# 震源域の強震動と被害

# Strong Ground Motion in Near Source Area and Earthquake Damage

# 久田 嘉章\*

## Yoshiaki HISADA

工学院大学工学部建築学科,教授,早大工博 (〒163-8677 新宿区西新宿1-24-2, hisada@cc.kogakuin.ac.jp) Kogakuin University, Dept. of Architecture, Professor, D. Eng.

近年明らかになってきた震源域近傍における地震動特性に着目し、従来想定されている入力地震動 (2000 年改正基準法の安全限界レベルなど)と比べ、特徴的な3つのタイプの地震動特性である、① ランダム位相タイプ(エルセントロ地震波)、②長周期パルスタイプ(神戸地震波)、③大変位(fling step)タイプ(台湾地震波)、の成因や特徴を整理し、地震被害との関係を説明する。さらに代表的 な観測地震波を用いた地震応答解析などから、②長周期パルスタイプは中低層建物など短周期の建物 に、③大変位(fling step)タイプ(台湾地震波)は超高層や免震など長周期建物に、それぞれ大き く影響することを示し、同時に地震動の大きさの割に地震被害が小さくなる原因も考察する。

震源近傍の強震動,長周期パルス波、fling step、地表・地中断層 Strong Motion in Near Source Area, Long-Period Pulse Wave, Fling Step, Surface Fault and Buried Fault

#### 1. はじめに

近年、強震観測網が充実するのに伴い、震源域近傍で の地震動記録も次々に得られるようになり、設計用地震 動レベルを凌駕する記録が数多く観測されてきている。 その結果、本協議会の主題にあるように地震動レベルの 大きさに比べ、建物の地震被害が少ないという矛盾も目 立ってきている。一方、1995年兵庫県南部地震を契機と して全国の活断層の調査が活発に行われるようになり、 活断層など震源域近傍での入力地震動の特性を理解し、 それに対する最適な耐震設計を行うことが不可避になっ てきている。本講演では近年明らかになってきた震源域 近傍における地震動特性に着目し、図1に示されるよう な従来想定されている入力地震動(2000年改正基準法の 安全限界レベル、建築センターの BJC-L2 波など)と比 べ、特徴的な地震動特性を整理し、地震被害との関係を 説明する。地震動の例として図2に代表的な震源近傍の 観測地震波(1940年エルセントロ波、1995年JMA神戸波、 1999年台湾・石岡 TCU068 波; すべて震源断層から 10 km 以内)の応答スペクトルを示す。2000年改正基準法の安 全限界レベルと比べ、エルセントロ波は良く対応してい るのに対し、神戸波は短周期領域で、台湾波は長周期領 域で、それぞれはるかに大きな振幅を示している。本講 演ではこれら震源近傍に特徴的な地震動の成因と地震被 害の例を説明し、最後に RC 造建物の地震応答解析を行い、 地震被害の特徴を考察する。



図1:改正基準法による加速度応答スペクトルと 安全限界用の模擬地震波(工学的基盤上)

1



図2:代表的な震源近傍の地震動の応答スペクトル

#### 2. 震源近傍の地震動特性

まず始めに震源近傍の地震動特性を大きく3つのタイ プに分類し、その成因や観測地震波と地震被害の例を説 明する<sup>1)</sup>(図2参照)。

- ① ランダム位相タイプ (エルセントロ地震波)
- ② 長周期パルスタイプ(神戸地震波)
- ③ 大変位 (fling step) タイプ (台湾地震波)

#### 3タイプの地震動の成因と特徴

表示定理を用いて、上記の3タイプの地震動の物理的 な説明を説明する。表示定理とは以下示す式であり、観 測点 Y の地震動が断層面上の震源各点 X のすべり関数  $\begin{bmatrix}D_i(X; \omega)\end{bmatrix}$ と、地震動の伝播特性を表すグリーン関数  $T_{ik}^0$ の積からなり、それを断層面上の合積で表現したもの である。

$$U_{k}(Y;\omega) = \int_{\Sigma} T_{ik}^{D}(X,Y;\omega) \left[ D_{i}(X;\omega) \right] d\Sigma \qquad (1)$$

ここで $\omega$ は円振動数、 $\Sigma$ は断層面積,  $T_{ik}^{D}$ は成層地盤における動的グリーン関数の Traction 成分である。

