

震源域の強震動と災害強度指標～台湾集集鎮の場合～

Strong ground motions and indexes of disaster intensity in the vicinity of epicenter

～ In case of the 921 Ji-Ji (Taiwan) Earthquake ～

鯨田 泰子*, 高田 至郎**, 尾崎 竜三***

Yasuko Kuwata, Shiro Takada and Ryuzo Ozaki,

*神戸大学大学院自然科学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

**工博, 神戸大学教授, 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

***工博, 神戸大学助手, 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

On September 21, 1999, 1:47 (local time), a huge earthquake attacked the central area of Taiwan, F. O. China. It was called "Ji-Ji Earthquake" after the village name of the seismic epicenter. We had investigated severely attacked regions for earthquake casualties and distributed questionnaires. In this paper, taking the results of the above survey into account, the strong ground motions, not only of the main shock but also of the after shocks, are discussed by using seismic intensity by modified questionnaires, the methodology of the Japan Meteorological Agency for measuring seismic intensity, SI value and PGA. The results show that seismic intensity by questionnaires, the methodology of the JMA, SI value are better and more useful than PGA, in order to assess the disaster intensity. Hereafter, we shall call these three factors of seismic intensity "Indexes of Disaster Intensity"

Key Words: strong ground motions, measuring seismic intensity, SI value, Ji-Ji (Taiwan) Earthquake

キーワード: 強震動, 計測震度, SI 値, 台湾集集地震

1. はじめに

1999年9月21日午前1時47分に台湾中部において巨大地震が発生した。台湾中央気象局ではこの地震を震源の村名に因んで“921集集地震”と命名している。本地震は比較的小都市および山間部を直撃したために兵庫県南部地震のような大都市被災とは様相が異なるものであった。とくに兵庫県南部地震では断層が横ずれの破壊運動をしたのに対し、今回は東側が上盤となり西側の下盤に乗り上げるような逆断層運動¹⁾であった。そのために断層変位による被害が多く、とりわけ断層を横断していた橋やダム、鉄塔など大型構造物の被害は衝撃的であった。逆断層ずれによる上下盤の断層運動の違いから被災状況は異なってくるが、その差異がどれほどのものか十分把握されていない。そこで、断層距離を考慮して上下盤による地震動強度について分析を行った。

また、今回の地震では1gを越える最大加速度が幾つか観測されており、兵庫県南部地震で観測された818galを上回る地震であったことに相違ない。しかし、これまで経験したことのない地震動が実際の被害とどれほどま

で結びついているのか議論の余地が残るところである。

台湾地震時の断層破壊に関する研究としては、Iwataら²⁾が観測波形の逆解析に基づき、断層の破壊性状をシミュレートした上で、理論波形を算定しており、観測波形と理論波形はよい一致を示していること、また断層破壊の際、不均質なすべりがあったことを報告している。その結果を用いて、Irikuraら³⁾は、断層の北端では数百kineという大きな振幅で長周期パルスをもつ速度波形が観測されているものの、1000galを越える大きな加速度波形の観測された震源付近(断層南部)よりは被害が少なかったことを説明するために、2次元DEM、グリーン関数による重ね合わせ手法を用いて波形を推定している。その上で地震動強度と被害の大きさについて考察し、構造物の固有振動数に応じた地震動強度指標を用いることで被害の原因を説明している。本稿では災害強度指標である日本気象庁の計測震度およびSI値を用い、強震動との関係について分析を試みた。

さらに、午前1時47分の地震後もマグニチュード5を越える大規模な余震が多数発生していることと、震源近くの被災地で地震時の人的被災に関する調査を行った

際に、余震で亡くなった人も多くいたことが知られており本震・余震の被災強度についても検討する。また、同調査時に被災地でアンケートを実施し、アンケート震度を算出した。このアンケート震度について計測震度との適合を試みた。

