福岡県西方沖地震で観測された震度計データとその構造物破壊能

川瀬 博¹⁾

1) 正会員 九州大学大学院人間環境学研究院、教授 工博
e-mail:kawase@arch.kyushu-u.ac.jp

要 約

2005年3月20日福岡市北西の沖合約30kmを震源とする福岡県西方沖地震MJ7.0が発生した。福岡市内では震度6弱と報告された割に被害は全体に軽微であったが、市内中心部において中破レベルの被害建物が集中して発生した。そこでまず福岡市内で得られた震度計のデータを中心に福岡市内の強震観測記録を分析し、その構造物破壊能を構造物群の非線形応答解析による被害率予測モデルを用いて評価した。また町丁目別基盤深さを反映した一次元モデルと工学的基盤波から再現した強震波形を用いて被害率分布を計算した。その結果警固断層の北東側の基盤が深くなっているところで被害率も大きくなること、しかしその被害率は観測された実被害率よりもかなり大きいことがわかった。

キーワード: 震度計、サイト増幅、地下構造、計測震度、被害率

1. はじめに

2005年3月20日午前10時53分、福岡市の北西の沖合約30kmを震源とする「福岡県西方沖の地震」MJ7.0が発生した。震源域は普段よりほとんど地震のない地域であり、歴史的にも1700年の壱岐・対馬の地震(M7)しか見当たらない地震発生頻度の非常に低い地域であった。しかも海域においてM7クラスの地殻内地震が発生すること自体(伊豆半島沖を除いて)極めてまれな事象である。この地震により、震源域に近い玄界島では全家屋231棟の約半数が全壊し全員が島から避難したほか、福岡県全体では143棟の全壊家屋、352棟の半壊家屋が発生した(福岡県調べ)。福岡市内でブロック塀の崩壊による死者1名が出た他、負傷者1,186名が報告されている(同)。

福岡市内では震度6弱が報告されたが、その割に被害は全体に軽微であった。しかし、詳細な調査の結果、市内中心部「天神」の西側の舞鶴・大名・今泉といった地区で旧耐震のRC造で大破した建物が3棟、新耐震のRC造・SRC造で中破レベルの被害を受けた建物が数棟見ついている。その分布は警固断層の北東側に限って分布しているように見える。この被害分布の偏りはいかなる原因によるものかを明らかにすることは今後の防災対策を考える上で大変重要である。幸い、福岡県は兵庫県南部地震のあとに自治省からの地方交付金によって政令指定都市では各区に1台、他の市町村では市町村につき1台の震度計を整備し、震度の即時把握をしていたが、その記録装置には約60波の地震波が記録できるようになっており、本震の記録を回収することが可能であった。

そこで本論文では、福岡市内で得られた震度計のデータを中心に得られた本震の強震観測記録を分析し、その構造物破壊能を構造物群の非線形応答解析によって被害率を予測する長戸・川瀬モデル¹⁾²⁾で評価する。また我々は別途K-NET福岡(FK0006)の強震観測記録から表層をはぎとって工学的基盤波を求め、それをあらかじめ把握していた町丁目別基盤深さ³⁾から作成した一次元地盤構造モデルに入力して本震の強震波形を再現しているが⁴⁾⁵⁾、この波形に対しても同様の方法で構造物破壊能を求め、調査された被害率⁶⁾と比較する。

2. 観測強震記録

福岡市内には K-NET 観測点(FK0006)が 1 点、天神 5 丁目に設置されていた。また気象庁は中央区大濠にある福岡管区気象台で震度計観測を行っている。一方、県の設置した震度計は福岡市内の各区の消防署(中央区だけは市消防局)に置かれ、震度速報に利用されていた。この震度計は最新の記録約 60 波がメモリーに残される方式であり、そのデータ回収には特殊なカードリーダーを必要とする。事前にメーカー製カードリーダーを用意していた我々は震災発生の 7 時間後からデータ回収を開始したが、既に余震によって上書きされていた東区以外の観測点で無事データを回収できた。東区については、震度計観測地点に近い九州大学病院の大型免震病棟において地震観測を実施しており、その中の自由地盤の記録を代表値として利用する。また中央区大名の警固断層直近に建設されていた免震建屋(建設技研 CTI 福岡ビル)の免震基礎上の本震観測データについても、所有者から開示いただいております以下の解析に用いる。図 1 にこれらの観測点位置を示す。ここで二本の直線は警固断層の概略の位置(工学的基盤の肩の位置とそこから深くなっている谷底のライン)を示している。また町丁目別の第四紀層の層厚を色分けして表示している。

