

特集 ■ 阪神・淡路大震災と防災

カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震

額額一起

まず図1をみていただこう。これは兵庫県南部地震の神戸大学と神戸海洋気象台における観測記録を、3年前の被害地震である釧路沖地震(1993年)の釧路気象台での記録と比較したものである。ひと目で、神戸の記録の方がゆっくり揺れており、しかも10秒も経たないうちに大きな揺れはおさまってしまっていることがわかる。

地盤の影響の少ない神戸大学の記録などは、二つのパルスだけで構成されているといっても過言ではない。さらに東西成分も加えて子細に検討すると、これらパルスの震動方向は、北西-南東になっていて、震源断層といわれる六甲断層系にほぼ垂直な方向に相当する。単純に考えると、長い時間、速く揺れている釧路の記録の方が被害が大きいような気がする。しかし、実際は神戸の方が圧倒的に被害が大きかったし、こうした周期1~2秒を中心とするゆっくりした揺れの方が建物などに厳しい影響を与えることが、理論的にも解

明されつつある。

長周期のパルス状の揺れがおこり、しかもその震動方向が断層走向に依存するということは、従来の耐震設計などで考慮されてはいなかった。したがって、これが兵庫県南部地震に特有のものか、あるいは神戸のような震源断層に近い地域では普遍的に発生するものなのかをみきわめておくことが、今後の震災対策を考える上で重要な意味をもつであろう。ここではカリフォルニアの被害地震の強震記録と比較しながらこの点を考察する。

カリフォルニアの強震記録

カリフォルニアの被害地震のうち、兵庫県南部地震のように震源断層が鉛直に近く、かつ断層面がほぼ水平方向に動いた横ずれ断層の地震として、パークフィールド地震(1966年)、コヨーテレイク地震(1977年)、インペリアルバレー地震(1979年)などがあげられる(市街地から遠く被害規模の小さなものも含む)。これらの地震では震源断層に数km以内で隣接した観測点において強震記録が得られており、その記録(図2a, b, c)をみると、断層に直交する震動が兵庫県南部地震と同じような長周期の大きなパルス状の波形をしている。この傾向は断層面に平行な震動ではあまり顕著でなく、振幅も直交方向ほど大きくなっていない。これらの記録は明らかに、横ずれ断層の近傍で断層

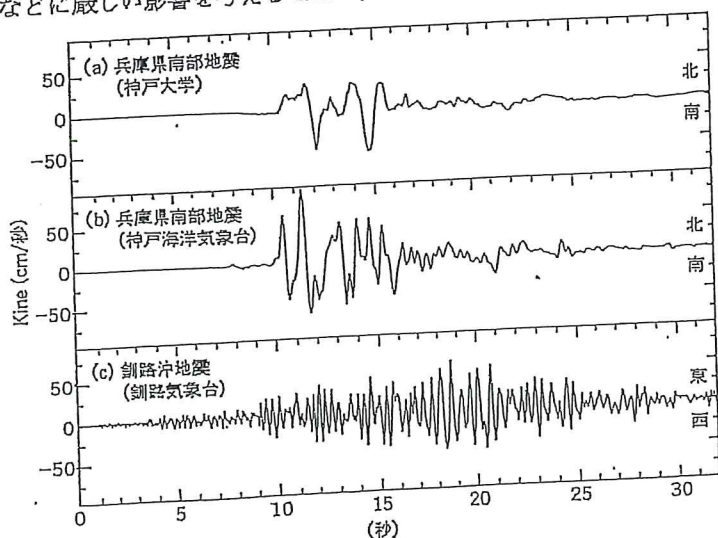


図1 兵庫県南部地震と釧路沖地震(1993年)の速度記録の比較。(a) (b)が兵庫県南部地震の神戸大学と神戸海洋気象台における南北成分記録で、下段が釧路沖地震の釧路気象台における東西成分記録である。気象台の原記録は加速度であるが、すべて速度記録に直して統一してあるので、振幅の単位はkine(cm/秒)になっている。神戸大学での記録(a)では、1サイクル程度の短い波(パルス)が2波みえる。

