

地震動のどのような特性が壊したのか + 地盤の非整形性の影響

東洋大学 伯野元彦

阪神大震災で鉄筋ビルをはじめ、高速道路、高架橋、その他が壊れた。その原因は、地震動が強かったということになっているが、今回の地震動のどのような特性が、このようにひどい破壊を引き起こしたのかが、現在のところハッキリしていない。最大加速度値でない事はハッキリしている。というのは、ノースリッジ地震のTarzanaでは1.8Gという今回の0.8Gに比べて2倍以上の値でも、大して壊れていないからである。

5,500人以上の方々の無念の死を無駄にしないためにも、今回の地震の被害が何故このようにひどかったのかを追求しなければならない。

1. 何故、このようにひどく木造家屋は壊れたのか

私は土木屋であるから何も詳しい事はわからないが、素人として見て、わからない事だらけである。つまり、福井地震から後の多くの地震で、木造家屋はそんなに壊れていないし、倒壊家屋など殆ど無かった。(長岡地震、今市地震は除く)M7.2などという大規模の直下型地震が無かったと言われればそれ迄かもしれないが、比較的最近の1984年長野県西部地震(M=6.8)、1978年の伊豆大島近海地震(M=7.0)、1974年伊豆半島沖地震(M=6.9)、何れの場合も、震源域に木造家屋は数多くあったにも拘らず、地震の揺れで倒壊した家屋は一軒もない。(鉄骨の溶接不良で倒壊した一軒は除く)

長岡地震(1961年M=5.2)では、かなり倒壊家屋があり、今市地震(1949年M=6.2)でも倒壊したと言われているが、これらはかなり古い形式(ワラ屋根とか土壁とか)で、しかも古い家屋が多く、最近の地震で被害が出ない事と考え併せて、最近の木造家屋は地震に対して強いのだと思っていた。これら木造家屋の被害を解析するのは訳はない。古い木造家屋の実物大模型を作って、振動台上で実際神戸の震度7地域に来たと思われる地震動で振動させてみることである。

キーワード：阪神・淡路大震災、構造物の動的破壊、なげさ現象

東洋大学 工学部, 0427-53-1710

2. 何故、一応耐震設計された橋梁などが壊れたのか

この問題もわからない事の一つである。予想を越えた強い地震が来たからという事になっているし、また壊れた以上、そのように強い地震が来たのだらうけれども、その地震のどのような性質が被害を及ぼしたのかが、よくわからないのである。地震の最大加速度だけが被害を大きくした主な原因とは考えられないと言う事は、多くの人々の一致した考えであろう。

ただ、今回818ガルを記録した神戸海洋気象台は、気象庁発表の震度7の領域には入っていない。従って、震度7の地域では、地盤の増幅作用により最大加速度がより大きかった可能性がある。この事に関して興味ある余震観測が行われている。それは、六甲山麓の高台の被害の小さい地点から、震度7の地点、海岸と、いわゆる「震災の帯」を横断するように、京大防災研究所を主とした余震観測が行われた。その結果は、六甲山寄りの高台に比べて、震度7の領域では最大加速度が4~10倍大きかったというのである。勿論、本震は余震よりかなり大きいから、地盤の非線形性を考慮しなければならないだろうが、震度7の地域でも地表面に地割れなどは認められなかったし、それ程の非線形性もなかったであろうから、最低2倍程度にはなっていたであろう。すると、神戸海洋気象台の記録を2倍すると、水平1,600ガル、上下600ガルとなる。これでもノースリッジ地震よりは小さいが大分近付いた。さて、地震加速度は質量を掛けると地震力であるから、構造物を破壊させる場合、大別して2つのケースが考えられる。一つは、大きな力で0.数秒間位で破壊させてしまう場合であ

