



地震動の方向性の定量的な検討と地震被害推定のための 平均方向の提案

境有紀¹⁾、熊本匠²⁾

1) 正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科、教授 工博

e-mail : sakai@kz.tsukuba.ac.jp

2) 非会員 トヨタ自動車株式会社

(元筑波大学大学院システム情報工学研究科、大学院生 工修)

e-mail : takumi_kumamoto@mail.toyota.co.jp

要 約

地震動の方向性について、様々な地震動強さ指標、応答スペクトルの周期について定量的に検討した。具体的には、過去に観測された強震記録からそれぞれの全36方向の地震動を合成して、様々な周期帯の弾性加速度応答スペクトル、あるいは、地震動強さ指標について、その大きさが方向によってどの程度変動するかについて検討した。その結果、いずれも変動係数にして、平均20%程度、方向性の強い地震動は40%以上変動していることがわかった。そして、一自由度系からなる建物群に一方方向の地震動を入力して被害推定を行う場合などを想定し、構造物の地震応答が平均的なものとなる地震動の「平均方向」を、0-3秒平均加速度応答の平均値をとる方向として提案した。平均方向の地震動を用いて、建物群を対象とした一自由度系地震応答解析を行った結果、実際の被害率を再現でき、平均方向の有用性を確認した。

キーワード： 地震動、方向性、弾性応答スペクトル、平均方向、建物群モデル

1. はじめに

地震動には、震源メカニズムによって強い方向性が現れる場合がある。例えば、甚大な被害を引き起こした1995年兵庫県南部地震では方向性が非常に強い地震動が観測されており(例えば¹⁾²⁾、これは、断層破壊の伝播方向に依存する波動の干渉によって説明されていて³⁾、このいわゆる断層破壊の指向性効果は、Californiaの地震でも観測されており、様々な検討がなされてきた(例えば⁴⁾⁵⁾⁶⁾。

一方、地震応答解析など地震動を入力する解析を行う際には、NS、EW成分といった、ある特定の方向の強震記録が用いられることが多く、強い方向性をもった地震動が発生した場合、強震計がたまたまどのような方向に設置されていたかによって、地震応答解析などに用いられる地震動の方向が決まるのでは、実際の被害を推定する際に大きな誤差を生じる可能性が高い。例えば、1995年兵庫県南部地震の大坂ガス管合供給所や神戸海洋気象台の記録はNS方向がほぼ強軸方向と対応しているが、JR鷹取の記録の強軸方向はNS、EWいずれから45度ずれていて、NS、EWのいずれの成分を用いても地震応答を過小評価する危険性がある。

そこで本研究では、近年の強震観測網の充実によって蓄積されてきた強震記録を用いて、地震動の方向性について定量的に検討する。そして、地震応答解析を行う場合、設計という立場に立てば、最大方向を入力するという事も考えられるが、例えば、一自由度系からなる建物群に一方向の地震動を入力して被害推定を行う場合には、最大方向を入力したのでは被害を過大評価してしまう。そこで、被害推定などを想定し、地震応答が平均的なものとなるような地震動の「平均方向」の提案を行う。

地震計設置方位に依存しない指標としては、各方向の応答スペクトルの平均、および、平均となる方向でのスペクトルを指標として用いることが提案されており⁷⁾、本論文の位置づけとしては、周期帯を何通りかに変化させた応答スペクトルにいくつかの地震動強さ指標を加え、それらが平均となる「平均方向」について、近年の強震観測網の充実によって蓄積されてきた日本の強震記録を用いて検討し、一自由度系からなる建物群に一方向の地震動を入力して被害推定を行う場合を想定して、その妥当性を検証したものとなる。

2. 地震動の方向性の検討

2.1 用いた強震記録と加速度オービット

検討に用いた強震記録⁸⁾⁹⁾を表1に示す。これらは、1990年代に強震観測網が整備されて以降、震度6弱以上を記録したものの中で（一部、震度5強のものも含む）、その周辺に大きな地形や地盤の変化がなく、地震動の局所的な変動が少ないと考えられ、なおかつ、十分な数（100棟程度）の建物が存在して統計的に有意な被害率を算出できたものである。加速度オービットを図1に示す。

図1を見ると、例えば、1995年兵庫県南部地震の大阪ガス葺合供給所（(4)hnbfski）で観測された地震動は、南北に大きく卓越している一方、2007年能登半島地震時にJMA輪島（(43)nthjwj）で観測された地震動については円形になっていて方向による違いはさほど見られないなど、地震動によって方向性は様々であることがわかる。

ただ、加速度オービットでは、地震動の方向性が構造物の地震応答に与える影響を定量的に把握することは難しい。そこで、構造物の地震応答に大きな影響を与える応答スペクトル（大地震時の建物の塑性化を含めた周期をカバーする0-3秒の範囲とした）を用いて、地震動の方向性について検討した。

表 1 解析に用いた強震記録一覧

地震	観測点	ID	PGA	PGV	I _M	D _{RC}	D _w	No.
1993年釧路沖	釧路地方気象台	ksrkma	752.2	43.1	6.0	-	0.0	1
1994年三陸はるか沖	八戸市庁舎	srhhch	433.5	50.2	5.8	-	1.9	2
1995年兵庫県南部	JR鷹取	hnbtk	741.6	157.2	6.5	19.9	59.4	3
	韮合	hnbtki	833.5	130.8	6.5	10.2	20.2	4
	NTT神戸	hnbntt	331.2	88.5	5.8	3.9	16.1	5
	JR宝塚	hnbtkz	690.7	96.6	6.2	3.9	7.2	6
	本山第一小	hnbmt	794.0	81.6	6.1	2.4	6.5	7
	神戸JMA	hnbkma	752.2	105.0	6.4	1.0	3.2	8
	尼崎高架橋	hnbamk	340.5	56.9	5.7	1.9	2.4	9
	尼崎竹谷小	hnbamt	367.8	51.1	5.7	0.4	1.7	10
	尼崎港	hnbamh	472.1	62.2	5.7	0.0	0.0	11
	関電総合技研	hnbsgk	556.2	59.4	6.0	0.5	0.8	12
1997年鹿児島県北西部(3/26)	K-NET宮之城	kg1myj	544.0	36.3	5.5	-	0.0	13
	K-NET阿久根	kg1akn	295.9	43.8	5.7	-	0.0	14
1997年鹿児島県北西部(5/13)	K-NET宮之城	kg2myj	976.6	45.5	5.9	-	0.0	15
2000年鳥取県西部	境港測候所	tttrskm	762.8	84.9	6.0	-	1.1	16
	K-NET米子	ttrynk	441.4	53.8	5.8	-	0.0	17
2001年芸予	K-NET大野	gyoono	465.7	33.6	5.6	-	0.0	18
	K-NET東予	gyoty	514.7	33.9	5.6	-	0.0	19
2003年三陸南	JMA涌谷	srmwky	445.6	42.8	5.6	-	0.0	20
	JMA大船渡	srmof	1106.9	34.5	5.8	-	0.0	21
	JMA石巻	srmimj	962.7	27.6	5.6	-	0.0	22
2003年宮城県北部	JMA涌谷	myhwky	594.0	54.2	5.8	-	0.0	23
	鹿島台町震度計	myhksd	1614.2	43.8	5.9	-	0.0	24
2003年十勝沖	K-NET広尾	tkchro	972.7	48.8	6.0	-	0.0	25
	K-NET標津	tkcsbt	583.7	65.2	5.9	-	1.3	26
	K-NET池田	tkcikd	671.0	59.6	5.9	-	0.0	27
	K-NET釧路	tkcksr	410.2	43.6	5.6	-	0.0	28
	KiK-net本別	tkchbi	497.4	34.8	5.5	-	0.0	29
2004年新潟県中越	川口町震度計	ngckgk	1667.9	144.7	6.0	-	19.8	30
	K-NET小千谷	ngcojk	1500.7	133.4	6.7	-	0.0	31
	JMA小千谷	ngcoji	975.0	93.6	6.3	-	0.0	32
	十日町震度計	ngctks	1339.7	58.3	5.9	-	1.8	33
	K-NET長岡	ngcnkg	542.7	51.0	6.1	-	0.0	34
	JMA長岡	ngcnji	436.2	38.3	5.5	-	0.0	35
	中里村震度計	ngcnks	768.8	71.9	6.0	-	0.0	36
	KiK-net加茂	ngckmo	412.0	28.8	5.7	-	0.0	37
	栃尾市震度計	ngctco	1012.3	34.2	5.5	-	0.0	38
	K-NET小出	ngckdk	639.3	39.7	5.5	-	0.0	39
2005宮城県沖	宮城川崎町震度計	mygkws	1124.2	44.5	5.6	-	0.0	40
2005年福岡県西方沖	福岡舞鶴震度計	fosmdr	342.8	70.3	5.7	-	-	41
2007年能登半島	K-NET穴水	nthkan	896.1	103.7	6.3	-	18.8	42
	JMA輪島	nthiwj	472.2	98.7	6.1	-	4.7	43
	K-NET輪島	nthkwj	546.3	43.9	5.5	-	2.9	44
	K-NET能都	nthknt	665.6	25.2	5.6	-	0.0	45
	K-NET七尾	nthnno	217.9	34.9	5.3	-	0.0	46
	JMA能登町	nthjnt	261.1	51.8	5.7	-	0.0	47
2007年新潟県中越沖	K-NET柏崎	ncokzk	812.0	126.9	6.4	-	5.3	48
	柏崎市震度計	ncokzs	775.1	125.1	6.3	-	7.4	49
	上越市柿崎震度計	ncojks	443.1	94.4	5.9	-	0.0	50
	長岡市中ノ島震度計	nconns	347.8	35.6	5.6	-	0.0	51
	長岡市上岩井震度計	nconks	354.9	44.9	5.7	-	0.0	52
	柏崎市高柳町震度計	ncokts	543.5	53.3	5.7	-	0.0	53
	JMA小千谷	ncooji	401.9	28.3	5.1	-	0.0	54
	K-NET小千谷	ncoojk	524.8	47.6	5.6	-	0.0	55