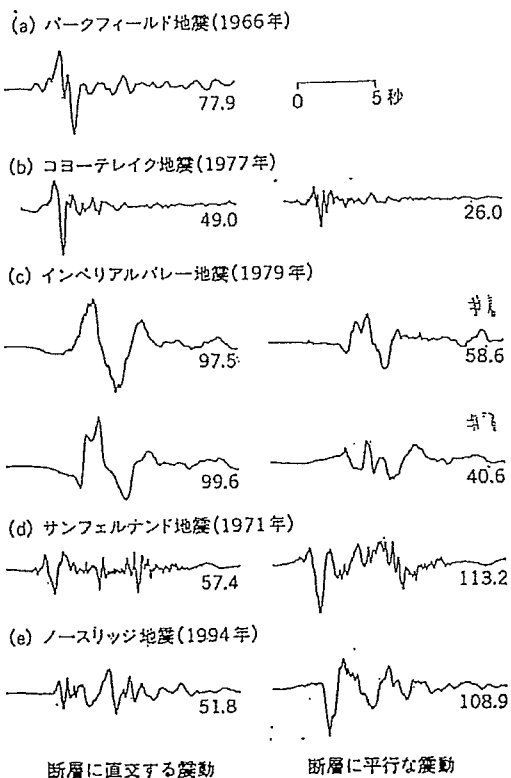


図2 カリフォルニアの被害地震の震源断層近傍における速度記録。左側と右側は水平記録のうち断層に直交する成分と平行な成分を表わす(断層の方向は破壊伝播の方向に取る)。また(a)(b)(c)が横ずれ断層の地震で、(d)(e)が縦ずれの逆断層の地震である。数字は最大速度振幅(cm/秒)を示す。

に垂直な方向にパルス状の長周期地震動が発達することが、普遍的な事実であることを示している。

ではなぜこうした地震動が発達するのであろうか? 断層運動は断層面に沿った岩盤の動きであるから、直観的にはその動きに沿って岩盤のこちら側と向う側で逆向きの一対の力(偶力)が働き、これに伴って断層に平行な震動が大きくなるように思える。しかし、こうした偶力はモーメントをもつから地球を回転させようとするが、実際には回転しないので、このモーメントを打ち消すようなもうひとつの偶力が働かなければならない。

小さな断層から生ずる地震動は図3aに示すように、これら二つの偶力を構成する四つの力に対応して四つの方向をもつ。たとえば紙面に垂直な断層面で右横ずれの断層運動がおこると、断層を中心とする2本の対角線で分割される4地域のうち、断層運動の延長上にある地域では断層に垂直

な方向の震動が卓越する。しかし、断層に隣接した地域では依然として平行な震動が大きく、この単純なモデルでは横ずれ断層近傍における直交方向震動の卓越が説明できない。

その説明のためには、震源断層には必ずある大きさがあることと、断層運動が断層全面で同時におこるのではなく、ある破壊開始点から徐々に全体へ伝播していくことを考慮する必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。もし断層が20 kmの長さを持ち、断層運動が図3bの左から右へ地殻の地震波速度の83%で伝播したとすると、伝播方向にある観測点では図3cのように、断層各部から放射された地震波が微妙な時間差で到着する。これら地震波が互いに干渉し、その結果として図1,2と同じような大きな長周期パルス波(図3c太線)が形作られる。こうした増幅的な干渉は断層に垂直な震動が卓越する地域とその周辺に限っておこり、平行な震動の地域ではおこらないので、全体として断層近傍ではそれに垂直な震動が支配的になるのである。

