

鋼構造物の被害

京都大学 工学部 家村 浩和
井上 晋
五十嵐 晃
立命館大学 理工学部 伊津野和行

1. 日米の被害地震と耐震設計コードの変遷

別表に示すように、日本および米国（カリフォルニア州）その他は、最近の約100年間に、極めて似かよった地震被害を経験して来ており、相互に学ぶべき点が多い。その数例をあげれば次のようになる。

- ・ 1906年のサンフランシスコ地震と1923年の関東大地震による大火災
- ・ 1968年の十勝沖地震と1971年のサンフェルナンド地震における鉄筋コンクリート柱のせん断破壊
- ・ 1971年のサンフェルナンド地震と1978年宮城県沖地震におけるライフラインの被害
- ・ 1983年の日本海中部地震と1985年のメキシコ地震におけるやや長周期震動による震源より遠方での地震被害
- ・ 1994年のノースリッジ地震と1995年の兵庫県南部地震による直下型地震被害

2. ノースリッジ地震による震源近傍での震動と鋼構造物の被害

2.1 震源近傍での震動の特徴

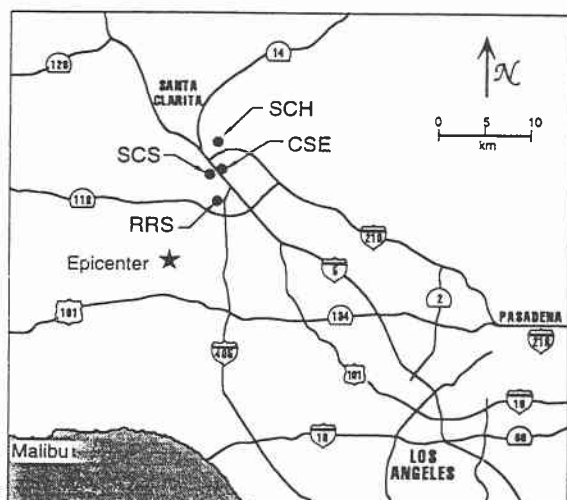


Figure 1. Epicenter of January 17, 1994 Northridge earthquake and near-field stations studied.

Table 2. Peak acceleration, velocity and displacement for selected accelerograms.

Station	Dir.	PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)
RRS	N-S	0.82	157	51
	E-W	0.57	102	73
	Up	0.85	42	33
SCS	N-S	0.63	84	58
	E-W	0.71	142	126
	Up	0.59	37	55
CSE	N-S	0.75	118	59
	E-W	0.47	71	42
	Up	0.41	26	47
SCH	N-S	0.88	139	57
	E-W	0.61	79	41
	Up	0.55	21	16
LUC	N-S	0.83	33	76
	E-W	0.75	146	261
ELC	N-S	0.35	33	11

カリフォルニア工科大学 W.D.Iwan 教授による「Near-Field Consideration in Specification of Seismic Design Motions for Structures」(第10回ヨーロッパ地震工学会議、ウィーン、1994 への提出論文) より引用する。

Fig.1 に震央と観測点の位置、Table 1 に各観測点での水平2成分および上下成分の最大加速度、速度、変位を示す。なお LUC は 1991 年の Landers 地震による Lucerne Valley での記録、ELC は 1940 年の Imperial Valley 地震による El Centro での記録である。論文では主に次のような結論を得ている。