※ PGA:地動最大加速度(cm/s²), PGV:地動最大速度(cm/s),いずれも水平2方向ベクトル和,I_M:計測震度,D_{RC}:RC造建物大破率(%), D_w:木造建物全壊率(%),No.は図1の番号に対応

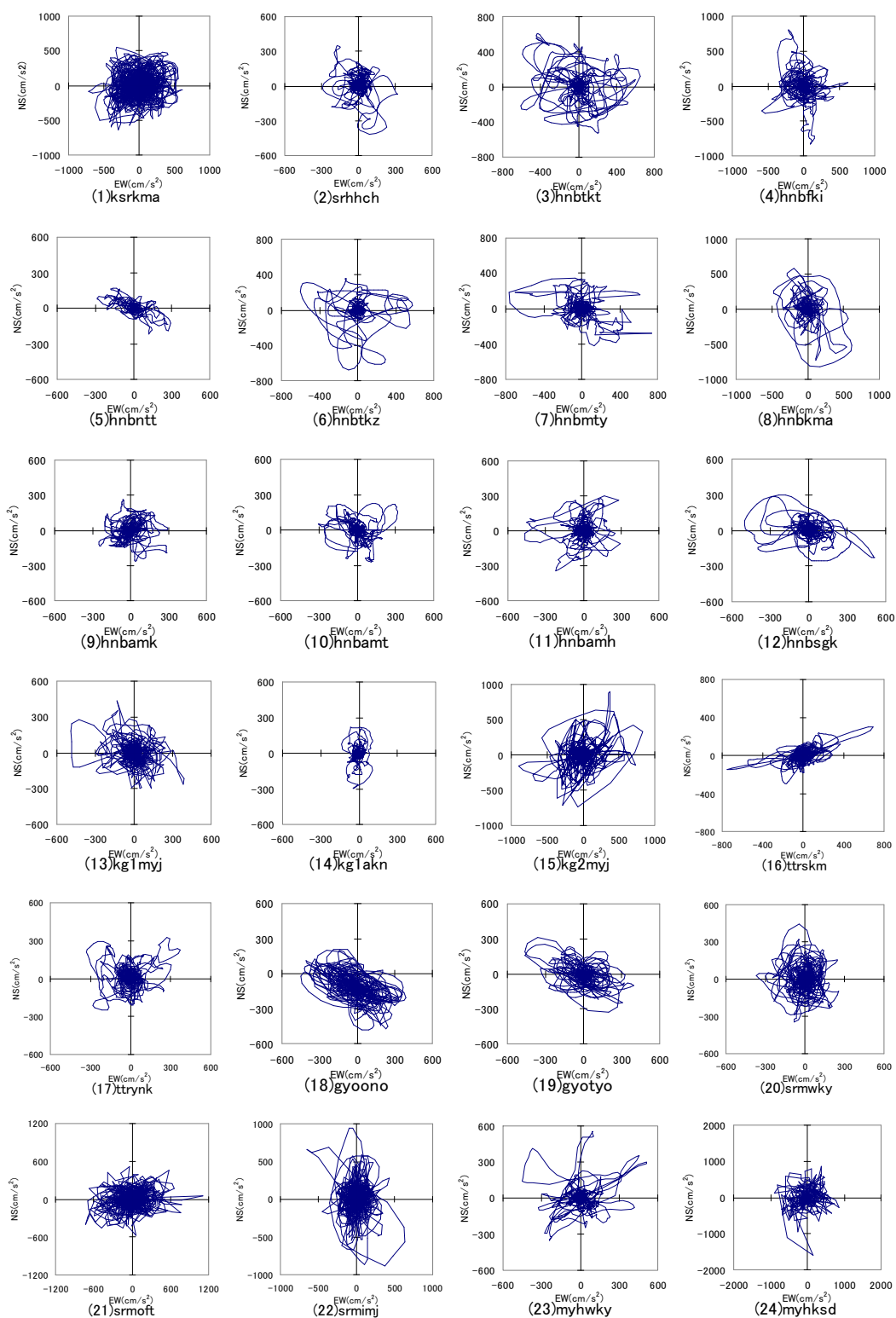


図1 強震記録から描いた加速度オービット一覧

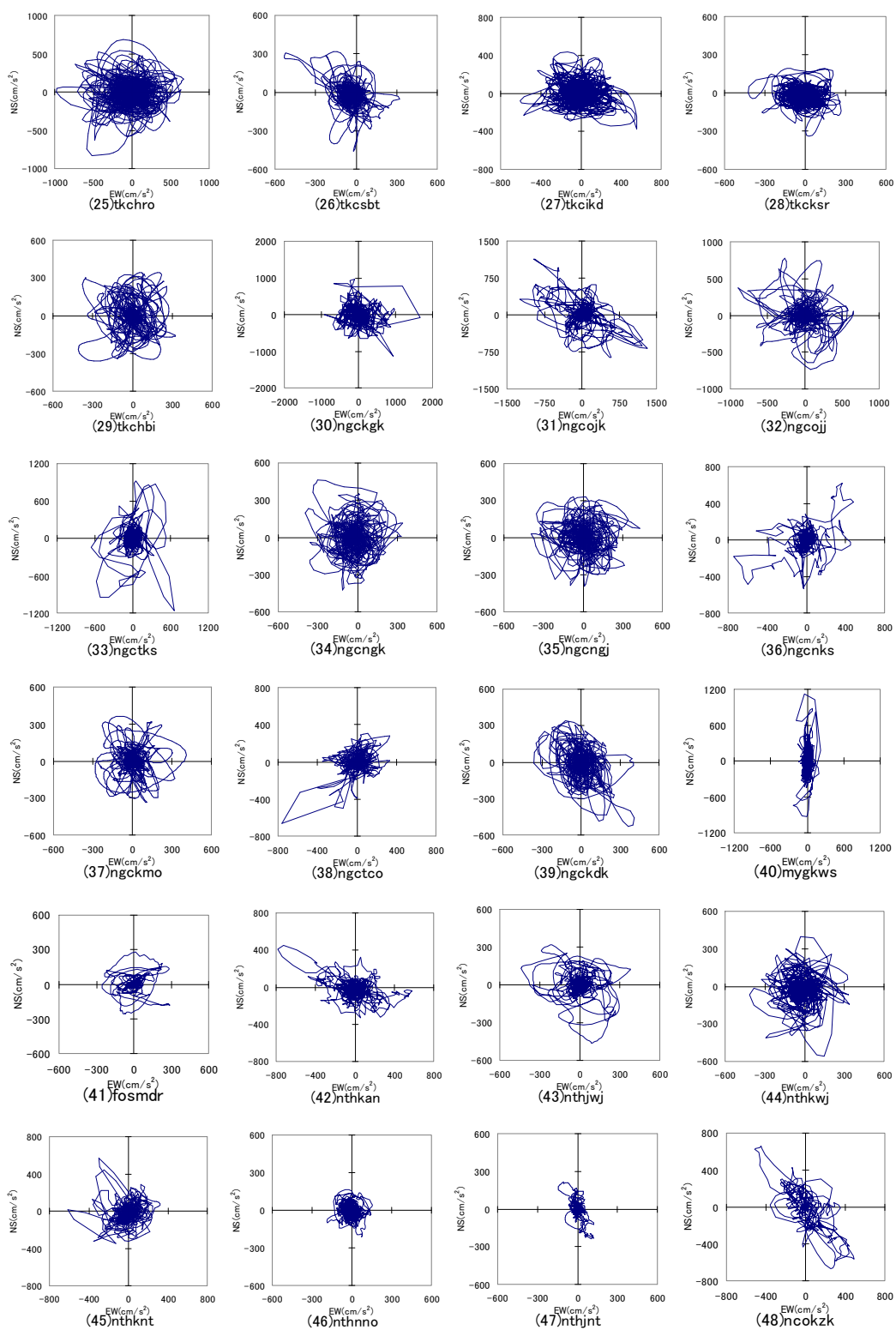


図1 強震記録から描いた加速度オービット一覧（続き）

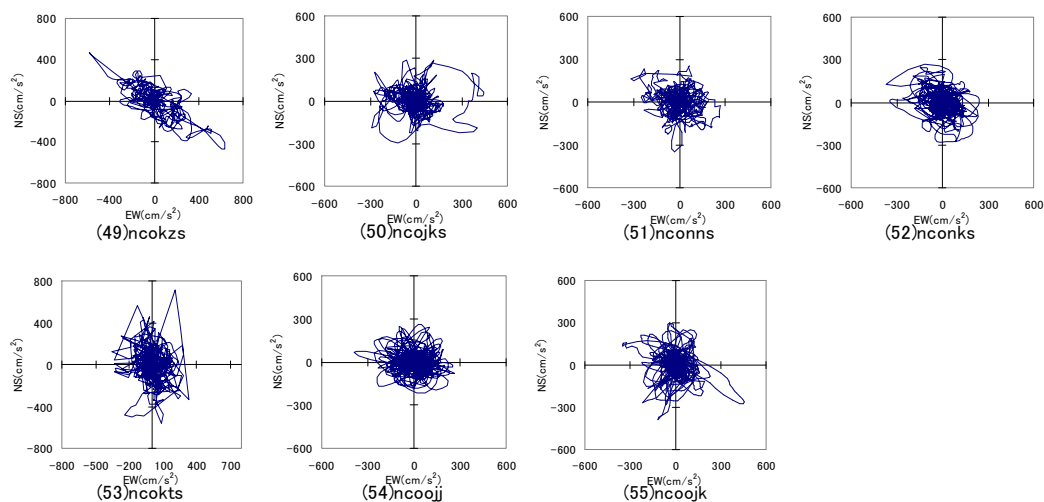


図 1 強震記録から描いた加速度オービット一覧（続き）

2.2 方向性の評価方法

まず、加速度オービットを基に EW 方向の E の向きを 0° として、反時計回りに 5° ずつ 36 方向にベクトル合成を行い、各方向の加速度波形を作成する（図 2、3、以下、方向性が強い(4)hnbfki と方向性が弱い(43)nthjwj の 2 つの強震記録を例として示す）。加速度波形を見たところ、方向による違いはさほど見られない。そこで、減衰定数 5% の弾性加速度応答スペクトルを算出した（図 4、5）。

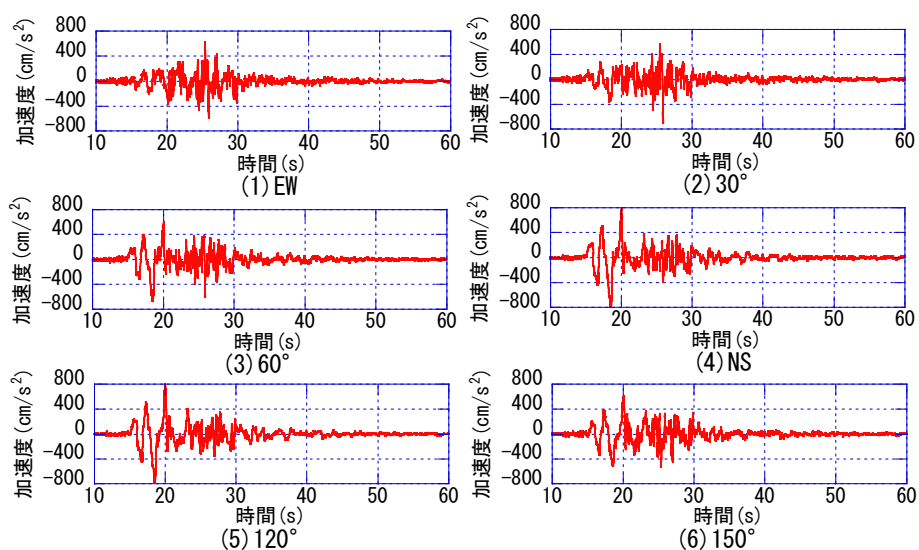


図 2 様々な方向に合成した加速度波形(hnbfki)

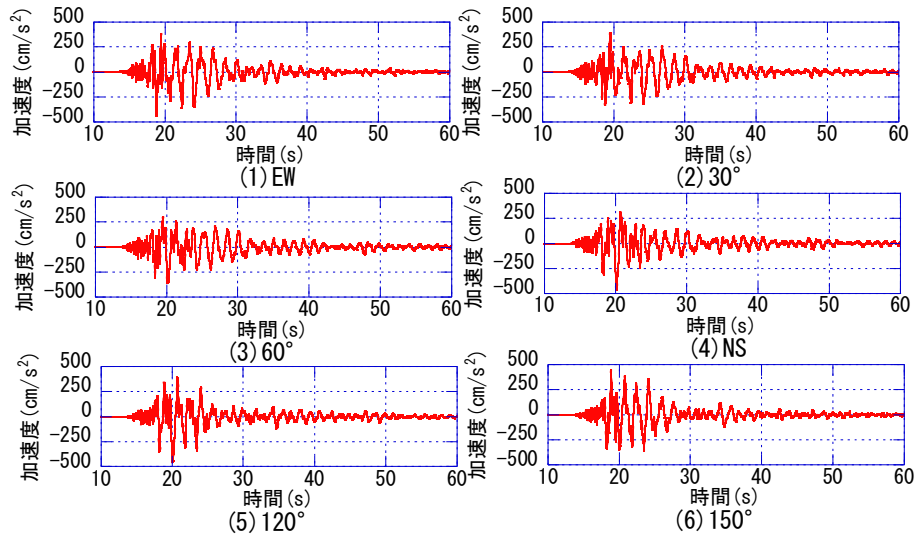


図3 様々な方向に合成した加速度波形 (nthjwj)

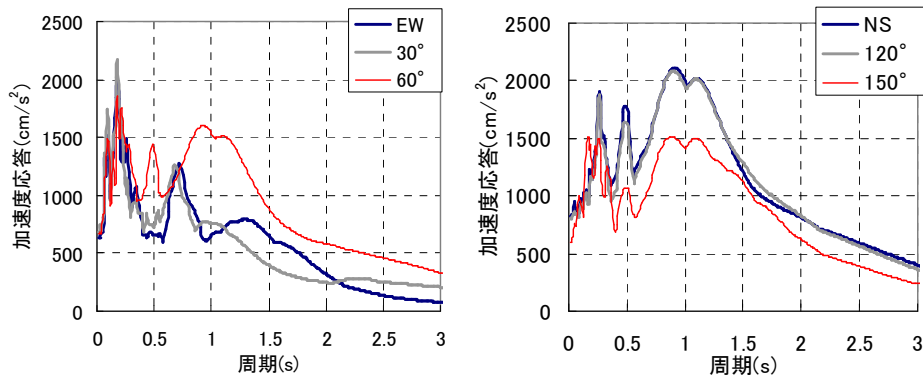


図4 hnbfki の様々な方向の弾性加速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

