

3.3 強震動と建物の被害

3.3.1 建物の被害

6月14日午前8時43分に岩手県内陸南部を震源とするM7.2の地震が発生し、岩手県奥州市、宮城県栗原市で震度6強、宮城県大崎市で震度6弱など、岩手県南部から宮城県北部にかけて強い揺れが観測され、山間部を中心に地盤崩壊などにより、死者17名、行方不明6名、負傷者426名などの人的被害や土木構造物の被害が発生した。

本節では建物の被害を中心に、筆者らのグループが行った被災度区分判定を含む被害調査、建物被害のあった地区での余震観測、微動観測、および地震応答解析による本震時の地震応答推定などの内容について報告する。

3.3.1.1 調査の概要

地震発生当日の6月14日から16日にかけて強震観測点周辺と複数の学校建築物の被害調査を簡単に行ったが、その際の情報をもとに構造躯体に比較的大きな被害が発生した大崎市立上野目小学校・宮城県岩ヶ崎高校について、後日あらためて被害調査を行い、部材の損傷状況などを確認した。上野目小学校については、近隣にほぼ同年代・同形式の西大崎小学校と真山小学校があるが、構造躯体に損傷を受けたとみられるのは上野目小学校だけであった。このため、西大崎小学校、真山小学校についてもごく簡単な被害調査を行った。図-3.3.1に調査した学校建築物と近隣の強震観測点の位置関係をまとめる。被害調査後、上記の4校について、建物の振動特性を把握し、本震時の建物応答の検討に用いることを目的として、7月2日から8月1日までの約一か月に渡って地盤および建物内における余震観測を行った。

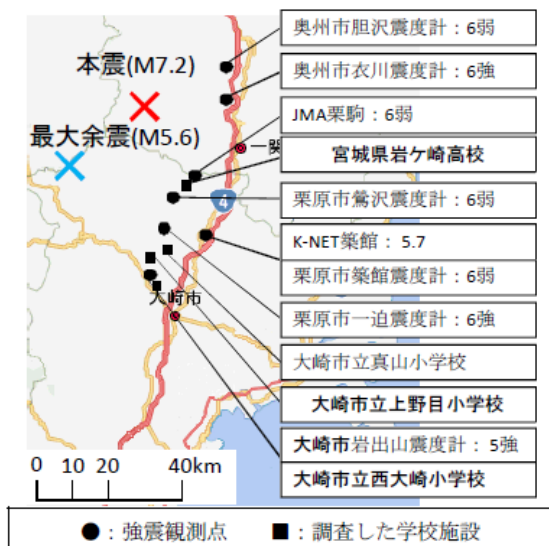


図-3.3.1 調査した学校施設と付近の強震観測点

3.3.1.2 地震の概要

今回の地震の概要を表-3.3.1に示す。この地震により、岩手県奥州市、宮城県栗原市の2か所で震度6強の揺れが観測された。死者・行方不明者合わせて23名などの人的被害が発生したが、地盤崩壊などが原因で、建築物の被害は比較的少なく、建築物の振動被害による人的被害は少ないと報告されている。

表-3.3.1 地震の概要

発生日時		6月14日午前8時43分
震央		岩手県内陸南部 39° 01.7'N, 140° 52.8'E
震源深さ		約8km
規模		M7.2
震度	6強	岩手県奥州市, 宮城県栗原市
	6弱	宮城県大崎市
	5強	岩手県北上市, 一関市, 金ヶ崎町, 平泉市 宮城県加美町, 涌谷町, 登米市, 美里町, 名取市, 仙台市, 利府町 秋田県湯沢市, 東成瀬村
人的被害		死者17名, 行方不明6名, 重傷70名, 軽傷356名
住家被害		全壊30棟, 半壊146棟, 一部損壊2521棟

(平成20年7月2日14時の内閣府発表より¹⁾)

3.3.1.3 強震観測記録

今回の地震による強震記録は防災科研 K-NET²⁾および気象庁(JMA)³⁾によって公開されている。調査した上野目小学校、岩ヶ崎高校周辺の各観測点における観測地震動とその周辺の被災状況を簡単にまとめたものを表-3.3.2に示す(被害の詳細は文献⁴⁾を参照されたい)。