2. 断層上下盤の強震動特性

台湾の活断層は、山脈から丘陵台地へ移行する地質構造に沿うように、北は台北縣から南は高雄縣に亘って全土に拡がっている。今回の地震では、台湾中部の車籠埔断層と大茅埔-双冬断層が破壊活動を引き起こしたと推定されている⁴⁾。今回のような逆断層タイプ破壊が生じた場合、ラディエーションパターンを考慮すると上下盤とも EW 成分が卓越すると考えられるが、下盤では必ずしもそうではない。上盤では硬地盤、下盤では比較的軟弱な堆積地盤となっているため、地震動特性が異なった可能性もある。そこで断層破壊面からの距離を軸に、上下盤の地震動強さを比較した。断層線を決めるにあたり、車籠埔断層の表面破壊線を参考に断層線を仮定した⁴⁾。車籠埔断層が約 30° の低角逆断層であったと推定されていることから、断層最短距離は上盤では各観測点から断層面までの距離を、下盤では地表上における断層線までの距離を採った。この断層距離に対して、上下盤の最大加速度、SI 値、計測震度で比較を行った。SI 値⁵⁾は次式で定義している。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} SvdT \quad (h=0.2) \quad (1)$$

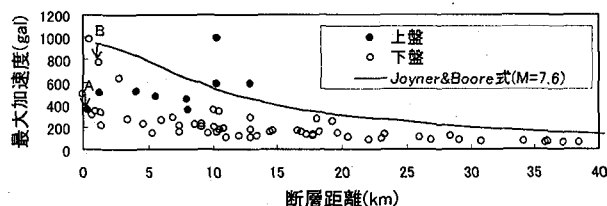


図-2.1 断層距離と最大加速度(EW 成分)

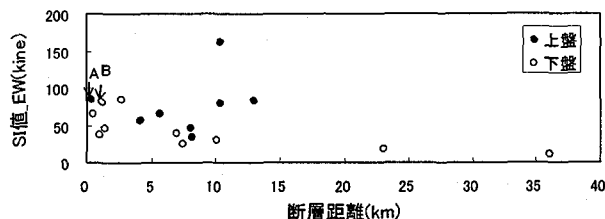


図-2.2 断層距離と SI 値(EW 成分)

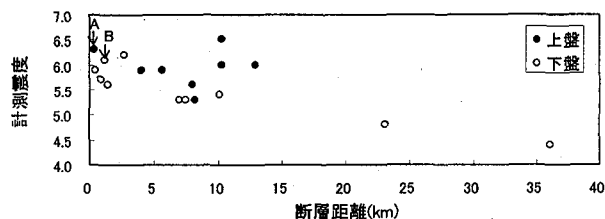


図-2.3 断層距離と計測震度

最大加速度が全体的に EW 成分に大きい傾向がみられたので、EW 方向成分の最大加速度を用い、SI 値も比較できるように EW 成分で算出したものを示している。最大加速度の各点は表面に断層が現れた地域の観測点を表している。また、SI 値、計測震度は断層距離を考慮し幾つかの観測点を選定し加速度記録から算出した。

図-2.1, 2.2, 2.3 は断層から離れるにつれ値が減衰している。下盤ではこの減衰が顕著であり、上盤では若干ばらつきがみられる。さらに、各観測点について詳細に比較する。図中に添字で示した観測点の A 地点は TCU052, B 地点は TCU065 である。この 2 観測点の最大加速度値では B 地点の方が大きい、SI 値ではほぼ同値、計測震度で比較すると A 地点の方が大きくなる。最大加速度では、上下盤ともに断層近辺で高い値を示しているが、計測震度や SI 値の災害強度指標で示すと上盤側が高くなるのがわかる。

それでは、これらの指標が実際の被害とどのように対応しているのか？南投縣の計測震度と家屋被害との関係を例に挙げる。図-2.4 は南投縣の市鎮郷別の全戸数に対する全壊・半壊の比率を家屋被害率⁹⁾として、その地域に近い観測点の計測震度との関係を示している。これによると計測震度と家屋被害は対応していると考えられる。

