

建設省土木研究所 正員 大久保忠良
 建設省土木研究所 正員 ○栗林 栄一
 建設省土木研究所 正員 岩崎 敏男

まえがき

サンフェルナンド地震による高架橋の被害について考察した結果を報告する。

1. サンフェルナンド地域の地形

カリフォルニア州は幾重にもかさなる北北西-南南東に走る大小の山地・丘陵・盆地・谷などからできている。この地形的特徴は、主に断層運動によるものであり、地形のみならず、地層の分布もこれに規制されている。しかし San Fernando 地域は前述の大きな傾向が乱され、全体の構造が東西にのびる、いわゆる Transverse Ranges (横断山地) と称されているところで、地質学上ひとつの興味ある地域となっている。Transverse Ranges の成因はカリフォルニアの地質構造や地震活動と密接な関係がある。主断層系の San Andreas 断層はロスアンゼルス北部および東北部では屈曲しているので南部カリフォルニアで蓄積されたひずみはこの大断層系に斜交する一群の平行断層のズレや衝上によって解放される。1952年の Kern County 地震や今回の San Fernando 地震はこの典型的な例で、地史上何度も繰り返えされて現在のような状態になったものと考えられる。この際、地下深处にあった結晶岩など古い岩石が地表に現われたり、新しい岩石の上に衝上して現在の地質構造ができ、それによって地形も規制されている。

San Fernando Valley は、北東に San Gabriel 山地、東西および南にも山地や丘陵が発達している大盆地である。盆地の大きさは東西約 25 km、南北約 20 km、総面積約 400 km² である。盆地北縁の Sylmar の標高は 430 m で南にゆるく傾斜し、南端の Shearman Oaks では標高 183 m あり、その間の平均勾配は 100 分の 1 強となる。San Gabriel 山地は幅 30 km 余で北西-南東にのび、各々の峰は標高 1200 ~ 2000 m ある。盆地の北縁の標高は 400~500 m、前山の標高は 1,150~1,200 m でその水平距離は 2.5 km なので平均勾配は 100 分の 30 程度となる。

2. サンフェルナンド地域の地質

(1) 岩 質

この地域には先古生代の火成岩や変成岩から、第 4 紀の沖積層まで発達している。しかし、この地域を構成する主要な岩相は San Gabriel 山地の片麻岩、花崗岩、その他の周辺丘陵地の中生代白亜紀~古第 3 紀の砂岩・頁岩、新第 3 紀のシルト岩・砂岩互層、盆地内の沖・洪積世の砂・礫等である。

San Gabriel 山地を構成する岩石をもう少し詳しくみると、先古生代の火成岩や変成岩から沖・洪積層までである。そのうち主要部は片麻岩・結晶片岩・花崗岩などで、その生成時期は 12~14 億年前(花崗岩の一部には古第 3 紀 7000 万年前のものもある)といわれている。山地の周辺部には新第 3 紀の海成堆積層(シルト岩・泥岩・細粒砂岩)が、また山地中央部には新第 3 紀の陸成堆積層(低固結

度の砂岩・礫岩・泥岩)が発達している。これらの地層の厚さは場所によって著しく変化する。総厚は山地部では大部分侵食されてなくなっているが300~1,500m, 西隣の盆地で1,200~1,800m がある。San Fernando Valley は第3紀の褶曲運動や断層運動によって沈下した一種の向斜地で、沖・洪積層の下に発達する後期白亜紀から第3紀末までの堆積物の厚さは4,500m に達することが重力探査や石油井戸で確認されている。

San Fernando Valley は厚い沖・洪積層に覆われている。新第3紀に引き続いて沈降地帯であったこの地帯は初期には泥質なものを、末期には粗粒なものを堆積している。これらのよくしまつてはいるが未固結な堆積物は盆地の中央部で200mを越す厚さがあるが、だんだん薄くなって山麓部では消滅している。Sylmar地区では現河床部をのぞくと平均6m程度の厚さがある。但しSan Gabriel山地の南縁を画するSanta SusanaやSierra Madre断層帯の南側は構造運動のため極端に深くなっており、場所によっては沖・洪積層だけで、その厚さが4,000m に達している。Van Norman Lakeを含む広い谷底平野には比較的泥質なものが10m余りの厚さで発達している以外はだいたい砂や礫など粗粒な堆積物からなる。

3. サンフェルナンド地震とその強震記録

(1) 地震の諸元

サンフェルナンド地震の諸元を示すと次のとおりである。

発生日時 1971年2月9日6時0分41.5秒(日本時間 2月9日23時0分41.5秒)