る。この場合は、大きな力で発生した亀裂が速い速度で進行し、全断面の耐力を奪ってしまう場合である。地震力は振動力であるけれど、亀裂の進行を継続させるためには、或る程度以上の力を加え続けなければならない。つまり、力が或るレベル以上の時間というのは、かなり短い、それが破壊を決める。例えば、周期1秒の振動力の場合には、半波で0.5秒、或るレベル以上の力の時間はその半分として0.2秒程度のものである。この位の時間で構造物の一断面全部が壊れてしまうのは相当な衝撃的破壊である。山陽新幹線のラーメン橋脚には、通常地震時の短柱のせん断破壊時によく見受けられる、タスキ型のせん断亀裂は殆ど見られず、斜め1本だけのせん断亀裂が数多く見受けられた。これは恐らく、地震力が一方向だけに加わって壊れたものであろう。いま一つ、地震力が構造物を破壊させる場合として、構造物の共振が挙げられよう。阪神高速の横揺れ破壊が、これに相当するのかも知れない。

今回の得られた強震記録は、1波か2波の周期1~2秒の突出した大きな波が特長である。震度7の領域でも、この性質が残っていたとすると、大きな最大加速度で亀裂が入り、周期が1~2秒という比較的長周期の波なので、或るレベル以上の亀裂を進行させる程度の加速度が比較的長時間(と言っても、0.数秒間であろうが、周期0.数秒の波のそれに比べると長い)作用して、衝撃的破壊を起こしたと推定される。また、構造物の固有周期が、この1~2秒に一致していれば、僅か2波と言えども過渡的な共振を起こすことは振動学の教えるところである。

ノースリッジ地震の1.8Gの記録では、1~2秒というような、やや長周期の波は認められず、それがそれ程の被害を生じなかった原因とも言えるかも知れない。

3. 強震観測と動的強度研究は車の両輪

以上のように、被害について推定することはできるかも知れない。ただ、これはあくまでも推定である。何か実験的手法で、これが確かめられないものかと思う。数値破壊シミュレーションで確かめる方法も、勿論考えられる。しかし、破壊規準などは仮定しなければならないから、かなり実際に近いところまではいくかも知れないが、実現象の再現にはか

なわない。さて、このように実大構造物に実際の地震力を加えてみる実験は、必要な事ではあるが、何分にも大変な費用を必要とする。振動台による振動実験は積載荷重が制限されるので、構造物模型を外部から動的油圧加圧器で加振する事となろう。

それでも、10階建のビルを加振する事など、そのままではとてもできないから、破壊する部分のみを実験し、破壊しない部分の挙動は、オンライン計算機で計算するというハイブリッド実験方式を採用する事となろう。日本に何台もとは言えない金額であるが、これだけの災害を受けた国が持つべき設備だと思ふ。

4. 震度7の帯状地域と地震加速度

今回の地震の被害の特徴は六甲山地と海岸に挟まれた、せいぜい幅1km足らずのいわゆる「震災の帯」にひどい被害が集中している事である。

震度7の領域は六甲山麓をほぼ帯状に続いているのに対し、より被害のひどい領域は、三宮付近、大開周辺、東灘区と特定の地域に集中している。この付近はボーリング資料と合わせてみると、基盤の傾斜面上であったり、埋没谷状の地質地形であったりして、一旦軟弱地盤に入った地震動エネルギーが水平方向に逃げにくい地形となっている事がわかった。

このように、被害が六甲山地南側の帯状地域に集中している事に関して、二つの説が提出されている。一つは、この帯状地域の下にまだ知られていない伏在断層があり、それが動いたとする説と、既に述べたような地盤と地形による地震動の増幅によるという説である。この伏在断層説には1つの弱点がある。それは、今回の地震による余震分布(図-1)である。現在の地震学では、余震は、本震の断層ずれが壊し残した所が、壊れて余震となるという事になっている。つまり、余震分布は本震の震源断層を示しているという訳である。その目で図-1を見ると、神戸市の西方は、震度7の地域と余震分布がほぼ一致している。しかし、余震分布は淡路島の方からほぼ直線状に、六甲山中に延びており、震度7の領域は山麓を余震分布と異なって、やや東寄りに向きを変えている。もし震度7の領域の下に伏在断層があって、それが地震を起こしたとすると、図-1の余震分布が本州に上陸した点で向きを変えて「震災の帯」に一致