一方、観測点が断層面にごく近い場合、動的グリーン 関数の静的項(ω=0に相当)が卓越し、断層面積分をす る際に擬似特異点(発散点)となる。このため、動的グ リーン関数から動的項と静的項を分離して評価した方が 数値解析上効率的であり、かつ物理的な意味も明快にな る<sup>2</sup>。

$$U_{k}(Y;\omega) = \int_{\Sigma} \left\{ T_{ik}^{D}(X,Y;\omega) - T_{ik}^{S}(X,Y) \right\} \left[ D_{i}(X;\omega) \right] d\Sigma$$
$$+ \left\{ T_{ik}^{S}(X,Y) \left[ D_{i}(X;\omega) \right] d\Sigma \qquad (2) \right\}$$

ここで、 $T_{ik}^{S}$ は静的グリーン関数であり、上式右辺の第1 積分が動的項、第2項が静的項に相当する。ちなみに動 的グリーン関数は実体波および表面波からなるため、そ の幾何減衰は  $1/r \sim 1/\sqrt{r}$  であるのに対し、静的グリーン 関数の幾何減衰は  $1/r^{2}$ と大きい。従って断層面から離れ る従い、動的項が静的項に対して優勢になる。

図3の簡単な地表断層モデルと地中断層モデルを用い て、震源近傍の強震動特性を調べてみる(モデルの詳細 は文献<sup>3)</sup>を参照されたい)。図4は地表断層(左)と地中 断層(右)による地表面での最大速度ベクトルである。 上から下に並んでいる3枚の図で、上から順に静的項の 寄与、動的項の寄与、静的項+動的項(完全解)である。

地表断層の場合(図4の左)、動的項の寄与により破壊 が進行する左側の観測点にて断層直交成分が卓越する長 周期パルス波が発生している(②タイプ;図5を参照)。 一方、静的項の寄与によりflingStepとよばれる断層す べりによる成分が、断層ごく近傍で断層並行成分に卓越 している(③タイプ)。従って完全解の波形(静的項+動 的項)では、長周期パルス波とflingstepの組み合わせ により、断層ごく近傍では大振幅波が断層面に斜め断層 平行成分が卓越している。静的項は減衰が大きいため、 断層面から離れると断層直交成分が卓越する。

一方、地中断層の場合(図4の右)、地表断層と同様に 動的項により長周期パルス波(②タイプ)は断層直交成 分に卓越しているが、静的項の寄与は小さく、fling step の影響は無視できる。従って完全波形では、破壊が進行 する左側の観測点にて断層直交成分のみに卓越した波形 となっている。

以上のことから、 ②タイプの長周期パルス波は地表断 層でも地中断層でも発生し、特に断層破壊が近づく側の 観測点で断層面の直交成分に卓越する。図5に示される ように左横ずれ断層で、破壊が右から左側に移動する場 合、断層直交成分の地震波は、破壊が観測点の左側にあ る場合、震源の Radiation Pattern により観測点では上 向きの振幅が卓越し、逆に破壊が観測点を通過した場合、 位相が逆転し下向きの振幅が卓越し、パルス状の波形と なる。しかも Directivity 効果 (移動震源による方向性: ドップラー効果的な現象)により、左側の観測点では、 継続時間が短くなり振幅が著しく増大する(Forward Directivity Effect; 例えば文献<sup>3)</sup>など)。それに対して、 断層の破壊が遠ざかる右側の観測点ではパルス波は発生 せず、波形がばらばらとなる①のランダム波に近い地震 動になる。一方、③の fling step は地表断層のごく近傍 で観測され、断層すべりによる大きな変位に起因する。 fling step は静的項からなるため、断層面から離れると 急激に減衰し、地中断層では観測されない。



図3:左横ずれ断層による地表断層と地中断層の震源近傍の地震動特性の計算例 (Vs=3 km/sの半無限地盤)



図4:図3のモデルによる地表断層(左)と地中断層(右)による地表面での最大速度ベクトル (上から下の3枚の図で、上から順に静的項の寄与、動的項の寄与、静的項+動的項)