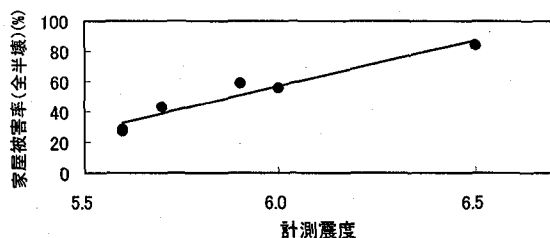


図-2.4 計測震度と家屋被害率

また、加速度の EW 成分と対応させるため SI 値も EW 成分で比較を行ったが、SI 値の水平成分でみると各観測点の最大 SI 値は必ずしも EW 成分であるとはいえない。図-2.5 に示すように、上盤側では EW 成分が高くなる傾向をもっているが、下盤では必ずしも上盤と同様ではなく、むしろ NS 成分が卓越している地点が多い。地震波のラディエーションパターンからいえば、断層直交(EW)方向が一般に卓越する。上盤は山地であり地盤が堅いた

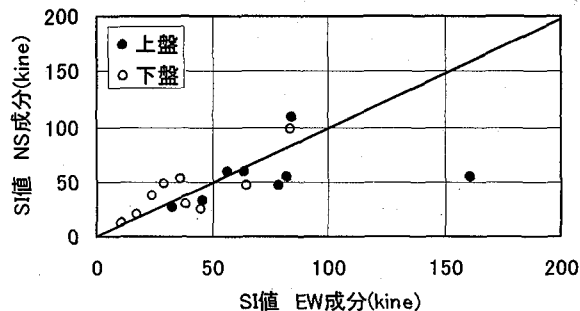


図-2.5 SI 値の方向特性

め EW 方向がそのまま卓越するが、下盤では盆地のような堆積地盤であるため表層地盤での波の反射や屈折が影響され NS 方向に卓越したとも考えられる。指標として SI 値を用いる場合、断層直交方向に必ずしも卓越するとは限らないことを考慮しなければならない。

結果として、逆断層の上下盤では断層からの距離が離れるにつれ地震動強さも減衰していき、下盤より上盤での被災強度が高いことがわかった。本地震が低角逆断層で上盤が断層面に近いことが主要因である。しかし、最大加速度は地震動強度を示せるがそれが災害強度を示すとは云い難い。SI 値は災害強度を示しているが、断層破壊パターンにより方向性までを考慮するのは難しい。一方、計測震度では 3 成分の地震動を組み入れたものにより 1 つの指標で示すことができ、計測震度は家屋被害と適合していることも確認できた。こうしたことから最大加速度値が、災害に直接結びついているとは言いきれない。

3. 最大観測加速度値と計測震度

前章では A, B の 2 測点の最大加速度(EW 方向)記録 348gal, 774gal と計測震度 6.3, 6.1 とを比較したところ加速度値が小さいが震度において大きくなった。加速度の NS 方向でも 438gal と 563gal で B のほうが大きい。そこで、この 2 地震波の違いについて計測震度を算出する段階ごとに比較することを試みた。

本来、計測震度は以下の算出手法により求められる⁷⁾。

1. 3 成分の加速度記録をそれぞれフーリエ変換し、

スペクトルを計算する。そのスペクトルに周期に関して周期 0.1~1.0sec に対応したフィルター、ハイカットフィルター、ローカットフィルターの 3 種類のフィルターを掛ける。

2. フィルター処理された加速度波形をベクトルのに合成する。
3. 算出したベクトル波について、その絶対値があるレベル a 以上で継続時間のパラメータ ($\tau_0=0.3\text{sec}$)をみたすような a の最大値を求める。
4. 河角の式に代入し、計測震度を算出する。

そこで、A, B 地点の水平成分のスペクトルについて比較したところ (図-3.1, 3.2), A 地点では両方向成分とも周期 2 から 3sec 程度で卓越したスペクトルが得られるが、B 地点では周期 0.7 から 2sec で卓越したしており、A 地点の方が長周期成分を持っていた。さらに、3 種類のフィルターで処理した場合、フィルターには周期 1~2sec から離れるにつれ小さな利得をもつ特性があるために、A 地点のスペクトルは卓越周期域で増幅される。

