、新しい沖積地に発生した建物の沈下傾斜、マンホールの浮上がり、傾斜地での地盤の変動などの現象を容易に理解することができるようになった。

橋脚天端の地震による応答変位が大きくなると、桁は橋脚をふみはずし落下することが、昭和 大橋・東跨線橋の桁の落下で教えられた。一般に、橋は計算された応力に基づいて設計されており、変位はほとんどの場合、設計の条件になることはなかった。しかし、天端幅を決める場合に桁が地震時に落ちないようにするために変位を勘定すること、あるいは単純桁どうしをつないでおくことを新潟地震で学び、後者の経験は大都市の高架高速道路の設計に生かされている。

以上述べたように、われわれは過去の大地震のたびに新しいことを教えられ、地震に強い構造物をいかにしてつくるかを学んできた。また、その具体例をいくつか述べた。さて、昭和 46 年 2 月の San Fernando 地震で何を教訓として受け取ったか、また、受け取ろうとしているかを、討論会の説明討議を尊重して具体的に述べてみようと思う。

2. San Fernando 地震の概要

土木学会はこの地震の調査のため昭和 46 年 3 月、10 人からなる調査団を派遣し、その震害調査報告は土木学会論文報告集、第 195 号に発表されているので、ここでは震害の概要を述べる。

地震は 1971 年 2 月 9 日午前 6 時に発生し、その規模は $M=6.6$ であった。もし地震の発生が 2 時間以上遅れていたら、高速道路は車でいっぱいになっているのでインターチェンジの高架橋の落橋により大災害が発生したとも考えられるし、病院には外来患者が多く集まっていた、建物の圧潰（2 階建の診療所の一階が完全につぶれて、平家造のようになっていた）および本館では、柱の折損などの直接的被害のほか、混乱による二次的災害により多くの死傷者を出したであろう。このように考えると、まさに大都市の地震というのは、ちょっと間違えば深刻な事態を招くことになるので、背筋に冷たいものがとおる思いを禁じえない。

いままでの加速度記録が更新されたのもこの地震であった。すなわち、震央から 14 km の地点で 1 040 gal と

いう、重力の加速度よりも大きい加速度記録がとれた。最大の加速度値が EL Centro の 330 gal と比べものにならないくらい大きいというばかりでなく、Los Angeles 市周辺に配置された 300 台以上の強震計の記録が得られ、このデータの整理にアメリカでも 2 年は要するだろうといわれるくらい数多くの記録がとれた。建設省土木研究所の大久保忠良博士が、アメリカ合衆国の好意で提供された最大加速度一覧表から、地動の鉛直、水平両方向の最大加速度と強震計設置点の震央距離との関係を求め、図一1の結果を得た。この図は構造物に作用したであろう地震の大きさを知らうえに大変参考になるものである。この図から推定すると、5号・405号のインターチェンジでは水平 530 gal、鉛直 340 gal となり、5号・210号のインターチェンジでは水平 570 gal、鉛直 380 gal という、大きい加速度の地震波が作用したことになる。決潰寸前であった San Fernando Lower Dam 地点では最大加速度が水平 360 gal、鉛直 220 gal 程度となる。いずれの地点においても、通常設計に際して考慮されている値より著しく大きい加速度値である。強震記録から判断すると、激しい地震動の継続時間は 10 秒前後であった。

今回の地震の被害総額は 5 億ドルとも 10 億ドルともいわれているが、いずれにしてもアメリカ史上最大の被害の地震である。近代都市施設には大きい投資がなされ

ているから、構造物が震害を受けると、後進国におけるものとは、比較にならない被害額になってしまうであろう。

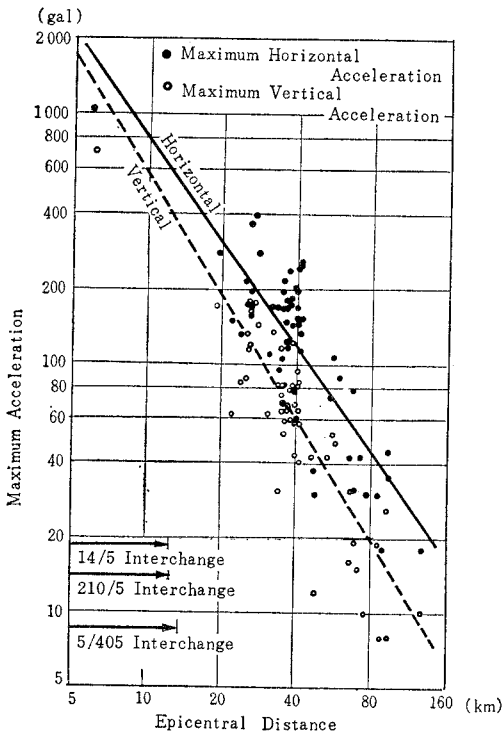
次に橋とダムと埋設管との 3 つの施設について、被害の背景、話題提供者の得た教訓を述べてみたい。被害を受けた構造物のなかには、近代的な鉄筋コンクリート造りの病院などもあるが、土木構造物を主たる対象とすると、そのなかでは、インターチェンジの倒壊が一般の関心を集めているので、まず橋関係を討論の対象にした。同様の理由でダムを選んだ。アメリカでは地盤の加速度が 1040 gal を記録した地点のすぐそばに、コンクリートのアーチダムがあり、非常に大きい加速度の地震動が作用したと想像されるにもかかわらず被害らしい被害がなかったという点に別な興味がわいているようである。もちろん、被害を受けたアースダムにも大きい関心もっている。埋設管と断層との関係も今回の地震ならではのなかなか他に例のない事柄であり、また、同時に埋設管は近代都市において、ますます密度高く建設されてゆく構造物でもあるので、最後に埋設管と震害をテーマにしてみた。そのほか、鉄道・電力施設・水道施設などもあるが、討論会としてはテーマをしぼって、深く議論するほうがよいと考えたので、橋・ダム・埋設管以外は割愛せざるを得なかった。