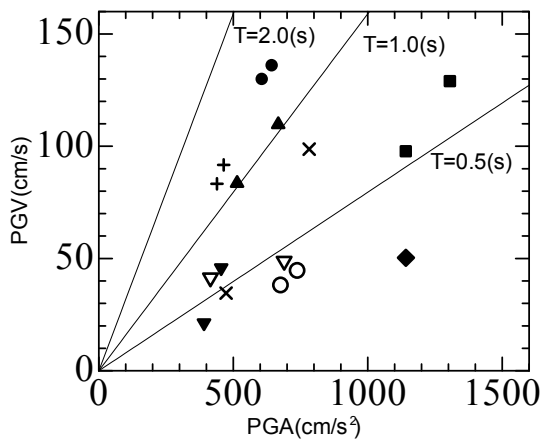
また、地震の建物応答への影響を検討するため、調査した学校施設に近いK-NET 築館、JMA 栗原市栗駒と過去の主な地震の観測記録の最大加速度(PGA)ー最大速度(PGV)の関係を図-3.3.2に示す。なお、図中の3本の点線は等価周期を表す。また、減衰5%および10%で求めたSa-Sdスペクトルを図-3.3.3に示す。

K-NET 築館の強震記録は、0.2~0.3秒以下の短周期が卓越する地震動であり、JMA 栗原市栗駒も周期1秒程度を超える成分は少ない地震動で、建物被害への影響は比較的小さいと思われる。またPGAおよびPGVの値も兵庫県南部地震や新潟中越地震と比較すると小さい。

震度6強を観測した自治体震度計の加速度波形は公開されていないが、今回の地震で震度の割に比較的建物被害が少なかったのは、このように地震動が短周期で卓越するものであったこと、PGAおよびPGVが比較的小さかったことが幸いしたと考えられる。

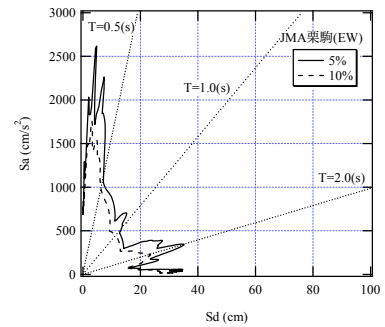
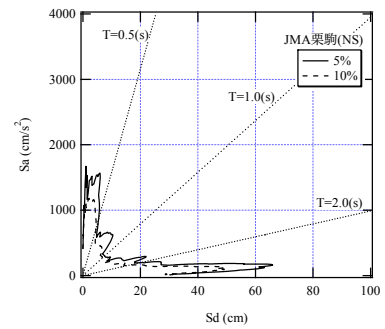
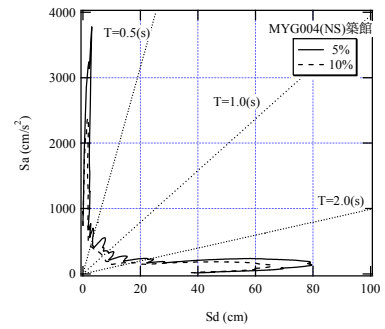
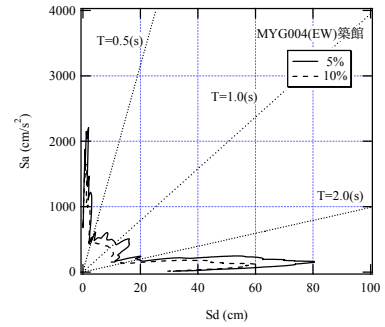
表一3.3.2 各観測点の観測地震動

観測点	方向	PGA (gal)	PGV (cm/s)	計測 震度	観測点と周辺の状況
栗原市一迫 (震度計)	NS	823		6.2	栗原市一迫総合支所内に 設置。
	EW	793			
	UD	417			
栗原市築館 (震度計)	NS	740		5.7	築館中心街の栗原市役所 に設置。
	EW	678			
	UD	224			
栗原市栗駒 (JMA)	NS	415	41.4	5.9	
	EW	689	48.8		
	UD	281	14.9		
K-NET 築館	NS	740	44.4	5.7	築館の中心街から少し離 れた低い丘の上の築館中 の近くに設置
	EW	678	37.9		
	UD	224	14.0		
奥州市衣川 (震度計)	NS	1608		6.1	奥州市衣川総合支所内に 設置。支所の建物は非構 造壁にひび割れ。
	EW	1607			
	UD	636			
奥州市胆沢 (震度計)	NS	342		5.5	奥州市胆沢総合支所内に 設置。
	EW	574			
	UD	275			
K-NET 一関	NS	219	22.6	5.0	一関消防署の敷地内に設 置。
	EW	287	25.4		
	UD	210	11.8		



