

建物被害に適合した震度の東北地方太平洋沖地震への適用

Application of New Seismic Intensity for Building Damage Evaluation to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

岡本 篤興¹, 鍬田 泰子¹, 齊藤 栄²

Atsuoki OKAMOTO¹, Yasuko KUWATA¹ and Sakae SAITO²

¹神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻

Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Kobe University

²大阪ガス株式会社導管事業部

Pipeline Business Unit, Osaka Gas Co., Ltd.

Seismic intensity is well-known index of strong ground motion to measure earthquake damage. Since it was revised as the instrumental seismic intensity, it is pointed that it does not meet well with earthquake damage during the earthquakes following the 1995 Kobe earthquake. A new seismic intensity considering the ground motion of 1s in period was proposed based on past earthquake records. This study attempts to verify the applicability of the new seismic intensity for the giant inter-plate earthquake such as the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. The new seismic intensity has good correlation with building damage and is applicable to the ground motion of the inter-plate earthquake having the far source and long duration.

Keywords: *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, seismic intensity, building damage*

1. はじめに

我が国で用いられる震度は、複雑かつあいまいな「地震動の強さ」を数値で表し、被害と密接に関係する値として地震発生直後に速報されることから、地震被害の推定やこれに関連した初動対応の判断材料として多くの防災機関で利用され、住民にも馴染みの深い指標である。気象庁は1996年4月に人間の体感や周囲の被害状況から決定する観測方法を完全に廃止し、震度計による地震記録から震度を算定する現行の新算出方法を採用した¹⁾。しかし、新算出方法で算出された計測震度は、1995年の兵庫県南部地震の地震波の特徴が反映されたものであるため、近年の地震被害との相関が十分ではないことが指摘されている^{2), 3)}。2011年3月に発生した、日本における地震観測史上最大規模の地震である東北地方太平洋沖地震でも、最大震度7(計測震度6.67)を記録したK-NET 築館(宮城県栗原市)の地震計周辺の被害は軽微であったこと⁴⁾、福島県の三春町・二本松市・郡山市・福島市および白河市でも、5強~6強が観測された割に、RC造、鉄骨造建築物の地震動による構造的な被害が顕著ではなく、重大な被害も確認されたが限定的であったこと^{5), 6)}が報告されている。また、震度6強が観測された宮城県仙台市ではRC造、鉄骨造建築物に甚大な被害が発生したが、それらの多くは1978年の宮城県沖地震以前に建設されたものであることや、以前は水田であった地域での被害が大きいといった地盤条件による影響が指摘され

ている⁶⁾。総じて、震度と地震による建物被害がよく対応していない。

かかる課題を解決するため、地震被害に対応した震度が数多く提案されてきた^{2), 3), 7), 8)}。著者らも、気象庁の計測震度の算出方法に則した方法で低層住宅のような一般的な建物の等価周期である1~2秒に着目した震度を提案し、1995年から2007までの建物被害との関係についても良い相関があることを確認している⁹⁾。ただし、これまでの検討では、過去の地殻内地震の地震記録を多く使用しており、大規模プレート境界地震の地震記録は少なかった。東北地方太平洋沖地震のような巨大なプレート境界地震を経験し数多くの強震記録が観測されている中、新震度と建物被害との関係について明らかにしておく必要がある。

そこで本研究では、計測震度の高い観測点を網羅的に調査するのではなく、東北地方太平洋沖地震の記録を用いて新震度の高い観測点と世帯あたりの被害棟数の高い市町村の観測点を絞り、地震計周辺の建物被害と新震度について調査・分析し、建物被害との関係を明らかにする。さらに、東北地方太平洋沖地震の特徴である、震源距離が長大化したことや、震源断層内に複数のアスペリティを持つことによる複数の波群がある地震動による震度への影響を分析し、新震度の東北地方太平洋沖地震への適用性について検証する。

震度の地震防災におけるその役割と住民の認識を考えれば、本課題を検討する意義は大きく、本研究によって

東北地方太平洋沖地震のような巨大なプレート境界地震にも新震度の適用が可能となれば、想定されている東海・東南海・南海地震においても地震発生後に高精度で被害予測ができ、迅速かつ効果的な救助活動、応援活動につながると期待される。

2. 建物の等価周期に着目した新地震動強度指標

(1) 震度に関する既往研究

建物被害に適合した地震動強度指標は、力学的に構造物の地震応答を考える上で物理量であることが望ましい。しかし、新算出方法の計測震度は、従来の体感震度による震度の認識や利用の継続性から、加速度波形に独自のフィルタ処理を施して物理量ではない数値に変換されている。このフィルタは0.1sから10sまでの幅広い周期の地震動を取得する¹⁾ことから、計測震度は様々な周期成分の地震動の強さを総合的に評価した指標ともいえる。ただし、人体感覚や種々の建物の中小被害、大破・全壊などの現象と相関の高い周期成分はそれぞれ異なるため、一指標で全ての現象を厳密に説明することは難しい。かかる課題について気象庁震度階級に則した震度算定法の提案に関する研究は少なくない。

清野ら^{7), 8)}は近年の高層化・大型化の進む建物やライフライン、橋梁、貯槽タンクなどの土木構造物の固有周期の長周期化に伴い、構造物の周期に合った震度で地震被害評価をするために組合せ震度を提案している。この指標は短周期、中周期、長周期の3種類の周期成分からそれぞれ震度を算出する手法である。低層住宅などの一般構造物を対象とする短周期震度は、計測震度と同じ手法で算出される。

また、境ら^{2), 3)}は、高震度階における計測震度と実建物被害との対応性について指摘し、震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法を提案している。この算定法は計測震度を低震度、中震度、高震度の3種類に分割する手法であるが、最終的には3種類の震度値を組み合わせて1つの震度を算出している。

さらに、境ら¹⁰⁾は弾性速度応答と建物被害率との相関係数を比較し、甚大な建物被害と相関をもつ地震動の周期帯は1~2秒であることを指摘している。日本の木造建物や鉄筋コンクリート造建物の固有周期は0.2~0.5秒程度であるが、振動時の構造物の塑性化による周期の伸びを考慮すると等価周期は1~2秒になる。また、計測震度は0.1~1.0秒、建物の中小被害は0.5~1.0秒の周期帯における弾性速度応答との相関が高いことを示し、周期帯ごとの弾性速度応答からそれぞれ低、中、高の3種類の震度を求める手法を提案している。

(2) 1~2秒計測震度 (I_M)

本研究では、計測震度よりも建物被害を精度よく評価できる新たな震度について検討を行う。新震度は、低層住宅などの一般構造物の建物被害を適切に予測することを目的とし、上述した境¹⁰⁾の研究を踏まえ、建物の等価周期1~2秒における地震動強度を対象にした震度とする。従来の計測震度（以下、 I_S ）の算出方法は、3成分の加速度波形をそれぞれ周波数領域でフィルタ処理をした後、時間領域で合成したベクトル波形から継続時間を考慮したベクトル波振幅を得る。そして、それを河角の式[1]に代入して計測震度は算出される。

$$I_S = 2 \log a + 0.94 \quad [1]$$

ただし I_S : 計測震度, a : 継続時間を満たすベクトル振幅
一方、新震度の算出方法は、基本的に計測震度の算出方法に則したものであり、フィルタ処理を一部変更するのみで全体の算出方法が煩雑になることを避けた。具体的には、フィルタ処理の過程で式[2]に示す1~2秒の台形バンドパスフィルタを計測震度のフィルタに重ねて用いる。図-1は計測震度のフィルタ特性に新震度のバンドパスフィルタを合わせたフィルタ特性を重ねて示す。また、新震度は1~2秒の特性を強く有していることから1-2秒計測震度（以下、 I_M と表記する）と呼ぶ。

$$BF(f) = \begin{cases} 10.0f - 4.0 & (0.4 < f \leq 0.5) \\ 1.0 & (0.5 < f \leq 1.0) \\ -10.0f + 11.0 & (1.0 < f \leq 1.1) \\ 0.0 & (f \leq 0.4, f > 1.1) \end{cases} \quad [2]$$