表層地盤層厚と強震観測点

図 1 福岡市内の強震観測点の位置と表層(第四紀層)地盤の層厚

3. 強震動の特徴

次に、これらの観測点で得られた強震動の波形の概要とその特徴について述べる。まず表 1 には震度観測点 7 地点・K-NET 福岡 (FK0006)・気象庁福岡管区気象台の計 9 地点の緯度・経度(気象庁より入手)、観測最大加速度、観測最大速度および計測震度(ただし本論文では小数点 2 桁まで計算)を示す。これから最大速度は中央区の震度計(以下 FK0S01 と表示)で最大となっていて、他の区の震度観測点とは開きがあることがわかる。

図 2 には FK0006 と FK0S01 の加速度波形を示す。図 3 には同じくこれらの波形を積分して求めた速度波形を示した。積分に際しては DC 成分を除去しさらに 20 秒をカットオフとするハイパスフィルターをかけた。これらの図から、両者の NS 成分はよく似ているが、EW 成分では FK0S01 にある S 波の立ち上がり直後の連続する周期 0.5 秒前後の顕著な短周期波が FK0006 には欠如しているという大きな違いが目される。一方、図 4・図 5 に示した建設技研(CTI)福岡ビルの波形を FK0S01 と比較すると振幅が少し大きいがよく似ていることがわかる。なお CTI の UD 成分は極性が逆と思われる。

表 1 福岡市内の主な強震観測点の座標と観測最大値・計測震度

観測点 コード	震度観測点所在地	緯度	経度	最大加速度 (Gal)	最大速度 (cm/s)	計測震度
FKOS01	福岡市中央区舞鶴3丁目	33.5875	130.3917	288.4	64.4	5.73
FKOS02	福岡市早良区百道浜1丁目	33.5864	130.3578	238.5	29.0	5.28
FKOS03	福岡市西区今宿東1丁目	33.5697	130.2794	231.2	21.2	5.23
FKOS04	福岡市城南区神松寺2丁目	33.5494	130.3775	361.8	15.6	4.72
FKOS05	福岡市南区塩原2丁目	33.5617	130.4286	141.1	22.5	4.80
FKOS06	福岡市博多区博多駅前4丁目	33.5817	130.4217	138.1	30.5	4.93
FKOS07	福岡市東区東浜1丁目	33.6111	130.4164	311.4	-	5.50
FKO006	福岡市天神5丁目	33.5936	130.4008	276.5	59.5	5.54
EDF	福岡市中央区大濠1丁目	33.58	130.377	189.1	29.5	5.15

(a) FKO006(K-NET 福岡)

(b) FKOS01(中央区震度計)

図 2 FKO006(K-NET 福岡)・FKOS01(中央区震度計)の強震観測波形(加速度)

(a) FKO006(K-NET 福岡)

(b) FKOS01(中央区震度計)

図3 FKO006(K-NET 福岡)・FKOS01(中央区震度計)の強震観測波形(速度)

図4 建設技研(CTI)福岡ビルの強震観測波形(加速度)

図5 建設技研(CTI)福岡ビルの強震観測波形(速度)

図6 FKOS01(中央区舞鶴)・FKO006(K-NET)・建設技研 CTI 福岡ビル(中央区大名)での観測波の減衰5%速度応答スペクトル(NS成分とEW成分)