過去の被害地震		岩手宮城内陸地震	
● JR鷹取	} 兵庫県南部地震	○ K-NET築館	} 新潟県中越地震
◆ JMA川口		▽ JMA栗原市栗駒	
■ K-NET小千谷	} 新潟県中越地震		
× K-NET穴水			
+	} 能登半島地震		} 新潟県中越沖地震
△ JMA輪島			
▲ K-NET柏崎	} 新潟県中越沖地震		
▼ K-NET小千谷			

図一3.3.2 最大加速度－最大速度の関係



図一3.3.3 Sa-Sd スペクトル (h=5%, 10%)

3.3.1.2 学校建築の被害

前述のように、今回の地震では上野目小学校及び岩ヶ崎高校大きな被害が生じた。筆者らのグループで調査した範囲で建設年代・耐震補強の有無と学校建築の被害の関係をまとめると以下のとおりとなる。

1) 上野目小学校：2 階建て RC 造の普通教室棟は 1963 年、同じく RC 造の新棟は 1982 年の建設。次節で述べるように、普通教室棟に大きな被害が生じているが、新耐震設計法に基づき建設された新棟は無被害。被災前に普通教室棟に耐震補強などは施されていない。

2) 西大崎小学校（写真－3.3.1）：上野目小学校普通教室棟とほぼ同形式の校舎で 1964 年建設。1 階柱に軽微なひび割れが見られたが大きな被害は生じていない。被災前に耐震補強などは施されていない。

3) 真山小学校（写真－3.3.2）：上野目小学校普通教室棟とほぼ同形式の校舎で 1964 年建設。後者にはほぼ被害は見られなかった。被災前に耐震補強などは施されていない。

これら 3 つの小学校はほぼ同年代に、ほぼ同形式で建設されている。（上野目小学校の全景は次節参照）

4) 岩ヶ崎高校：3 階建て RC 造校舎 3 棟。いずれも 1982 年 3 月の竣工となっており、新耐震設計法直前の建物である。後述のように、上野目小学校ほどではないが比較的大きな被害が生じている。上野目・西大崎・真山小学校に比べると、震源に近い位置にあり、JMA 栗駒観測点に近い。被災前に耐震補強などは施されていない。

5) 栗駒中学校：校舎は 1973 年、屋内運動場は 1974 年の建設。以下の優奈被害報告がなされている⁴⁾。校舎は 2007 年 12 月から耐震補強工事を実施中で、外付けブレース補強が完了。開口付き RC 造耐震壁補強を行い、耐震補強工事中（開口付き RC 耐震壁と外付け鉄骨ブレース）であった。屋内運動場は鉄骨造屋根面の耐震補強済みで、被害はなかった。校舎には 9m スパンの教室の柱際に出入口開口を設けたタイプの RC 補強耐震壁があり、開口上部の梁は垂れ壁などによる補強がされておらず、せん断ひび割れが発生した。廊下窓下の有孔レンガ腰壁のせん断ひび割れや、教室間のコンクリートブロック壁の一部で、ブロックの破損・落下が生じた。

6) 宝来（たからぎ）小学校（写真－3.3.3）：RC 造 2 階建ての校舎は 1992 年建設であり、他に屋内運動場および幼稚園棟がある。校舎棟と幼稚園棟はほぼ無被害であったが、屋内運動場の ALC 版が落下する被害があった⁴⁾。



写真－3.3.1 西大崎小普通教室棟の全景



写真－3.3.2 真山小普通教室棟の全景



写真－3.3.3 宝来小学校屋内運動場 ALC 版の落下

3.3.1.3 上野目小学校の被害⁵⁾

建物調査概要

大崎市立上野目（かみのめ）小学校は、宮城県大崎市岩出山地区の山麓に位置しており、1963 年および 1982 年建設の 2 階建 RC 造校舎 2 棟および屋内運動場がある。新耐震設計法により設計された 1982 年建設の管理教室棟は無被害であったが、1963 年の普通教室棟（写真－3.3.4）と屋内運動場に被害が生じた。被害調査は被害が見られた普通教室棟と屋内運動場について行っている。