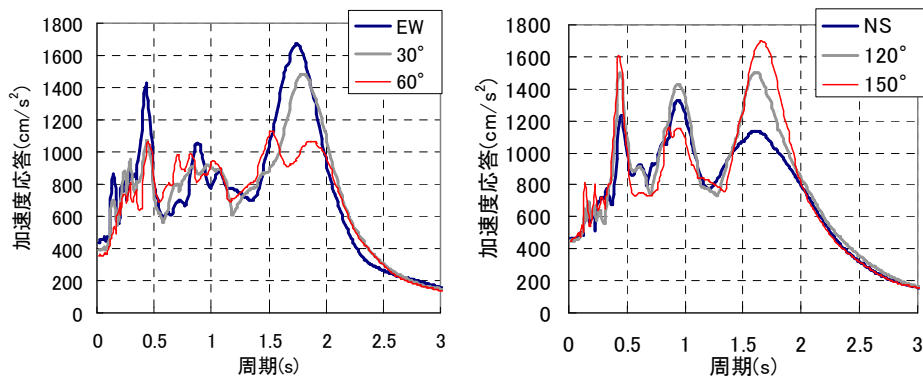


図5 nthjwj の様々な方向の弾性加速度応答スペクトル (減衰定数 5%)

図4、5の弾性加速度応答スペクトルを比べると、hnbfkiがnthjwjより方向による変動が大きいことがわかる。このことを定量的に評価するために、スペクトル全体、即ち、大地震時の建物の塑性化を含めた周期をカバーする0-3秒の平均加速度応答について、方向に対する変動の様子をプロットした(図6)。方向性が強いhnbfkiは方向によって加速度応答が倍程度変動しているのに対し、方向性が弱いnthjwjは、ほとんど変動していないことがわかる。平均値(μ)と標準偏差(σ)から変動係数(式(1))を算出す

ると、方向性が強い hnbfki の変動係数が 26.6%、方向性が弱い nthjwj は変動係数が 5.21%となった。

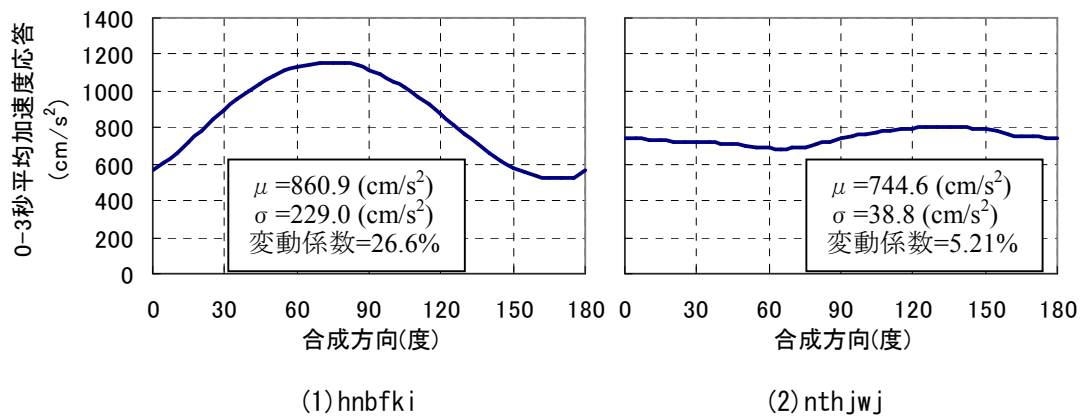


図 6 合成方向と 0-3 秒平均加速度応答の関係

$$\text{変動係数} = \frac{\sigma}{\mu} \times 100(\%) \quad (1)$$

ただ、図 4、5 を詳しく見ると、hnbfki において建物被害に大きな影響を与える周期 1 秒前後⁷⁸⁾では、方向によって 2 倍以上違う一方で、nthjwj はさほど変わらないが、0.5 秒以下の短周期では両者とも方向による変動はさほどないなど、方向性の強さは、応答スペクトルの周期によっても変化することがわかる。そこで、様々な周期の応答スペクトル、地震動強さ指標について、図 6 と同様の方法で、各地震動について方向による変動を定量的に評価し、その変動係数で方向性の評価を行う。