図6にはこれら3つの観測波の水平成分の5%速度応答スペクトルを比較した。この図からFKO006は0.7秒から1.5秒付近のパワーがFKOS01(中央区震度計)ほどないことがわかる。CTI(中央区大名)はFKOS01よりさらにピークが大きく、また0.5秒に顕著なピークがあるのが特徴的である。この0.5秒のピークは上述のS波到達直後に見られる波群に起因しており、それはEW成分のスペクトルに顕著に見ることができる。NS成分で周期1.5秒付近の振幅が大きいのはディレクティビティに起因する⁷⁾。

以下中央区の観測波と同様にして、早良区FKOS02・西区FKOS03・城南区FKOS04の西側3区の震度計による観測加速度波形およびそれを積分した速度波形を図7・図8に、南区FKOS05・博多区FKOS06・東区(九大病院)での観測加速度波形およびそれを積分した速度波形を図9・図10に示す。早良区のNS成分などは中央区のそれと似ているが、西区はかなり断層走向の延長線からはずれるので地震波の形状が異なっている。また城南区は表層厚が薄いことを反映して短周期成分に富んだ波形となっていることがわかる。また東側(一部南側)の観測点も加速度波形で見ると短周期成分が多い地点が多いが、速度波形で見ると南区と博多区はよく似ており、断層の走向との関係で地震波の形状が決まっていることを示している。

(a) FKOS02(早良区震度計)

(b) FKOS03(西区震度計)

(c) FKOS04(城南区震度計)

図7 西側3区の震度計の強震観測波形(加速度)

(a) FKOS02(早良区震度計)

(b) FKOS03(西区震度計)

(c) FKOS04(城南区震度計)

図 8 西側 3 区の震度計の強震観測波形 (速度)

(a) FK0S05(南区震度計)

(b) FK0S06(博多区震度計)

(c) 東区九大病院地表

図9 東側3区の震度計の強震観測波形(加速度)

(a) FKOS05(南区震度計)

(b) FKOS06(博多区震度計)

(c) 東区九大病院地表

図 10 東方 3 区の震度計の強震観測波形 (速度)

図 11 福岡管区気象台での強震観測波形（加速度）

図 12 西側 3 地点での観測波の 5%速度応答スペクトル(NS 成分と EW 成分)

図 13 東側 3 地点での観測波の 5%速度応答スペクトル(NS 成分と EW 成分)

なお以上の K-NET および自治体設置の震度計以外に中央区大濠の福岡管区气象台における 95 型震度計でも強震観測記録が得られている。図 11 にその加速度波形を示しておいたが、早良区と城南区の中間的な波形となっていることがわかる。図 12・図 13 には西側 3 地点と東側 3 地点の水平成分の速度応答スペクトルを比較しておく。

4. 構造物破壊能と実際の被害率

我々は一般的な RC 造建物の被害予測を地震動特性に即してシミュレートするために、非線形応答解析建物群モデル¹⁾²⁾を開発し、これまで多くの地震に適用してその妥当性を検証してきたが、それを今回の福岡市内の強震動に対しても適用してみた。このモデルは神戸市の灘・東灘区の観測被害率を再現するように作られたものなので、その地域の 1995 年当時の建物耐力を基準としたモデルであるが、別途我々は兵庫県南部地震で被害を受けた RC 造建物の降伏耐力は福岡市の RC 造建物のそれとほぼ同じと推測している⁸⁾ので、以下では地域係数の影響を考慮せずに解析した。対象としたのは各区の震度計波形で、建物種別は木造および RC 造(3 階建・6 階建・9 階建・12 階建のそれぞれ旧耐震と新耐震に区分)である。得られた結果を表 2 に示した。この結果より、中央区舞鶴の波形だけが大幅以上の被害をもたらす大きな破壊力を有しており、木造では 13%、RC 造では 9 階建の旧耐震の建物に対してのみ 3%の被害率をもたらすと推定されたことがわかる。RC 造 9 階建旧耐震の建物モデル群のうち、最も耐力の低い建物について、高さ方向の相対層間変形角応答の分布を図 14 に示すが、1 階に変形が集中しており、耐力が相対的に低い建物では限界を超える入力により一度大変形がある層で生じるとその層に変形が集中し制御が困難であることを示している。なおこの建物の一次共振周期は 1 秒である。