なお、上野目小が所在する大崎市内には、教室棟に関して建設時期、構造形式がほぼ同じである真山小と西大崎小が位置しているが、上野目小に大きな建物被害が見られたのに対し、真山小と西大崎小では目立った建物被害は見受けられなかった。



写真－3.3.4 上野目小普通教室棟の全景

耐震診断結果

上野目小学校は 2006 年度に耐震診断⁶⁾（2 次診断）が行われている。桁行方向について診断結果の概要を表－3.3.3 に示す。普通教室棟の柱断面リストを図－3.3.1.4 に、柱梁伏図を図－3.3.5 に示す。診断の結果、1,2 階とも、柱は靱性指標 $F=2$ 以上の曲げ柱で靱性型の建物と評価され、 I_s 値が目標値 $I_{so}=0.7$ を上回り耐震補強不要と判断された。

表－3.3.3 普通教室棟 耐震診断結果

階	C	F	E_0	S_D	T	I_s	$C_{Tu} \cdot S_D$
2	0.675	2.59	1.311	0.975	0.979	1.251	0.493
1	0.469	2.25	1.056			1.008	0.457

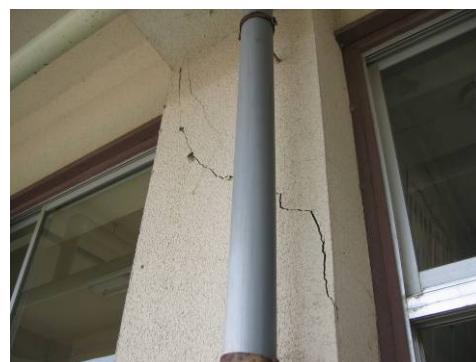
被害状況と被災度区分判定

・普通教室棟（RC 造 2 階建、1963 年建設）

図－3.3.5 中には被災度区分判定⁷⁾による柱の損傷度を示した。1 階では、柱 22 本のうち、4 本に幅 10mm を超える大きなせん断ひび割れが生じ（損傷度 IV・写真－3.3.5）、3 本にも大きなせん断ひび割れが生じた（損傷度 III・写真－3.3.6）。1 階の南構面は東方向に 10mm 程度の残留変形が生じていた。



写真－3.3.5 1 階 Y0-X6 柱(損傷度 IV)



写真－3.3.6 1 階 Y0-X8 柱(損傷度 III)

	C1		C2	
	2 階	1 階	2 階	1 階
主筋	4-22φ	4-19φ	8-22φ	10-22φ
帯筋	9φ@200	9φ@200	9φ@200	9φ@200

図－3.3.4 柱断面リスト

柱断面は、図－3.3.4 に示したように 450mm×450mm とこの規模の建物としては小さく、また、1971（昭和 46）年以前の建築基準法により設計されており、設計図書によると帯筋も 9φ@200 と少ないため、上記のような大きなせん断ひび割れが生じた柱は、せん断耐力、及び、軸力支持能力を失う直前の状態であった。

2 階の被害は、1 階と比較して全体的に損傷度は小さく、損傷度 II 以下の柱が半数を占めたが、局所的に損傷度の大きい柱も見受けられ、Y1- X2 の柱には幅 7mm のせん断ひび割れが生じた（損傷度 IV）。2 階も 1 階同様、南構面において東方向に 10mm 程度の残留変形を生じている柱が多数見られた。