次に、フィルター処理された 3 成分の波形を合成し、ベクトル波形で比較を行った (図-3.3, 3.4)。A 地点では 500gal 程度の大きな振幅の数は少ないが一つの振幅の時間幅は広い。一方、B 地点では 200 から 500gal 程度の大きな振幅がいくつも見られるが時間幅は狭い。ここで、計測震度の算出方法通り、ある加速度レベルが継続する時間を 0.3sec に設定すれば、A 地点で震度 6.3, B 地点で震度 6.1 となり、A 地点の方が大きくなるとも考えられる。こうした周期の違いはフーリエスペクトルだけでなく、合成波形の振幅の時間幅にも影響している。

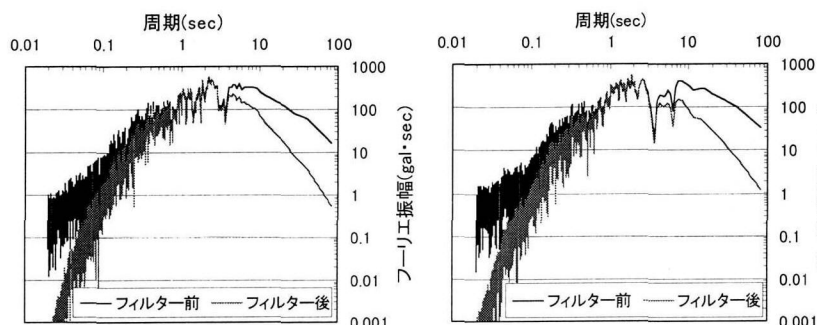


図-3.1 A 地点のフーリエスペクトル(左 EW 成分, 右 NS 成分)

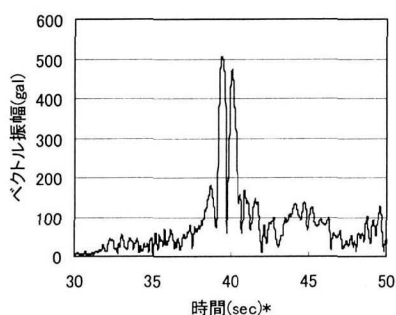


図-3.3 A 地点の合成ベクトル波形

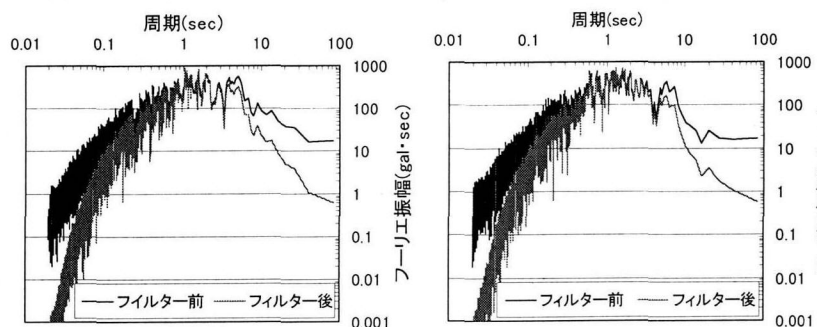


図-3.2 B 地点のフーリエスペクトル(左 EW 成分, 右 NS 成分)

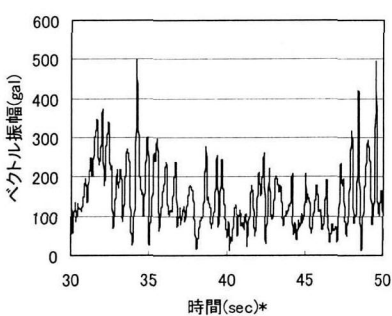


図-3.4 B 地点の合成ベクトル波形
(時間軸は 1999/9/20 17:00 からの時間)