3. 橋 関 係

橋および道路での損害は総額 2 500 万ドルに達するといわれている。なかでも橋は建て直しを必要とするものが、鋼橋 1、RC 橋 3、PC 橋 3 の計 7 橋、修復を必要とするもの 50 橋以上という大被害であった。

橋の震害は Los Angeles 市北方境界近くを中心として 5 号線に前後約 4 km の間、および建設がほぼ完了していた 210 号線の 6 km の間に著しかった。とくに被害の大きかったのは 5 号線（州間高速道路）と 210 号線（州間高速道路）のインターチェンジ付近および 5 号線と州道 14 号線との交点であったが、これらの地点で古い橋ではなく竣工直後の橋が大被害を受けたことは特徴の一つとしてあげることができる。これらの震害のほとんどは地震動によって発生したもので、後述のガス管のような断層（地震に伴って発生）によるものではないと考えられる。以下に震害の特徴的な点を述べる。

北のほうから述べると、14号と5号とのインターチェンジの高架橋は、単柱ベント橋脚で支えられた PC ボックス曲線ゲルバー橋であったが、ヒンジ支承の桁がかりが浅く、かつ有効な落下防止構造を欠いたため東から 2 本目の橋脚上の橋桁がはずれ、橋脚は基部から折損し、ほぼ曲線の接線方向に倒壊した。この橋脚は深さ 12 m



図一1 震央距離と加速度との関係

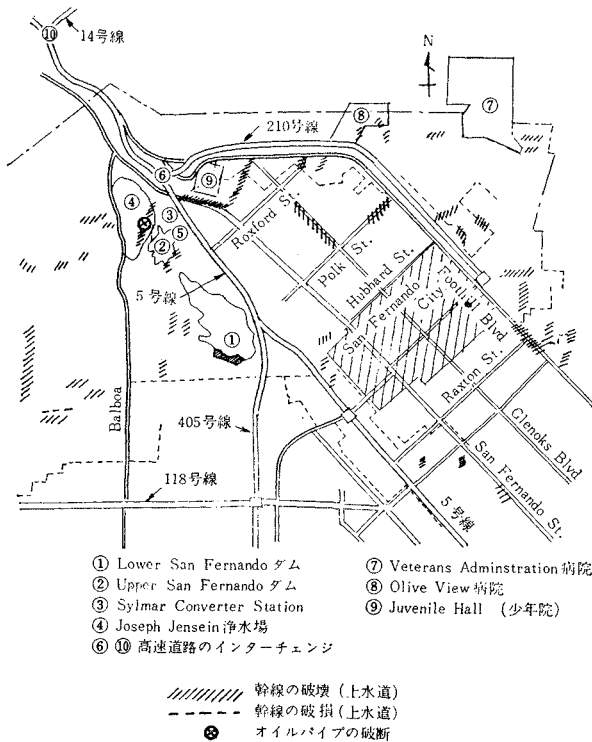


図-2 Los Angeles 北部被災地平面図

の太径コンクリート杭基礎と高さ 38 m の躯体(一柱式)からなる高橋脚で、地震によって、橋脚の天端は大きい振幅で振動し、桁のはずれ、橋脚の倒壊が発生したものとされる。