2.3 指標を変えたときの地震動の方向性

地震動の方向性を評価する様々な周期の応答スペクトル、地震動強さ指標（以下、まとめて地震動強さ指標）は、塑性化による周期の伸びも含めた多くの建物の周期を想定して、0-1 秒平均加速度応答（計測震度と強い相関がある¹⁰⁾）、1-2 秒平均加速度応答、2-3 秒平均加速度応答、0-3 秒平均加速度応答、地動最大加速度、地動最大速度の 6 つとした。地震動強さ指標それぞれについて、図 6 と同様に表 1 の全ての地震動に対して変動係数を求め、横軸を地震動強さ指標として全ての地震動に対してプロットして図 7-12 に示す。ここで、地震動強さ指標は、波形全体を対象としていて、構造物の地震応答に大きな影響を与える、これらの値が最大となる時間帯を対象としていることになり、方向性の時刻による変化までは考慮されていないことに留意されたい。

これを見ると、地震動強さ指標は、いずれも方向によって大きく変動していて、変動係数にして最大 40%以上にもなる地震動もあり、 $\pm \sigma$ で倍以上違うことになる。0-1 秒、1-2 秒、2-3 秒、0-3 秒平均加速度応答、地動最大加速度、地動最大速度について、変動係数の全ての地震動に対する平均を求めると、それぞれ、14.8、21.3、23.8、15.9、17.2、21.3(%)と 20%程度となり、平均して $\pm \sigma$ で 1.5 倍程度違うことになる。また、変動係数の平均値は、周期が長くなる、あるいは、長い周期の応答と相関が強い指標（PGV）ほど大きくなる傾向が見られる。

地震動ごとに見ていくと、(43)nthjwj（赤枠）や(48)ncokzk（青枠）のように地震動強さ指標によらず方向による変動が小さい、あるいは、大きいものがある一方で、(1)ksrkma（緑枠）のように全体に変動は小さいが、ある周期（1-2、2-3 秒）ではやや変動が大きい、あるいは、(4)hnbfki（オレンジ枠）のように全体に変動が強いが、短周期（0-1 秒、PGA）では変動が小さいなど様々なパターンがあることがわかる。