震源位置 San Gabriel 山中(34°23.8' N, 118°23.6' W) 深さH = 0 ~ 12 Km

規模 マグニチュード6.6(新潟地震 7.3, 1968十勝沖地震7.8)

物件に関する損害額 約2,000億円(新潟地震1,300億円, 1968十勝沖地震530億円)

(2) 強震の記録

この地震では、241台の強震計と144台の簡易強震計(サイスマスコープ)によって強震の波形記録ならびに最大振幅が得られた。1971年4月までに公刊されたアメリカ合衆国政府機関の資料にもとづいて作成した震央距離と加速度の関係は、日本において観測された震央距離と加速度の関係がマグニチュードM6と7の場合について対比してみると、サンフェルナンド地震のマグニチュードが6と7の間にあることが裏付けられる。(文献1), 4), 参照)

Pacoima ダムの岩盤に設置されていた強震計は1g以上の加速度を記録した。サンフェルナンド地震で高架構造橋梁が著しい震害を蒙った5号線上のインターチェンジ(5/210, 5/14)は、震央の西南西、約16km に位置する。震央距離16km における平均的な加速度を求めると地表面において約400~600gal になる。橋梁の地震応答については加速度記録は全く無い。

今回の地震の震央ならびに、震央付近における代表的な強震記録波形として、Pacoima Damでの記録(節理の多い閃緑岩質片麻岩上)、Castaic(砂岩上)での記録が挙げられる。(文献3)参照)

(3) 波形特性

地震応答解析の入力とするため、Castaic における加速度記録(水平2方向)をデジタル化し、その波形特性を調べた。

水平2成分N21E, N69W につき、自己相関係数、パワースペクトル、応答加速度比スペクトル曲

線および、応答速度スペクトル曲線の計算を行なって、それぞれ0.3秒、0.8秒付近にピークをもつ波形であることを確認した。

Pacoima Dam 地点での強震記録に対する応答速度スペクトル曲線は文献5)に示されているとおり、0.4~0.5秒と1.0秒~2秒の区間に2つのピークを示す特性をもっている。

得られた多数の強震記録を検討した結果、後述する高架橋やダムの地震応答解析において、構造物の基盤に考慮すべき入力加速度として、Castaic N69W 成分が有効な参考資料になると判断された。

4. 高架橋被害例の解析

サンフェルナンド地震は、橋および道路に総額2,500万ドルに達する被害を与えたといわれている。中でも高速道路の高架橋は、完全崩壊したために架け換えを必要とするもの7橋（鋼橋1，RC橋3，PC橋3），修復を必要とするもの50橋以上という大きな被害をうけた。

高架橋の被害は、州間高速道路405号線とのインターチェンジから北方約8kmの間の州間高速道路5号線上および5号線とのインターチェンジから東方約6kmの間の州間高速道路210号線上に著しかった。

とくに被害が著しかったのは5号線と210号線の交点および5号線と州道14号線との交点であったが、これらの地点では竣工直後の橋に大きな被害を生じたことを特徴の一つとして指摘できる。

特徴的な被害の様相を呈したつぎの4橋につき、静的解析および動的解析を含む各種の検討を行っている。これらの内から2)および4)の検討結果を今回、呈示する。

- 1) RTE 5/405 Separation
- 2) RTE 210/5 Separation and Overhead
- 3) RTE 14/5 South Connector Overcrossing
- 4) Foothill Boulevard Undercrossing

5. 結 論

高架橋について震害の事例を素材にして、現地の地質、地震動の強震記録、被災構造物の諸元、被災の状況などを調査し、これらの諸情報に基づいて、電子計算機上に被災した高架橋の原型を単純化して直橋として組み込み、地震動の加速度を加えて、地震時における高架橋の揺れ方を再現した。

その結果からつぎの結論が導かれた。

- 1) 5号線と210号線の立体交差のための高架橋（上部、下部ともRC、橋長240m曲線橋、高さ20m、最大支間40m）の地震時の橋軸方向の最大撓みは、地震動の最大加速度が0.3Gであれば、12cmとなる。落橋する可能性を生む撓は18cm程度（架け違いの長さが35cmであるから、その半分の値とする）であるから、地震動の最大加速度を0.45G以上とみるか、又はこれより低い加速度であっても橋脚の基部に破壊が生じたとみることができよう。
- 2) 最大撓みを12cmとする地震時の作用力は、自重の10%が水平方向に作用した場合にほぼ相当する。
- 3) 本橋の強度は、水平方向に作用する自重の15%程度の水平力（設計では5%）にも耐え得るから、崩壊の原因としては、1)における二つの推論のうち、地震の最大加速度が0.45G以上であったと見るのが妥当であろう。