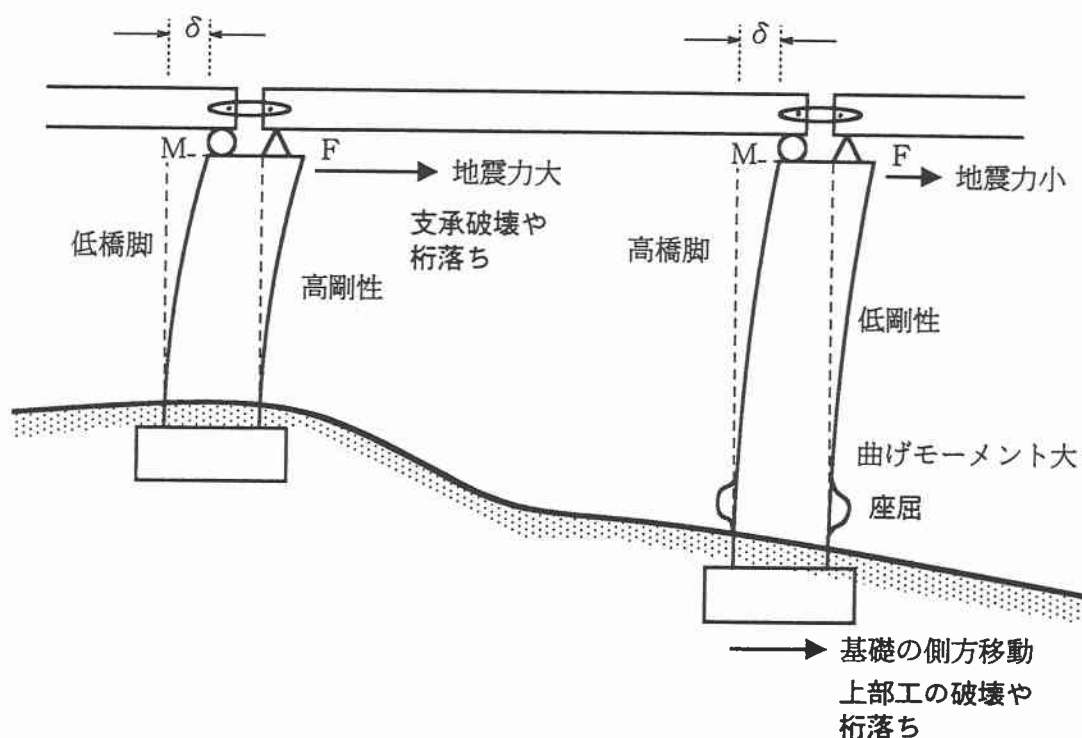
- ・ 最大水平加速度(0.88g)とともに最大上下加速度(0.85g)も極めて大きい。
- ・ パルス的な地盤速度の最大値が 157 cm/sec と極めて大きい。その結果、加速度応答スペクトルは従来のものときほど違くないが、相対変位スペクトルは、極めて大きな値となる。試算では 10 階程度の建物の最大層間変位が、1 層の高さの 4% 程度にもなる。

2.2 鋼構造物の被害

20 階程度までの鋼フレームの建物は 2~4% の層間変位になったものと推定される。地震後の調査から、多くの鋼フレーム建物のはり-柱接合部の溶接部周辺にクラックが発見され、大きな問題となっている。これは、とりもなおさず、構造物の大きな相対変形によるものである。

3. 高架橋における橋軸方向の被害のシナリオ

下図に示すように単純桁が高さの異なる橋脚に載っており、お互いに連結材でつながれている場合の被害のシナリオについて考えてみる。



- ・ 上部の桁が地震に対して大きく相対変形しようとする。連結材の作用により、桁はほぼ同一の水平変位応答をする。
- ・ 低い橋脚は頂部での水平変形に対する剛性が高く、同一の変形に対しては、高橋脚よりも大きな地震力を受ける。支承部が破壊すると桁落ちが起る。支承部が強いと橋脚に大きな力が作用する。RC橋脚のせん断破壊はこの原因による。桁落ちまたは橋脚が被害を受けると、その影響が隣接の桁や橋脚に及ぶ。
- ・ 鋼橋脚はコンクリート橋脚よりも変形しやすく剛性が低い。従って同一の変形量に対して、鋼橋脚に作用する地震力は小さくなる。高橋脚ではこの傾向が著しい。しかし高橋脚基部でのモーメントが大きくなり座屈などが起る。