4. 本震・余震の強震動と計測震度

震源近傍の南投縣集集鎮において、死者の死亡プロセスに関するヒアリング調査を行った。その結果、RC 家屋居住者の死者では、約半数が午前 1 時 47 分の本震の地震ではなく、その約 10 分後の余震で家屋が倒壊し生き埋めになって亡くなったことが明らかになった⁸⁾。また、多くの住民から「初めの地震では横揺れを感じ、次の地震では縦揺れを感じた。また、家屋の多くは後の地震で倒壊した」との証言を得た。

この実証言をもとに、集集鎮近辺の観測地地点での午前 2 時 03 分の余震記録から計測震度、SI 値について検討した。集集鎮の中心街に比較的近い水里(TCU078)の観測点では、本震・余震の計測震度がともに 5.6 が得られており、この地域では短時間のうちに 2 つの大地震を感じていることになる(表-4.1)。しかし、本震・余震の 2 地震の観測加速度波形をみると最大加速度は変わらないが主要動の継続時間が全く異なっており、一見同様の震度があるとは考えにくい(図-4.1)。そこで、先ほどと同様に計測震度の算出要領をもとに比較検証を行う。

加速度波形を FFT 変換し、フィルターを掛けたものを比較すると(図-4.2)、水平成分において本震では 0.1~2sec、余震では 0.2~0.3、0.5~0.8sec と本震・余震ともに周期 1sec 前後に卓越した振幅を持っていることがわかる。一方、鉛直成分において本震では非常に卓越した周期はみられないが、余震において 2~4sec の長周期域において卓越している。

また、フィルター処理されたスペクトルを逆フーリエ

表-4.1 水里(TCU078)での本震と余震

	最大加速度(gal)			計測震度	最大SI(kine)
	V	NS	EW		
本震	171	302	440	5.6	46
余震	220	257	444	5.6	54

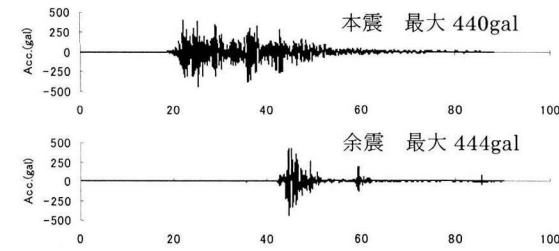


図-4.1 水里(TCU078)の加速度波形 (EW 成分)

変換し、ベクトル合成した波形をみると(図-4.3)、余震のベクトル振幅の方が局所的ではあるが大きな振幅を持っていることがわかる。本震では、いくつものピークを持っているが、余震ほど大きな振幅で時間幅のある合成振幅は得られなかった。ここで、河角の式に代入する継続時間 0.3sec をもつ最大振幅の加速度を考慮すれば、本震・余震ともに同じ震度を持つことがわかる。

次に余震で縦揺れが卓越したという住民の証言について検討を行う。水平成分では 0.1 から 0.8sec 程度、鉛直方向では 2~4sec の長周期で非常に卓越したスペクトルがみられた。人間の振動に対する感覚は長周期になるほど強い揺れとして感じる傾向がある。余震において鉛直方向の長周期震動を水平方向より感じたとするれば、住民の感覚証言に縦に揺れたという表現が出てくることも考えられる。

