

V-4 日米の最近の大地震と耐震技術の 動向に関する研究

北見工業大学工学部	正員	桜井 宏
北見工業大学工学部	正員	鮎田耕一
北海道大学工学部	正員	佐伯昇
南カリフォルニア大学工学部		篠塚正宣

1. はじめに

日米は、1989年から1995年に大地震を受けた。地震被害と各種の耐震方法の効果を詳細に検討することは、大変重要である。本研究の目的は、最近の大地震の被害の特徴、現状の耐震性の評価、耐震技術の効果、及び、今後開発が必要とされる技術の方向性について調査及び検討した。

2. 方法

本研究の方法は、1993年から1996年にかけて、日米の最近の大地震による被害と、耐震方法について調査した。地震被害に関する現地調査、資料や測定データの収集と分析、主に米国の地震地帯での耐震や、RC構造物の補強、構造物の維持管理に関する専門家に対する聞き取り調査と分析を行い、それらを総括するものとする。

3. 調査結果

3.1.1 最近の大地震と地震被害特徴

(1) 最近の大地震の概要

表-1に、最近の日米の大地震の概要を示す。わが国では、1993年に釧路沖、北海道南西沖、1994年に北海道東方沖、三陸はるか沖、1995年に兵庫県南部地震が発生した。この2年間の間に発生した地震は、いずれもでマグニチュードが7.2から8.2の間で大きな地震あった。兵庫県南部地震は内陸直下型地震であり戦後最大級の被害をもたらした。それ以外の地震は海底で発生した、いわゆる海洋型の巨大地震であり震源からの距離は比較的離れているが、大きな地震被害が発生した。また、北海道南西沖地震は、震源の深さが10kmと比較的浅い海底で発生したため、遡上高が30mを越える津波が発生し、港湾や道路等の施設にも多数の被害をもたらした。

米国の最近の大地震は、西海岸のカリフォルニア州に発生し、大都市付近の内陸直下型であった。マグニチュード(Richterscaleによる)は、日本の大地震に比較し6.7から7.0と若干小さいが、比較的震源の深さが浅く、サンフランシスコやロスアンゼルスなどの大都市に近いたため大きな被害をもたらした。地震の発生した時間帯は、日本の地震はいずれも通常の就業と就学時間からはずれているために、人的な被害が潜在的で、同規模でもさらに大きな被害が発生した可能性

Study on damage and caused by recent large earthquakes and
earthquake-proofing in Japan and the USA
by Hiroshi SAKURAI, Koich AYUTA, Noboru SAEKI and Masanobu SINOZUKA

が高い。一方、米国では、ロマプリータ地震は就業時間帯、ノースリッジ地震は、非就業時間帯で、橋梁等の被害は前者は後者の約4分の1にも関わらず、死者の数はほとんど同数であった。

表-1 地震の概要

Earthquake	In 1993 Kushiro-oki Earthquake	In 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake	In 1994 Hokkaido Toho-oki Earthquake	In 1994 Sanriku Haruka-oki Earthquake	In 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake	In 1989 Loma Prieta Earthquake	In 1994 Northridge Earthquake
Time Occurred (local time)	20:06, 15 January 1993	22:07 12 July 1993	22:23 4 October 1994	21:19 28 December 1994	05:16 17 January 1995	17:05 17 October 1989	04:31 17 January 1994
Location of seismic center	42.9°N 144.4°E	42.5°N 139.1°E	43.5°N 14.9°E	40.4°N 143.7°E	34.6°N 135.0°E	37.1°N 121.9°W	34°2' N 118°5' W
Forcal Depth	107km	10km	50km	20km	10km	18km	18km
Magnitude	7.8	7.8	8.1	7.5	7.2	7.0*	6.7*

* the Richter scale

(2)地震被害の概要

地震被害の概要を表-2に示す。地震の人的被害は人口密度の大小や津波の発生の有無の影響を受ける。特に、比較的人口密度の小さい地帯を襲った、釧路沖、北海道南西沖、北海道東方沖、三陸はるか沖地震は道路自体の被害やその橋梁の支承部の被害が多いのに比べ人的被害が比較的少ない。また、これらの地域には高層の構造物が少なく、例外的なものとして釧路沖地震の際に釧路市の消防のRC望楼頂部の檣部分が破壊し落下した構造物の被害が、その後の兵庫県南部地震の高層構造物の被害を暗示していたのが特徴的であった。これに対し、大都市とその近郊を襲った兵庫県南部地震、ロマプリータ地震、ノースリッジ地震は道路等の高架構造物及びそれを結ぶ橋梁が多数建設され、それらの被害が目立った。