5号線が Southern Pacific 鉄道を跨ぐ支間 22 m の単純桁橋は橋脚の高さは低いにもかかわらず落橋した。その原因は、支承部の桁がかりが浅く、現象的には新潟地震の東跨線橋(この場合は砂の流動化による大きい地盤変動によって落橋したので、原因は異なっている)と類似の震害例を示していた。新聞雑誌などで広く報道された5号と210号のインターチェンジの高架橋は、単柱式ベント橋脚で支えられた7径間のRC曲線ゲルバー箱桁橋であったが、橋台およびヒンジ支承の桁がかりが浅く、かつ橋脚が高いため、大きい振幅で振動し、支承がはずれ曲線の外側方に向かって倒壊した。この高架橋の設計上の欠陥としては、以上のほかに、橋台が高盛土の上に基礎らしい基礎もなく載せた形式のものであったことならびに、橋脚に 57 mm という太径異形鉄筋が使用され、継手構造も単に重ねてあるのみで、しかも帯鉄筋が弱く、鉄筋コンクリートが別個のものになっていたこと、などが指摘される。帯鉄筋は主鉄筋が太径であるにもかかわらず、直径 13 mm の鉄筋を 30 cm 間隔に配置したものである。

210号線上の高盛土区間には斜橋が多かったが、これ

らの斜橋は両端の橋台が水平に互いに反対方向(それぞれ橋台面と橋軸線の交角が鈍角の方向)に変位し、橋桁は鉛直軸まわりに回転した。中央にベント橋脚をもつ斜橋の場合は、橋桁の回転によって橋脚に大きいねじれモーメントが作用して、ねじれせん断破壊を起こしたと考えられる場合もあった。

これらの橋の架設地点の地盤は、わが国の洪積層程度の比較的良好な地盤であるが、設計震度はわが国の値よりはるかに小さい値である。カリフォルニア州では1966年以前はAASHOの規定で、それ以後は州の道路橋設計便覧によって設計しているということである。

AASHOの規定では、水平地震荷重 E は死荷重 W に設計震度 C を乗じたもので、わが国の震度法と同じ考えであるが、 C の値は地耐力が 40 t/m^2 以上の地盤に直接基礎の下部構造をおく場合は 0.02、 40 t/m^2 以下の地盤で直接基礎に対して 0.04、杭基礎に対して 0.06 となっている。州道路橋設計便覧の規定は同州の建物の耐震設計規定の考え方を準用して、水平地震荷重 E は死荷重 W 、構造物のエネルギー吸収係数 K と構造物の剛度による係数 C の積となっている。 K の値は 0.67~1.33 で、 C は $0.05/\sqrt{T}$ (ここに T は構造物の固有周期) となっている。 C は 0.1 以下で KC の積は 0.02 以上と規定されている。この式を今回の地震で被害を受けた構造物に適用して、その設計震度を求めると 0.05~0.08 になると推定される。この値はわが国の設計震度と比較して、かなり小さいし、これらの構造物がうけた地盤の推定最大加速度とは比べものにならないほど小さく、設計震度の面から考えて地震に十分抵抗できるとは考えにくい構造物であったといえると思う。

橋の震害と震害の背景から、考えれば考えるだけ、より多くの、またより貴重な教訓を学びとることができ、話題提供者も約 10 ぐらいの教訓をあげているが、わが国の橋の耐震設計で、すでに取り入れられている盛土上の橋台の設計上の注意事項、落橋防止(新潟地震での経験)、およびアメリカ合衆国における設計震度の低いことなどを除いて、おもなものをあげると、次のことがわが国の設計にも他山の石となりうるのではないかと考えられる。

- ① 太径鉄筋および帯鉄筋の実用規準の確立
- ② 斜橋の橋桁の水平面内での回転の解明と対策
- ③ 高橋脚および大スパンの橋の地震時応答の研究と設計への結びつき

なお、アメリカ合衆国における反省について述べると、アメリカでは昭和 46 年 7 月からカリフォルニア大学に委託して、道路橋耐震設計規準の改訂の準備作業を

進めていたが、不幸にして、その完成前に今回の地震を受けたことになった。しかし、この地震によって作業が急がれることになり、数年中に成案をみるように加速されているようである。また、それまでの暫定措置としてカリフォルニア州では現行の地震荷重を直接基礎をもつ橋に対して2倍、杭基礎を有する橋に対して2.5倍とすることとした。詳細は未詳であるが、設計震度のあげ幅が大きすぎ、今後設計する橋はよいが、既設の橋の補強がこれに伴って必要であると思われ、このほうはどうなっているのか。いずれにしてもアメリカは馬鹿にあわてたものだと思う。

4. アースダム

カリフォルニア地方は雨量が少ないので、Los Angeles 近郊には昔から数多くの利水ダムがつけられており、今回の地震の激震地内にも、いくつかのアースダム、コンクリートダムがあった。コンクリートダムで最も注目されるのが、1040 gal の加速度記録のとれた地点のすぐそばにあるアーチダム (Pacoima Dam) で、天端の弦長がわずかにせぼめられたほか、いくらかの漏水の増加がみられた程度の軽微な震害であったことは、今後の研究問題になろう。ここでは、アースダムに限定して述べる。