表 2 震度計観測波形と長戸・川瀬モデルによる推定大破以上被害率(%)

No	観測地点	計測震度	PGA (Gal)	PGV (cm/s)	木造	RC 造							
						3F 新	3F 旧	6F 新	6F 旧	9F 新	9F 旧	12F 新	12F 旧
1	中央区	5.73	288.4	64.4	13.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0
2	早良区	5.28	238.5	29.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	西区	5.23	231.2	21.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	城南区	4.72	361.8	15.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	南区	4.80	141.1	22.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	博多区	4.93	138.1	30.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

図 14 RC 造 9 階建旧耐震の長戸・川瀬モデルのうち最も低耐力のモデルの高さ方向の相対層間変形角応答の分布 (点線は破壊クライテリアである 1/30 のライン)

表 3 FK0006 での地盤モデル

No.	層厚 (m)	Vs (m/s)	密度 (g/cm ³)
1	2	110	1.78
2	6	130	1.76
3	4	150	1.66
4	3	180	1.94
5	10	320	1.87
6	-	600	1.90

図 15 一次元地盤モデルで推定した地表面波形の計測震度分布(水平 2 成分から計算)

図 16 一次元地盤モデルで推定した地表面波形の中央区中心部での最大速度分布

5. 中央区での推定強震動波形による被害率

最後に、我々は別途 K - NET 福岡 (FK0006) の強震観測記録から表層をはぎとって工学的基盤波を求め、それをあらかじめ把握していた町丁目別基盤深さ³⁾から作成した一次元地盤構造モデルに入力して本震の強震波形を再現している⁴⁾⁵⁾、この波形に対しても前章と同様の方法で構造物の被害率を推定し、調査された観測被害率⁶⁾と比較した。

地震動の計算方法は概略以下の通りである。まず、地下構造調査結果が深さ 20m まで得られている K-NET 観測点 FK0006 における基盤深さを図 1 の町丁目別の基盤深さ分布に基づき 25m とし、深さ 20m までの PS 検層結果に基づき、最下層が 25m まで続いているものとして表 3 に示す地下構造を仮定した。また Q 値は $Q = 5f$ (f : 周波数) とした。この構造を用いて FK0006 の波形から逆算工学的基盤波を推定した。この逆算工学的基盤波の最大速度は 52cm/s であった。なお地盤の非線形性は顕著には見出せないことが報告されている⁵⁾⁹⁾のでここでは線形と仮定している。

つぎに層厚が表 3 に示した FK0006 地点での各層の層厚比で変化するとし、各町丁目の代表地点での 1 次元地盤モデルを作成し、その増幅率と逆算工学的基盤波から地表での波形を推定した。このとき地震動は主軸成分である N20°E 成分を用いた。図 15 にはこうして得られた地表面地震動の計測震度分布を示す。また図 16 には中央区中心部での最大速度分布のクローズアップを示す。最大速度は、工学的基盤の深さ分布の形状と同様に、舞鶴や大名など警固断層の北東側に沿った限られた地域で大

きく、建物被害が集中した地域とほぼ対応している。なお、以上の計算では、距離補正も放射特性の補正もしていないため、FK0006 よりも震源距離の大きなところや震源走向から大きくはずれるところでは過大評価となっている可能性がある。松島・他¹⁰⁾は、同じ表層地盤を三次元でモデル化して、逆算工学的基盤波を用いて最大速度分布を計算し、図 16 とほぼ同じ最大速度分布を得ている。そのことから、警固断層をはさんだ両側での福岡市中心部での最大速度の違いは、表層地盤の一次元的な地盤増幅で第一義的に説明できるものと考えられる。また得られた推定波と FK0S01 地点と CTI 地点で観測波と比較したがよく一致した。