図5:破壊伝播の進行する側(左側)での長周期パルスタイプ波(断層直交成分)の生成説明図

## 3タイプの地震動の観測例と地震被害例

次に実際の観測波から各タイプの波形の特徴を確認し、 建物被害の特徴を報告する。

# ① ランダム位相タイプ (エルセントロ型)

エルセントロ波に代表される地震波で、震源近傍なが ら位相がランダムと見なせ、短周期の卓越する地震波で ある。通常、断層直交成分(Fault Normal, FN)と断層 平行成分(Fault Parallel, FP)の振幅には特に大きな 差は見られない。上で説明したように、震源近傍では破 壊伝播が遠ざかる観測点では、断層各点から発生する地 震波はランダムな重ね合わせとなり、短周期成分が卓越 する波形となる(Backward Directivity:破壊伝播の後 方指向性、図5の右側観測点)。

代表例として、1940年 Imperial Valley 地震のエルセ ントロ波と、1952年 Kern County 地震のタフト波の速度 波形を、それぞれ図6と図7に示す。タフトは震源断層 からやや離れており、波形後半に表面波が現れているが、 断層面の観測点寄りに震央が位置し、破壊伝播は観測点 から遠ざかる方向にある。図にはFN成分とFP成分図を それぞれ示しているが、両者に特に大きな差は見られな い。同時に加速度応答スペクトルも示しているが、基準 法のスペクトルは、エルセントロ地震波が基礎になって いることが分かる。一方、震源断層の直上に観測点があ る場合でも、断層面が 10~20 km 以上深ければ観測され る波形は後述の directivity 効果が弱くランダム波とみ なせ、短周期の卓越する波形となる。例として 1985年メ キシコ (Michoacan) 地震、1985年チリ地震や、1999年 台湾集集地震などの震源直上で観測されている。

## ② 長周期パルスタイプ(神戸型)

震源断層が浅く、破壊伝播が観測点に近づいてくる場合、Forward directivity(前方指向性)効果により、周期1~2秒以上のやや長周期(またはやや短周期とも呼

ばれる) で断層直交成分が卓越するパルス状の波形とな る。カルフォルニアでは1960年代からしばしば観測され ており、1995年兵庫県南部地震以前から観測・理論両面 から良く知られていた。日本では1994年ノースリッジ地 震と兵庫県南部地震を契機に紹介され、存在が広く知ら れるようになった(文献<sup>3)</sup>など)。さらに兵庫県南部地震 以降、詳細な震源過程の逆解析が行われ、長周期パルス 波は対応する各アスペリティーからそれぞれ発生するこ とが明らかにされ、その結果、アスペリティーサイズや 個数のスケーリング則や、アスペリティーサイズとパル ス波の卓越周期の関係、directivity 効果を考慮した経 験式、発生する場所の適用範囲などが提案されている。 長周期パルスの代表例として、右横ずれ断層である1979 年 Imperial Valley 地震と 1995 年兵庫県南部地震(左横 ずれ断層)の波形と応答スペクトルの例を図8、9に示 す。1979年 Imperial Valley 地震は、1940年の地震と同 じ Imperial Valley 断層沿いに地表断層を伴って発生し た地震であるが、地表の食い違い変位量は1m程度と小 さく、また震源が断層の南側にあったため、北側の観測 点でForward directivity 側となった。よってFN成分に 200 kine 以上の長周期パルス波を生じ、FN 成分の応答ス ペクトルの周期約1~2秒以上で修正基準法の入力地震 レベルを凌駕している。

同様に図9は1995年兵庫県南部地震の神戸大学の記録であるが、良く知られているように神戸側はForward directivity 側となり、さらにアスペリティーサイズが10km程度であったため、FN成分に周期1秒程度の長周期パルス波を生じ、その結果、応答スペクトルはやや長周期で改正基準法レベルを大きく上回った。この他、逆断層の1994年Northridge地震や2000年鳥取県西部地震(左横ずれ断層)の強震記録などFN成分が卓越する長周期パルスタイプは近年、数多く観測されている。

4



図6:1940年 Imperial Valley 地震の震源断層とエルセントロ速度波、及び応答スペクトル(ランダム位相タイプ)



図7:1952年Kern County 地震の震源断層とタフト速度波、及び応答スペクトル(ランダム位相タイプ)



図8:1979年 Imperial Valley 地震の震源断層と断層近傍の観測波、及び応答スペクトル(長周期パルスタイプ)



図9:1995年兵庫県南部地震地震の震源断層と断層近傍の観測波、及び応答スペクトル(長周期パルスタイプ)



図 10:1995 年兵庫県南部地震で観測された速度波形の最大振幅時の平面内軌跡(上)、及び全半壊した木造家屋の卓越した倒壊方向の割合(図中の数値は各地域内で全データに対する倒壊方向の割合)<sup>4),5)</sup>