さらに、これらに起因する人的な被害が多数発生した。都市化すると、土木構造物にも高度な機能性が要求され、高層かつ重層の連続的な構造物が建設される。これらの地震に対する確かな安全性や信頼性が問題となっている。同規模の地震でも、敷地面積等に余裕のある米国に比べ、日本は人口が密集し敷地面積が狭く、複雑な都市の施設形態により被害が拡大する傾向が高い。特に、兵庫県南部地震では、道路の高架構造物の他に、鉄道やライフライン等がこれに加わり、これらの施設の破壊や崩壊等が、人的被害の拡大や、その後の都市機能の復旧を著しく妨げる結果となった。首都圏等を大地震が襲った際の著しい被害の発生とその拡大が心配されている。

(3)コンクリート構造物の被害の特徴

釧路沖地震では、気象台で900galの大きな加速度が測定され、前述したRCの消防の望楼の破壊が発生した他、相対的に重量のあるRCのT型桁の橋梁の支承と橋脚に被害が目立ち、特に、ひびわれ等が主鉄筋の段落し部に認められた。北海道南西沖地震では、道南の軟弱な黒松内層のRC橋で、釧路沖地震と同様な被害が認められた。津波でコンクリート製の道路擁壁や橋梁の護岸等が引き倒される特徴的な被害がみられた。また、震源に近い奥尻島のPC製のスノーシェルターの連壁基礎と上部工のPCアーチの崩壊が認められた。北海道東方沖地震では、湖沼等の河口に近い軟弱地盤上の合成桁橋や3径間連続桁橋の支承部の、支承の損傷やそ

表-2 地震被害の概要

Earthquake		In 1993 Kushiro-oki Earthquake	In 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake	In 1994 Hokkaido Toho-oki** Earthquake	In 1994 Sanriku Haruka-oki Earthquake	In 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake	In 1989 Loma Prieta Earthquake	In 1994 Northridge Earthquake
Fatality	Dead	1	202	—	2	5462	62	65
	Missing	—	29	—	—	、 2	—	—
	Seriously injured	64	81	—	—	35080	65	over 5000
	Slightly injured	657	240	227	285			
Damage to construction	Damage to roads (DTR) Damage to bridge (DTB) Totally demolished house (TDH) Partially demolished houses (PDH) Collapsed cliffs (CC)	DTR: 994 TDH: 18 PDH: 182	DTR: 711 TDH: 558 PDH: 247 CC: 14	DTR: 44 PDH: 17	DTR: 28 PDH: 128 CC: 3	DTB*: Seriously: 303 Slightly: 6441 TDH & PDH: 107388 DTR: 665 CC: 182	DTB: Seriously: 13 Slightly: 91	DTB: Seriously: 46 (Collapsed: 7) Slightly: 240
	Amount of damage	About ¥70 billion	About ¥132.3 billion	About ¥9 billion	About ¥84.2 billion	About ¥10 trillion	\$ 6.7 billion (in 1989 dollars)	\$ 15-30 billion (preliminary damage estimate)

* 1: Excepting the north territory of Japanese (Tishima island chain) * 2: Damage of piers of express way

の固定アンカー等の定着部のコンクリートにひびわれや破壊が生じた。三陸はるか沖地震では、道路橋とそれに隣接する歩道橋の衝突による橋脚の傾斜や建築物のRC柱に破壊や崩壊が認められた。特に、RC柱については、過去の地震によるひびわれで錆びたと思われる鉄筋腐食箇所が破断面に存在し、既往の地震による脆弱化も影響した可能性が認められた。以上に起因する人的被害は比較的に少ないため示方書等の再検討を考えさせるまでの関心はほとんど呼ばなかった。

しかし、兵庫県南部地震では、橋脚の段落し部の破壊に起因する橋梁の崩壊や支承やそのアンカーの固定部の損傷による桁の落下が多数発生し、人的な被害も拡大した。設計上想定しているよりもかなり大きい加速度が記録され、設計時の地震力の入力をも含めた示方書の根本的な見直しがなされた。

米国では、ロマプリータ地震において、RC高速道路橋梁の柱が破壊し、二階部分の通路の崩壊が発生した。1971年のサンフェルナンド地震以来、耐震設計が見直されていたが、さらにそれを再検討することになった。その結果、耐震診断と補強対策が詳細に検討され、その実施も行われた。ノースリッジ地震では、高速道路橋梁のRC柱の破壊が発生したものとなり、これらの被害はある程度抑制されたものとなり、既に補強した部分は崩壊にはほとんど至ることなく、補強の適性や効果を確認する機会となった。