この地表面での推定波を用いて構造物破壊能を把握する。用いたモデルは同じ長戸・川瀬モデルである。図 17・図 18 に得られた木造建物と RC 造 9 階建旧耐震建物の被害率(大破・倒壊率)分布を示す。予想通り基盤深さの深い警固断層北東沿いの地区だけで大きくなっていることがわかる。なお RC 造に関しては 9 階建旧耐震の建物以外のカテゴリでは被害率はほぼゼロであった。

図 16 に示したように、この地区の最大速度は 75cm/s 以上となっており、その応答スペクトルレベルは図 6 から推測できるように周期 1 秒から 2 秒の間で 150cm/s を超えている。一方、実際の被害⁶⁾では、RC 造の中破以上率は高々 1% 程度(ただしその平均化範囲はかなり広域である)となっており、明らかに予測被害率は過大となっていることがわかる。木造の場合はその中破以上率は 5% 程度であった。なおいずれの構造種別においても大破建物は数えるほどしかなく、被害率は出されていない。この差の原因の解釈として、福岡市における建物の耐力が神戸市における建物の耐力よりも平均的に大きいと考えることも可能である。木造に関していえば神戸市の灘・東灘区の震災の帯における建物は床面積も小さいものが多く、また大きな被害率の原因として土葺き瓦屋根の重さが指摘されており、地域的背景によって神戸の当時の建物の方が相対的に弱かった可能性もゼロではない。特に木造については年代区分を考慮しておらず、その地域差も被害率の差に寄与する。しかし RC 造ではこうした耐力の地域性はあまり考えられず、年代区分も考慮しているので、地域係数が 0.8 である福岡市内の建物の方が 1.0 である神戸市内のそれより平均的に高耐力であるとは考え難い。この差はおそらく、100cm/s 以下の中程度の入力に対する挙動とそれ以上の震度 7 クラスの入力に対する挙動にはギャップがあり、両者は連続的には対応していないことによるものと推測される。すなわち、ある程度以下の入力に対してはすべての二次的構造部材が有効に作用し、かなり耐力の増大に寄与するが、入力がさらに大きくなるとそのうち軽微な二次部材は耐力を喪失し、主要構造部材と大変形にも追従できる良質の二次部材だけが抵抗するようになると想定されるので、入力レベルがかなり大きくなるまでは長戸・川瀬モデルでは被害率が過大評価されるのではないかと。この点については今後も検討を重ね、長戸・川瀬モデルを改良していきたい。

木造建物の被害率

図 17 推定地震波による木造建物の計算被害率(大破以上率)の分布

RC造建物の被害率(9F_OLD)

図 18 推定地震波による RC 造 9 階建旧耐震建物の計算被害率(大破以上率)の分布

6. まとめ

本論文では、福岡市内で得られた震度計のデータを中心に得られた本震の強震観測記録を分析し、その構造物破壊能を長戸・川瀬モデルで評価するとともに、K-NET の観測記録 FK0006 から求めた工学的基盤波と町丁目別基盤深さから推定した一次元地盤モデルを用いて再現した本震の強震波形に対しても同様の方法で構造物破壊能を求め、調査された被害率と比較した。その結果、本震記録のうち起震断層の延長線上の福岡市中心部においては、断層直交成分に近い方向でディレクティビティによると思われる1秒を中心とする「やや短周期」速度パルスが卓越し、工学的基盤での最大速度で50cm/s以上に達していたこと、その速度パルスは表層(第四紀層)で増幅され、表層厚の厚い警固断層北東側で振幅が大きくなっていること、その再現波を用いた被害率評価では、実被害に見られた警固断層北東部での被害の集中を説明できるものの、実被害率に比べ計算被害率はかなり高く求められたこと、などが指摘された。今回のような震度6弱レベルの入力に対する全体に軽微な被害を予測するためには、二次部材の挙動を定量的に反映したモデルのチューニングが必要と考えられる。