長周期パルス波は断層直交成分に破壊力のある地震動 となるため、建物の倒壊する方向も断層直交成分に卓越 する<sup>4,5,6</sup>。実際、図10に示すように1995年兵庫県南部 地震の際、神戸内の地震動は断層直交成分が卓越し、多 くの木造家屋は神戸側断層に直交する北西-南東方向に なぎ倒されるように倒壊している<sup>4,5</sup>。

## 大変位タイプ(台湾型)

地震により地表断層が現れる場合、地表断層の近傍で は断層の食い違い運動による大変位が発生し、長周期成 分の卓越する波形となる。横ずれ断層の場合、断層直行 (FN)成分に長周期パルス波が現れるのに対し、断層面 を挟んだ地面がほぼ等しい大きさで逆方向にずれを生じ、 断層平行(FP)成分に大きな永久変位が現れ、長周期の パルス波となる(fling step)。一方、逆断層の場合、前 方指向性効果による長周期パルス波と同時に永久変位も 断層直行(FN)成分と上下成分に現れ、また上盤側が下 盤側に乗り上げるため、特に上盤側の地表断層近傍の両 成分に極めて大きな長周期成分が生じる特徴がある。前 者の代表例として 1992 年 Landers 地震や 1999 年トル コ・Kocaeli 地震、後者の例として 1999 年台湾・集集地 震が挙げられる。

横ずれ断層による大変位タイプの観測例として 1992 年Landers 地震の観測波を図 11 に示す。この波形は 1992 年Landers 地震の震源断層、及び2~5mのすべり(右 横ずれ)を生じた Camp Rock/Emerson 断層のごく近傍に あるLucerne Valley (LUC)における FN 成分 (N50E)、FP 成 分 (N40W)の速度及び変位波形である。FN、FP 成分とも に大振幅の速度パルス波を生じており、FP 成分には3m 弱の永久変位(fling step)が現れている。速度応答ス ペクトルでは、短周期のレベルはあまり大きくはないも のの、周期 2~3秒以上で FN 成分だけでなく、FP 成分 も改正基準法の安全限界レベルを大きく凌駕している。

この観測波形は理論的にも再現されており、図12に示 すようにfling step と長周期パルス波の組み合わせによ り、最大速度・変位の出現する方向が断層面に対して傾 斜することが確認されている<sup>70</sup>。図では観測波と計算波 の最大速度・変位方向を示しているが、速度波形では約 45°に、変位波形では約 40°に傾斜している。また図の 数値は最大振幅値を、()内の%は動的項と静的項の占め る割合を示している。特に速度波形の断層直交成分では 9割以上は動的項(長周期パルス波)が占め、一方、変 位波形の断層平行成分では 9割近くは静的項(fling step)が占めることが分かる。

Landers 地震の場合、断層近傍で建物が無かったため、 建物の倒壊方向に関するデータは無いが、同じ横ずれ断 層である 1995 年兵庫県南部地震の淡路側では建物の倒 壊方向が調べられている<sup>4,5)</sup>。1995 年兵庫県南部地震の 際、淡路側では野島断層が破壊し、地表に断層破壊が現 れた。図13 に示すように建物の倒壊方向は断層面に対し て傾斜した方向で卓越している。図10の神戸側では断層 にほぼ直交していたのと対照的である。同様に源栄らは 1999年トルコ・コジャエリ地震の際、地表断層近傍のモ スクにある Minaret(塔)の被害調査から、断層面に傾 斜した方向に卓越する地震動を受けていたことを報告し ている<sup>80</sup>。これらの被害の原因は、上で説明したように 長周期パルス波とfling stepの組み合わせに一因がある と考えられる。

次に逆断層タイプの地表断層の例として、図14に2000 年集集地震の震源断層と、上盤側の地表断層のごく近傍 における石岡(TCU068)のFN成分(GPS 観測からN45W と仮定)、FP成分(同N45E)及び上下成分の速度及び変 位記録を示す。前述したように逆断層かつ前方指向性効 果により、FN成分と上下成分に400 kine 近い大振幅の 長周期パルス波が現れ、かつfling stepによる大きな永 久変位も現れている(FN成分は10m近い)。同図の速度 応答スペクトルより、改正基準法の安全限界レベルでは 周期2~3秒以上の長周期成分で全く過小評価になるこ とが分かる。