4. 鋼構造物の被害の概要

阪神高速道路神戸線

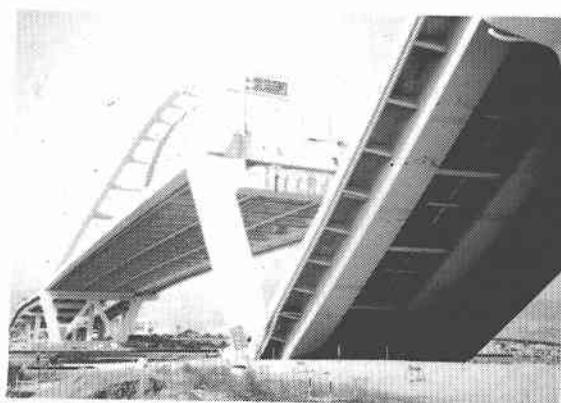
一柱式の鋼橋脚に橋軸および橋軸直角方向のはり出し部の全重量が作用し、橋脚が大きく座屈し隅角部が引き裂かれた。大きな鉛直力が作用したものと考えられる。横方向の張りばりもダイヤグラムの位置で大きく座屈している。



阪神高速道路湾岸線

(西宮港大橋側径間部)

バスケットハンドル型ニールセンローゼ桁の側径間が落橋した。橋脚が西側に移動した結果と考えられる。支承の破損および桁の座屈などの被害がある。ニールセンローゼ橋にも大きなたわみが見られた。



阪神高速湾岸線 摩耶埠頭
第一突堤北（第2摩耶大橋東）

1層ラーメン南側上角部亀裂・上中央部座屈

南側橋脚の沈下により、溶接部に割れが生じた。

隣接する1柱式RC橋脚でも、基部に曲げひびわれが発生している。

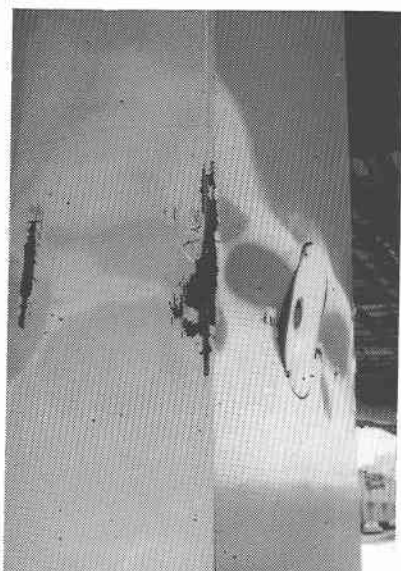


阪神高速湾岸線 六甲アイランド橋
ダブルデッキローゼ橋の六甲アイランド側支承が破壊され側径間との間に大きな段差が生じている。

支承部に大きな地震力が作用したものと考えられる。

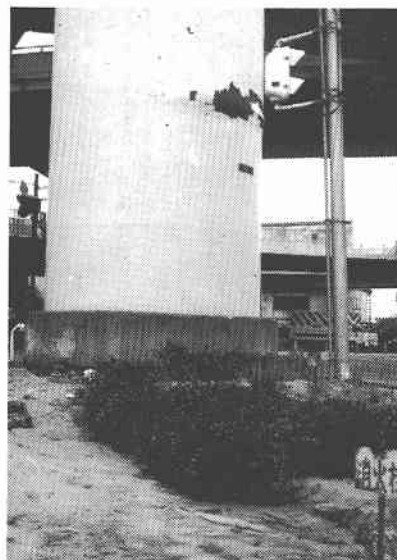


ハーバーハイウェイ 新港第五突堤北
2層ラーメン北内側1階下3分の1で座屈
橋軸直角(南北)方向の振動もしくは、南側(海側)橋脚の沈下により座屈したものと考えられる。