ただし、 $BF(f)$: バンドパスフィルタ, f : 周波数(Hz)

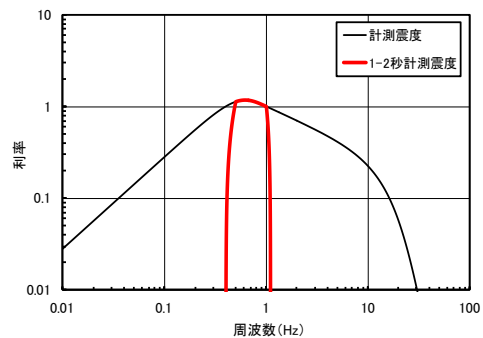


図-1 計測震度と I_M のフィルタ特性

境らの1~2秒の弾性速度応答ではなく、従来の計測震度フィルタを拡張させた理由として2点挙げられる。一つは、計測震度を用いた研究との継続性にある。計測震度が建物の大被害に対応しないとはいえ、地震動強度の評価にはこれまで幅広く利用されてきた。計測震度やその算出方法を全て見直すのではなく、現行の計測震度と I_M を併用するために、図-1のフィルタ特性や0.3秒の継続時間、河角の式を算出方法に残した。とくに、著者らは、計測震度を用いて揺れ最中の避難行動可能時間の算出¹¹⁾を行っており、計測震度と新震度との相互の関係を把握する上で、フィルタのみの違いに着目することができる。二つめには、計測震度のフィルタ特性にある。計測震度のフィルタでは1~2秒の利率は0.996~1.170で図-1からもほぼ平坦であることがわかる。1~2秒のバンドパスフィルタをさらに掛けた場合、計測震度のフィルタの影響は少なく、1~2秒のバンドパスのみを掛けた波形と近くなる。速度応答スペクトルとフーリエスペクトルはほぼ同じ形状をしていることが知られており¹²⁾、境らの速度応答を用いなくとも、1~2秒のバンドパス波形で境らが示している地震波の特徴を分類できると考えられる。

(3) 過去の地震における新震度と建物被害との相関

表-1に示す、1995年から2007年までの地震における境¹³⁾の調査で示されている地震計周辺の建物全壊率を用いて、新震度である I_M と建物被害との相関性を確認しておく。図-2に、 I_S , I_M と建物大破全壊率の関係を示す。建物大破全壊率と I_S の関係には相関はあるが、高震度においてばらつきが多い結果になっている。一方で、 I_M との相関係数は0.92で高い相関を示しており、高震度階における相関も良い。 I_M が計測震度より建物被害に適合した

震度指標であることがわかる。なお、境らが提案する、1~2秒の弾性速度応答を用いた震度と建物大破全壊率との相関係数Rの乗数は0.92であり、精度としては I_M と同程度であった。

表-1 境の建物被害調査結果¹³⁾と各震度

EVENT	SITE	I_s	EXP(I_s)	I_M	EXP(I_M)	建物大破全壊率(%)
1995年 兵庫県南部地震	JR鷹取	6.48	652.0	6.17	478.2	34.9
1995年 兵庫県南部地震	基合	6.49	658.5	6.04	419.9	15.3
1995年 兵庫県南部地震	JR宝塚	6.15	468.7	5.42	225.9	6.2
1995年 兵庫県南部地震	本山第一小	6.12	454.9	5.19	179.5	5.3
1995年 兵庫県南部地震	神戸JMA	6.43	620.2	5.38	217.0	2.5
1995年 兵庫県南部地震	尼崎高架橋	5.69	295.9	5.08	160.8	2.2
1995年 兵庫県南部地震	尼崎竹谷小	5.70	298.9	4.83	125.2	1.2
1995年 兵庫県南部地震	尼崎港	5.74	311.1	5.06	157.6	0
1995年 兵庫県南部地震	六甲アイランド	5.70	298.9	5.02	151.4	0
1997年 鹿児島県西北部3/26	K-NET宮之城	5.53	252.1	4.26	70.8	0
1997年 鹿児島県西北部5/13	K-NET宮之城	5.92	372.4	3.95	51.9	0
2000年 鳥取県西部	K-NET米子	5.82	337.0	5.37	214.9	0
2001年 芸予	K-NET大野	5.64	281.5	4.19	66.0	0
2001年 芸予	K-NET東予	5.59	267.7	4	54.6	0
2001年 芸予	K-NET三原	5.03	152.9	3.32	27.7	0
2003年 十勝沖	K-NET広尾	6.07	432.7	3.87	47.9	0
2004年 新潟県中越	K-NET長岡	5.51	247.2	4.59	98.5	0
2004年 新潟県中越	K-NET小出	5.55	257.2	4.65	104.6	0
2007年 能登半島	K-NET穴水	6.33	561.2	5.93	376.2	18
2007年 能登半島	K-NET輪島	5.53	252.1	4.78	119.1	2.8
2007年 能登半島	K-NET能登	5.55	257.2	4.4	81.5	0
2007年 能登半島	K-NET七尾	5.28	196.4	4.93	138.4	0
2007年 新潟県中越沖地震	K-NET柏崎	6.37	584.1	5.5	244.7	4.2
2007年 新潟県中越沖地震	K-NET小千谷	5.58	265.1	3.95	51.9	0

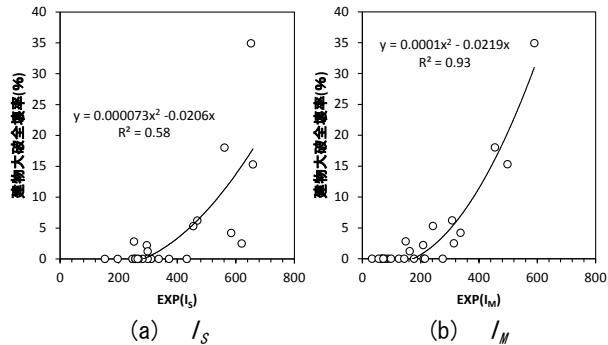


図-2 指標と建物大破全壊率の関係

3. I_M と他の地震動強度指標との比較

(1) 過去の38地震の地震記録の特性

I_M と建物被害や東北地方太平洋沖地震の地震動との関係について検証する前に、従来の地震動強度指標と I_M の関係について確認しておく。分析に用いた地震記録は、2000-2009年に国内で発生した $M_J \geq 6.0$ の38地震において(独)防災科学研究所の強震ネットワーク K-NET¹⁴⁾の地震計で観測された震央距離100km以内の992記録である。表-2はそれらの地震記録を地震と震度階級によって分類したものである。38地震の内、地殻内地震が12地震、プレート境界地震が18地震、スラブ内地震が8地震含まれる。地震記録の大部分は震度階級3または4の計測震度で、震度階級6弱以上の高震度の地震記録は少ない。また、プレート境界地震のマグニチュードの最大は8.0であった。

図-3は上述の38地震の地震記録の計測震度と I_M の関係を示している。 I_M は基本的に計測震度より0.0~2.0ポイント小さくなるのがわかる。別の検討⁹⁾では計測震度は周期1秒以下の地震動が支配的で、周期1-2秒の地震動が計測震度に直接的に影響していないことが分かっている。そのため、周期1-2秒の成分が強く建物被害が多いと考えられる地震動でも計測震度よりも I_M が1, 2階級小さく評価されることが生じる。