地表断層近傍の地震被害の例として、図15~17に地表 断層と交差する道路沿いで行った建物の全数被害調査の 結果を示す<sup>9</sup>。調査棟数は合計 272 棟で、構造形式は RC 構造が 69%を占め、以下 S 造が 19%、レンガ造 4%、木造 1%となっている.調査建物は1~3階の低層の民家がほ とんどで、6階以上の中高層の建物はなく、5階建て建物 は1棟のみである.図14は4箇所の調査位置を示し、図 15 は断層からの建物の位置と被害率の関係である。調査 は無被害、小破、中破、大破、その他(撤去など)で行 った。被害率は中破以上の被害建物について、断層崖の 直上・直下(断層崖から10m以内,断層崖の真上にある 建物は直上に含める)と断層崖近傍(同30m以内)およ びその他(30m以上)の地域の3つに区分し、それら各 区分地域の調査棟数に対する割合を算出した。図から被 害率は断層の上盤と下盤では上盤の方が大きく、かつ断 層の直上に集中していることが分かる。具体的な調査結 果を地図にプロットしたものを図17に示すが、被害は断 層直上に集中していることが図からも分かる。調査から 明らかになったことは、被害はほぼ断層運動に起因して おり、震動による被害は非常に小さかったことである。 これは図14の地震記録でも短周期成分が小さく、fling step のみ卓越していることからも理解できる。参考とし て写真1に図 17(b)の豊原市中正公園付近の建物の例を 示すが、断層直上の建物は断層変位よる建物が大きく傾 斜しているが、下盤側の断層近傍の建物には、殆ど地震 動による被害は見られなかった。

- -



図11:1992年 Landers 地震の震源断層と震央近傍の観測波、及び応答スペクトル(大変位タイプ)







図13:1995年兵庫県南部地震の野島断層と木造家屋の主要な倒壊方向4,5



(a) 地表断層直上の RC 造建物(傾斜による被害)

(b) 地表断層から 200m 程度離れたところにある古い日本家屋 (目立った構造被害は見られなかった)

写真1 2000年台湾・集集地震の地表断層近傍の建物



図 14:1999 年集集地震の震源断層と地表近傍の観測波、及び応答スペクトル (上盤側:TCU068、大変位タイプ)



図15 1999 年集集地震の震源断層との全数調査位置<sup>9)</sup>



図16 全数調査の結果:断層との位置関係から見た中破以上の被害率®

**2004** 年度建築学会大会(北海道) 振動部門 PD 資料(2004.8.30)



(b) 豊原市中正公園付近 (Around Chung Chen Park, Fengyuan city)

図 17 2000 年台湾・集集地震における地表断層近傍の建物の全数調査結果<sup>9)</sup> (場所は図 15 を参照。図中の矢印は建物の傾斜方向を示す)



(c) 台中市東山 (Tung-shan road, Taichung city)



(d) 太平市西部 (West of Tai-ping city)



地震波の種類	ファイル名	波形詳細	地震名	М	地震タイプ	走向。
ランダム	BCJ-L2	センター波				
ランダム	KOKUJI	告示波(安全限界)				
ランダム	ELC	エルセントロ波	1940 Imperial Valley地震	7	右横ずれ	325
長周期パルス	H-E06_	El Centro Array #6	1979 Imperial Valley地震	6.5	右横ずれ	326
長周期パルス	H-EMO_	EC Centro Meloland	1979 Imperial Valley地震	6.5	右横ずれ	326
長周期パルス	KobJMA	JMA 神戸波	1995兵庫県南部地震	7.2	右横ずれ	234
長周期パルス	TAKATR	JR鷹取波	1995兵庫県南部地震	7.2	右横ずれ	234
長周期パルス	OGFUKI	大阪ガス・葺合	1995兵庫県南部地震	7.2	右横ずれ	234
長周期パルス	NWH	Newhall – Fire Sta	1994 Northridge地震	6.7	逆断層	122
長周期パルス	RRS	Rinaldi Receiving Sta	1994 Northridge地震	6.7	逆断層	122
Fling Step(大変位)	Lucern	Lucerne Valley Sta	1992 Landers地震	7.3	右横ずれ	341
Fling Step(大変位)	TCU068	石岡小 Sta	1999 台湾·集集地震	7.6	逆断層	45
Fling Step(大変位)	TCU052	光正小 Sta	1999 台湾·集集地震	7.6	逆断層	26