こうした断層運動の伝播方向に依存した地震動の増幅は電波などと同じように“指向性(directionality)”と呼ばれ、カリフォルニアだけでなく多くの地震で観測されている。兵庫県南部地震でも各地の最大加速度値や速度値の分布をみると、震源断層の六甲断層系を北東方向に延長した先の宝塚や高槻、京都などで、ほぼ同じ距離の大阪平野内より値が大きくなっていることが認められ、断層運動はこの方向に伝播したことがわかる。

なお、図2a, b, cでは一つのパルスしかみえないが、図1の兵庫県南部地震では明らかに二つのパルスがみえる。これは後者の断層運動が図4のすべり量分布⁽³⁾で示されるように複雑で、神戸側断層では明石海峡下との中心部あたりの2カ所で大きなすべりがおこっており、それぞれに対応してふたつのパルスが現われたものと考えられる(淡路側は遠いので大きな影響は与えない)。

また、サンフェルナンド地震やノースリッジ地震などの縦ずれの逆断層では、正の指向性が現われる方向で断層に平行な震動(断層の方向は破壊伝播方向)が卓越しているので、図2d, eのようにこの震動方向に顕著なパルスが現われる。

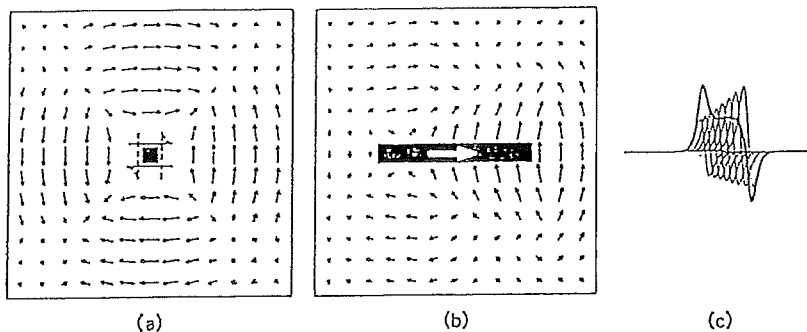


図3 右横ずれ断層における指向性の原理。(a)小さな断層では最大速度振幅部分の震動方向が四象限型の方位特性をもつが、(b)断層が大きさをもちその破壊が左から右へ進行するとき、断層半ばから右側を中心に全体的に断層直交方向の震動が卓越する。(c)この卓越は断層各部からの地震動が増幅的に干渉することによっておこり、その結果として地震動は長周期のパルス状となる。

長周期パルス波が見逃された理由

以上のように、震源断層の近傍では周期1秒を越える長周期で大振幅のパルス波が卓越して被害をもたらすことは、カリフォルニアで繰り返し観測されていた。また安芸⁽⁴⁾が1968年にパークフィールド地震の記録(図2a)を用いてこの事実を指摘して以来、アメリカで同様の論文が出版されてきたにもかかわらず、日本で注目されることはほとんどなかった。ここでその理由を考察することは、今後の地震動の研究に有益であろう。

まず考えなければならないのは、兵庫県南部地震が福井地震(1948年)以来の都市直下の内陸地震であったことである。福井地震は強震計が国内に配備される以前のできごとであり、研究者が強震記録をみることもできない。その後の被害地震は大部分が海域で発生しており、少数の内陸地震も強震計が多数設置されている都市域から離れておこっている。断層近傍の地震動が記録されることは非常に少なかった。たとえば長野県西部地震(1984年)は御岳山麓でおこった内陸地震であるが、震源付近は人口の少ない山村地域であったため、もっとも近い強震記録でも数十km離れた飯田市で観測されたものであった。結局のところ、兵庫県南部地震以前に存在した断層近傍の地震動記録はカリフォルニアのものだけであり、そこに長周期パルス波をみてもカリフォルニア特有の現象である可能性を捨て切れず、積極的に取り入れることはしづかったと想像される。