3.1.2 耐震設計と耐震性評価

日本では、兵庫県南部地震直後、建設省が当面の措置として、構造部材の非線形性を考慮して、地表を①硬い地盤、②中程度の地盤、③柔らかい地盤に分類し、兵庫県南部地震に等しい地表の地震動の耐震安全性を動的応答解析により照査することとした。また、土木学会では、地震動を建造物の供用期間中に数度発生する可能性があるレベルⅠの地震動と、供用期間中に発生することが稀なレベルⅡの地震動を定義した。さらに、建造物の耐震性能を地震を受けても補修を要しなく、機能性が保たれ、特に優れたものを最高として、3段階に分けた。

一方米国では、カリフォルニア州運輸局によって、サンフェルナンド地震以降、

各々の建設地点に発生する地震を予測可能にする研究が行われた。カリフォルニア州全域の地震断層上の最大想定地震が、最大基盤加速度の水準を定義するために用いられ、想定地震地図が作成されている。

日本では、当面、静的な震度法を基に主に水平力に対する靱性による評価が行われ、特に重要な場合は構造部材の非線形性を考慮し、兵庫県南部地震の地震動で評価している。また、補強コンクリートの応力歪関係をピークの強度から20%減じた値を考慮するものとした。

米国では、道路構造物の補強マニュアルとして、既存構造物の評価として部材毎に許容力と要求される耐力の比(C/D ratio method)で評価し、これが1以下になると補強する目安としている。

3.1.3 耐震技術について

わが国では、今後、新設の構造物に対しては新しい示方書で対処できるが、特に1980年以前に建設された構造物の補強が重要である。補強方法として鋼版巻き付けなどが、取られている。

米国でもこの方法が採用されているが、特に当初の構造物全体の設計上のバランスを変えないために、柱と柱基礎の間に補強版を巻かない部分を設けるなどの対策が取られている。また、死荷重を増やさないために、グラスファイバーやカーボンファイバーによる巻き付け補強や積層版による補強が積極的に、行われている。また、実物大に近い橋脚等のモデルを作成し、既存の設計のものに繰り返し荷重をかけた後、補強を行い再度試験するという実際的な実験を行い有用なデータを取っている。

米国では、また、高強度コンクリートの使用により部材自体の断面を小さくし、慣性力を減じ、結果的に耐震性をあげる研究も行われている。

日米において、地震力に対して制震や免震する装置の開発と実験も多数行われている。米国では、特に寒冷の条件でも、免震が有効に働くことを確かめる実験も進められていた。

地震被害を未然に防ぐためには、地震情報をスムーズに入手できる事が重要であり、米国ではCUBU等の地震情報網が整備されて活用されている。また、日本でも1996年春より科学技術庁等による加速度計の設置とその情報の活用が可能になった。