今回最も大きい被害を受けた San Fernando Lower Dam と同 Upper Dam は、ともに約50年以前に水締め工法によって建設されたアースダムで、Lower Dam はほぼ全面欠壊したが、地震当時水位が下がっていた幸運もあって、湛水がダムを越流する災害はまぬがれた。下流の12 mile² の住民は万一の欠壊にそなえて、一時立退きを強制されたほどであった。ダムの水位が幸いにして下がっていたのは、一つは左岸側で工事を実施していたことと、また、このダムは以前から警戒中で、たびたび安定性が診断されたり、補強工事が行なわれたので、安定性の見地からも常時水位を満水位よりかなり下げて

いたことによるものといわれている。

Upper Dam は満水状態にあって、しかも堤体の破壊は、かなりの程度まで進行したが全面欠壊には至らなかったもので、もしこのダムが欠壊すると、湛水は下流の Lower Dam の貯水池に流れ込み、水位の上昇、ひいては湛水の越流の危険性があつたわけで、前述のように、San Fernando 地震は発生時刻が幸運であつたばかりでなく、大事故の危険性をはらみながらも、大事故にならなかった例もいくつかあり、まさに市民にとっては幸運の一語につきる地震だったといえる。

(1) San Fernando Lower Dam

このダムは1912年に着工し、1915年から使用されたダムで、高さ43m、堤頂長664m、ダム体積250万m³、貯水容量2500万m³で、30mの高さまでを水締め工法で施工し、その上の約10m余は転圧工法で完成させている。その後、上流面にコンクリートフェーシング、下流面に排水のためのロックゾーンと、転圧工法による断面補強を行ない、図-3に示す断面をもつダムになっていた。ダムの基礎は河成堆積層で、深さは10m程度である。

破壊の状況を説明すると、下流面の天端から約10mのところからすべり面が始まり、ほぼ円弧状のすべりによって貯水池側におおむねダム全長にわたって崩壊したが、崩壊時の水位がダム下流面の残留高より約40cm低かったので、奇蹟的に越水をまぬがれた。コンクリートのフェーシングは水没した。

このダムの設計震度には0.15が採用されていた。しかし前述のように、このダムに作用した地震の加速度はかなり高い値のものであった。

本ダムの破壊の状況がアースダムの耐震設計に慣用的に用いられている円弧すべりに、かなり類似しているのので、この方法の検討の意味も含めて、盛立て材料の粘着力および内部摩擦角にある幅を与えて、円弧すべりによる安定計算が試みられた。間隙水圧が安定に対して重要

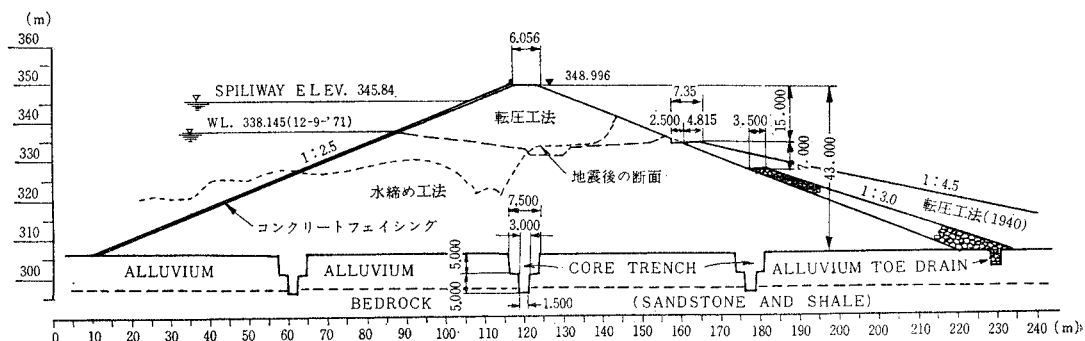


図-3 San Fernando Lower Dam 断面図

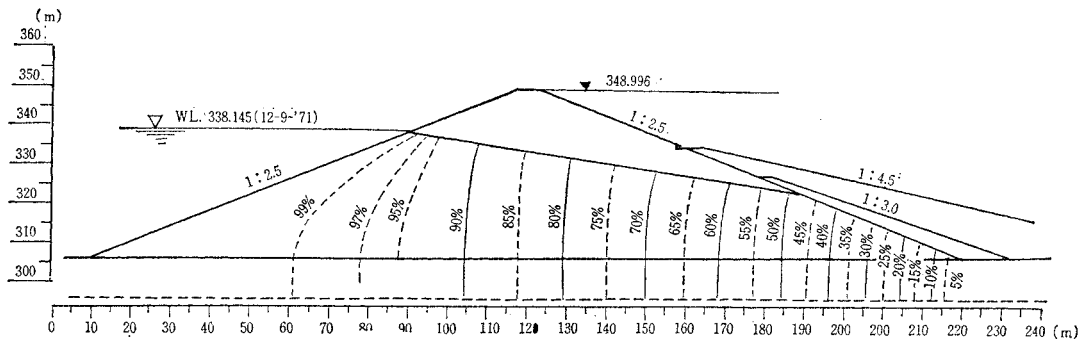


図-4 San Fernando Lower Dam 等ポテンシャル線図 (定常時)