たとえ遠方の記録でも近傍の記録の性質がある程度保存されていればよいが、図3bで明らかな

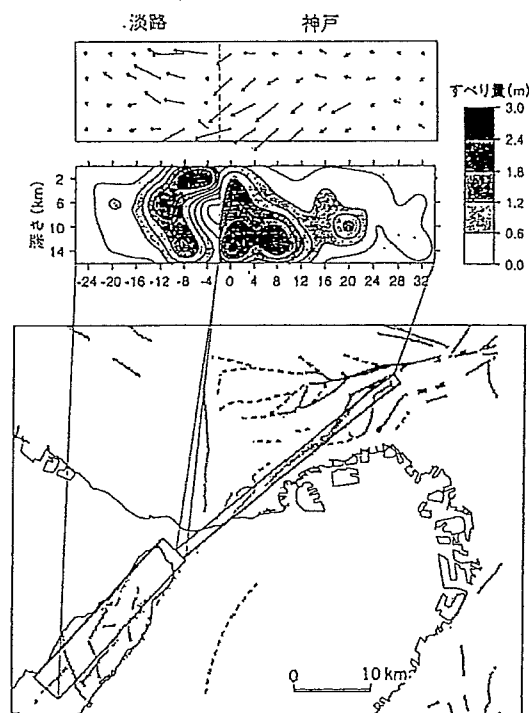


図4 吉田らによる兵庫県南部地震の断層モデル⁽³⁾。下段は想定された断層面の地表への投影(太線が上辺)で、その断層面上のすべり量とすべりベクトル(南東ブロックの動き)の分布が上段に示されている。

ように、断層の延長を除いて遠方では長周期パルス波の発達が見えなくなるだけでなく、複雑な地下構造によって波形が乱されてしまう効果も無視できない。図5はインペリアルバレー地震(1979年)を震源断層から約20kmの長さに展開された強震計アレイで観測した速度記録で、距離の近いものから順に並べたものである。距離が大きくなるにしたがい、長周期成分が不明瞭になってくるのがみられるだけでなく、No. 11~13に達すると、堆積層によって生成された表面波が現われてきて震動の継続時間が延び、パルス波の態をなさ

なくなる。同様の傾向は兵庫県南部地震でも、関西地震観測研究協議会の速度記録を距離順に並べるだけでみて取ることができる。

長周期パルス波を受け入れにくくしたもう一つの理由は、震源断層の近くではその微細な構造から発せられる短周期地震波も減衰せず残っているはずであり、長周期成分だけが強調されるのはおかしいという研究者の先入観であった。

たしかに、長周期地震波よりも短周期地震波の方が伝播の過程で減衰しやすいので、震源で生成された地震波成分のうち近傍では短周期と長周期の両成分があっても、遠方では長周期成分だけ残ることになる。しかし、震源成分のうち1秒よりも長い周期の成分は地震学の理論に基づいた決定論的扱いで説明が可能だが、短い周期の成分は断層面や地下構造のランダムな性質に強く依存し、統計的な扱いが必要であるという認識が最近、研究者の間に広がりつつある⁽⁵⁾。これが正しいとすると、1秒よりも短周期の成分はそのランダム性から断層の指向性で増幅することが小さく、大きく増幅する長周期成分と比べて断層近傍でも相対的に押えられると理解することができる。もちろんこれも相対的な話であって、実際の観測記録を周波数解析してみると、釧路の記録は1秒より短周期にしかピークがないが、神戸の記録は周期1~2秒を中心に広い帯域でパワーをもっているというような違いとなって現われる。

長周期パルス波の重要性

たとえこれまで断層近傍の長周期パルス波が考慮されることがなかったとしても、それが建物などに及ぼす影響が小さければ何の問題にもならない。地震動と建物被害の関係のもっとも単純な理解は、建物の固有周期に近い地震動が入力するとそれに建物が共振して被害が大きくなる、というものであろう。もしこれが常に正しいとすると、長周期波パルスは高層の建物には重大であるが、固有周期が数Hzの中低層建物や木造住宅などではあまり心配する必要がないことになる。