していなければならない。あくまで伏在断層を主張するためには、「余震分布と本震の原因となった地震断層は一致する」という現在の地震学の常識を覆さなければならない。今回の地震によって、過去の地震による種々の常識は覆ったので、これもそういう事になるかもしれないが、現在のところは、本震の震源断層は、余震分布の所に離れていても、先にも述べたように、地盤地形の地震動増幅によって「震災の帯」は十分説明できるのである。

5. 不整形地盤による地震動増幅

前述したように、地震被害が六甲山麓で带状にひどい事に関して、地盤・地形による地震動増幅を挙げた説があるが、これを補強するものとして、一つのシミュレーション結果を示そう。図-2は、六甲山地と海岸の間の狭い地盤断面について、2次元有限要素法解析を行った結果である。その地盤断面の土質は図-3に示すように、六甲山地から沖積層洪積層が傾斜した重層となっているとされているので、それを模擬した。地震波は、底部に水平方向正弦3波を入射させた。図-2の結果は、水平方向、上下方向とも実際の100倍の或る時点での変位を示している。結果は、六甲山麓の狭い領域で上下動も大きくなることを示している。水平方向のみの地震動を入射しているのに、上下動も相当に大きくなる原因であるが、それは表層軟弱部の六甲山寄り部分の傾斜している事と関係がある。水平入射地震動は、この傾斜部で進行方向を曲げられ、地表面に対しては上下動成分も持つようになるのである。そして「震災の帯」では、そのように進行方向を曲げられた地震波と、傾斜部を外れた鉛直に上昇する波とがぶつかる狭い領域で大きな揺れとなるのである。このように、水平方向片側に硬地盤があって、それに隣接した軟弱層で揺れが大きくなる現象を、その発生機構は違うが、現象の類似から「なぎさ現象」と呼ばれる事が多い。

6. 強震観測・公開組織の充実を

今回の地震では、多くの強震記録が関西地震観測研究協議会(座長, 土岐憲三 京都大学工学部教授)を始めとする各機関によって得られた。ただ残念な事に、震度7の地域内では強震記録は殆ど得られていない。現在のところは、神戸海洋気象台で得られた

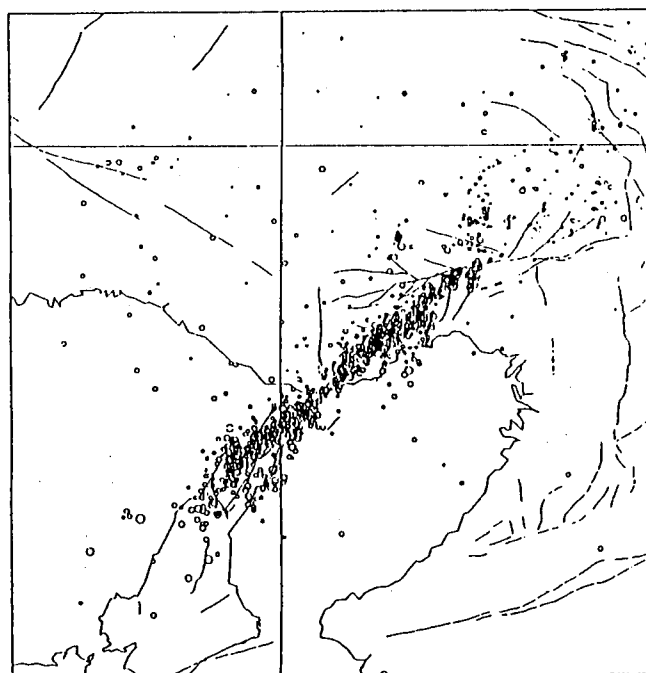


図-1 余震の震央分布 (京都大学防災研究所による)