表-2 2000-2009年に発生した38地震記録の計測震度の内訳

震源	年月日	震度階								合計	
		7	6強	6弱	5強	5弱	4	3	2		1
千葉県東方沖	2000.06.03						13	37	2		52
茨城県沖	2000.07.21					3	13	9			25
鳥取県西部	2000.10.06			3	4	7	25	6	1		46
安芸灘	2001.03.24			3	11	13	27				54
岩手県内陸南部	2001.12.02					3	24	14	2		43
宮城県沖	2003.05.26		1			11	9	3			24
宮城県中部	2003.07.26				2	4	12	16	1		35
十勝沖	2003.09.26		1			2	1				4
十勝沖	2003.09.26			1	1	2	3				7
十勝沖	2003.09.26						1	1			2
釧路沖	2003.09.29						7	1			8
釧路沖	2003.10.08						5	7	1		13
新潟県中越地方	2004.10.23	1	2	2	3	8	16	15	1		48
新潟県中越地方	2004.10.23						10	16	14		40
新潟県中越地方	2004.10.23					2	2	9	3		16
新潟県中越地方	2004.10.23		1	1	2	3	18	13	1		39
新潟県中越地方	2004.10.27					1	4	7	2		14
釧路沖	2004.11.29			1	9	7	2				19
釧路沖	2004.12.06				1	7	7				15
留萌支庁南部	2004.12.14			1		2	3	13	11	3	33
釧路沖	2005.01.18					4	15	2	1		22
福岡県西北部	2005.03.20		1	2	9	18	7	1			38
千葉県北東部	2005.04.11					4	47	6			57
茨城県沖	2005.08.16				1	3					4
茨城県沖	2005.10.09					3	10	17			30
種子島近海	2005.11.22						2	9	10		21
宮城県沖	2005.12.17						4	4			8
大分県西部	2006.06.12					1	1	8	19	3	32
十勝沖	2007.02.17							2	5		7
能登半島沖	2007.03.25		1	3	2	6	11	1			24
新潟県上中越沖	2007.07.16		1	1	5	5	16	7			35
福島県沖	2007.11.26						1	2	5		8
岩手県内陸南部	2008.06.14			3	4	5	26	10			48
岩手県沿岸北部	2008.07.24			2	7	15	6	4			34
十勝沖	2008.09.11						3	1			4
十勝沖	2009.06.05						5	4			9
駿河湾	2008.08.11			7	3	25	12				47
薩摩半島西方沖	2009.09.03						2	13	11	1	27
合計		1	7	22	72	127	347	317	92	7	992

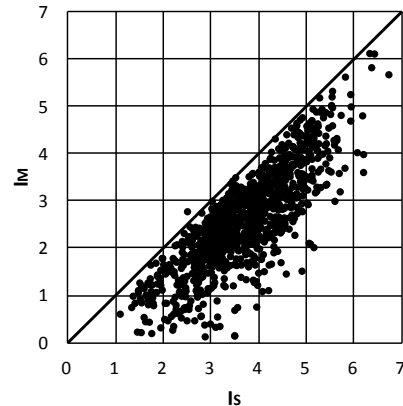


図-3 計測震度と I_M の関係 (2000-2009年の38地震の場合)

次に、 I_M 、計測震度と地表最大加速度(PGA)、地表最大速度(PGV)の関係を図-4に示す。計測震度に用いられるフィルタの処理は加速度と速度の中間の次元の波形を求めていることに相当するため、PGA、PGVいずれの指標とも計測震度との相関が強いことがわかる。一方、 I_M については短周期成分がカットされているためPGAとの相関は弱い、PGVとの相関は見られる。なお、図中の相関曲線の式を表-3に示す。

表-3 I_s 、 I_M とPGA、PGVの相関式 $y=A \times \text{LN}(x)+B$ の各パラメータ

y	x	A	B	R ²
I_M	PGA	0.57	0.12	0.43
I_M	PGV	0.84	1.24	0.79
I_s	PGA	0.76	0.41	0.88
I_s	PGV	0.84	2.34	0.92

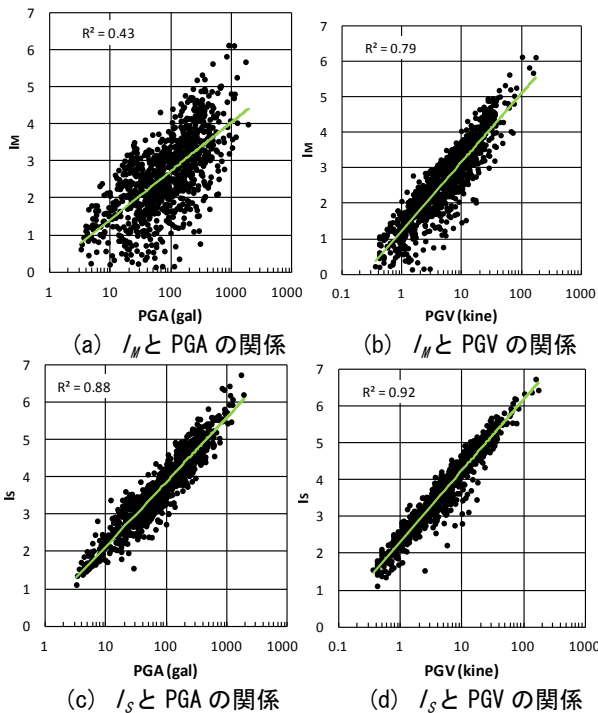


図-4 I_S , I_M と PGA, PGV の関係 (2000-2009 年の 38 地震の場合)

(2) 東北地方太平洋沖地震の地震記録の特性

次に、東北地方太平洋沖地震の本震の揺れを観測した K-NET¹⁴⁾の地震計 659 カ所と震度 5 弱以上を観測した気象庁¹⁵⁾の地震計 43 カ所を合わせた 732 カ所の観測地点の地震記録 (表-4 参照) を用いて同様に分析を進める。この本震は 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生し、地震規模は Mw9.0 のプレート境界地震である。図-5 に計測震度と I_M の関係を示す。図-3 で示した過去の地震を用いた場合と比較すると、過去にわずかであった I_M 5.0 以上

表-4 東北地方太平洋沖地震における計測震度の内訳

	震度階							合計
	7	6強	6弱	5強	5弱	4	3	
北海道					20	143	10	173
青森県				1	5	14	9	29
秋田県					1	19	3	23
岩手県			4	11(4)	7	3		25(4)
宮城県	1	6(2)	16(6)	5(3)				28(11)
山形県				3	1	11	2	17
福島県		2	14(3)	10(4)	2	6	1	35(7)
新潟県					1	14	13	28
栃木県		2	4(1)	8(4)	5	2		21(5)
群馬県			1	1	5	8	1	16
茨城県		5(1)	15(5)	5(2)	1			26(8)
埼玉県				5(1)	5	5		15(1)
東京都				12(2)	11	3	3	29(2)
千葉県			2	17(4)	6	6		31(4)
神奈川県			1	4(1)	5	11		21(1)
山梨県					3	7	1	11
長野県						12	12	24
岐阜県					1	15	8	24
富山県						7	4	11
石川県						5	10	15
福井県				1	1	8		10
静岡県					2	19	6	27
愛知県						11	6	17
三重県						6	10	16
滋賀県						7	5	12
和歌山県						1	3	4
奈良県						1	8	9
京都府						8	1	9
大阪府						8	2	10
兵庫県						6	4	10
徳島県				2			1	3
鳥取県							2	2
広島県							1	1
合計	1	13(3)	57(15)	85(25)	62	236	262	732(43)