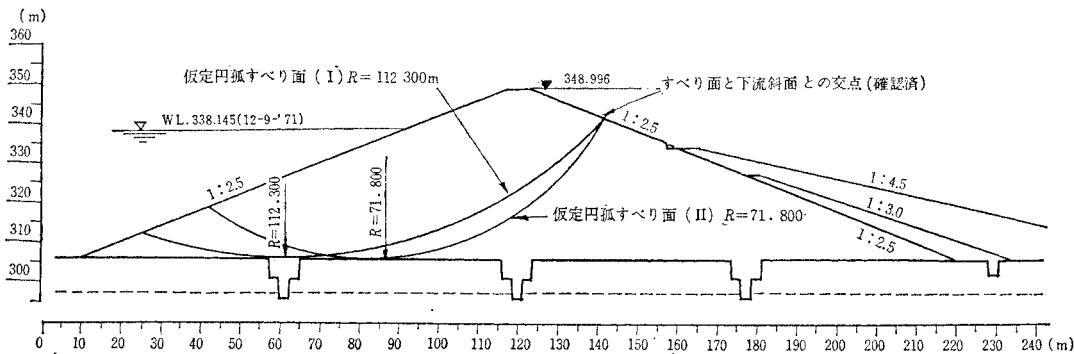
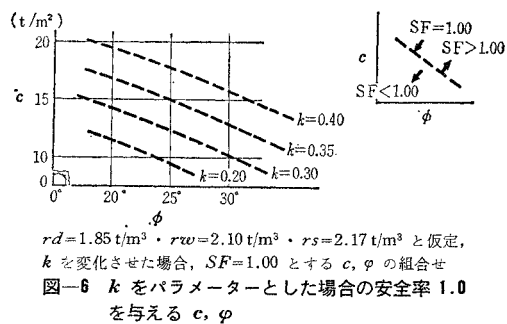


図-5 San Fernando Lower Dam 仮定破壊すべり面図

な要素であるので、堤体内浸透流等ポテンシャル図を求めた(図-4 参照)。この計算には、地震当時の水面に対し定常状態として、有限要素法を用いた。この図を参考にし、震度 k 、粘着力 c (t/m²)、および内部摩擦角 ϕ をパラメーターとし、図-5 の仮定破壊すべり面について円弧すべりの安定計算を行ない、安全率を求めた。安全率がちょうど1になる c と ϕ との関係を示したのが図-6 である。

正しい c, ϕ の値が入手できないこと、また震度と地盤加速度の対応も明確ではないので、図-6 の計算結果と震害とを直接的に結びつけるのは問題があり、また現在のところ大変困難な問題であるが、 $\phi=25^\circ$ で $k=0.20$ とすると $c=0.9$ kg/cm² で、安全率が1を割る結果が得られている。盛立て材料の強度も大体 $\phi=25^\circ, c=1$ kg/cm² とすると、慣用の計算法も、もっともらしい答を与えるようにみえる。

以上の被害および円弧すべりによる解析から、話題提供者の得た教訓は、アースダムの地震的安定に震度の大きさもさることながら、盛立て材料の c, ϕ の地震時低下は、より大きい問題になるのではないかということ、地震の多発地帯ではアースダムを建設するには慎重でなければならないということなどである。後者の理由としては、第一に注意すべきは、安定に寄与すべき堤体の大部分が浸潤線以下にあり、したがって、飽和状態にある



ことである。換言すれば、間隙水圧の変化である。第二には、断層変位などの地盤の相対変位による漏水である。漏水が始まると、それによるパイピングが起こり、欠壊に至るおそれがある。数年前に地震によるものではないが、Los Angeles市近郊のBaldwin Hills Damで、断層による相対変位によって漏水が生じ、水みちができて漏水がふえ、ついに欠壊した例がある。

Upper San Fernando Dam (図-7 参照) は1919年に着工、1921年から使用されている。ダムの高さ20m、ダム堤長530m、ダム体積44万m³、貯水量230万m³で、Lower Damと同じく水締め工法で建造されたものである。地震的にダムは満水状態であった。本ダムもすべりが生じているらしいが、欠壊には至っていない。すべりは上流から下流に向かって生じており、天端が0.9m