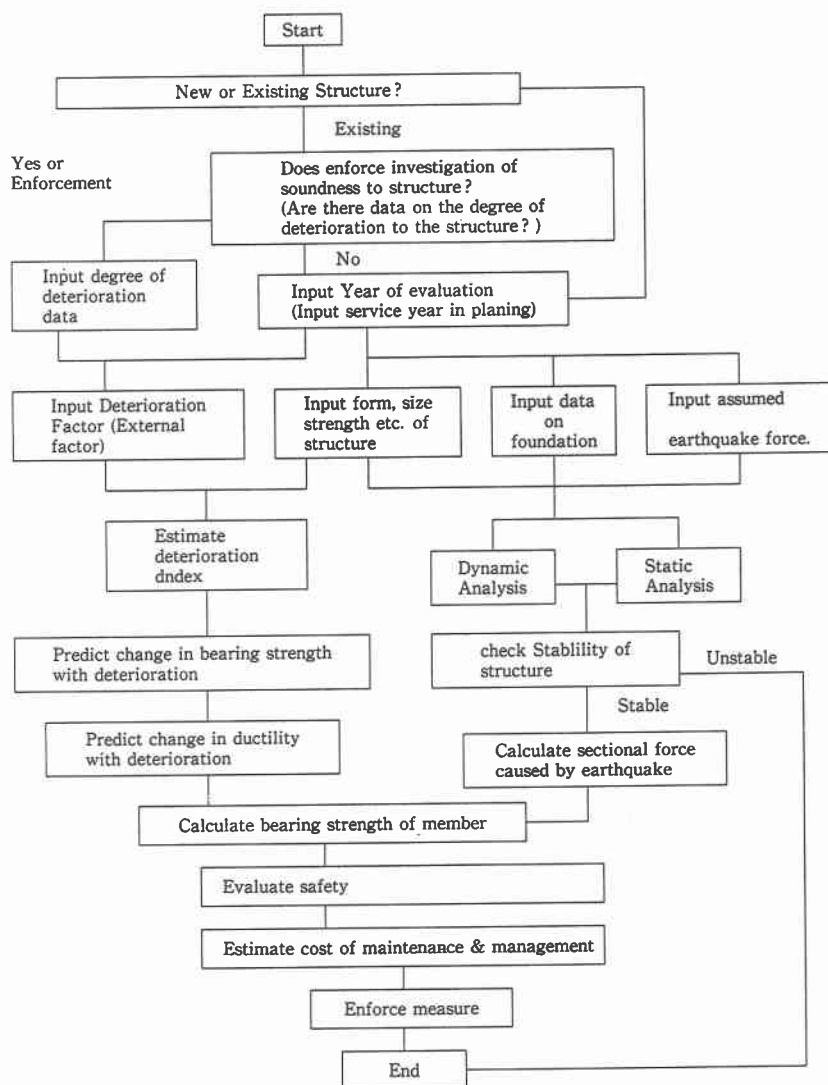


図-1 耐久性と耐震性を考慮した構造物の評価フロー

3.2 今後の課題

地震被害の分析、地震時の耐震技術の有効性の調査が重要である。また、さらに既存構造物の耐震対策が重要であり、耐震補強の際、構造物の現状の健全性の評価と補強による耐震性向上の効果の評価が重要である。同様に耐震技術の耐久性の検討も必要である。

これらを評価する方法を図-1に提案する。今後、これらに必要な非破壊技術の選定、開発、システム化が重要である。また、このような解析フローに基づく信頼性を評価する理論の検討と、そのシステムの構築が重要である。

謝辞、本研究の主なものは、平成7年度、文部省の海外動向調査による成果によるものである。

また、調査に協力して頂いた南カリフォルニア大学、カリフォルニア州立大学、コロンビア大学、カリフォルニア工科大学、カリフォルニア州道路局各位に感謝致します。

参考文献

- 1) Stephanie E. Change, Masanobu Sshinozuka : Life Cycle Cost Analysis with Natural Hazard Risk, Proc. of the National Seismic Conference on Bridge and Highways, Dec. 1995
- 2) P. Geyskens, A. D. Kiureghian, P. Monteiro : Basyesian Prediction of the Elastic Modulus of Concrete, ACI journal submitted
- 3) California Department of Transportation : The Continuing Challenge—the Northridge Earthquake of January 17, 1994, October 1994
- 4) F. Seible, R. Burgueno, M. G. Abdallah, and R. Nuismer : Advanced Composite Carbone Shell Systems for Bridge Columns Under Seismic Loads, Proc. of the National Seismic Conference on Bridge and Highways, Dec. 1995
- 5) F. Seible, G. A. Hegemier, M. J. N. Priestly, D. Innamorato : Developments in Bridge column Jacketing Using Advanced Composites, Proc. of the National Seismic Conference on Bridge and Highways, Dec. 1995
- 6) Federal Highway Administration : Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges, Publication No. FHWA-RD-94-052, May 1995
- 7) James E. Roberts : EERI Annual Meeting, February 1996
- 8) Y. Fujino, T. Pinkaew : Recent Implementation of Active Structural Control and Proposal of a New Semi-Active Mass Damper, Proc. of the International Conference on Retrofitting of Structures, Columbia University, March 1996
- 9) H. Sakurai, K. Ayuta, N. Saeki, and K. Okada : Study of the Relationship Between Recent Large Earthquakes and Damage to Concrete Structures, Memoirs of Kitami Institute of Technology, Vol. 27, No.1, April 1996
- 10) The Ministry of Construction (Japan) : The Specification and Commentary Restoring Highway Bridge Damaged by the Hyogoken-Nanbu Earthquake (Draft) (in Japanese), February 1995
- 11) The Ministry of Construction (Japan) : Reference on applying correspondingly "The Specification and Commentary Restoring Highway Bridge Damaged by the Hyogoken-Nanbu Earthquake" (Draft) (in Japanese), June 1995
- 12) Kazuhiko Kawashima : Impact of Hanshin-Awaji, Japan, Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges, Proc. of the National Seismic Conference on Bridge and Highways, Dec. 1995
- 13) Kazuhiko Kawashima : Damage of Highway Bridges by Hanshin/Awaji, Japan, Earthquake and Seismic Design and Seismic Strengthening, Proc. of the International Conference on Retrofitting of Structures, Columbia University, March 1996, pp. 187-207
- 14) Masanori Hamada : Liquefaction-Induced Ground Displacement in the Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake, 48th EERI Annual Meeting Feb. 7-10, 1996
- 15) Japan Society of Civil Engineers : Guideline to the Maintenance of Concrete Structures, 1996
- 16) Japan Society of Civil Engineers : Specification of Earthquake-Resistant Design for Concrete Structures (Provisional), 1996