表1:RC 建物群の地震応答解析<sup>10</sup>で使用した震源近傍の観測地震記録(震源断層の走向は USGS<sup>11</sup>、EIC 地震 学ノート<sup>12</sup>を参照。但し、台湾地震の TCU068 では断層端部での走向の変化を考慮)

#### 3. 震源近傍の地震動による RC 建物群の地震応答解析

次に震源域の地震被害をより具体的には理解するため、 各タイプの代表的な地震波を用いて RC 建物の地震応答 解析を行った。用いた RC 建物モデルは長戸・川瀬によ る RC 造建物群モデル<sup>10</sup>である。このモデルは兵庫県南 部地震における地震動シミュレーション結果を元に、神 戸市(灘区・東灘区)の被害調査結果に整合し、現況の RC 造建物の地震応答を最も良く説明するモデルの一つ と考えられている。

表1に用いた地震記録の一覧を示す。ランダムタイプ の地震波として、エルセントロ波に加え、参考として改 正基準法・告示による安全限界レベルの模擬地震波(図 1を参照)と、日本建築センターの設計用入力地震動(レ ベル2)も用いている(両方とも工学基盤レベル)。また 震源断層の走向は USGS<sup>11)</sup>、EIC 地震学ノート<sup>12)</sup>を参照 している。但し、台湾地震のTCU068 では断層端部での 走向の変化を考慮している。

表2に現行の設計耐力を持つ標準建物モデル(3、 6、9層モデル)による地震応答解析結果を示す。この モデルではピロティーなど特殊な構造を除外してあり、 各層の復元力特性を Degrading tri-linear 型(減衰5%) とし、第2降伏点に対応するベースシア係数を建築基準 法及び建築学会の指針に準拠して建物耐力としている。 表2では最大相関変形角が1/30rad以上で大破した建物 を定義しているが、ランダムタイプや大変形タイプの地 震動では全ての建物は大破には至っていない。それに対 して長周期パルス波である神戸波やノースリッジ波では 断層直交成分(FN 成分)の地震波に対して被害が出て おり、低層から中層の建物には長周期パルス波が最も配 慮すべき地震動であることが確認できる10。

さらに表2の結果を仔細に見ると、神戸市で最も被害 の激しかった「震災の帯」の中の地震動(鷹取波や葺合波) ばかりでなく、あまり被害の見られなかった六甲山側の 波形 (JMA 神戸波) にも被害が出ており、現実と矛盾している。このため長戸・川瀬による RC 造建物群モデル 10では2次壁などの非構造部材の影響も考慮し、かつ被 害調査結果に合うように図 18 に示すように標準建物モ デルの耐力を増加させている。その際、3層モデルでは

表2:現行の耐震規定による標準RC 造モデル<sup>10</sup>を用いた地震応答解析結果(R3,R6,R9 はそれぞれRC 造3,6,9 層モデル。成分のFP、FN は表1の断層走向から求めた断層平行、断行直交成分。また表中の×は最大相関変形角が1/30rad 以上の大破した建物)

タイプ	ファイル名	成分	PGA	R3	R6	R9
	kokuji		365			
ランダム	bcjl2		356			
	ELC	FP	386			
		FN	434			
	H-E06	FP	386			
		FN	434			
	H-EMO	FP	269			
		FN	369			
	KobJMA	FP	515			
長周期		FN	835	×	×	×
パルス	TAKATR	FP	600			
		FN	662	×	×	×
	OGFUKI	FP	680			
		FN	823	×	×	
	NWH	FP	644			
		FN	729	×		
	RRS	FP	414			
		FN	841	×	×	
	Lucern	FP	795			
		FN	681			
大変形	TCU052	FP	364			
fling		FN	592			
step	TCU068	FP	485			
		FN	450			

2~4層、6層モデルでは5~7層、9層では8~10 層、それぞれ代表したモデルとなっている。図 18 より 低層建物ほど基準法による耐力(α=1)より大きく、例 えば新耐震の3層建物では4倍近い耐力比を持つモデル となっている。さらに3・6・9層モデルでは新耐震基 準の建物の耐力が旧耐震基準のそれよりも大きくなって いる。さらに長戸・川瀬による RC 造建物群モデルでは、 耐力分布に対数正規確率密度分布によるバラツキを与え、 各層モデルでそれぞれ12ケースの建物モデル群となっ ている<sup>10</sup>。