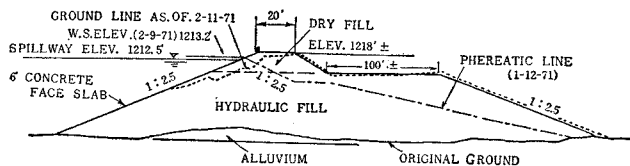


図-7 San Fernando Upper Dam 断面図

沈下し、下流側に 1.5 m 移動して、上流面のコンクリートフェーシングは階段状の変状を示した。この数段の階段は、想像するに、すべり面と上流面との交点（堤長方向には線である）で、すべり面の始端であろう。下流面の小段が大きく、ダムがすべり崩壊に至らなかったことは前述のとおりであるが、堤体内を横断する放水管はダム上流部分で引張破壊、下流部分で圧縮破壊をしており、欠壊寸前を示唆しているといえる。

このダムの上流面の勾配は Lower Dam のそれと同じであり、それにもかかわらず、すべりの向きが逆であり、勾配のゆるい下流面のほうにすべっているのは不可解な現象である。したがって、現象の解析がうまくできたのちに価値ある教訓が学びとられるものと思われる。

水締め工法で建造された 2 つのダムは、欠壊または欠壊寸前という状態に追いつめられたが、その中間にある転圧工法という、近代工法で施工された Van Norman Bypass Dam には、アスファルトフェーシングの一部に座屈または開口という軽微な震害が発生したが、ダム本体は地震後の診断によっても異常のないことが認められている。本ダムは 1968 年に着工、1970 年から使用されている。ダムの高さは平均で約 10 m、貯水容量は 35 万 m^3 である。このダムは転圧工法という違った工法で建造されたほか、高さが他のダムよりかなり低いこと、および、ダム軸の方向が前記の 2 つのダムと直角の方向にあることなどの相違点が指摘される。

このダムが無被害であった理由が明らかにされたあとで、今後の耐震設計に資する貴重な教訓が得られることは、Upper Dam の場合と同じであろう。

5. 埋設管

埋設パイプラインには、石油・天然ガスなどの輸送パイプライン、都市ガス・水道などの供給配管網のほか、下水道などがある。今回の地震で、下水道および上水道は San Fernando 市および Los Angeles 市北部地区で大きい被害を受け、都市ガス供給配管網にも、かなりの被害があった。輸送パイプラインでは、古いガス管の被害のほか、きわめて軽微であった。

上水道の被害としては San Fernando 市を囲む、Los Angeles 市北部で漏洩 708 か所、供給枝管の漏洩

828 か所、消火栓 49 か所、ゲートバルブ 39 か所となっている。この数字には San Fernando 市は含まれていない。水道本管の震害は各所に分散されているが、注目すべきことは、地震によって新生した断層付近の本管は数箇所でもメチャメチャになっていることである。したがって、水道本管の震害の原因

として、地盤を伝わる地震波と断層による地盤変動とをあげることができる。

水道管の大部分は鋳鉄管で、一部に鋼管が使用されている。継手の多くはソケット継手で、ゴムガスケット・セメントコーキング・鉛コーキングが用いられている。鋼管では多くドレッサーカップリングが用いられ、溶接の場合でも突合せ溶接は少なく、ソケットの端部を隅肉溶接したものが多かった。

これに反し、鋼管を用いた都市ガス用パイプライン・石油用パイプラインはどうだったろうか。Southern California Gas 会社のパイプは市街地で 426 か所、その他の幹線支線をあわせると 500 か所以上で被害を受けた。3 本の天然ガス輸送パイプラインは国道 5 号線ぞいに南下している。このうち 26" と 12" のラインには被害がなかった模様であるが、San Fernando 市中央の Glenoaks Blvd に埋設されていた古い 16" の管の損害ははなはだしかった。

16" の管はガス溶接の管で 1920 年代に建設されたもので、断層との交点付近で 2 か所圧縮変形を受け、ちょうど小田原ちょうちんの形に潰れていた。圧潰された箇所以外は引張破断を生じ、断層に最も近い開口部で 5 cm ぐらい、断層から遠くにつれて開口の幅も減少する傾向をもっているが、開口が約 6 m おきに発生しているのは、溶接継手の強度が溶接技術の未熟な時代の製品のため、母材より弱かったのではないかと考えられる。

このほかに、アーク溶接のガス管もあったが、この管は断層を横切っていないこともあって無被害だった。石油パイプラインのアーク溶接管のうち破損したのは、Van Norman 湖の西部をとおりほぼ南北方向に埋設されていた 6" の管だけだった。パイプは軸方向に 5 cm、軸直角方向に 22 cm ずれて油漏れを生じた。この地点は東西方向の断層が地質図の上には示されており、付近の水道管も大きい被害を受けていることから、地盤動もはなはだしかったものと推定される。前述の 26" と 12" のパイプも地質図上の断層を横切ってはいるが、無被害であったことは、いま述べた 6" の管の被害と比べて理由づけが矛盾しているようにみえる。しかし、水道管の被害も 26" と 12" と断層との交点付近に少ないことからすると、地質学的あるいは地理学的（湖との距離の差