※カッコ内は気象庁の観測点数

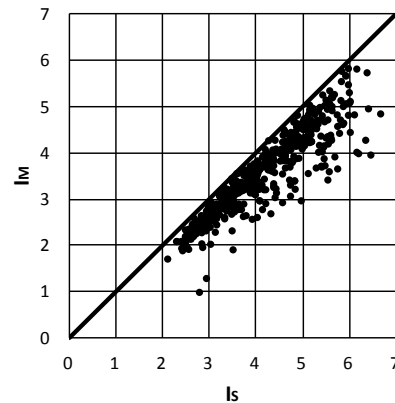


図-5 計測震度と I_M の関係 (東北地方太平洋沖地震の記録の場合)

の高震度が多く記録されたことがわかる。また、東北地方太平洋沖地震では両指標の差が小さくなっており、中長周期の成分が強い地震動が多かったことが考えられる。

次に、 I_M 、計測震度と PGA, PGV の関係を図-6 に、そしてそれぞれの相関式を表-5 に示す。図-4 の過去の地震記録と比較すると、PGA との関係である (a)と(c)の図では相関曲線の傾きがおおよそ等しく、 I_S と I_M の関係式で差が小さくなった分だけ上に平行移動したことがわかる。したがって、巨大なプレート境界地震の場合でも PGA とそれぞれの指標との関係性に変化はないと考えられる。一方、PGV との関係である (b), (d)の図では、相関係数や相関曲線の傾きで違いが見られ、(d)ではより顕著である。それぞれの相関分布図には 2 つのまとまりがあることが確認でき、それについては次節で検討する。

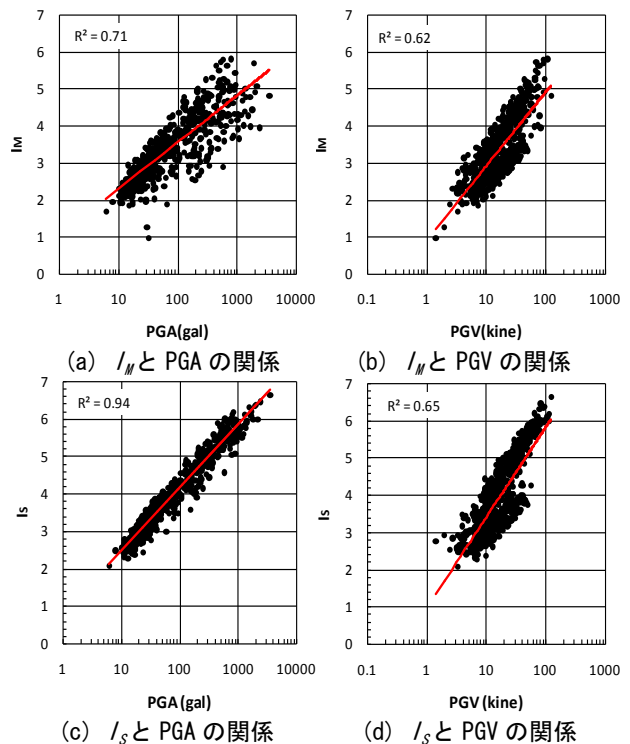


図-6 I_S , I_M と PGA, PGV の関係

(東北地方太平洋沖地震の記録の場合)

表-5 I_S , I_M と PGA, PGV の相関式 $y=A \times \text{LN}(x)+B$ の各パラメータ

y	x	A	B	R ²
I_M	PGA	0.55	1.04	0.71
I_M	PGV	0.88	0.90	0.62
I_S	PGA	0.73	0.85	0.94
I_S	PGV	1.01	1.09	0.65

表-6 PGA, I_M の TOP10 記録とその観測点
(a) PGA (b) I_M

(a) PGA			(b) I_M		
	観測点	PGA (gal)		観測点	I_M
1	築館 (MYG004)	3,525	1	JMA 大崎市	5.99
2	日立 (IBR003)	2,306	2	小川 (TCG006)	5.82
3	塩竈 (MYG012)	2,169	3	古川 (MYG006)	5.81
4	銚田 (IBR013)	1,907	4	中野 (FKS024)	5.76
5	仙台 (MYG013)	1,829	5	仙台 (MYG013)	5.73
6	大宮 (IBR004)	1,805	6	石巻 (MYG010)	5.66
7	白河 (FKS016)	1,664	7	JMA 登米市	5.64
8	今市 (TCG009)	1,638	8	JMA 涌谷町	5.61
9	茂木 (TCG014)	1,483	9	JMA 松島町	5.56
10	郡山 (FKS018)	1,381	10	角田 (MYG017)	5.54

4. I_M の東北地方太平洋沖地震への適用

前節で提案した I_M が東北地方太平洋沖地震の地震動ならびに建物被害評価にも適用できることを確かめるにあたり、本研究では以下の項目について検討した。

- ① 建物被害との関係：過去の地震では計測震度よりも I_M と適合することが確認していたが、本地震でも適合することを確認する。
- ② 震源距離の長距離化による影響：既往の分析では震央距離 100km 以内の地震記録を対象として他の地震動強度ならびに建物被害との関係を分析していたが、本地震では震源が遠くなり 100km を超えた地震記録が大半である。そこで、既往の分析に対応する震源距離の適用範囲について検討を行う。
- ③ 複数の波群を持つ地震動による影響：計測震度ならびに I_M は、一つの地震波形から一つの震度が算出される。しかし、本地震は既往の分析で用いられた地殻内地震や中小規模のプレート境界地震と違い複数のアスペリティを持つため、大規模な地震動が複数合わさったような波群が観測された。そのような地震動の繰り返しが I_M に与える影響について明らかにする。

(1) 検証① 建物被害との相関

東北地方太平洋沖地震による I_M と建物被害との相関を検証するため、広域な被災地域の中から I_M が大きい地域、もしくは建物被害が大きくなると推定される地域を抽出し、現地調査を行った。

まず、地震記録から地域を選別するため、東北地方太平洋沖地震の本震における K-NET¹⁴⁾ と気象庁¹⁵⁾ 地震計の観測記録の内、PGA と I_M の上位 10 記録を表-6 に列挙した。なお PGA は 3 成分の最大加速度の 2 乗和平方根を示している。PGA の上位 10 記録は全て 1,000gal を超え、宮城県や茨城県、栃木県、福島県の北関東から東北までの太平洋側で観測されている。一方、 I_M では宮城県の観測点が上位 10 記録の大半を占める中、栃木県の K-NET 小川と福島県の K-NET 中野で、高い I_M が算出された。とくに、K-NET 仙台を除いた I_M の上位 5 記録は、いずれも PGA の上位 10 記録に含まれていない。PGA と I_M の違いが上位記録を比較するだけでも顕著に現れている。観測点周辺の建物被害状況を把握するため、 I_M の上位 4 記録の観測点を対象にして調査を行った。

一方、市町村の建物被害状況から地域を選別するため、市町村の建物全壊棟数¹⁶⁾ を全世帯数¹⁷⁾ で除した比率を市町村の建物全壊率と定義し、その分布を図-7 に示す。新聞や地震被害報告から、沿岸部で明らかに津波の浸水被害や液状化被害を受けている地域を省き、内陸にも建物全壊率の高い市町村があることが確認できる。上記で I_M が高い観測点の市町村では建物全壊率も高くなっている。上位 4 記録の他に市町村の建物全壊率が高い福島県の郡山市と須賀川市にある K-NET 郡山、K-NET