表3に各建物モデル群の地震応答解析で求めた大破 率(最大相関変形角が 1/30rad 以上)を示す。図中、 R3, R6, R9 はそれぞれ3, 6, 9 層モデルで、0 と N は旧耐 震、新耐震の建物群に相当する。地震動がランダムタイ プや大変形タイプの地震動では、新耐震による低中層建 物が大破に至る可能性は殆ど無いことが分かる(ピロテ ィーなど特殊な構造は除外していることに注意)。一方、 長周期パルス波では、M6 クラスの 1979 年インペリアル バレー地震の地震波では被害が出ないが、M7 クラスの 1995 年兵庫県南部地震や 1994 年ノースリッジ地震の地 震波では、断層直交成分の建物、特に旧耐震の建物には 大きな割合で被害が出ている。特に1995年兵庫県南部地 震では周期約1秒で卓越する長周期パルス波が生成され たため、「震災の帯」の中の地震動(鷹取波、葺合波)を 用いると新耐震の建物でも9層モデルでは大きな被害率 を出しており、観測された地震被害を良く説明している。



図 18 長戸・川瀬による RC 造建物群モデルの 耐力比 α<sup>10</sup> (現行基準による耐力に対する使用 モデルの標準耐力の比)

## 4. おわりに

震源近傍の地震動特性と被害を整理すると次のように まとめられる。

① エルセントロ地震波に代表されるランダム位相タ イプの地震波は、断層破壊が遠ざかる場合に広く観測される。加速度応答スペクトルでは短周期が卓越し、長周 期側で漸減する標準的な地震波となる。現行の耐震基準 のもとになっているため、ピロティーなどの特殊な建物 を除けば、現行基準で設計された建物に大きな地震被害 を生じる可能性は極めて低いと考えられる。

②神戸地震波(JMA 神戸波など)に代表される長周期 パルスタイプの地震波は、地表・地中断層に関係なく、 断層破壊が近づく場合、断層面に直交する成分が卓越す る地震波となる。特に長周期パルスの卓越周期では、現 行の耐震基準を凌駕する場合がある。卓越周期は断層面 のアスペリティーサイズに依存し、神戸地震波は1秒程 度であったが、地震規模が大きくなるほど一般に長周期 側に移行する(入倉レシピなど;本協議会の岩田氏の講 演などを参照)。従って、その卓越周期に塑性化した建物 の固有周期が一致した場合、極めて大きな被害を被る可 能性が高くなる。

③台湾地震波(TCU068・石岡波など)に代表される大 変位 (fling step) タイプの地震動は地表断層のごく近 傍で、断層のすべり方向で観測される。横ずれ断層では 断層平行成分となるため、長周期パルス波と重なった場 合、断層面に斜めの方向に大きな長周期波が観測される 場合がある。一方、逆断層では断層直交成分、特に上盤 側で非常に大きな長周期の地震動成分を生じる。fling step はグリーン関数の静的項から構成されるため、幾何 減衰が大きく(1/r<sup>2</sup>のオーダー)、地中断層や断層から離 れた地点では無視できる。例えば円形の簡単な断層モデ ルを用いた場合、断層半径(あるいはアスペリティー半 径)の1/10程度から断層すべりの影響は大きく減少し、 断層半径の距離で 1/10 程度になる <sup>9</sup>。これまでの観測 では、地表断層の近くではあまり大きな短周期の地震波 を出さないことが多く、地表断層の大変形に起因する被 害を除けば、現行の基準で設計された中低層の建物の被 害はあまり大きくはならないと考えられる。一方、高層 や超高層建築、免震建築など長周期の建物には、耐震設 計上、特別の配慮が必要になる。特に大規模な地表断層 では地面が数mから10m程度も高速で移動するため (台湾地震では約 200 cm/s)、免震建築には非常に厳し い地震動になることに注意すべきである。

#### 謝辞

本研究で用いた長戸・川瀬による RC 造建物群モデル の地震応答解析プログラムは九州大学の川瀬 博氏より 提供して頂き、地震応答解析は工学院大学の吉田研史氏 の協力を頂きました。本研究は文部科学省「大都市大震 災軽減化特別プロジェクト」、学術フロンティア事業「工 学院大学 地震防災・環境研究センター」、及び、日本原 子力発電株式会社「大加速度入力時の構造物の安全性評 価指標に関する研究」による研究助成を一部使用しまし た。