など)の差が、このような現象を発生させる原因であったかも知れない。

話題提供者は以上の震害および震害の背景から、断層が動くと、それと交わっている地下埋設管は大被害を受けること、とくに継手の弱い管は継手部がパイプライン全体としても大きな弱点になり、水漏れ、あるいは油漏れが起り、土砂がパイプ内へ流入し、復旧工事をますます困難にすることなどを学びとった。しかし、ガス・水道・石油などのアメリカの技師と話合うことによって、さらに次のような教訓を得た。これらの教訓は、わが国の埋設管の耐震設計にも有用であると思われる。

① アメリカ合衆国の石油パイプラインは何回かの大地震で震害を受けたが、その主要原因は断層であった。そのために、アメリカ合衆国の埋設管の耐震対策は即断層対策である。すなわち、断層付近ではパイプは地盤とは別な自由な運動ができるようにすることが耐震対策の基本的な考え方となっている。換言すれば、地盤には断層で相対変位を生じても、パイプが地盤と異なった動きができるようになっていると、地盤より小さい相対変位を受けるにとどまり、切断はまぬかれる可能性が生れてくる。実際の設計では、パイプを地表近くに敷設するか、パイプと地盤との間にクッションになる材料を媒介しておくとかの方法が用いられている。

② 橋梁に添架する場合の橋台裏のパイプ、あるいはタンクから出て地下にすぐ入るパイプなどは、過去の地震によって、被害の受けやすい部分であることは、わが国でも衆知のことであるが、アメリカの技術者も知っていた。この部分はフレキシブルな構造にすると、パイプが構造物の壁をとおるところでは、パイプが壁との相対変位が可能になるように、パイプの周囲にやわらかいパッキングをするなど、地震の経験を実際の設計に生かしているようであった。

③ 材料的には、衝撃に強く伸びの大きい材料を使用することが、パイプの耐震設計の基本原則である。すなわち、铸铁管よりは鋼管がよく、ヒューム管は管自身の強度もさることながら、継手が弱点になっていること、また鋼管を使用する場合でも継手はアーク溶接で、十分な強度をもつ継手であることが大切である。このことはわが国でも、古くから指摘されていることではあるが、現実の地震では、同じ現象がいつも繰り返されている。アメリカ合衆国の石油・ガスのパイプは鋼管で、継手は溶接が原則となっていて、ある会社では年1回常用圧力の1.5倍の圧力での耐圧試験を行なっている。

④ パイプの埋設深さは、道路で0.9~1.2m、畑地で0.4m以上であるが、可能な限り浅いほうがよいとアメリカでは考えられている。これは、①で述べたことと同じで、アメリカで最も警戒している事項は断層だ

からである。この点はわが国の考え方とは一見反対のように思われる。アメリカの地盤はわが国より硬いところが多いし、地盤が硬くてかつ埋設深さが深いパイプがあり、もし地盤が断層で相対変位を生じたとすると、パイプもほぼ同量の相対変位を強制させられ破壊するので、上述のような設計がアメリカでは考えられている。

⑤ 道路・鉄道の下を横断する場合は、導管より公称径で2段階大きい径の鋼製ケーシングを用いる。この方法はわが国でも有用であろう。

⑥ 以上の各種の配慮をしても、なおかつ断層の相対変位が異常であったなどの原因が考えられるので、パイプの破断の対策をしておかなければならない。このためには、被害範囲をなるべく少なくするシャ断バルブが考えられており、アメリカ合衆国では、パイプラインの設置場所により異なるが、平地で8km、高低のあるところでは1.5~5kmの間隔にシャ断バルブを設置している。また、人口密度の高い地区ではシャ断バルブの間隔を密にする例がある。地震国のわが国においても、アメリカにおけるシャ断バルブの配置は参考になるだろう。

⑦ 大地震で震害が発生する場合を予想し、被害箇所の調査方法、応急復旧などに関する事前の防災準備と訓練を机上で実施している会社もあった。これは、地震による二次災害を最小限にいとめるためにも、また復旧を短時間で完成させるためにも大変有効な、また重要なことである。

以上が今回の地震から得た主たる教訓であるが、わが国のパイプラインの耐震対策を考えてみると、地形地質は大変複雑であり、地盤の硬軟層の境界部で、地震時に地盤の振動・変形などに当然差が生ずるであろうし、また表面波による地盤の運動も考慮しなければならない。残念ながら、わが国においては埋設管の耐震設計の手法は開発されていない。このことは、アメリカでも同様であるが、地震国のわが国は、世界にさがかけて、パイプラインの耐震設計を開発し、実験値や観測値などを過去の震害と結びつけながら実用的な手法を確立する必要がある。埋設管の耐震設計は、一般構造物に適用されている震度法とは異なった考え方に基づいて開発され、地盤の動きとの相互作用が、新しい耐震設計のベースになるものと考えられる。