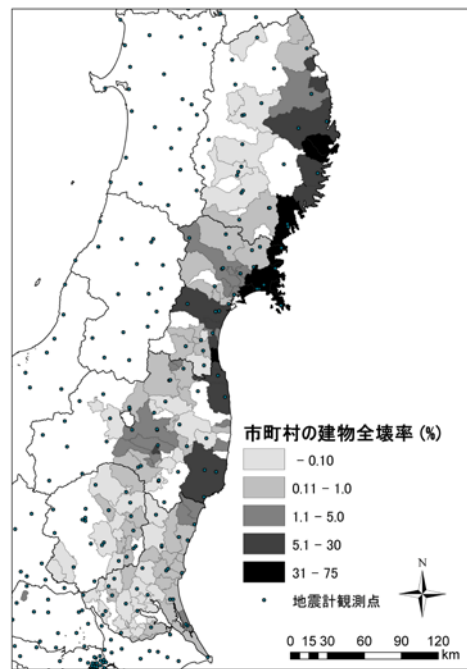


図-7 各市町村の建物全壊率分布

須賀川を上記の分析対象に追加して現地調査を行った。

現地調査では、まず地震計周辺の建物被害状況を視察した。視察時期は JMA 大崎と K-NET 古川については 2011 年 3、4 月と 2012 年 3 月、その他の地域では 2011 年の 12 月である。調査時に見られた各地震計周辺の被害の概要を説明する。

JMA 大崎と K-NET 古川の観測点間の距離は 1km ほどであるが I_M は 0.18 ポイント JMA 大崎の方が高かった。JMA 大崎の周辺では、木造家屋の層崩壊や壁の剥落、液状化による支持物の傾斜やマンホール周りの地盤の沈み込みなどが確認された。一方、K-NET 古川周辺の建物被害は JMA 大崎のそれと比べると軽微であった。K-NET 小川周辺では、住宅がさほど多くはなかったが、家屋の屋根瓦のずれや大半の墓石が倒れたことがわかる修繕跡が見られた。また、1 軒が全壊したという情報を那珂川町支庁で得た。K-NET 中野周辺では、ブロック造の蔵にクラックが見られた。数軒全壊した家屋があったという情報を役場で得、家屋が取り壊された後の更地を確認した。K-NET 郡山周辺では、観測点の南側に住宅が密集しており、屋根瓦や壁に被害を受けている家屋を多く確認できた。

さらに、地震計周辺の行政区画を対象に市町村から建物被害数の情報を収集した。表-7 に地震計周辺の建物被害数ならびに建物棟数を示す。観測点周辺の範囲は観測点によって異なるが、概ね地震計から半径 500m 以内の建物被害件数である。K-NET 須賀川については全壊した家屋があったが、建物棟数を把握できなかったため以降の分析では割愛する。 I_M が高い地点では、現地で倒壊に至る建物被害を確認しており、 I_M が地震直後の 1 次的な被害把握に役立つ指標であると考えられる。また表-8 から、K-NET 郡山の全壊棟数が多いことがわかる。さらに、一部の観測点で微動観測により地盤の振動特性を分析し、本震・余震の周期特性について比較した。 I_M が高い地点では、表層地盤の H/V スペクトルの卓越周期が 0.6 秒付近で比較的軟らかい地盤であることがわかった。表層地盤の増幅によって I_M が高くなり、被害にも繋がった要因の一つと考えられる。なお、これらの調査・分析結果は既報している¹⁸⁾。

表-7 地震計周辺の建物被害データ

観測点	全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊	建物棟数
JMA大崎	10	4	24	40	326
K-NET小川	1	0	4	202	331
K-NET古川	2	4	10	64	641
K-NET中野	4	—	1	—	270
K-NET郡山	23	27	303	444	797
K-NET須賀川	17	—	29	38	—

注：被害数は市町村からの提供されたもの。K-NET 小川、古川と JMA 大崎の建物棟数は固定資産台帳ベース。K-NET 中野と郡山は住宅地図による読み取り数。ただし、K-NET 郡山については被害総数が建物棟数を超えたため、暫定的に被害総数を建物棟数とした

次に、 I_M が東北地方太平洋沖地震における建物被害に適合するのかが検証する。表-7 のデータから建物大破全壊率（建物棟数に対する全壊数の比率）を算出し、図-2 の過去の地震の I_M と建物大破全壊率との関係に重ねて図-8 に示す。過去の地震による回帰式を踏襲すると、相関係数の自乗は計測震度では 0.57 から 0.54 に、 I_M では 0.93 から 0.81 に低くなったが、それでも I_M と建物大破全壊率との相関係数は良い相関にあり、本地震の記録が既往の地震の被害分布の上に乗ることが確認できた。計測震度の高い観測点周りの建物被害について調査を行わなかったが、高い PGA と計測震度で相関が良いこと（図-6(c)）、PGA の高い観測点が市町村の建物全壊率が高い地域にないこと（図-7）を踏まえると、計測震度であれば図-8(a)の横軸 $EXP(I_M)$ の 400 以上で建物大破全壊率が低い点が分布したものと考えられ、過去の地震の計測震度との関係では合わないといえる。一方、 I_M は過去の地震だけでなく東北地方太平洋沖地震においても、建物被害に適合する震度指標であるといえる。しかし、本地震

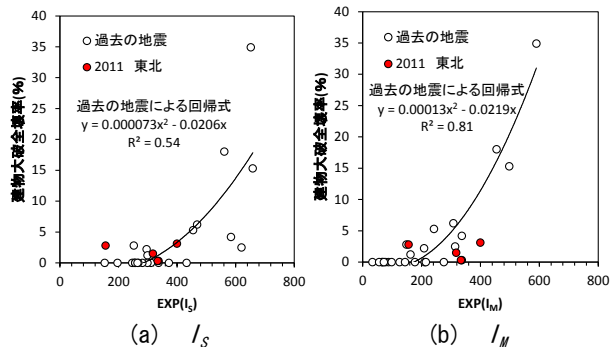


図-8 指標と建物大破全壊率の関係

の建物被害は、 I_M が大きい地域を対象としたが、 I_M が 6.0 ($EXP(I_M)$ が約 400) 以上の高震度の記録がなかった。そのため、本研究で確認できたのは I_M が 6.0 以下のレベルまでであり、それ以上の高震度域での建物被害との関係については今後検討が必要である。

(2) 検証② 断層最短距離の長距離化による影響

本地震は、気象庁¹⁵⁾および USGS¹⁹⁾によると岩手県沖から茨城県沖までのおよそ 500km の長さに及ぶ大きな範囲が震源断層となったことから、マグニチュードの大きな地震となり広い範囲で強い地震動が観測された（図-9 参照）。本研究では、震源断層からの最短距離を断層最短距離と定義し、距離による I_M の特性の変化について分析を行い、震央距離 100km 以内を対象にしていた既往の分析に対応する震源距離の適用範囲について検討する。