# 参考文献

- 1) 久田嘉章, 震源近傍の強震動 改正基準法の設 計用入力地震動は妥当か? –、第29回地盤震動シ ンポジウム、日本建築学会、pp99-110, 2001
- 2) Y. Hisada and J. Bielak, A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity , Bull. of the Seism. Soc. of America, Vol. 93, No. 3, pp. 1154-1168, 2001
- 久田嘉章、山本俊六、ノースリッジ地震の地震動 類似点と相違点、第23回地盤震動シンポジウム、日 本建築学会、pp.93-100, 1995
- 4) 久田嘉章、1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向データの数値化、及び強震記録との関係、日本建築学会構造系論文報告集、No. 512、pp. 105-110、1998
- 5) 久田嘉章、南栄次郎、1995年兵庫県南部地震における木造家屋の倒壊方向と地震動特性、第10回日本 地震工学シンポジウム、Vol.1、pp.783-788、1998

- 6) 元木健太郎・瀬尾和大・山中浩明:震源近傍での地 震動特性に関する一提案-1995年兵庫県南部地震に おける構造物被害方向の規則性に着目して-,第10 回日本地震工学シンポジウム論文集,第一分冊, pp. 759,1998
- Y. Hisada and J. Bielak, EFFECTS OF SEDIMENTARY LAYERS ON DIRECTIVITY PULSE AND FLING STEP, 13<sup>th</sup> WCEE, 2004
- M. Motosaka and A. Somer, Ground Motion Directionality inferred from a survey of minaret damage during the 1999 Kocaeli and Duzce, Turkey, earthquake, J. Seismology, No. 6, pp. 419-430, 2002
- 9) 日本建築学会、1999年台湾・集集地震災害調査報告
  書、第1章・地震及び地震動、2000
- 10) 長戸健一郎・川瀬 博、建物被害データと再現強震動 による RC 造構造物群の被害予測モデル、日本建築学 会構造系論文報告集、No. 544、pp. 31-37、2001
- 11) USGS, Southern California Earthquake Catalog, <u>http://quake.wr.usgs.gov/research/deformation/mo</u> deling/SHBSSA98/scal cat.html
- 12) 東京大学地震研究所、EIC 地震学ノート、 http://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/EIC/EIC\_News/
- 13) 日本建築センター模擬波(基盤波)、BCJ-L2(ダ ウンロードサービス)
   http://www.bcj.or.jp/download/wave.html
- 表3:長戸・川瀬による RC 造建物群モデル<sup>10</sup>を用いた地震応答解析による大破率(R3,R6,R9 はそれぞれ3,6,9層モデルで、OとNは旧耐震、新耐震の建物群に相当。成分のFP、FN は表1の断層走向から求めた 断層平行、断行直交成分。最大相関変形角が1/30rad 以上で大破としている)

タイプ	ファイル名	成分	PGA	R30	R60	R90	R3N	R6N	R9N
	bcjl2		356	2%	1%	23%	0%	0%	0%
ランダム	Kokuji		365	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	ELC	FP	284	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		FN	200	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	H-E06	FP	386	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		FN	434	0%	0%	8%	0%	0%	0%
	H-EMO	FP	269	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		FN	369	0%	0%	8%	0%	0%	0%
	KobJMA	FP	515	0%	0%	0%	0%	0%	0%
長周期		FN	835	3%	35%	26%	1%	15%	15%
パルス	TAKATR	FP	600	3%	3%	3%	0%	0%	0%
		FN	662	18%	32%	92%	3%	8%	69%
	OGFUKI	FP	680	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		FN	823	8%	32%	79%	1%	8%	50%
	NWH	FP	644	0%	0%	1%	0%	0%	0%
		FN	729	2%	0%	36%	0%	0%	1%
	RRS	FP	414	0%	0%	8%	0%	0%	1%
		FN	841	18%	10%	8%	3%	7%	1%
大変形	Lucern	FP	795	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		FN	681	0%	0%	3%	0%	0%	0%
	TCU052	FP	364	0%	0%	3%	0%	0%	0%
fling		FN	592	0%	0%	1%	0%	0%	0%
step	TCU068	FP	485	0%	0%	3%	0%	0%	0%
		FN	450	0%	1%	18%	0%	0%	0%

17