6. 討論会を経ての教訓

3~5. に述べた教訓は話題提供者が被害とその背景から学びとった耐震設計の教訓であったが、研究討論会では話題提供者の説明のあと、自由討論に移り、San Fernando地震の教訓を考えてみた。以下に自由討論を通して得られた教訓を述べてみたいと思う。

① 多くの強震計が設置してあったので、図-1 に示すような、大きい加速度が構造物に入力として作用していることが明らかになった。大きい入力が入っても Pa-coima Dam のように大した被害が発生していない事実をどう評価するかが第一の論点であった。この問題は、いままでも、しばしばわが国においても提起されてはいたが、材料または構造物の動的破壊の研究が非常に遅れているので、構造物の地震時応答の計算はできても、極限状態における構造物の挙動が説明できなかったので、この問題も立消えとなっていた。しかし、San Fernando 地震を契機にして、大きい入力と構造物の動的強度との関係を究明する努力を惜しんではならないし、この問題の重要性が深く認識された。大きい入力を受けた構造物の応力は、やはりかなり高くなるが、塑性変形あるいは減衰の増大などで何とか地震に耐えているというのが実体で、研究もこの方向で進むべきではなからうかという結論が生れたように思われる。

② 斜橋の回転の問題が第二の話題となったが、アメリカ合衆国の橋台は 3. で述べたように、わが国のそれよりは強度が低いために、今回の被害が発生したとも考えられる。しかし、他山の石のたとえもあることで、わが国でも一応検討して価値ある問題であろう。

③ 上下の加速度が強震計の観測結果によると、かなり大きなものであることが判明した。しかし、静的震度法の最近のすう勢は、大ダムの設計指針でも、道路橋の規準でも鉛直震度は水平震度の中に含ませて、計算を単純化しようとしている。このような背景をふまえて San Fernando 地震で得られた大きい鉛直方向の加速度をどのようにして設計に生かすかが討論された。鉛直震度を無視して設計しても、実質的には、鉛直震度を考慮したものと大差ないことがわかっているので、計算の簡便な方法が採択されているという説明があり、了解されたと思われるが、動的解析の際の鉛直方向の入力については新しい問題が提起されたように思う。図-1 によると鉛直加速度の距離による減衰は、水平加速度のそれより大きくなっているの、わが国の場合、内陸に発生する地震と外側地震帯に発生する地震とは、区別して考えたほうがよいのかも知れない。

④ アースダムについても、震度と加速度との相関関係が質問され、それと関連して盛立て材料の c, φ が討議された。橋と同様で、ダムの動的解析、動的強度の判

定の妙案がいまのところなく、将来の研究問題とされたが、静的震度法はあれでよいのかどうか、この可否をきめる資料は何かが問われているのではないだろうか。大地震に十分耐えられるようなアースダムは、いかにして設計され、建設されるのかも問題の事項と思われた。話題提供者も説明しているように、盛立て材料の c, φ が大切であるが、 c, φ と間隙水圧との関係もより詳細究明されるべき問題であろう。地震の多いわが国における土構造物の耐震強度向上の手法の確立は焦眉の急の問題であり、世界の問題でもあろう。

⑤ 今回の地震で注目を集めたものの一つに、埋設管の地震時挙動と、その耐震設計法の開発がある。アメリカ合衆国における埋設管の実施例のうち、パイプの材料は伸びのよい材料を用いるとか、継手は十分な強度をもつようにするとかは容易に了解されるが、パイプはなるべく浅く埋めたほうがよいという点は、わが国の地盤・地震の実情から理解しにくいことで、これについて質問があった。

これはアメリカ合衆国の埋設管の耐震設計は主として断層対策が主であって、この点わが国とは事情が異なっていることは 5. で述べたとおりである。しからば、わが国ではいかにして耐震強度の高い埋設管を設計し、建設するかは、新しく、かつ重要な問題であろう。

近代都市施設が広汎に被害を受け、アメリカ史上最大の損害を出した San Fernando 地震から何を学ぶかは、われわれの理知の問題であろう。討論会では教訓というよりは、新しい問題が提起されたにとどまっている印象が強いが、今後の研究によって、討論会で提起された問題が究明され、それが実際の設計に生かされるようになって、初めて立派な教訓が生み出されたといえるかも知れないように思う。いずれにしても、研究討論会では一般の意見は主として話題提供者への質問という形で出てきたので、研究討論会として必ずしも満足すべきものではなかったが、この点は司会者の不手際に基づくものが多いと考え、お詫びしなければならない点である。しかし、参加者は当日の討論を通じ、何が問題であるか、何が解決されなければならないか、何を自己の耐震設計に生かすべきかをつかんで研究討論会が終了したと筆者は信じている。