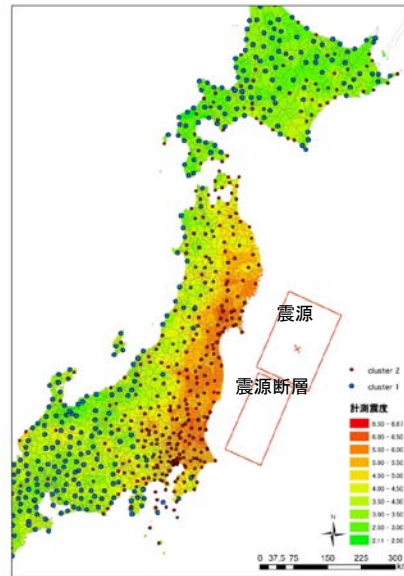


図-9 震源位置、震源断層範囲と計測震度分布図

I_M の算出過程においてフィルタ処理された波形から、1 秒間ごとの波形を用いて震度を算出する²⁰⁾ことで瞬間的な I_M を算出し、地震発生から I_M が最大となるまでの時間と断層最短距離との関係について図-10 に示す。分析に用いた地震記録は表-4 の東北地方太平洋沖地震の本震記録である。図から分布が 2 つのクラスターに分かれていることがわかる。断層最短距離が長くなるにつれて、分布の下限が直線的に増加し、その勾配は約 2km/s になっている。つまり、最大の I_M は S 波かそれより遅い波で決定されていることが考えられる。また、本震では 3 つの断層破壊があったことが報告されており⁴⁾、東北地域の地震波形からは 3 つの波群が確認できる。これらの破壊の時間差が 120 秒あることから、1 つめの破壊だけでなく、それ以降の断層破壊から放出された地震波によって最大の I_M が算出されたものも考えられる。そこで、図-10 の分布の下限の直線から 120 秒オフセットした直線までの領域にあるものをクラスター 2、それよりも長い時間領域に最大の I_M があるものをクラスター 1 に分類した。

図-9 にクラスターに分類した地震計の観測点の分布を示しているが、クラスター 2 は東北・関東地方の太平洋側に分布し、それより震源から遠方の地域ではクラスタ

一1が分布している。図-9、図-10の時間的、空間的な分布特性からクラスター1は表面波、クラスター2は実体波によって最大の I_M がもたらされたと考えられる。

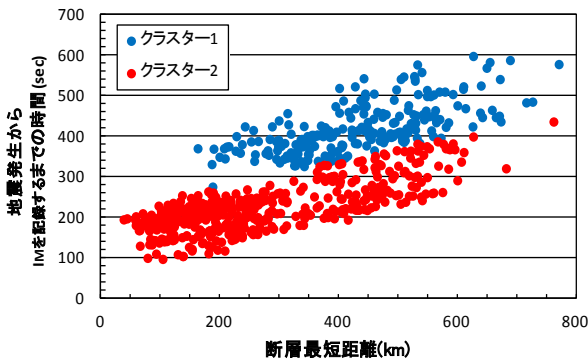


図-10 断層最短距離と地震発生から最大の I_M を記録するまでの時間との関係

さらに、図-11に示すようにPGVと I_M の関係図をクラスター別に示したところ、クラスター1は、既往のPGV- I_M の関係において I_M が低く評価されていることがわかった。この図は、図-6(d)をクラスターで分類したものである。図-6(d)で分布が二つに分かれていたこと理由は、プレート境界の巨大地震であったために表面波が励起され、実体波によるPGVと I_M の関係に表面波のそれが重なっていたためといえる。

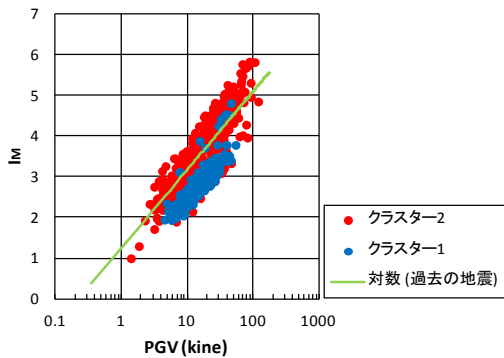


図-11 PGVと I_M の関係

震央距離100km以内を対象とした既往の分析で用いられたのは、実体波が支配的な記録であると考えられる。実体波が支配的なクラスター2の記録であれば、図-11に示すように距離に関係なく既往地震の I_M と速度の関係にも合ってくる。また、既往の I_M と建物被害との関係は、実体波が支配的な記録による I_M と被害の関係であるが、前述の建物被害と相関が良かった5観測点もクラスター2に含まれているため、既往研究とも符合する。

一方、表面波が支配的な I_M と建物被害との関係については、これまで着目してこなかった。表面波が支配的なクラスター1の地震動は、 I_M とPGVとの関係も過去の地震の関係式から外れており、実体波が支配的な I_M とともに建物被害評価に用いるには検討の余地がある。また、表面波が支配的なクラスター1の観測記録の内、最大の I_M は、香川県K-NET高松(KGW004)の4.80であり、図-8の被害分布からも大規模な建物被害は発生しない地震動レベルであるため、東北地方太平洋沖地震の記録だけでは議論できない。つまり、過去の地震による一連の分析結果に対応するのは実体波が支配的な I_M とし

て考えられる。

そこで、実体波が支配的な I_M が算出される震源距離の適用範囲について検討を行う。図-10から、断層最短距離150km未満の範囲にはクラスター2のみが存在しており表面波の影響は少ないと推測されるが、その範囲について図-11のPGVと I_M の関係図を用いて定量化する。図-11中の直線は、図-4で示した過去の地震のPGV- I_M の関係図の相関式である。表-3の相関式との分散を式[3]から算出した。

$$V = \frac{(\overline{I_M(v)} - I_M)^2}{n} \quad [3]$$

ただし、 V : 分散 $\overline{I_M(v)}$: PGVに対する I_M の相関式 (表-3)による推定1-2秒計測震度、 I_M : 1-2秒計測震度、 n : データ数、 v : PGV

断層最短距離から25km毎に分割した区間の分散を全データとクラスター別に算出した結果を図-12に示す。断層最短距離が150kmを超えると、徐々に分散が大きくなる。これはクラスター1の地震動に起因するものであり、実体波が支配的な I_M をもつクラスター2では、断層最短距離が450km程度まで安定していることがわかる。しかし、断層最短距離が150km以上になると表面波の影響を受ける観測点が増え始め、全データの分散はクラスター2の分散特性に近づく。つまり、150km以内であれば表面波の影響は少なく、実体波が支配的であることがいえる。なお、検証①で調査を行った観測点は全て断層最短距離150km以内に位置していた。

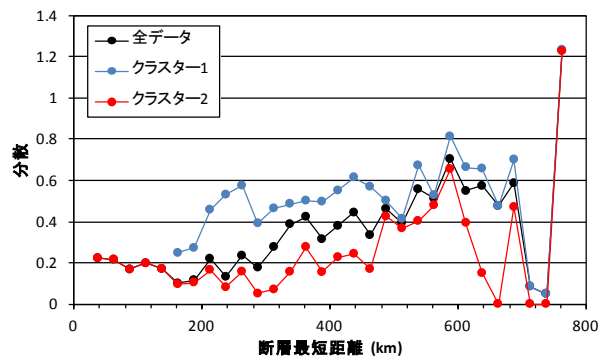


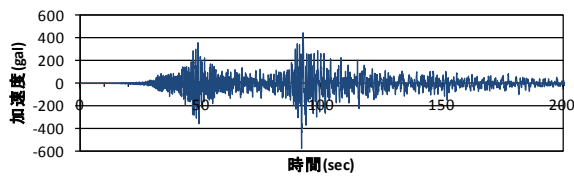
図-12 断層最短距離別の分散

表面波が支配的な地震動の I_M のレベルが小さく、本分析から表面波による建物被害との関係を明らかにすることができないが、過去の実体波が支配的な地震動の特性とは大きく異なっているため、実体波の記録とは区別して分析することが望ましい。実体波と表面波が支配的な記録を区別する一つの方法として、断層最短距離が150km以下であれば実体波が優勢な記録とみなせる。さらに、実体波が優勢な記録であれば、距離に関係なく、 I_M は過去の地震動や建物被害との相関が良いといえる。

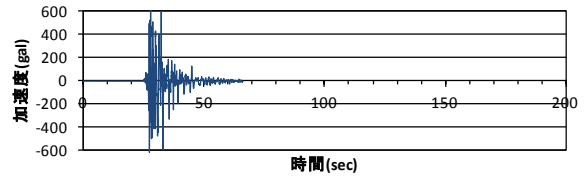
なお、本研究では断層最短距離を用いたが、震源距離を用いて同様の検証を行った場合、図-10や図-11のような明瞭なクラスターは見られなかった。