しかし、兵庫県南部地震やカリフォルニアの被

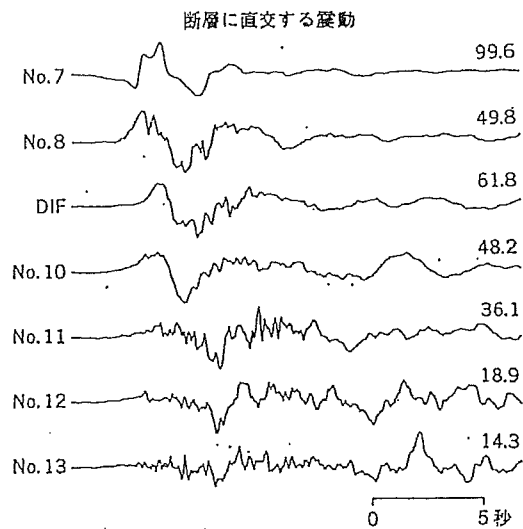


図5 強震計アレイによるインベリアルバレー地震(1979年)の速度記録。最上段の記録(図2の4段目左に同じ)の観測点は震源断層にほぼ隣接し、下に向かうほど断層から離れて最下段では約20km離れている。数字は最大速度振幅(cm/秒)を示す。

害地震では非常に多数の中低層建物や木造住宅が全壊やそれに近い被害を受け、高層建物では大きな被害はなかった。この矛盾は、固有周期の考え方では建物が弾性の範囲にある(揺れに比例して変形するが必ず元に戻る)場合だけしか想定されておらず、建物が一部損壊する効果が考慮されていないことに起因する。単純化し過ぎることを恐れず話をわかりやすくすると、たとえばつぎのようなストーリーが考えられる。

神戸の記録は周期1~2秒を中心に広い帯域でパワーをもっている。中低層の建物ではまずその短周期成分の影響を受け、それによって建物の一部が損壊を受けて塑性領域に入ってくると、ガサガサ揺れるようになって固有周期が延びてくる。その状態で1秒を越える長周期波が効いてきて、全壊に至るような大きな被害になったという考え方である。釧路では短周期成分はあっても長周期成分が小さかったため、一部損壊にとどまり“大震災”にはならなかったのである。現実にはこのように時間を追って現象が進行したわけではないが、ほとんど被害のなかったビルでも、強い地震動の最中に徐々にその振動周期が延びている観測事実⁽⁶⁾があり、大筋で誤っていないと思われる。