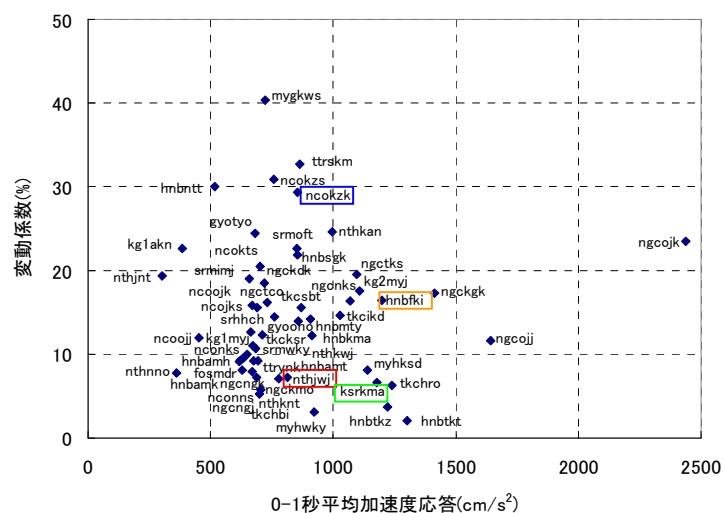


図 7 0-1 秒平均加速度応答の方向による変動

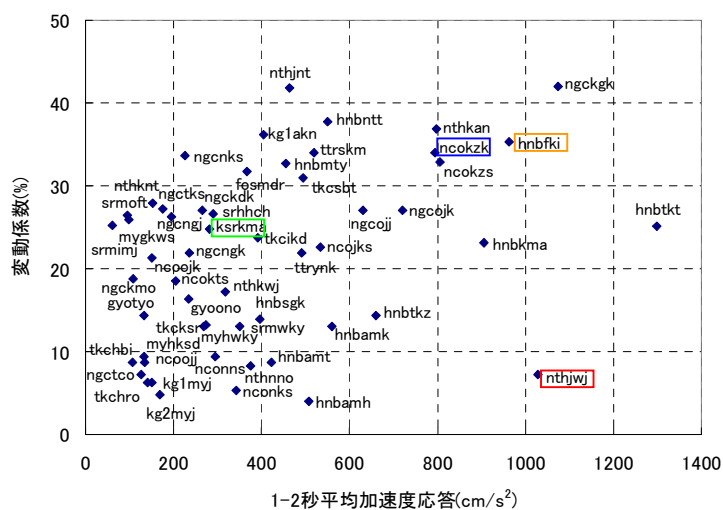


図 8 1-2 秒平均加速度応答の方向による変動

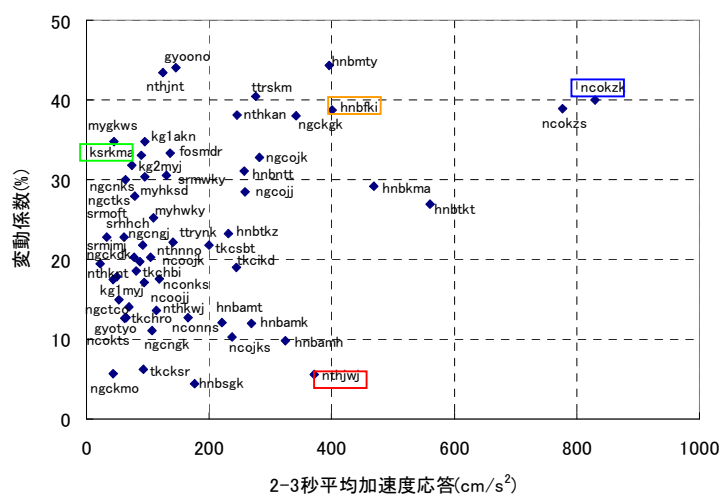


図 9 2-3 秒平均加速度応答の方向による変動

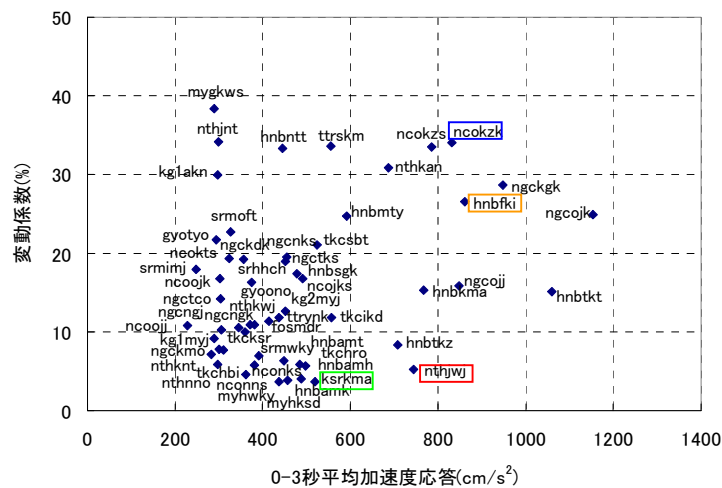


図 10 0-3 秒平均加速度応答の方向による変動

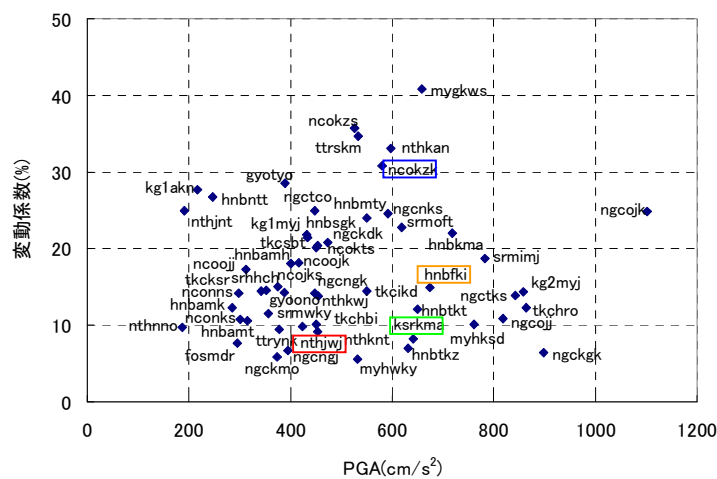


図 11 地動最大加速度の方向による変動

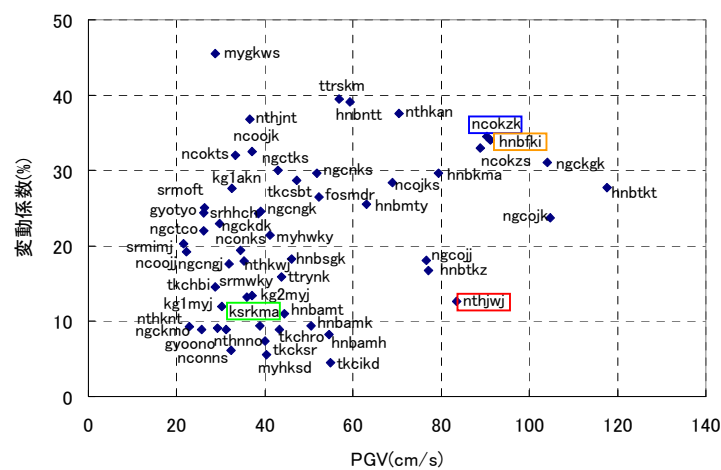


図 12 地動最大速度の方向による変動

3. 地震動の平均方向の提案

前章までで示したように、地震動は、方向によって大きく変動する場合があります、変動の仕方は、着目する地震動強さ指標、あるいは、地震動によって異なることがわかった。このことは、一方向の地震応答解析を行う場合に、地震動のどの方向の成分を選ぶかによって、その結果が大きく異なることを意味する。地震応答解析を行う場合、近年の計算機の発達によって、二方向同時解析も行われるようになってきたが、一方向解析を行うことも多い。その際、設計という立場では、安全側に立って最大方向を用いるという選択肢も考えられるが、被害推定を行う場合は、最大方向では被害を過大に評価してしまう。

そこで、被害推定を行う場合などを想定し、全方向の「平均」となる構造物応答が期待される地震動の「平均方向」について考える。これは、文字通り、ある地震動強さ指標が全方向の平均となる方向とすることが考えられるが、問題は、どの指標が平均となる方向とすべきかである。

そこで、平均を求める地震動強さ指標を変えたときの平均方向の比較を行って、平均方向を求める際の地震動強さ指標による誤差について検討した。具体的には、2.3 と同じ 0-1 秒、1-2 秒、2-3 秒、0-3 秒 平均加速度応答、地動最大加速度、地動最大速度の 6 つの指標を考え、ある指標の平均方向の値とその方向のそれ以外の指標の値を比較した。

(4)hnbfdi を例として、各指標の方向による変動と平均方向を図 13 に示す。平均方向は 2 つあること、そして、地震動強さ指標により平均方向は異なることがわかる。

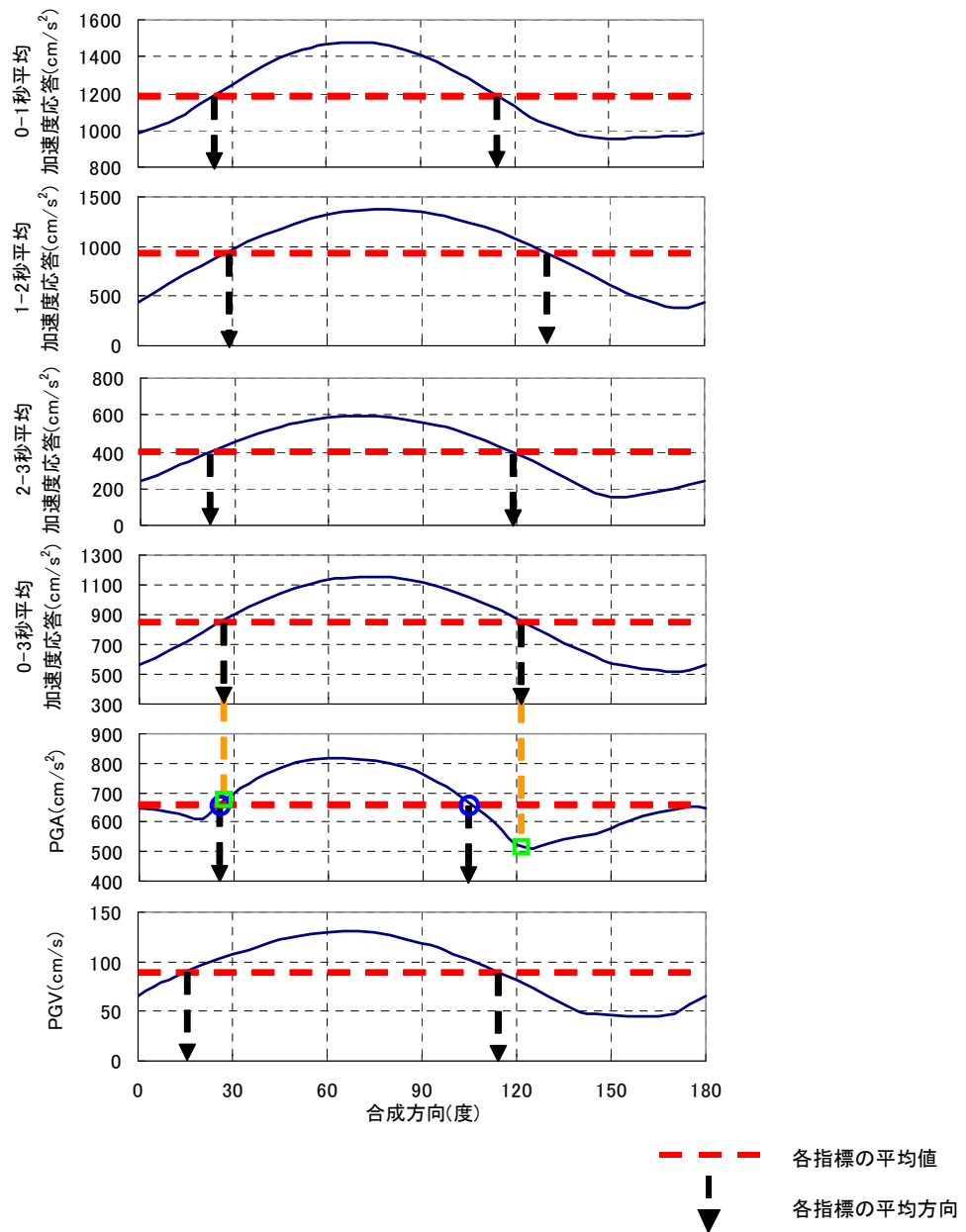


図 13 hnbfki の各指標で算出される平均方向の違い

そして、6 指標のうち、1 つの指標を用いて算出した平均方向について、その方向の他 5 指標の値との相対誤差を算出してプロットした (図 14-19)。具体的には、例えば、地震動(4)hnbfki について、0-3 秒平均加速度応答 (図 17) の PGA に対する相対誤差 (図 17 の水色の×) を求めるには、図 13 で 0-3 秒平均加速度応答に基づく平均方向のときの PGA の値 (緑の四角) と PGA に基づく平均方向による値 (青丸) との相対誤差 $((\text{緑四角の値} - \text{青丸の値}) / \text{青丸の値})$ を求め、横軸を 0-3 秒平均加速度応答に基づく平均方向の 0-3 秒平均加速度応答、即ち、0-3 秒平均加速度応答の全方向の平均としてプロットした。平均方向は、ほとんどの場合、2 つであるが、希に 3 つ以上ある場合もあるので、1 つの地震動について、ほとんどの場合、2 つの点、希に 3 つ以上の点がプロットされる。そして、これを全 55 記録、PGA 以外の指標についてもプロットすると図 17 となる。他の指標 (図 14-16、18、19) についても同様である。そして、相対誤差の絶対値を平均したものを平均誤差として算出した。