(3) 検証③ 複数の波群を持つ地震動による影響

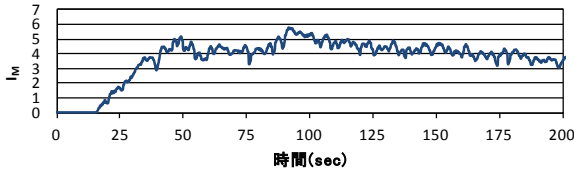
東北地方太平洋沖地震は、表-1で示したような地殻内地震や中小規模のプレート境界地震と違い、震源断層内



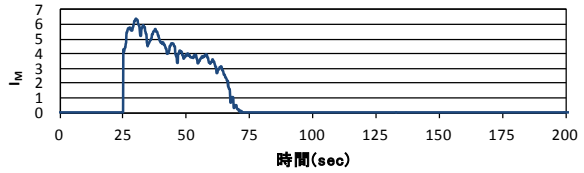
(a) K-NET 古川加速度波形 (EW 方向)



(b) JR 鷹取 加速度波形 (EW 方向)



(c) K-NET 古川の I_M 時間推移

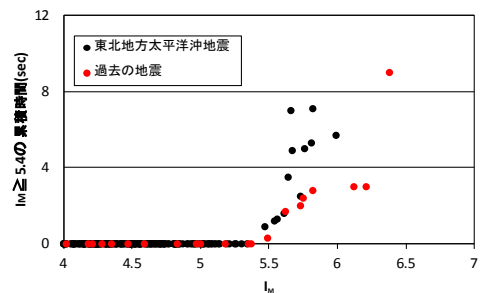


(d) JR 鷹取の I_M 時間推移

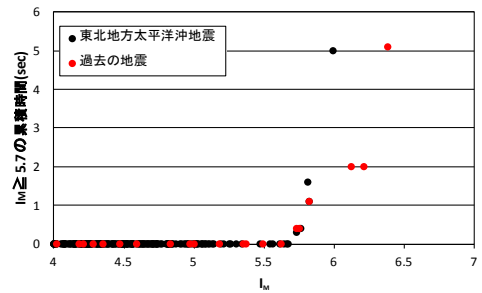
図-13 K-NET 古川(東北地方太平洋沖地震)と JR 鷹取(兵庫県南部地震)の加速度波形と I_M の時間推移

の複数のアスペリティで北側から順にすべったため、東北地方では複数の大規模地震が数分間に繰り返し発生したような波群が観測され、関東地方では複数の波群が重なった地震波形が観測された。このような複数波群は2008年に中国四川省で発生した $M_w7.9$ の地震でも報告されている。東北地方太平洋沖地震における K-NET 古川と兵庫県南部地震における JR 鷹取で観測された加速度波形を図-13の(a),(b)に示す。JR 鷹取の波形は1つの波群があるのに対し、K-NET 古川は複数の波群がある。既往の分析では、1つの波群を有する地震動による建物被害を扱っていたため、K-NET 古川のような強い地震動の繰り返しがもたらす破壊力を、 I_M によって適切に評価できるのか検証する必要がある。そこでまず、前節と同様に瞬間的な1秒間の I_M を0.1秒間隔で算出することで²⁰⁾、 I_M の時間推移を算出したものを図-13の(c),(d)に示す。図-13(c)から、K-NET 古川では2つの大きい波群の内、強い揺れであったのは後続の波群であることがわかる。他の観測点では、2つの波群で同程度の I_M を記録した地点もあった。 I_M の推移をみると、K-NET 古川では $I_M \geq 4.0$ の時間が2分以上継続していることが分かり、JR 鷹取では20秒程度である。一方、 $I_M \geq 5.0$ の時間はそれほど違いがないようにみえる。

継続時間についてより詳細に検証するためある閾値を超える I_M の累積時間と I_M との関係を分析した。図-14は、表-1に示す過去の地震記録と表-4に示す本地震の記録における、 I_M と高いレベルの累積時間の関係を示している。図-8から建物被害率が発生し始める I_M が $I_M \geq 5.3$ ($EXP(5.3)=200$)であるため、それ以上の様々な I_M の累積時間を分析した中から、 $I_M \geq 5.4$ 、 5.7 の累積時間の場合を図-14に示す。 $I_M \geq 5.4$ の累積時間では、東北地方太平洋沖地震における宮城県や茨城県など広い範囲の多数の記録が過去の地震の記録を上回っている。また、図-8の高い I_M の建物大破全壊率は、過去の相関曲線近辺にあるものの、相関曲線よりも低い被害率であった。 $I_M \geq 5.7$ の累積時間を見ると、複数ある波群の内の強い波群のみが影響するため、過去の地震との差異はほとんど見られない。これらのことから、複数の波群によって一つの I_M が算出されていたために図-14の累積時間が長く、 I_M が高く評価されたが、一つの波群のもつ I_M は低く、破壊力は弱くなっていた可能性が考えられる。



(a) $I_M \geq 5.4$ の累積時間



(b) $I_M \geq 5.7$ の累積時間

図-14 I_M と高レベル震度の累積時間との関係

そこで、複数の波群の中で最も高い I_M が算出される波群の評価をするため、複数の波群をもつ地震動を分割して I_M や累積時間の検証を行った。用いた記録は表-4中の宮城県、岩手県内の53の地震計で観測された波形である。それ以外の記録では複数の明瞭な波群を区別できなかった。分割方法は、1つ目の波群(前発波群と呼ぶ)と2つ目の波群(後発波群と呼ぶ)のそれぞれの最大加速度時刻の中間で波形を2つに分断した。図-15に全波形の I_M と前発・後発波群の内いずれか優勢な波群の I_M との差と、前発・後発波群の I_M の差との関係を示す。全波形の I_M と優勢な波群の I_M との差は最大で0.05であり、前発と後発波群の I_M がほぼ等しいときにその差が生じている。多くの場合は、全波形の I_M は優勢な波群の I_M のみで示されている。さらに、表-6に示す I_M の上位10記録のうち、その影響が出たのはK-NET石巻のみで、その差は0.01であった。したがって複数の波群から算出したことによって I_M が高く評価されていた観測点はわずかであり、その誤差も微小であった。

また図-16にそれぞれ前発・後発波群の I_M と $I_M \geq 5.4$ の累積時間の関係を示す。東北地方太平洋沖地震にお

る東北地方の記録では前発波群の高レベルの I_M の累積時間は短く、過去の同規模の地震と同程度であるのに対して、後発波群の I_M は高く、累積時間も過去の地震よりも長いことがわかる。つまり、 $I_M \geq 5.4$ の高レベルの震度で、図-14(a)の累積時間が長時間化した観測点は、後発波群が主に影響したものが多くことがわかった。また、周辺に建物被害が大きく複数の波群をもった観測記録の事例は少なく、表-7ではJMA大崎とK-NET古川のみである。二観測点については、後発波群だけの地震動であっても I_M は変わらないため建物被害と I_M との関係には複数の波群をもった地震動による影響もないといえる。

以上の分析から、東北地方太平洋沖地震では、複数の波群から一つの I_M が算出されたことによって I_M が高く評価された事例は少なく、後発波群のみの地震動の I_M や累積時間にほぼ等しかった。複数の波群をもつ地震動の事例が少なかったために本地震の傾向として位置づけ、他の巨大なプレート境界地震については検討が必要である。