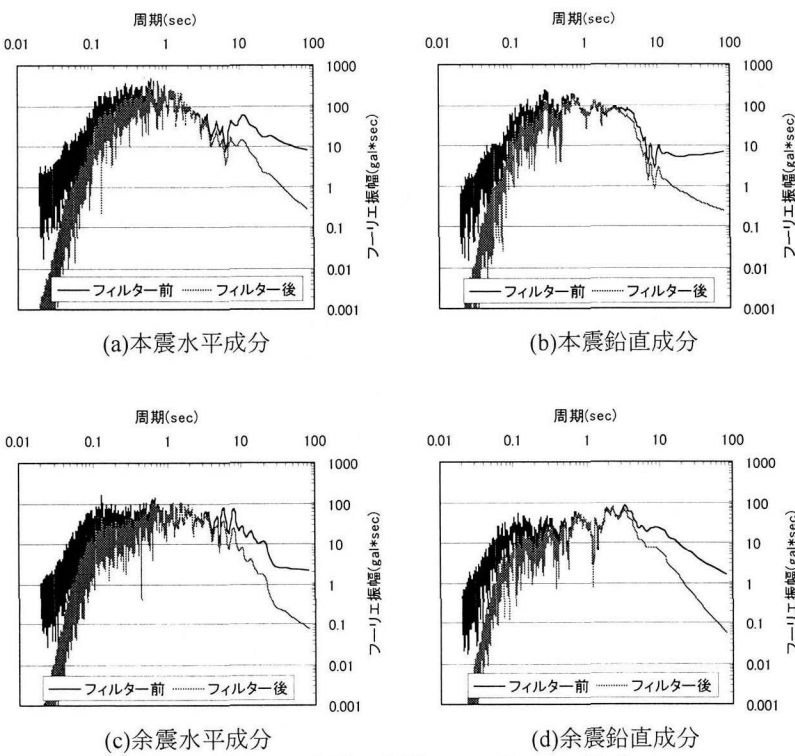


図-4.2 本震・余震のフーリエスペクトル

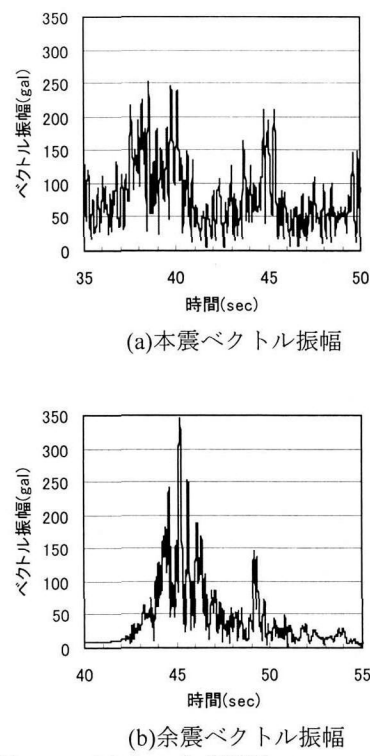


図-4.3 ベクトル合成振幅(時間は図-4.1に対応)

5. 強震動補間による計測震度とアンケート震度

5.1 アンケート震度

災害強度指標として計測震度や SI 値は、これまでの分析の中で被災度を示すには有効であるとわかってきている。しかし、これらの指標は地震計のある地点でしか算出できない。より高密度の震度データを得る場合、震度計で地震動を観測する以外にアンケート調査をもちいた震度を推定する方法があり、これは一般にアンケート震度と呼ばれている。

今回、震源地近傍の南投縣集集镇でアンケート調査を行い、アンケート震度でこの地域の震度を推定することを試みた。今回用いたアンケート評価法は、兵庫県南部地震の折りに実施されたアンケートをもとに質問項目や選択肢の内容を修正され、計測震度と対応するとともに高震度階に適用できるようにしたものである。そもそも、アンケート震度は中小規模の地震では多く検証され精度を確認されてきたが、震度7のような兵庫県南部地震の被災を想定していなかった。しかし、今回の地震では十分高震度階であると考えられたため、著者らにより修正したアンケート震度を用いた⁹⁾。集集镇の鎮公所（役所）の協力を得て、アンケートの配布回収をした。

集集镇で得られたアンケート震度を気象庁震度階との換算式でもって換算したところ、図-5.1 のような換算値の分布が得られた。集集镇での平均震度は5.9であった。中心街の震度分布は図-5.2 に示すとおりである。