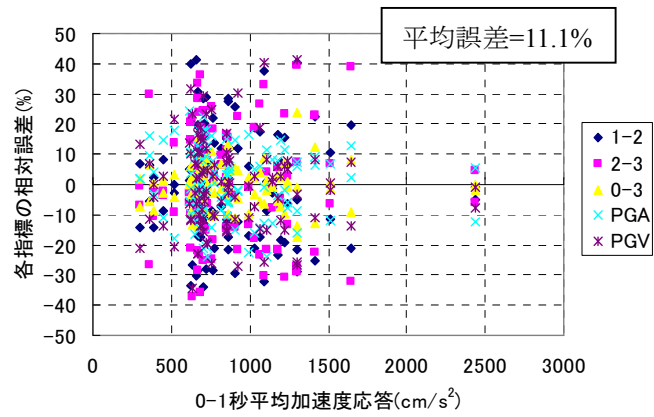


図 14 0-1 秒平均加速度応答の平均に対する他指標の誤差

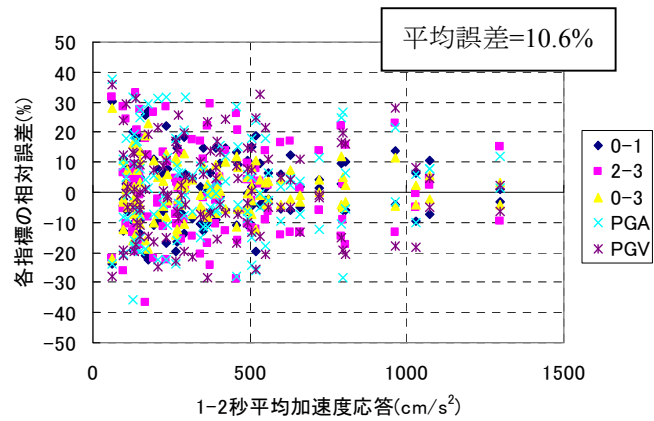


図 15 1-2 秒平均加速度応答の平均に対する他指標の誤差

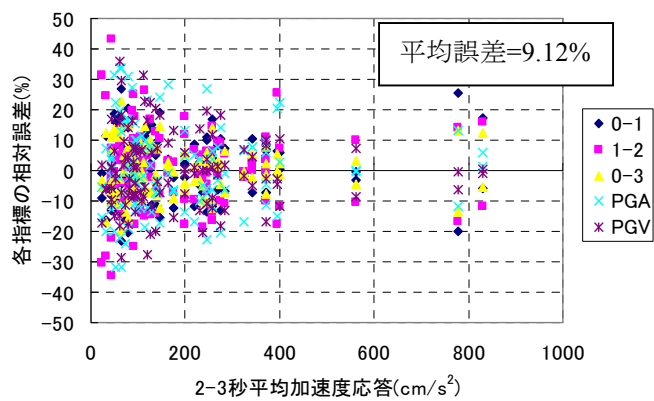


図 16 2-3 秒平均加速度応答の平均に対する他指標の誤差

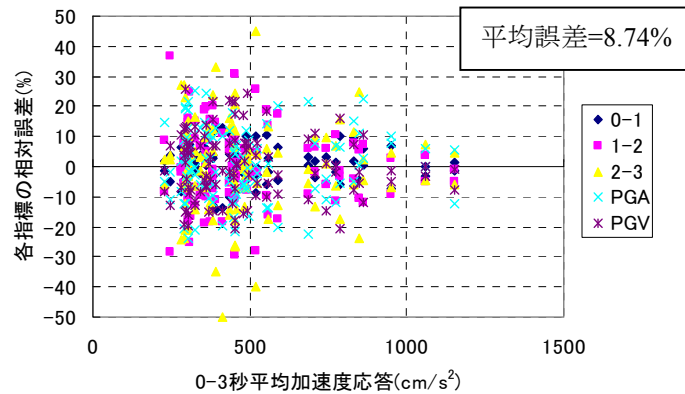


図 17 0-3 秒平均加速度応答の平均に対する他指標の誤差

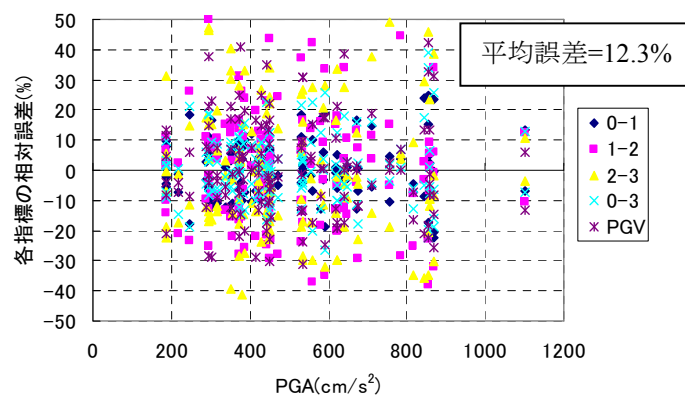


図 18 PGA の平均に対する他指標の誤差

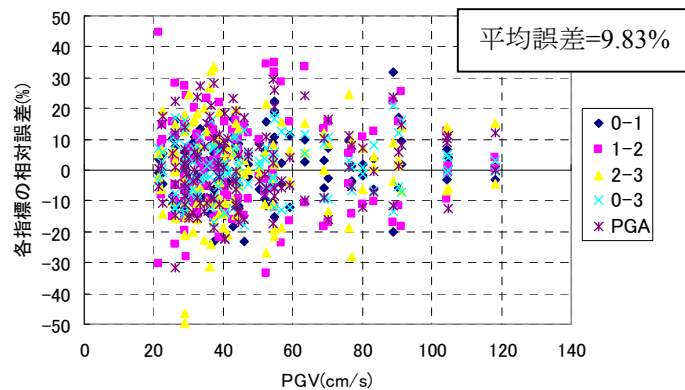


図 19 PGV の平均に対する他指標の誤差

平均方向を求める際の、地震動強さ指標の違いに伴う誤差は、大きい場合は 50% 近くになることもあるが、平均すれば 10% 程度であることがわかる。なお、横軸が大きくなるほどばらつきが小さくなっているように見えるのは、指標の値が大きいデータが少なく、これら (3)hnbtkk、(30)ngckgk、(31)ngcojk、(43)nthjwj など) がたまたま地震動強さ指標が違って平均方向があまり変わらない傾向をもつ地震動だったのか、指標の値が大きい地震動が一般的にそういう性質をもつのかは、判断が難しい。また、当然のことではあるが、周期帯全体を平均した 0-3 秒平均加速度応答の平均誤差が最も小さくなっていて、この指標が平均となる方向を地震動の平均方向を用いれば、これ以外の地震動強さ指標に対する平均方向との誤差は最も小さくなることが確認される。なお、0-3 秒平均加速度応答以外の指標やスペクトル

を用いた平均方向は、いくつか平均方向が 3 つ以上存在する場合があったが、0-3 秒平均加速度応答による平均方向は、ここで使用した全ての強震記録については、全て 2 つだった。

よって、0-3 秒平均加速度応答が平均となる方向を地震動の平均方向とすることを提案する。0-3 秒という周期帯は、大地震時の多くの建物の塑性化を含めた周期をカバーしていて、これ以外の指標や応答スペクトルを言わば「平均」したものになっている。平均方向の地震動は、全方向の平均的な性質をもち、例えば、応答スペクトルを示して強震記録の性質を示す場合などに用いることもできると考えられる。2 つの平均方向のどちらを使うかは、判断が難しいが、例えば、地震被害推定を行った際の被害率などのアウトプットを平均するなどの対処方法が考えられる。平均方向が 3 つ以上となる場合も同様である。

4. 入力地震動の方向による地震応答解析結果の違い

最後に、入力地震動の方向による解析結果が強軸（最大）弱軸（最小）方向、従来の NS・EW 方向、提案する平均方向によって、どの程度異なるかについて、建物群モデルを用いて検討する。具体的には、現存する鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物群を想定した一自由度系非線形モデル群を用いて被害率を求め、これを実際の被害率と比較することにより、地震動の入力方向の妥当性を検証する。対象とした強震記録は、観測点周辺に被害率を算出するのに十分な数があるもの、具体的には、表 1 の 1995 年兵庫県南部地震の 10 地点について解析を行った。

建物耐力（ベースシア係数）は、非構造部材による余剰耐力の発現を考慮に入れて算定し、これをモデル化したものを用いる。具体的には、まず、建物を腰壁・垂壁がついた外構面と内構面に分け、外構面は、腰壁・垂壁が付くことで、柱の内法スパンが短くなり、柱の曲げ降伏時のせん断力が上昇して、柱、耐震壁ともせん断応力度で耐力が決まる、内構面は、設計基準通りの耐力に雑壁による耐力上昇も加えると考え、建物の平面図、立面図とコンクリート強度から柱量、壁量、雑壁量、腰壁・垂壁構面割合、柱のせん断応力度を求めて算定する方法（式(2)）¹¹⁾を用い、様々な文献^{12)~29)}から平面図、立面図やコンクリート強度の情報がある建物を抽出して求めた（総計 148 棟）。

$$C_y = \frac{\tau_c \cdot A_c + \tau_w \cdot A_w}{n \cdot w} \cdot r + D_s \cdot R_t \cdot (1 - r) + \frac{\tau_{w'} \cdot A_{w'}}{n \cdot w} \quad (2)$$

ここで、 C_y : ベースシア係数、 τ_c : 柱のせん断応力度(=Fc/15(Fc≤21MPa), 1+Fc/50(Fc>21MPa)³⁰⁾、 F_c : コンクリート強度(MPa)、 τ_w : 耐震壁のせん断応力度(25kgf/cm²)³¹⁾、 $\tau_{w'}$: 雑壁のせん断応力度(=10kgf/cm²)、 A_c : 柱量(cm²/m²)、 A_w : 壁量 (cm²/m²)、 $A_{w'}$: 雑壁量 (cm²/m²)、 n : 建物階数、 w : 単位建物重量(=1200kg/m²)、 D_s : 構造特性係数(=0.3)、 R_t : 振動特性係数、 r : 腰壁・垂壁構面の割合である。

そして、式(2)によりベースシア係数を桁行、梁間の両方向で算定し、耐力が低い方向が被害を受けると考えて、桁行、梁間方向のうちベースシア係数が小さい方を階数ごとに対数正規分布でモデル化した（図 20）。階数分布は、兵庫県南部地震時の調査³²⁾で得られた神戸市全体の RC 造建物棟数データに基づいて、対数正規分布に近似したものを用いた（図 21）。階数から建物の弾性周期を求める式は、実在 RC 造建物のデータ³³⁾を基に求めた式(3)³⁴⁾を用い、階高は 3.5m とした。

$$T = 0.055H^{0.65} \quad (3)$$

ここで、 T : 建物の弾性周期(s)、 H : 建物の軒高(m)である。

建物は、一方向のみにバネを持つ一自由度系とし、復元力特性は Takeda モデル³⁵⁾を用い、降伏点剛性低下率を 0.30、ひび割れ耐力/降伏耐力を 0.30、降伏後の剛性/初期剛性を 0.01、除荷剛性低下指数を 0.50、減衰は瞬間剛性比例型として減衰定数を 5.0%とした。大破に対応した塑性率を 6 とし⁸⁾、これを越える応答塑性率となる建物の割合を被害率とした。入力する各地震動は、3 章より、0-3 秒平均加速度応答の