謝辞

本報告では気象庁および福岡県の震度計データ、防災科研のK-NETデータ、建設技術研究所の免震建物データ・九州大学病院免震棟データを利用しました。便宜を図っていただいた関係者に深く感謝の意を表します。また解析には川瀬研究室のナランマンドラ氏・セチキン チタク オズグル氏の協力を得ました。なお本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(特別研究促進費)「福岡県西方沖の地震の強震動と構造物被害の関係に関する研究」(研究代表者:川瀬博)および「大都市大震災軽減化特別プロジェクト 地震動(強い揺れ)の予測」の研究資金(分野担当者:岩田知孝)によって実施しています。

参考文献

- 1) 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集, 第544号, 31-37, 2001.6.
- 2) 長戸健一郎・川瀬博: 観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物被害予測モデルの構築と観測強震動への適用, 第11回日本地震工学シンポジウム, 2002.11.
- 3) 伊藤茂郎・川瀬博: 統計的グリーン関数法による強震動予測手法の検証と仮想福岡地震への適用, 日本建築学会構造系論文集, 第540号, 57-65, 2001.2.
- 4) 佐藤智美・松島信一・川瀬博: 2005年福岡県西方沖の地震での福岡市中心部での強震記録と表層地盤増幅, その2 逆算工学的基盤波と表層1次元モデルによる再現波, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 119-120, 2005.8.
- 5) Toshimi Satoh and Hiroshi Kawase: Simulation of strong motions in Fukuoka City during the 2005 West Off Fukuoka Prefecture Earthquake with special reference to thick Quaternary sediments around the Kego fault, Earth Planets Space, Vol. 58, No.1, 105-110, 2006.
- 6) 河野昭彦・井上一朗: 非木造建物の被害, 2005年福岡県西方沖地震災害調査報告書, 日本建築学会, 68-110, 2005.8.
- 7) 梅田尚子・川瀬博: 福岡県西方沖地震の三次元有限差分法による強震動シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 17-18, 2006.9.
- 8) 包 那仁満都拉・川瀬博: 常時微動計測に基づく中低層RC造建物の振動特性とその耐震性評価, 日本建築学会構造系論文集, 577, 29-36, 2004.3.
- 9) Kawase, H. and Y. Nejime: Separation of Observed Ground Motion Spectra to Get Site Amplification Factors: Linearity and Nonlinearity, 3rd Intern. Sym. on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, Paper ID=052, 2006.
- 10) 松島信一・佐藤智美・川瀬博: 2005年福岡県西方沖の地震での福岡市中心部での強震記録と表層地盤増幅, その3 警固断層沿いの表層三次元構造の影響評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 121-122, 2005.8.

(原稿受理: 2006年4月18日)

(登載決定: 2007年1月22日)

Strong Motion Data of Intensity Seismometer (Shindo-kei) during the West off Fukuoka Earthquake of 2005 and Their Structural Damage Potential

KAWASE Hiroshi ¹⁾

1) Member, Professor, Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University, Dr. Eng.

ABSTRACT

On March 20, 2005 the West off Fukuoka earthquake of MJ7.0 occurred at about 30km northwest of Fukuoka City. Although 6 on the JMA seismic intensity scale were reported at several points in Fukuoka, structural damage was not so devastating as expected from this intensity. Still, we have clear concentration of the damaged buildings in the central part of the city. Thus, we analyze the observed strong motion record in Fukuoka. First basic characteristics were summarized, and then the structural damage potential of these strong motions (=destructive ability) was evaluated using the damage ratio prediction model, in which we use a nonlinear response analysis method for a set of structures with different strengths (so-called Nagato-Kawase model). Then, the damage ratio distribution was calculated using the strong motion waveforms reproduced from the 1-dimensional ground models reflecting the shallow soil layers down to the engineering bedrock at every small districts. It turned out that the damage ratios also becomes large, as observed, in the areas where the bedrock depths are deep, namely in the northeastern side of the Kego fault. However, the simulated damage ratios are larger than the observed damage ratios so that we have a space for improvement in our simulation model of damage.

Key Words: Intensity seismometer, Site effects, Ground structure, Instrumental seismic intensity, Damage ratio