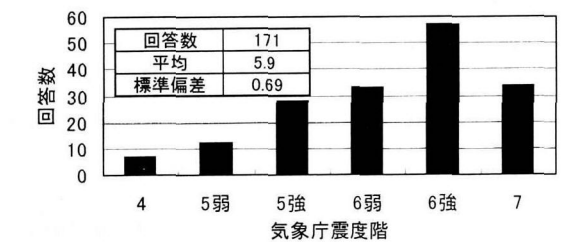


図-5.1 集集镇の震度分布

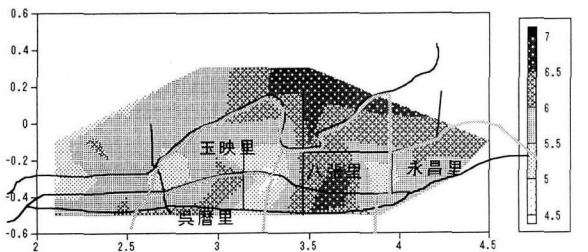


図-5.2 中心街のアンケート震度換算値分布(km 単位)

5.2 強震動補間による計測震度の推定

地震記録の未観測地点において強震動に形状補間法を用いて、任意地点の基盤波を算定し計測震度を推定することを試みる。本研究で用いた強震動補間の手法を図-5.2 のフローに示す。この形状補間法とは離散的な数値

で与えられた点の間の数値を補って連続関数として扱う手法である。フーリエ変換した振幅は形状補間するが、フーリエ位相はランダムな値であるため補間を行わず、地震波形の包絡形と位相差分スペクトルの形が類似していることを利用し、位相角の推定を行った¹⁰⁾。

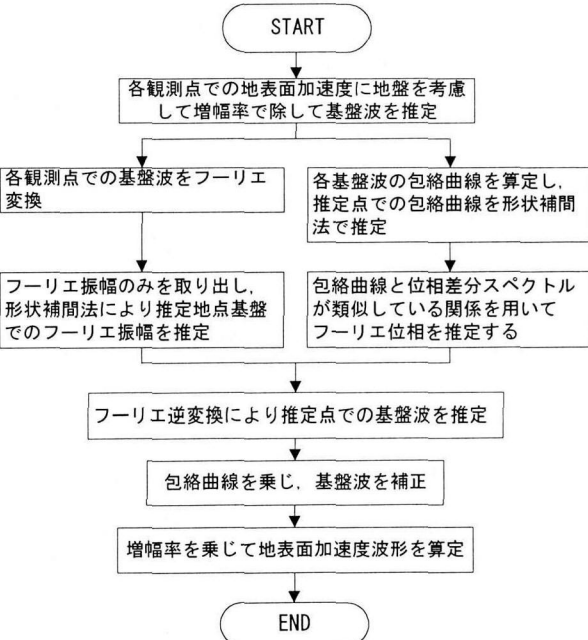


図-5.2 強震動補間の手順

今回形状補間するネットワークの節点に選定したのは、図-5.3 および表-5.1 に示す4 観測点である。集集镇が上盤にあるためできるだけ上盤側の節点で下盤の影響が少なく、ネットワーク内に推定点が入るように考慮した。

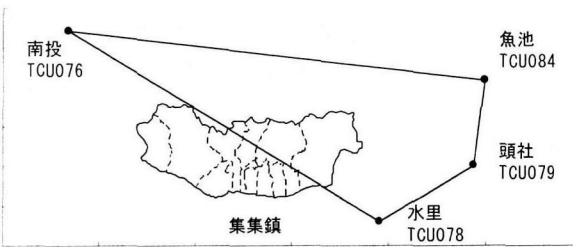


図-5.3 形状補間のネットワーク図

表-5.1 観測点の強震動と計測震度

節点	最大加速度(gal)			計測震度
	V	NS	EW	
水里	171	302	440	5.6
頭社	580	417	384	6.0
魚池	312	423	989	6.5
南投	275	420	340	5.7

集集镇は北側に山地、南側に川幅の広い川が流れており、地盤の状態が場所によって変わると考えられるが、地盤条件は2種地盤であるとして増幅させた。このようにして、集集镇内を幾つかの地域に分け補間により推定

された強震動の計測震度を算定したところ、5.8～6.1 の計測震度が得られた。先ほどのアンケート震度の換算値との関係（図-5.4）をみると、計測震度は補間により推定しているため、地盤の状況などに起因して5.8～6.1 である。また、アンケートの方は密度が高いので地盤の影響等により、5.0～6.8 程度にばらついている。しかし、両震度とも6.0 程度を平均に分散している。