平均値をとる方向を平均方向、最小値をとる方向を最小方向、最大値をとる方向を最大方向、そして、NS、EW 方向とした。平均方向は二方向算出されるが、最大・最小、NS・EW 方向を入力する場合と同様に、それぞれを入力して解析を行う。

解析結果を、横軸に実際の被害率（表 1 の D_{RC} ）、縦軸に解析による被害率として図 22 に示す。最小方向の地震動を用いた場合は解析による被害率がほとんど 0%となる一方で、最大方向を用いた場合は実際の被害率より遙かに大きくなっている。これに対して、平均方向を入力した場合は、解析による被害率と実際の被害率がよく対応していることがわかり、平均方向の地震動の有用性を確認できる。

図 22 には、2つの平均方向、最大・最小、NS・EW 方向それぞれの被害率を平均したもの●でプロットしている。図中の誤差平均とは、実際の被害率と解析による被害率（2つの平均方向、最大・最小、NS・EW 方向それぞれの被害率を平均したもの）の差の絶対値の平均で、この値が小さいほど、実際の被害率と解析による被害率が対応している。これを見ても、平均方向による被害率は、実際の被害率とよく対応しているのに対して、最大・最小、NS・EW 方向の平均は、被害率が大きい観測点で1つの方向の被害率が大きくなり、結果的に2方向の平均も大きくなってしまっている。これは、1995年兵庫県南部地震の地震動のように方向性が強く、2成分に大きな差があると、一種の非線形応答である被害率も大きな差となり、2成分による被害率を平均することでは、平均的に期待される被害率は求められないためと考えられる。

なお、被害率が小さいケースにおいては、いずれの入力方向においても解析による被害率は実際の被害率よりかなり小さくなっており、被害率が小さい場合は、制御が難しいという面はあるが、これは、今後の課題としたい。

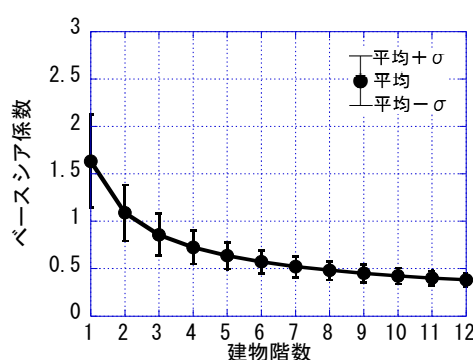


図 20 RC 造建物群モデルの耐力分布

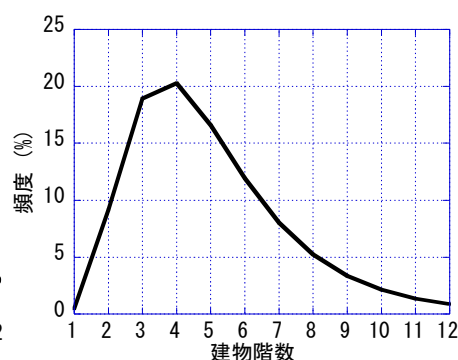
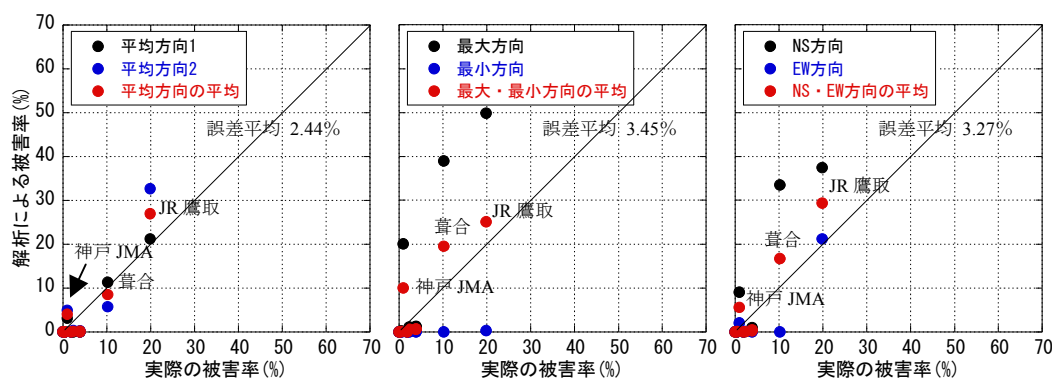


図 21 RC 造建物群モデルの頻度分布



(a) 平均方向

(b) 最大・最小方向

(c) NS・EW 方向

図 22 入力地震動の方向による解析結果の相違 (RC 造建物群モデル)

また、一方向バネをもつ一自由度系からなる木造建物群に平均方向の地震動が入力した場合についての解析を既に行っている³⁶⁾ので、最大・最小方向、NS・EW 方向を入力した場合についても検討を行った。

木造建物群は、全国の木造建物の微動計測結果から、周期が長い方向（耐力が低い方向）の周期を基に周期分布を求め（図 23）、これを式(4)を用いて耐力分布を求めた（図 24）ものである。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h \cdot \alpha_y \cdot R_y}{g \cdot C_y}} \quad (4)$$

ここで、 h ：モデルの高さ(=4.5m)、 R_y ：降伏層間変形角(=1/120)、 α_y ：降伏点剛性低下率(=0.3)、 g ：重力加速度、 C_y ：ベースシア係数である。

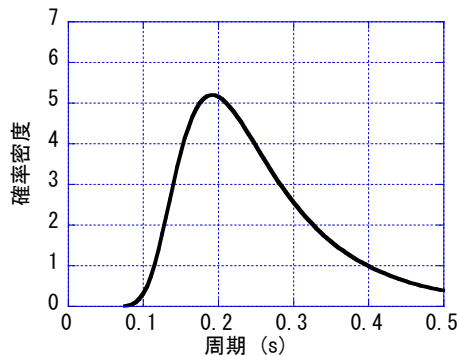


図 23 木造建物群モデルの周期分布

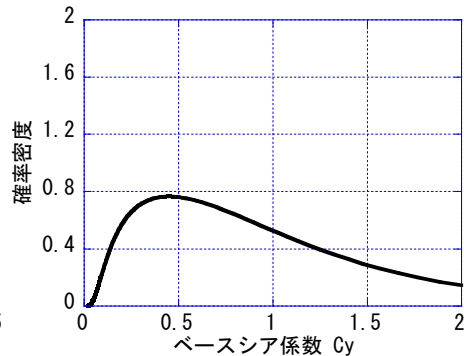


図 24 木造建物群モデルの耐力分布

地震応答解析の際の復元力特性は、木造建物の復元力特性を模擬する Takeda-slip モデル³⁷⁾を用い、降伏点剛性低下率を 0.30、ひび割れ耐力/降伏耐力を 0.30、降伏後の剛性/初期剛性を 0.01、除荷剛性低下指数を 0.50、減衰は瞬間剛性比例型として減衰定数を 5.0%とし、全壊に対応した塑性率を 6⁸⁾、これを越える応答塑性率となる建物の割合を被害率とした。平均方向を入力した結果に加えて、最大・最小方向、NS・EW 方向を入力した場合について、図 25 に示す。RC 造建物群による結果と同様に、平均方向を入力した場合が最も実際の被害率（表 1 の D_w ）と対応していることが確認される。なお、いずれの場合も JR 鷹取で解析結果が実被害より小さくなっているのは、ここで用いた木造建物群モデルが平均的な耐力分布に基づいており、JR 鷹取駅周辺の建物が平均より古い木造家屋の割合が多かったため、実際は大きな被害率となったのではないかと推測される³⁶⁾が、これに関しては、今後詳細な検討が必要である。

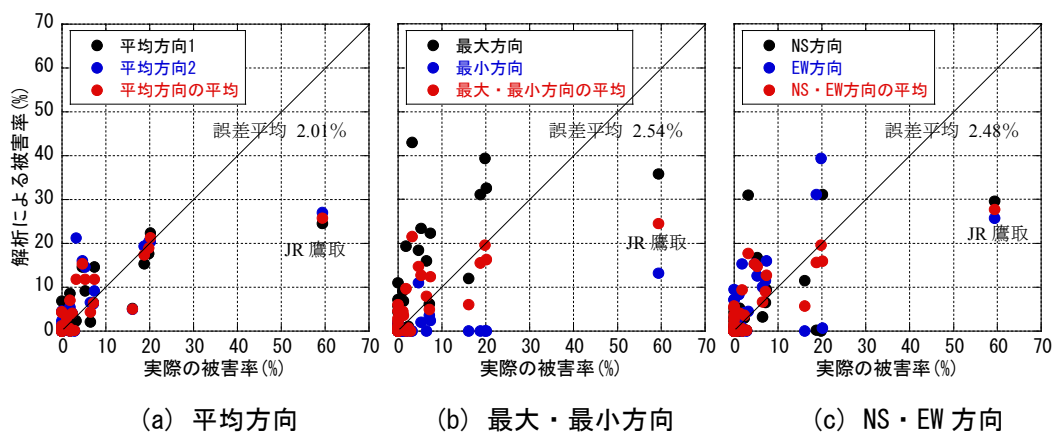


図 25 入力地震動の方向による解析結果の相違（木造建物群モデル）

以上のことから、建物を被害を受ける耐力が低い弱軸方向の一方にモデル化し、入力する方向として、提案する平均方向の地震動を用いると、より正確に被害推定を行うことができ、平均方向の有用性