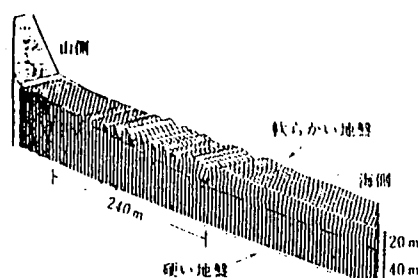


図-2 傾いた工学的基礎面上の地震動の重複反射による縦振動の助起 (大成建設(株), 東洋大学による)

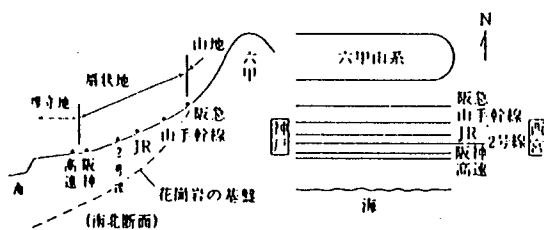


図-3 「震災の帯」地域模式図 (鹿島建設(株)による)

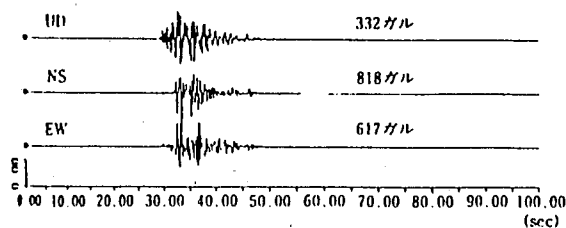


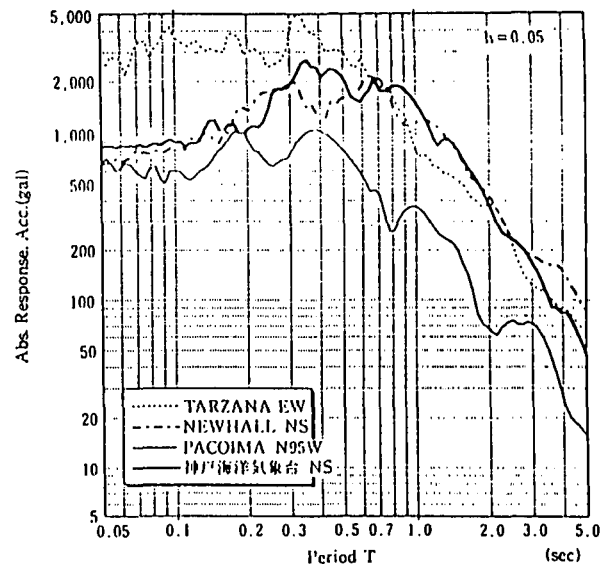
図-4 本震の加速度波形記録 (神戸海洋気象台)

記録(図-4)が、水平成分で818ガルと最大であるので、これが種々の解析に用いられている。ただ、この観測地点は、沖積層上でもないし、震度7の領域でもない。従って、ここの地震動では、構造物は大して壊れなかったのであるから、この地震動を被害解析の入力として用いる事は、厳密に言えば間違っている。ただ他に加速度の大きな記録も無い事から、これをそのまま用いる事もあるようである。勿論、より正確には、地表記録を基盤に戻して、それを被害地点基盤に加えて、地表記録を求め、それを入力として採用する事が正しい。