- 4) 日本の道路橋では、同種の地盤上に同規模の橋を架設する場合に、設計に用いる水平力は、地域によって自重の17.5%（北九州地方）から25%（東京）を採り、また架け違いの長さは60cm以上とするから、前述の橋のある地点での最大加速度を0.4~0.5Gとすれば、日本の道路橋では、たとえ最も地震の影響が弱いとしている北九州地方の橋でも崩壊することにはならないといえよう。
- 5) Foothill 通りと210号線の立体交差のための高架橋（RCラーメン構造）では、地震動の最大加速度を0.3Gとした場合に、橋には自重の46%に相当する水平力が加わる可能性がある。実際に加わった地震動の最大加速度は0.3Gを上まわることが予想されるから、作用した水平力も更に大きかったものと想定される。しかしながら設計に用いた水平力の大きさは自重の5%程度であり、抵抗しうる限界の水平力は自重の15%程度であると見なすことができる。したがって、おびただしい被害を受けることが十分考えられる。
- 6) このRCラーメン橋の脚柱部は、おびただしい被害を受けており、その理由の1つとして、5)に述べた事情が挙げられるが、その他の理由としては、脚柱断面の配筋の合理性さらには橋台の剛性と抵抗力などが挙げられよう。
- 7) 日本の道路橋では、32%以上の太径の鉄筋は一般には用いず、帯鉄筋を十分に用いているのに対し、上述のRCラーメン橋では57%の太径の鉄筋を用い、帯鉄筋としては組み立て用鉄筋程度の9%径のものを粗に配筋している。
- 8) ひるがえって我国の事情を考えると、太径の鉄筋を採用する場合には、十分な試験を施し、確信を得てから用いるべきことが挙げられ、習慣として行なってきた剛性の高い橋台の採用ならびに密度の高い帯鉄筋を用いた設計ということが、耐震上、有効であることを確認できた。

参 考 文 献

- 1) 高架橋、ダムおよび地下構造物の地震時における安全性の確保に関する研究（総ページ263頁）、建設省土木研究所、昭和47年3月、土木研究所資料第739号
- 2) ロサンジェルス地震調査報告会資料、昭和46年4月、建設省土木研究所
- 3) R. P. Maley and W. K. Cloud "Preliminary Strong-Motion Results from The San Fernando Earthquake of February 9, 1971" Geological Survey Professional Paper 733, The San Fernando, California, Earthquake of February 9, 1971: A Preliminary report published jointly by the U.S. Geological Survey and the National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of the Interior and U.S. Department of Commerce.
- 4) 勝又謙 "地震の規模、震央距離と地震動の振幅、震度、加速度"
土木学会耐震工学委員会、本四耐震合同研究会資料 S.45-10-29
- 5) M. D. Trifunac, D. E. Hudson, "Analysis of the Pacoima Dam Accelerogram," in Strong-Motion Instrumental Data on the San Fernando Earthquake of Feb. 9, 1971, edited by D. E. Hudson.
- 6) 大久保忠良 "サンフェルナンド地震の耐震設計に対する教訓-橋関係-" 土木学会第26回年次学術講演会講演集（第1部門、研究討論会）、昭和46年10月。
- 7) 大久保忠良、栗林栄一、飯田裕：高架構造橋梁の地震応答"第26回年次学術講演会講演集（第1部、1-93）、昭和46年10月。
- 8) "The San Fernando, California Earthquake of February 9, 1971" U.S. Dept. of the Interior and U.S. Dept. of Commerce, Geological Survey Professional Paper 733.
- 9) "Engineering Features of the San Fernando Earthquake February 9, 1971" P. C. Jennings, June 1971, EERL, Cal. Tech.
- 10) "Strong Motion Instrumental Data on the San Fernando Earthquake of February 9, 1971" D. E. Hudson, Sept. 1971, EERL, Cal. Tech.
- 11) "Engineering Aspects of the 1971 San Fernando Earthquake", U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards.
- 12) "California Geology" April - November, 1971 the California Division of Mines and Geology.
- 13) "Strong Motion Earthquake Accelerograms-Digitized and Plotted Data", July 1971, EERL, Cal. Tech.