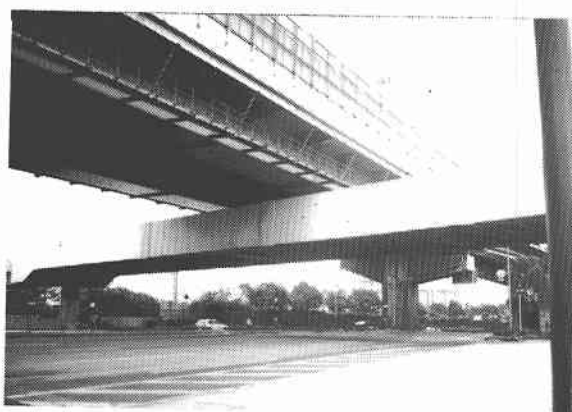
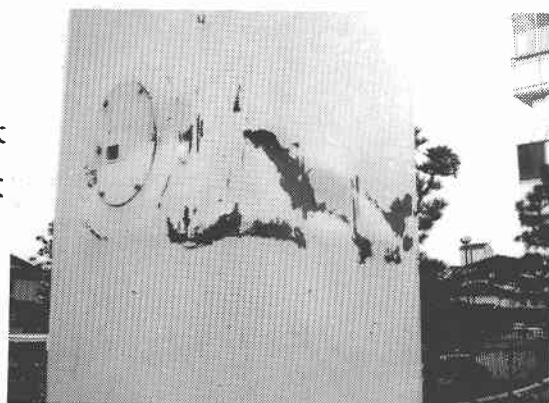
ハーバーハイウェイ 新港第六突堤北
1柱式2階だて橋脚(2m角)基部から4分の1で座屈。橋軸直角(南北)方向の振動により座屈したものと考えられる。

ハーバーハイウェイ・阪神高速神戸線接続部
新港第四突堤北(ポートアイランド入口)
2層円柱ラーメン西側基部より2m付近で座屈
隣接する同構造橋脚では、基部に円周状の座屈が
生じていることから考えて、振動による座屈だと
考えられる。



新交通ポートライナー貿易センター駅付近
連続桁の端部が高い橋脚の頂点からはずれて宙づり
状態となっている。大変形により桁がはずれたと考
えられるが、鋼橋脚に大きな損傷はない。写真奥の
門型橋脚の手前で桁が座屈している。

新交通六甲ライナー魚崎駅北側
円型一本柱が座屈している。これより北側の一本
柱部分および一本柱で支持された魚崎駅に大きな
被害はなかった

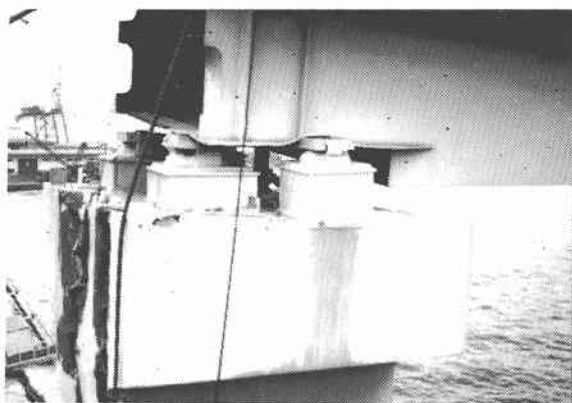


新交通六甲ライナー阪神高速神戸線
との交差点

3スパン連続桁の阪神高速道路橋の支承
部が破壊され、桁レベルが約70~80cm
低下した。そのため、直下の六甲ライナ
ー線の車輛限昇が確保できず通行不能と
なった。

新交通六甲ライナー六甲大橋南側

六甲アイランド内最北部の橋脚が海側に側方移動し、その結果北側の桁が南側の桁を橋脚頂部から南側につき落とした。これは、支承部の破損状況から推察される。桁が落下する過程で橋脚の側面に大きなツメあとを残した。