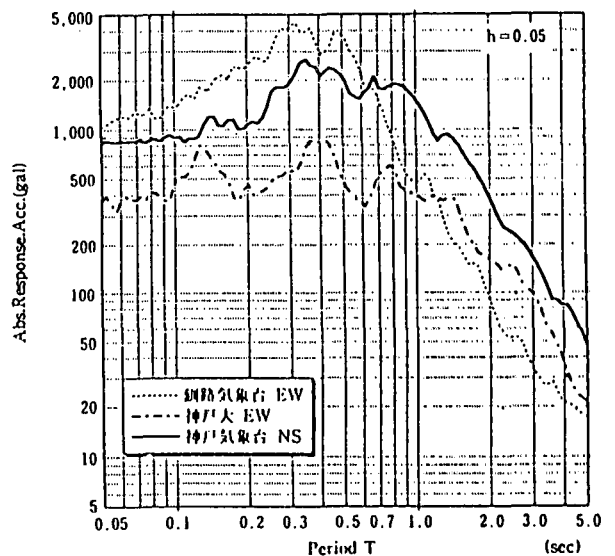
それはともかく、この記録を多くの被害を生じさせた地震動と見なして、その応答スペクトルを求め、それを国内外で過去に起こった地震の大加速度記録のそれと比較したものがあがる(図-5(a)(b))、これによると、1年前のノースリッジ地震のTarzana記録(1.8G水平)と比べると、0.7秒より短周期では、圧倒的にTarzanaが大きく、0.7秒から2.0秒の間では、気象台の記録が大きい。

この事が、阪神大震災の被害を拡大した原因だと言われているが、現在のところ断言はできない。構造物は強震で多少の亀裂を生じると、固有周期は2倍程度の長周期にすぐ伸びてしまう。そして、0.7秒~2.0秒の範囲に入ってしまう、阪神大震災では大きな被害を受けたというのである。一方、Tarzanaでは、亀裂程度で留まるというのである。ただ、阪神大震災でも、この気象庁の近辺ではそれ程の被害は生じておらず、この点をどう考えるかは問題であるが。

いま一つ、今回の地震で貴重な地震記録が得られ公開された。それは、神戸市が埋立地ポートアイランドで、地下-79m、-23m、地表とで、各水平2方向、鉛直方向の3成分加速度を完全な形で記録した事である。その記録を図-6(a)、(b)に示すが、この記録の最大の特長は、地下-79mの水平成分が678ガルであったものが、地表では340ガルと減衰しているのに対し、鉛直動は地下186ガルが、地表555ガルと増幅している事である。地下-79mで678ガルというのは、大変大きな加速度である。ポートアイランドは、全体として大規模な液状化が起こったので、液体の中は横波(S波)は伝播しないのであるから、完全に液化してしまえば、地表はゼロガルだった筈であるから、完全には液化せず、不完全液状化の状態であったと考



(a)



(b)

図-5 既往強震記録絶対加速度応答スペクトルの比較
(大林組技術研究所による)

えれば、水平動の減衰も理解できる。また、鉛直動の増幅は液体中も音波とかP波は伝わる訳であるから、これまた理解できる。ただ、強震記録のS波と鉛直動がほぼ同時に来ているので、鉛直動はSV波と考えられなくもないのだが、増幅しているという事から、ここでは鉛直動はP波であったという事がわかる。

以上のように、色々貴重な強震記録が得られた訳であるが、その公開の早さという点で、まだまだ米国に学ぶ点が多い。1年前のノースリッジ地震の際には、CIMIP (California Strong Motion Instrumentation Program) という州政府組織が、多くの強震記録を波形情報の形で、地震2日後から1週間以

内に公開していた。図-5(a)の元になったTarzanaの記録も、この組織から公開されたものである。日本では、多数の強震記録は防災科学技術研究所に集められ、約1年後に公開される。このように、公開までの期間が1年程度かかるという事も理解できない訳ではない。日本での強震観測は、かなりが研究機関で行われている。従って、得られた強震記録は、その機関が研究を行うためのデータなのである。一般に公開するのは、その研究が終了してからにしたいという気持ちもよくわかる。1年前のノースリッジ地震では、大学の研究者の強震観測網でも多くの良好な記録が得られたらしいが、それらは全く公開されなかった。それではいかんという訳で、先にも述べた関西地震観測研究協議会が昨年結成され、今回の地震で貴重な記録を数多く公開したという訳である。つまり、研究のための強震観測ではなく、強震観測と速やかな公開を目的としているのである。ただ、この協議会も関西地区の強震観測機関をすべて網羅している訳ではなく、また各機関独自の目的から観測地点などを選定している訳であるから、今回最も欲しかった震度7地域での記録は得られなかったのである。従って、関西地区に限らず、将来の地震で大災害を蒙りそうな所には、研究組織ではなく、強震観測とその結果の速やかな公開を使命とするような組織を作るべきである。