が確認される。

今回の検討は、建物を実際に被害を受けることが多い弱軸一方向にモデル化した場合であることに留意する必要がある。つまり、弱軸強軸の2方向をもった建物が様々な方向に配置されている建物群に2方向地震動が入力するという非常に複雑な状況を「弱軸方向に平均方向が入力する」と単純化したものと言える。筆者は、これまで地震動の2方向ベクトル和、即ち、最大方向を用いてこれまで様々な検討を行ってきたが^{例えば 8)-10)}、建物被害は、地震動の性質と建物の耐震性能の相対関係によって決まるものであり、経験的に導かれる被害関数がそうであるように、最大方向の地震動が入力するときの建物の設定がやや漠然としたものであることは否めない。今回の検討で、平均方向がより正確に実際の被害を再現することから、今後、これを用いた検討も行っていきたいと考えている。

5. まとめ

地震動の方向性について、様々な地震動強さ指標、応答スペクトルの周期について定量的に検討した。具体的には、過去に観測された強震記録からそれぞれの全36方向の地震動を合成して、様々な周期帯の弾性加速度応答スペクトル、あるいは、地震動強さ指標について、その大きさが方向によってどの程度変動するかについて検討した。その結果、いずれも変動係数にして、平均20%程度、方向性の強い地震動は40%以上変動していることがわかった。そして、一自由度系からなる建物群に一方向の地震動を入力して被害推定を行う場合などを想定し、構造物の地震応答が平均的なものとなる地震動の「平均方向」を、0-3秒平均加速度応答の平均値をとる方向として提案した。平均方向の地震動を用いて、建物群を対象とした一自由度系地震応答解析を行った結果、実際の被害率を再現でき、平均方向の有用性を確認した。

謝辞

強震記録は、防災科学技術研究所、気象庁、震災予防協会、JR 総合技術研究所³⁸⁾、大阪ガス、NTT ファシリティーズ、関西地震観測研究協議会、地域地盤環境研究所、建築研究所、東北大学大学院理学系研究科地震・噴火予知研究観測センター海野徳仁先生、岡田知己先生より提供して頂きました。図表の作成などで筑波大学大学院システム情報工学研究科神田和紘氏、鈴木達矢氏の大きな協力を得ました。

参考文献

- 1) 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集、第512号、1998、pp.105-110.
- 2) 源栄正人、竹中宏明、柴田明德: 直下型地震動の方向性と構造物の水平2方向連成応答、第2回都市直下型地震災害シンポジウム、1997、pp.159-162.
- 3) 川瀬博、松島信一: 三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第514号、1998.12、pp. 111-118.
- 4) 額満一起: カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震、科学、Vol. 66, No. 2、1996、pp. 93-97.
- 5) Somerville, P. G, N. F. Smith, and R. W. Graves: Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, Seism, Res. Lett, Vol. 68, 1997, pp. 199-222.
- 6) 神野達夫、三浦賢治: 強震記録に見られる断層破壊の指向性効果とその地震動特性への影響、日本建築学会構造系論文集、第610号、2006、pp. 191-196.
- 7) David M. Boore, Jennie Watson-Lamprey, and Norman A. Abrahamson: Orientation-Independent Measures of Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 96, No. 4A, 2006, pp. 1502-1511.
- 8) 境有紀、額満一起、神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案、日本建築学会構造系論文集、第555号、2002、pp.85-91.
- 9) 境有紀: 建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討ー2007年能登半島地震、新潟県中越沖地震のデータを加えてー、日本建築学会構造系論文集、第642号、2009、pp.1531-1536.

- 10) 境有紀、神野達夫、瀨瀬一起: 建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案、第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集、2002、CD-ROM.
- 11) 熊本匠、境有紀: 鉄筋コンクリート造建物の非構造部材を考慮した実耐力分布、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、2007、pp.311-312.
- 12) 構造家懇談会: RC 建築構造設計-実例と解説-、1984.
- 13) 小高昭夫、佐藤邦昭、矢野克己: 建築構造計算実例集[1]鉄筋コンクリート構造編、1988.
- 14) 武田寿一: 新しい耐震設計講座 鉄筋コンクリート構造の耐震設計、1984.
- 15) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1999、pp.296-300.
- 16) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.
- 17) 松森泰造、壁谷澤寿海、白井和貴、勝俣英雄: E-ディフェンスによる実大 6 層鉄筋コンクリート建物実験 その 2. 実大実験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、2006、pp.687-688.
- 18) 梅村魁: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法、1973.
- 19) 梅村魁: 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続(中層編)、1982.
- 20) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災被害報告 建築編-1 鉄筋コンクリート造建築物、1998、p.214, 218, 231, 247, 260, 299, 310, 314.
- 21) 日本建築学会: 1995 年兵庫県南部地震 鉄筋コンクリート造建物の被害調査報告書 第 II 編 学校建物、1997、p.91, 119, 129, 136, 164, 222, 225.
- 22) 日本建築学会: 1968 年十勝沖地震災害調査報告、1968、p.69, 116, 137, 167, 186, 192, 209, 233, 255, 264, 282, 298, 323, 359, 363, 380, 432, 460, 483, 535, 571.
- 23) 日本建築学会: 2000 年鳥取県西部地震災害調査報告 2001 年芸予地震災害調査報告、2001、p.101, 111, 117, 323.
- 24) 日本建築学会: 2003 年 5 月 26 日宮城県沖の地震災害調査報告 2003 年 7 月 26 日宮城県北部の地震災害調査報告、2004、p.26, 30, 192, 206, 210, 214, 216, 220, 225, 227, 233.
- 25) 日本建築学会: 2004 年 10 月 23 日新潟県中越地震災害調査報告、2006、p.86, 89.
- 26) 日本建築学会: 1994 年北海道東方沖地震災害調査報告 1994 年三陸はるか沖地震災害調査報告、1996、p.54, 68, 285, 295, 303, 333, 339, 349.
- 27) 日本建築学会: 1982 年浦河沖地震 1983 年日本海中部地震 災害調査報告、1984、p.29, 39, 216, 234, 241, 245, 254, 267.
- 28) 日本建築学会: 1993 年釧路沖地震災害調査報告 1993 年北海道南西沖地震災害調査報告、1995、p.154.
- 29) 日本建築学会: 1978 年宮城県沖地震災害調査報告、1980、p.183, 193, 203, 210, 223, 239, 245, 250, 254, 257, 259, 267, 275, 278, 293, 299, 307, 314, 324, 334, 356, 364, 368, 379, 392, 399, 408, 415, 422, 431, 454, 462.
- 30) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1999、p.6.
- 31) 日本建築センター: 構造計算指針・同解説 1991 年版、1991、p.211.
- 32) 日本建築学会: 阪神淡路大震災調査報告 建築編-1 鉄筋コンクリート造建物、1997.
- 33) 日本建築学会: 建築物の耐震設計資料、1981、pp.276-278.
- 34) 梅村恒、境有紀、南忠夫: 地盤と建物の相互作用の効果と地震応答スペクトルの関係、第 2 回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集、1997、pp.249-252.
- 35) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST5, 1970, pp.2557-2573.
- 36) 境有紀、飯塚裕暁: 非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした平均的な木造建物群モデルの構築、日本地震工学会論文集、第 9 巻、第 1 号、2009、pp.32-45.
- 37) 飯塚裕暁、境有紀: 木造建物における一自由度系地震応答解析のための復元力特性モデルの提案、日本地震工学会論文集、第 9 巻、第 1 号、2009、pp.113-127.
- 38) 中村豊、上半文昭、井上英司: 1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)、JR 地震情報、No.23d、1996.

(受理 : 2010 年 4 月 5 日)
(掲載決定 : 2010 年 8 月 30 日)

Investigation of Directional Property of Seismic Ground Motions and Proposal of Average Direction for Earthquake Damage Estimation

SAKAI Yuki¹⁾ and KUMAMOTO Takumi²⁾

1) Member, Professor, Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

2) Toyota Motor Corporation(former Graduate Student, Graduate School of Systems and Information Eng.,
Univ. of Tsukuba), M. Eng.

ABSTRACT

Directional property of seismic ground motions was quantitatively investigated. We made elastic response spectra in all 36 directions from past strong ground motion records and calculated coefficient of variance for various seismic intensity and response acceleration spectra changing period range. The average and maximum coefficients of variance were about 20% and 40%, respectively. We proposed 'average direction' of seismic ground motions in which the 0-3 sec. average response acceleration is equal to the average of all directions. This concept is useful in the earthquake damage estimation because we could reproduce actual structural damage by earthquake response analyses using SDOF systems under the input of seismic ground motions in the 'average direction'.

Key Words: Seismic Ground Motion, Directional Property of Seismic Ground Motion, Elastic Response Spectrum, Average Direction, Building Cluster Model