神戸高速鉄道三宮駅西側

鋼製橋脚柱が脆性破壊している。山側(手前側)方向に大きな力をかなりの速度で受けたものと推定される。



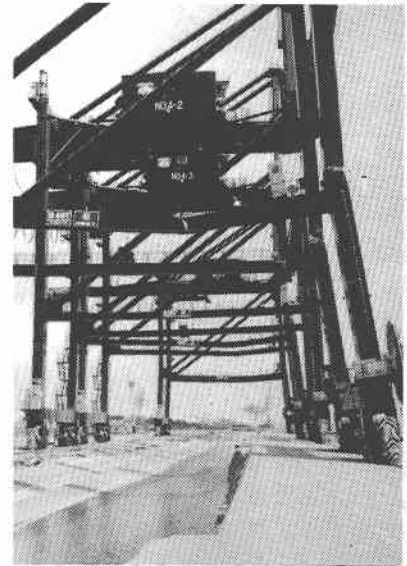
JR および阪急三宮駅

鋼製桁が山側(手前側)方向に移動し、上下両端ビーズの鋼製柱が大きく傾いている。

六甲アイランド南側岸壁

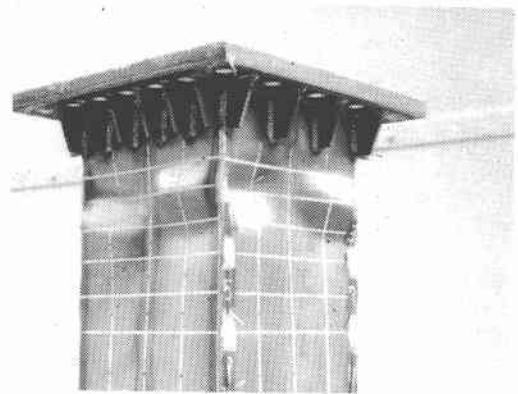
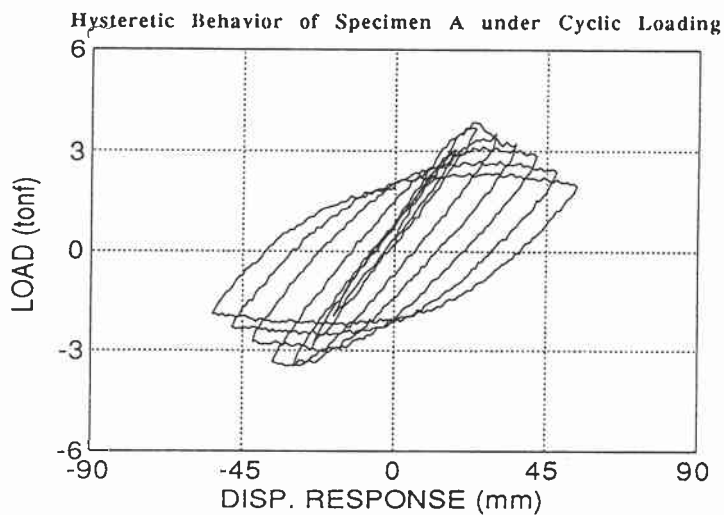
ガントリークレーンの座屈

岸壁が数m海側へ移動し、その後ろが数m沈下した。それにより、クレーンの脚が外側に広げられ、海側脚の2層下部と横構とに塑性ヒンジが発生した。崩壊にいたるものも数基あった。



5. 鋼製橋脚モデルの載荷実験

京大土木耐震研で実施した載荷実験から、次の復元力特性と座屈モードが観察された。写真程度の座屈を引き起こすと、耐荷力が急激に失われる。



米国・日本 被害地震・橋梁耐震コード 年代別比較表

京大・工 家村浩和 作成

米国 (その他の各国)