7. 日本に1台、実大構造物動的破壊試験装置を！

今回の被害を解析するに当たって、根本的に困る点がある。それは、耐震設計は、一般には震度法という静的な地震力を加えて、許容応力または許容塑性変形以内におさまるようにするものであるし、一方、構造物は地震によって、動的なまたは衝撃的な力を受け、壊れるのである。写真-1は鉄筋コンクリートラーメンの柱部に生じた亀裂を示しているが、これは通常のせん断亀裂よりは鉛直に近い角度となっており、鉛直荷重の影響を物語っているが、この亀裂の大きな特長は、通常地震によるせん断亀裂は、地震が振動荷重であるため、X字型の亀裂となるのだが、この亀裂は一方向だけである、という事は強い衝撃荷重によるものである事を示している。衝撃的な力による亀裂となると、この亀裂が或る開始点から出発して、1m位の亀裂の進展が終わるま

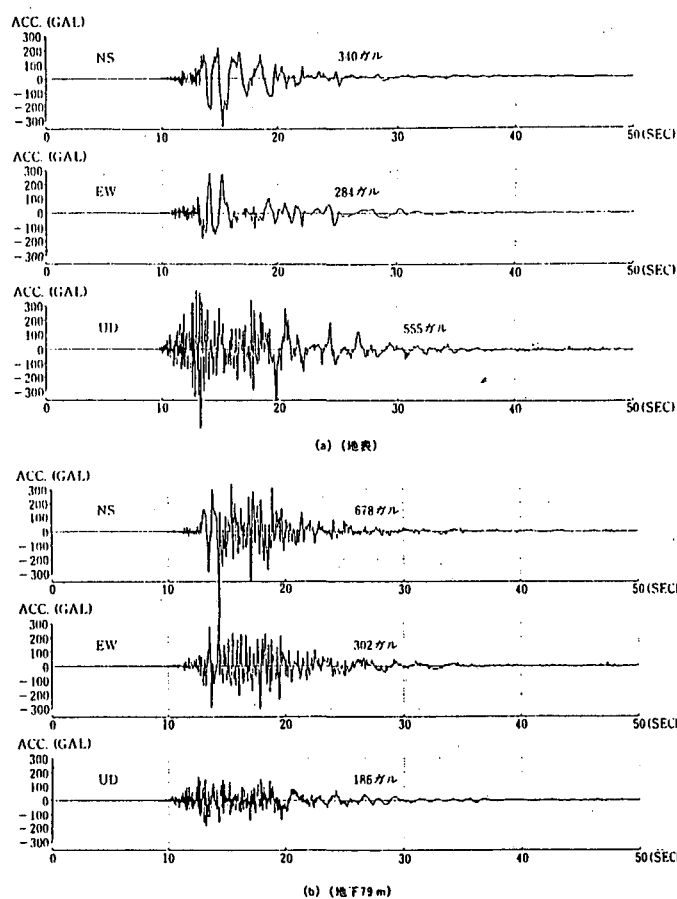


図-6 ポートアイランドで観測された加速度記録

でに要する時間は、0.2秒位のものではあるまいか。従って、亀裂上の或る点の歪みを考えると、亀裂が通過する前には歪みゼロで、通過後、歪みが2%となったとすると、その点の亀裂通過に0.1秒かかったとすれば、その点の歪み速度は20%/秒となり、かなりの高速歪みとなる。一般に材料は粘りのある鉄鋼ですら、10%/秒以上の高速歪みに対しては、脆性破壊を起こすと言われており、コンクリートなどにおいては、尚更である。以上のように、構造物の静的強度と動的強度は、大きく異なる可能性もある。そのような事はさておいても、設計法が静的で、実現象が動的という事は、なかなか難しい問題である。もし設計法も動的解析に基づいていれば、近似的に検討する事はできる。例えば、設計では、最大地震加速度200ガルで動的に解析し、安全率3で設計されていたとしよう。その構造物が最大加速度800ガルの地震に遭えば、多分壊れるだろう。その場合には、設計で仮定したより強い地震が来たから壊れたのだと近似的には言えよう。ただ、現行設計のように、静的加速度によっていると、比較のしようがない。