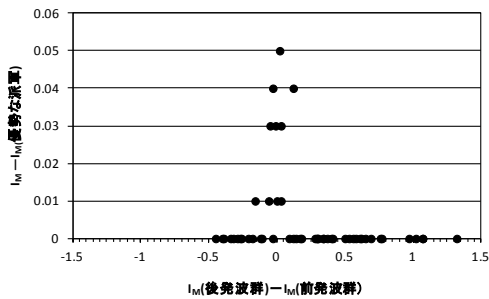
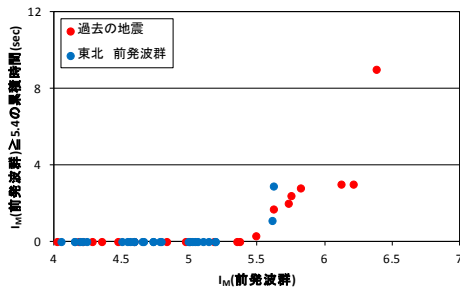
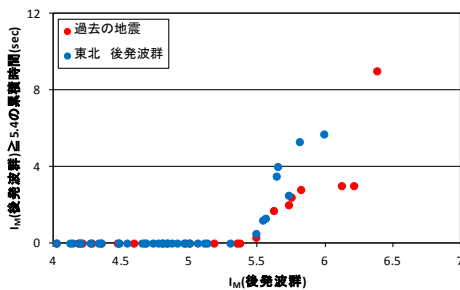


図-15 全波形の I_M と優勢な波群の I_M との差



(a) 前発波群



(b) 後発波群

図-16 I_M と $I_M \geq 5.4$ の累積時間の関係

(4) 検証のまとめ

本研究では、建物被害に適合する新たな地震動強度指標として I_M を提案し、巨大規模のプレート境界地震である東北地方太平洋沖地震への適用性を検証した。 I_M と

建物被害との関係だけではなく、本地震特有の震源距離の長大化、複数波群を有する地震動の繰り返しについても検討を行った。

著者らの調査で得られた東北地方太平洋沖地震の I_M と建物大破・全壊率との関係は、過去の地震の分布の上に乗ることが確認された。ただし、本研究で確認できたのは I_M 5.99 までのレベルであるため、それ以上の I_M に対する被害については課題が残る。

本地震では震源距離が非常に長かったが、実体波が支配的な地震波形の I_M では、他の地震動強度指標や建物被害とも距離に関わらず同様の関係があることが分かった。断層からの最短距離が 150km を超える地域では表面波が支配的に I_M を決定する観測点が増える。この I_M は他の地震動強度指標とも既往の関係から外れているため、建物被害評価には異なる結果をもたらすと考えられ、表面波が支配的な地震動の I_M と建物被害との関係については今後検討すべきである。

本地震で高い I_M が算出された地震動には複数の波群を有し、波群全体の継続時間で一つの震度が算出されていたために I_M が高く評価された可能性が懸念されたが、波群別に I_M や高レベルの I_M の累積時間を検証した結果、複数の波群を有することによる I_M への影響はわずかであり、本地震では後発波群が優勢であり、全波形の I_M は優勢な一つの波群のみの地震動強度とほぼ等しいことが分かった。建物被害とも検討する事例が少なかったため、本地震の一傾向と捉え、新たな地震においても検討が必要である。

すなわち、地殻内地震を主にして建物被害に適合する 1-2 秒計測震度 I_M を提案し、東北地方太平洋沖地震に適用したところ、建物被害については条件つきで適用することが確認でき、さらに東北地方太平洋沖地震の特徴である、震源距離が長大化や複数の波群がある地震動による I_M への影響については、距離を限定することで適用することが確認できた。

5. 結論

本研究では、建物被害に適合した地震動強度指標として 1-2 秒計測震度 I_M を提案し、東北地方太平洋沖地震の地震動特性ならびに建物被害との関係について検証を行った。本研究の結論を以下に示す。

- 過去の地震記録から I_M が従来の計測震度よりも、建物全壊率と良い相関にあることを確認したとともに、東北地方太平洋沖地震の記録が、過去の地震における被害分布図の上に乗ることが確認された。ただし、本地震で観測された最大の I_M は 5.99 であり、それ以上については今後も検討が必要である。
- 高い最大加速度の観測点と高い I_M の観測点は必ずしも同じにならず、市町村の建物全壊率の高い市町村にある観測点は、 I_M も高いことが分かった。
- 震源距離が長大化すると、実体波だけでなく表面波によって I_M が決まることが本研究で確認された。断層最短距離 150km 以下の範囲であれば、実体波が優勢になり、過去の地震の I_M と建物被害や地震動強度との関係も対応する。
- 複数の波群から一つの I_M が算出されたことによ

て I_M が高く評価された事例は少なく、本地震では後発波群のみの地震動の I_M や累積時間が全波形の I_M にほぼ等しかった。

謝辞

本研究では、(独)防災科学研究所の K-NET ならびに気象庁の地震記録を使用させて頂きました。また、建物被害については、被災市町の市役所・役場に資料を提供していただきました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁：震度を知る，ぎょうせい，pp.1-238,1996.9.
- 2) 境有紀，吉岡信悟，瀧瀬一起，壁谷澤寿海：1999 年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討，日本建築学会構造系論文集，第 549 号 pp.43-50，2001.
- 3) 境有紀，神野達夫，瀧瀬一起：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案，日本建築学会構造系論文集，第 585 号，pp.71-76，2004.
- 4) 後藤浩之：土木学会東日本大震災被害調査団，緊急地震被害調査報告書第 4 章，pp.2-7,2011
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査（速報）二本松市，郡山市，福島市における RC 造，鉄骨造及び非構造部材を中心とした被害
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査 白河市，須賀川市，仙台市における RC 造，S 造，非構造部材を中心とした建築物被害調査（速報）
- 7) 清野純史，藤江恵悟，太田裕：組合せ震度の提案・定式化とその応用について，土木学会論文集，No.612，pp.143-151，1999.
- 8) 清野純史，土岐憲三，臼田利之，太田裕：計測震度の工学的吟味と組合せ震度導入の意義，土木学会論文集，No.682，pp.267-278，2001.
- 9) 齋藤栄・鍬田泰子：建物の等価周期帯に着目した震度算定法の提案，土木学会全国大会第 66 回年次学術講演会，2011
- 10) 境有紀：2007 年能登半島地震，新潟県中越沖地震の強震記録と被害データを加えた建物被害と対応した地震動の周期帯の検討，日本地震工学会大会—2007 梗概集，pp.480-481，2007
- 11) 鍬田泰子，齋藤栄：瞬間計測震度を用いた揺れ最中の避難行動可能時間の定量化，日本地震工学会論文集 第 10 巻，第 5 号，pp.52-65，2010
- 12) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，pp149-151,1994
- 13) 境有紀：地震動の性質と建物被害の関係，日本地震工学会誌，No.9,pp.12-19，2004.
- 14) 防災科学技術研究所強震ネットワーク K-NET
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/search/>
- 15) 気象庁：平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震関連情報
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/jishin-portal.html>
- 16)

140 報)

- 17) 総務省：平成 22 年住民基本台帳人口・世帯数
- 18) 岡本篤興，鍬田泰子：東北地方太平洋沖地震における 1-2 秒計測震度と建物被害との関係，建設工学研究所論文報告集,第 54 号, pp.99-110, 2012
- 19) USGS : Magnitude9.0 –NEAR THE EAST COAST OF HONSHU, JAPAN
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2011/us0001xgp/>
- 20) Yasuko Kuwata, Shiro Takada : Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, Journal of Natural Disaster Science, Vol.24, No.1, pp.35-42.2002

(原稿受付 2012.5.26)

(登載決定 2013.1.13)