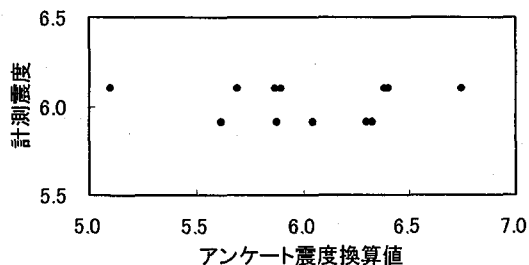


図-5.4 アンケート震度と推定震度

2 章の図-2.4 で計測震度と家屋被害率の関係を示したが、集集鎮の家屋被害率が 78%であることを考慮すれば、おおよそ震度 6 程度であることが推定され、アンケート震度と対応していると考えられる。修正アンケート震度も災害強度指標として有効であると考えられる。

6. まとめ

台湾集集地震での強震記録をもとに、災害強度指標である日本気象庁の計測震度および SI 値、アンケート震度を用い、強震動ならびに家屋被害などとの関係について分析を行った。以下のようにまとめられる。

- 断層の上下盤で検討したところ、最大加速度値は必ずしもそうではないが、SI 値や計測震度は断層上盤側で高いことが知られた。
- 実際の家屋被害と比較すると、計測震度とは適合しているが最大加速度値ではそうではなかった。また、SI 値は地震動の方向性による災害への影響を考慮するには必ずしも適切な指標ではない。
- 同じような最大加速度値であっても、計測震度を算出する際に用いるフィルターの高振幅に対応する周期成分を多く含む波形で計測震度が高くなる。
- 余震による災害強度についても分析したところ、ある地域では本震・余震が同等の災害強度をもつことが知られた。また、鉛直成分の長周期波が縦

揺れの地震を感じさせたとも考えられる。

- 著者らにより開発された修正アンケート震度表にもとづき現地調査を実施した。形状補間により推定した計測震度や家屋被害と比較・検証したところ若干のばらつきはあるが、平均値は実際の家屋被害と対応した。これにより、修正アンケート震度の有効性が確かめられ、今後災害強度指標として用いることができると考えられる。

謝辞

今回使用した強震記録は台湾中央気象局から提供されたものであり、ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) RCUSS and Kobe University: 921 Chi-Chi (TAIWAN) EARTHQUAKE reconnaissance and relief work, 2000
- 2) Iwata, T., Sekiguchi, H. and Irikura, K.: Rupture process of the 1999 Chi-chi, Taiwan, earthquake and its near-source strong ground motions, *Proceedings of International Workshop on Annual Commemoration of Chi-chi Earthquake*, Taipei, Taiwan, 2000
- 3) Irikura, K., Kamae, K. and Dalguer, L. A.: Source model for simulating ground motion during the 1999 Chi-chi earthquake, *Proceedings of International Workshop on Annual Commemoration of Chi-chi Earthquake*, Taipei, Taiwan, 2000
- 4) 内政部建築研究所：921 集集大地震建築震害調査初步報告，1999
- 5) 都市防災と環境に関する研究会：地震と都市ライフライン，京都大学学術出版会，p.270，1998.1
- 6) 台湾南投縣鎮公所：南投縣九二一大地震災民安置情形，内部資料，1999
- 7) 気象庁：震度を知る，ぎょうせい，pp.1-238,1996.9
- 8) 楢田泰子・高田至郎：台湾地震における集集鎮での死傷者発生要因と事後対応に関する分析，建設工学研究所論文集 42 号，2000.11（投稿中）
- 9) 高田至郎・上田直樹：計測震度に対応したアンケート震度の算出方法，第 10 回日本地震シンポジウム，C1-18，pp.631-636，1998.11
- 10) 高田至郎，尾崎竜三：地震動補間に基づく任意地点での加速度波形推定，建設工学研究所論文報告集，No. 40-B，pp.1-22，1998.11.

(2000 年 9 月 14 日 受付)