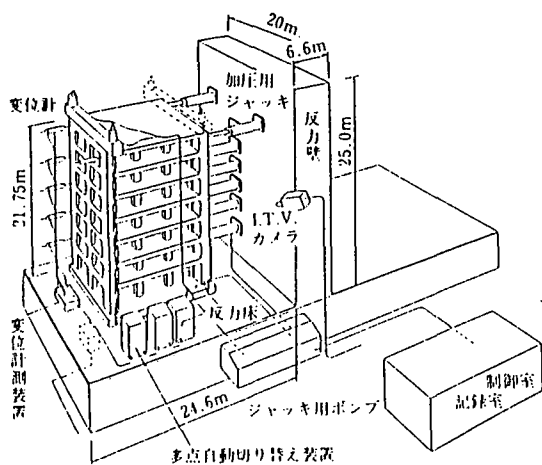


図-7 RC造7階建て建物の実験風景 (建築研究所)

ただ、動的解析を行う場合でも、材料の非線形特性は静的実験に基づいているし、材料の非線形モデルに実際の場合には必ず起こるのであろう材料の劣化を採用しているものは殆ど無い。そのように、現在の被害解析は色々不満な点があるので、いっその事、「実際に近い構造物」を「実際に近い力」即ち、動的地震力で壊してみる事が、最善の解決法となる。振動台の場合には、積載荷重に制限があるので、構造物を外から多くの反力壁に支えられた動的油圧ジャッキで破壊するという形式になるであろう。図-7は、建設省建築研究所で行われたRC造7階建物の仮動的試験の概略を示している。この試験装置では、油

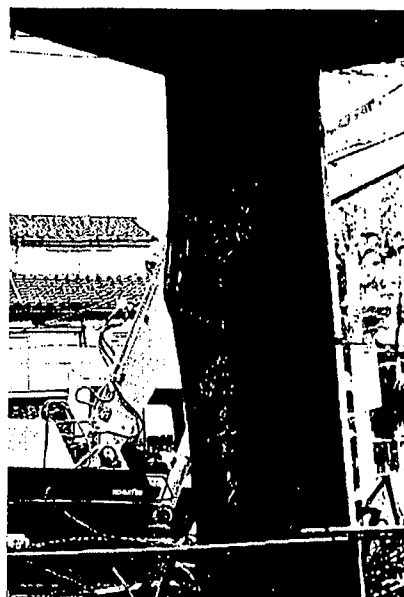


写真-1 RC橋脚に生じた斜め亀裂

圧ジャッキは準静的な加力しかできないので、破壊実験も2日間に渡って行われた。私の提言している装置は、動的加力を行える油圧ジャッキによって、破壊実験も実際の地震と同様、20秒間位で終了するものを想定している。勿論、このような装置は非常に高価なものであるから、日本に何台も備える訳にはいかない。土木も建築もライフラインも、その他施設も含めて、真の耐震強度を求める事が必要な時点になっているのではないだろうか。

What kind of characteristics of strong ground motion in Kobe caused such severe damage?

Motohiko Iakuno

In Kobe Earthquake 1995, so many structures such as highway bridges, reinforced concrete buildings and old wooden houses suffered severe damage. What kind of characteristics of strong ground motion in Kobe caused such severe damage?

Peak acceleration of the ground motion is not the main characteristics, because the peak acceleration observed in the Northridge earthquake is 1.8G two times larger than 0.8G in Kobe and not so severe damage done in the Northridge observed site.