境ほか⁽⁷⁾は、いろいろな地震の記録に対する建

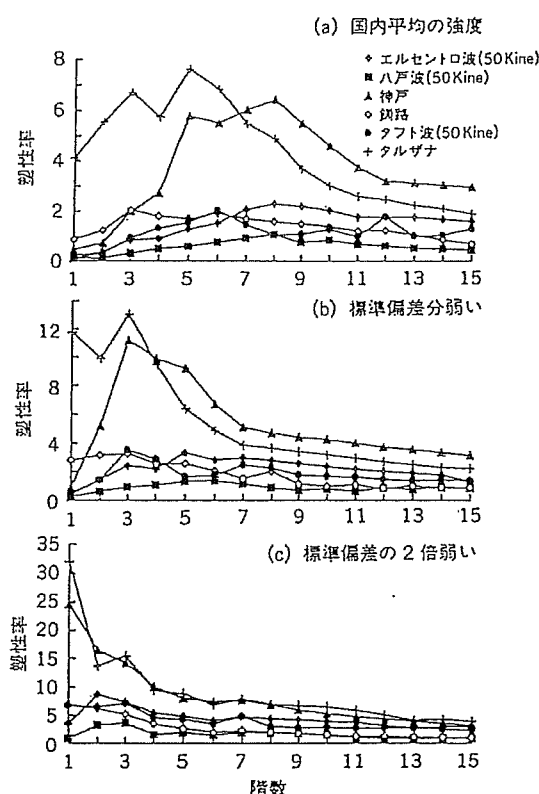


図6 いろいろな地震記録に対する建物応答の弾塑性解析の結果⁽⁷⁾。横軸が鉄筋コンクリート建物の高さを表わす階数で、縦軸の塑性率は損壊の受けやすさの程度を示す。地震記録には神戸(兵庫県南部地震)と釧路(釧路沖地震)、タルザナ(ノースリッジ地震)だけでなく、標準的な設計用入力地震動のエルセントロ波、タフト波、ハチノヘ波が与えられている。建物の強度には(a)国内の平均、(b)標準偏差分弱い、(c)標準偏差の2倍弱い、の3例が想定された。

物の応答を、弾性変形だけでなく塑性変形も考慮して解析した。その結果である図6では、鉄筋コンクリート建物の高さを階数で、損壊の受けやすさを塑性率で表わしてある。国内の平均的な強さの建物(図6a)ではやはり、長周期パルス波の発達した神戸(兵庫県南部地震)とタルザナ(ノースリッジ地震)の記録で塑性率が高いが、神戸では低層よりも中高層建物に大きな影響が出ている。しかし、標準偏差分弱い建物(図6b)では塑性率の大きな部分が3~5階建てに移ってきて、標準偏差の2倍弱い建物(図6c)になると神戸もタルザナも同じように非常に大きな塑性率が低層の1~2階建てに現われる。神戸などの調査では多くの被害建物で経年変化や設計・施工上の問題が指摘されており、こうした要因が建物の強度を下げ

図6bやcの状況を引きおしたと考えられよう。

鉄筋コンクリート造の結果を単純に適用することはできないが、木造住宅も図6cと同じような状況にあったと想像できる。これに対して釧路(釧路沖地震)の記録は図6aの低層建物でわずかに神戸を上回るが、全体的に低い塑性率レベルにとどまっている。また、標準的な設計用入力地震動であるエルセントロ波(1940年インペリアルバレー地震、ただし振幅を50kineに調整)、タフト波(1952年カーンカウンティ地震、同上)、ハチノヘ波(1968年十勝沖地震、同上)ではいずれの階数、強度でも神戸、タルザナを下回っている点に注目すべきであろう。

以上のように、断層近傍ではその指向性によって地震が振幅の大きな長周期のパルス状となり、これが大きな被害をもたらすことは、カリフォルニアと神戸で共通の事実であることがわかった^{*}。HEATON ほか⁽⁸⁾はノースリッジ地震の経験を踏まえ、兵庫県南部地震より以前に長周期パルス波の危険性を警告しており、その先見の明に感服する。しかし、彼らにおいてしても長周期にとらわれて固有周期の長い高層ビルや免震構造ビルにしか注目していない。多くの経験があったカリフォルニアにおいても、広く目配りするのはむずかしいことを示すひとつの例であろう。

(Kazuki KOKETSU 東京大学地震研究所)

文 献

- (1) P. G. SOMERVILLE et al.: Proc. 1995 ASME/JSME PVP Conf. (1995)
- (2) 久田嘉章・山本俊六: 第23回地盤震動シンポジウム, 93 (1995)
- (3) 吉田真吾ほか: 日本地震学会講演予稿集, 2, A76 (1995)
- (4) K. AKI: J. Geophys. Res., 73, 5359 (1968)
- (5) R. W. GRAVES et al.: IUGG General Assembly, Abstracts Week A, A424 (1995)
- (6) 家村浩和・P. C. JENNINGS: 土木学会論文報告集, 230, 33 (1974)
- (7) 境有紀ほか: 第715回地震研究所談話会 (1995)
- (8) T. H. HEATON et al.: Science, 267, 206 (1995)

* 一方、その被害の分布が狭い帯状になることは、神戸の地形による兵庫県南部地震特有の現象である。