日 本

<p>1906 サンフランシスコ地震 大火災 AWS S完成</p> <p>1933 ロングビーチ地震 初強震記録 設計震度 (Riley Act 0.02)</p> <p>1936 ベイブリッジ竣工</p> <p>1937 ゴールデンゲイトブリッジ竣工</p> <p>1940 インペリアルバレー地震 エルセントロ記録</p> <p>1955 UBC (Uniform Building Codes) 設計震度 0.06</p> <p>1956 第1回世界地震工学会議 (WCEE, 於サンフランシスコ)</p> <p>1957 I-880サイプレス地区竣工</p> <p>1971 サンフェルナンド地震 RC柱せん断破壊・桁落・ライフライン</p> <p>1975 AASHTO, Interim Spec., Bridges 設計震度 0.5 (塑性設計) 耐震補強開始 桁連結</p> <p>1981 ATC-6 設計地震 0.4 (塑性設計)</p> <p>1983 AASHTO, CALTRANS</p> <p>(1985 メキシコ地震 2秒)</p> <p>1987 ウィティアーナローズ (ロスアンジェルス) 地震</p> <p>(1988 アルメニア地震 1秒)</p> <p>1989 ロマプリータ (サンフランシスコ) 地震</p> <p>(1990 フィリピン地震)</p> <p>1990</p> <p>(1992 トルコ エルジンジャン地震)</p> <p>1992 ロスアンジェルス地震 (長周期)</p> <p>1994 ノースリッジ地震 (直下型都市地震, 大加速度, 大速度)</p>	<p>1891 濃尾地震</p> <p>1923 関東大地震 大火災 設計震度 0.1</p> <p>1939 道路橋示方書 設計震度 0.2</p> <p>1944 東南海地震</p> <p>1946 南海地震</p> <p>1948 福井地震 SMAC開発・耐震コード</p> <p>1956 道路橋示方書 設計震度 0.1~0.35</p> <p>1964 新潟地震 液状化</p> <p>1968 十勝沖地震 八戸記録 (2秒) RC柱せん断破壊</p> <p>1971 道路橋示方書耐震設計編 設計震度 0.1~0.24 修正震度法</p> <p>1978 宮城県沖地震 ライフライン</p> <p>1980 道路橋示方書 (新耐震設計法案) 変形性能照査</p> <p>1983 日本海中部地震 長周期地震動 10秒</p> <p>1988 本四 児島・坂出ルート竣工</p> <p>1989 道路橋示方書 耐震設計スペクトルの見直し 動的解析, 保有耐力, 3倍の地震力を考慮 1gの応答 制振構造の研究と建設</p> <p>1990</p> <p>1992 道路橋の免震設計マニュアル</p> <p>1993 釧路地震 北海道南西沖地震</p> <p>1994 東海道東方沖地震 三陸はるか沖地震</p> <p>1995 兵庫県南部地震 (都市直下型地震)</p>
--	---

IDNDR

第 2 次 調 査 団 報 告

(1 月 2 2 日 ~ 2 4 日)

土木学会兵庫県南部地震総合調査団

構 成

団 長	中村 英夫	土木学会会長・東京大学教授工学部土木工学科（社会基盤計画）
副団長	渡辺 英一	京都大学教授工学部土木工学科（公共交通計画）
団 員	黒川 洸	筑波大学教授社会工学系（都市交通計画）
	飯田 恭敬	京都大学教授工学部交通土木工学科（交通工学）
	盛岡 通	大阪大学教授工学部環境工学科（環境システム工学）
	松井 三郎	京都大学教授工学部附属環境微量汚染制御実験施設（環境工学）
	黒田 勝彦	神戸大学教授工学部建設学科（海上交通計画）
	榎木 亨	大阪大学教授工学部土木工学科（海岸工学）
	國島 正彦	東京大学教授工学部土木工学科
	藤野 陽三	東京大学教授工学部土木工学科（橋梁工学）
	三木 千寿	東京工業大学教授工学部土木工学科（鋼構造）
	森地 茂	東京工業大学教授工学部土木工学科（交通計画）
	柴田 徹	京都大学教授工学部土木工学科（土質力学）
	森 康男	大阪大学教授工学部土木工学科（交通施設計画）
	浅野 光行	早稲田大学教授理工学部土木工学科（都市施設計画）
	西野 文雄	埼玉大学教授大学院政策科学研究所（構造工学・社会基盤計画）
	家村 浩和	京都大学教授工学部土木工学科（耐震工学）
	後藤 芳顕	名古屋工業大学教授工学部社会開発工学科（応用力学・構造力学）
	細井 由彦	鳥取大学教授工学部社会開発システム工学科（水質工学・水道工学）
	今本 博健	京都大学教授防災研究所附属宇治川水理実験所（水理学）
幹事	佐伯 彰一	土木学会企画調整委員会委員
	家田 仁	東京大学助教授工学部土木工学科（交通計画・交通政策）
	清水 英範	東京大学助教授工学部土木工学（測量・地域計画）
	渡辺 法美	東京大学講師工学部土木工学科（建設マネジメント）
	山本 幸司	名古屋工業大学教授工学部社会開発工学科（土木計画学）
	伊津野和行	立命館大学助教授工学部土木工学科（耐震工学）
	新田 保次	大阪大学助教授工学部土木工学科（土木計画学）
	松尾 全士	土木学会事務局会員課