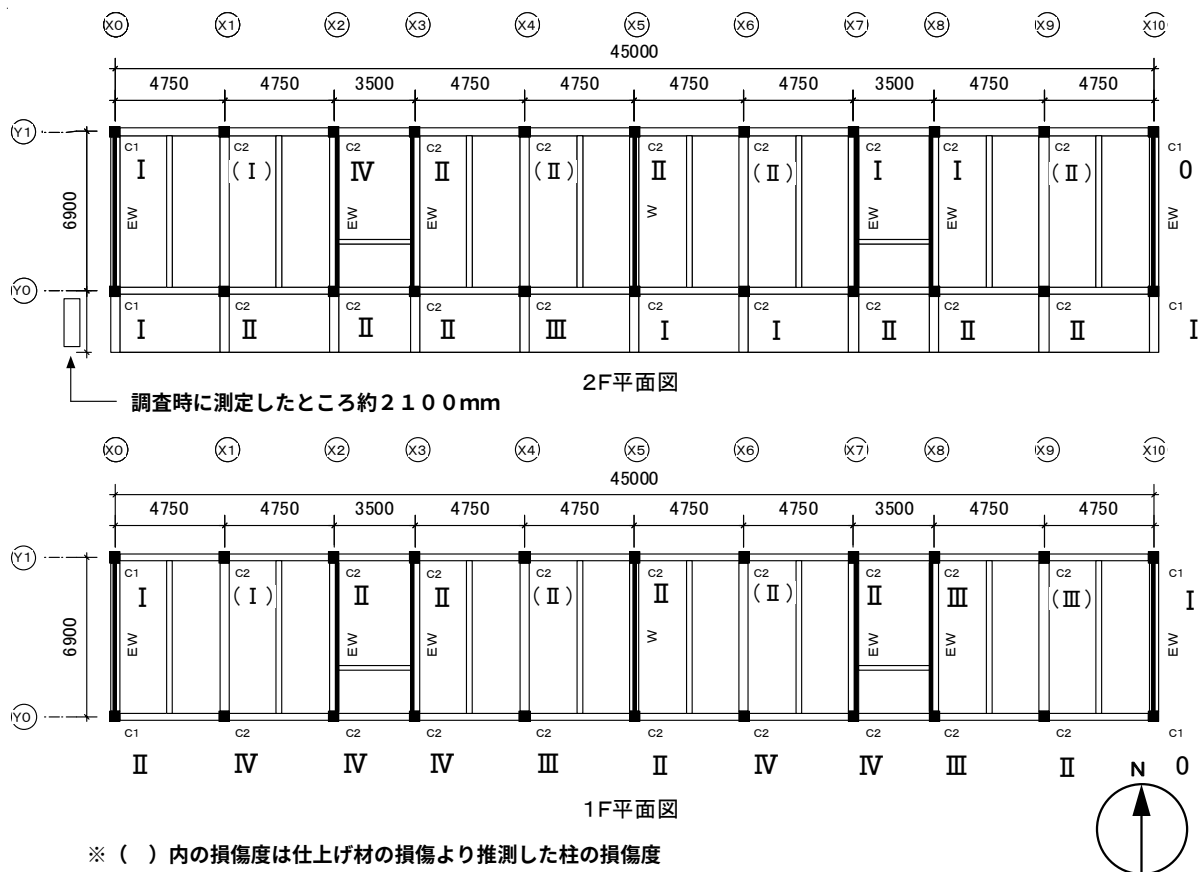


図-3.3.5 上野目小学校 柱伏図と柱の損傷度

Y方向壁には、面外に変形によると思われるひび割れが壁下部水平方向に生じたほか、階段の踊り場部分のかぶりコンクリートの剥落や内壁の一部脱落が見られた。

被災度区分判定⁷⁾の結果、1階桁行方向の残存耐震性能率 $R=49\%$ 、被災度は「大破」となり、「応急措置または応急復旧」が必要と判定され、復旧を行うまで使用禁止の措置が取られた。

また、実際の柱の破壊モードは写真に示したようにせん断破壊型であり、診断結果と一致していない。実際の破壊モードに合わせて柱の靱性指標 $F=1$ と評価すれば、1階の $I_s(=C_T \cdot S_D)=0.457$ であるので、十分には耐震性が高くなかったとも考えられるが、診断と実被害の破壊モードの乖離の原因については、今後の検討が必要と思われる。

・屋外運動場

屋内運動場は、1階がRC造、2階が鉄骨造（桁行：ブレース構造、梁間：ラーメン構造）の典型的な体育館である。桁行方向2階のX型ブレース（アングル材）の4構面すべてで、接合部でアングル母材が破断していた（写真-3.3.7）。梁間方向の鉄骨ラーメン、屋根面ブレースには特に損傷は見られなかった。1階RC造部分については、軽微なひび割れは発生しているが深刻な被害はなかった。桁行き方向2階の被災度区分判定の結果は、ブレースの破断により「大破」であるが、その他の部分は損傷が少ない。



写真-3.3.7 接合部におけるブレースの破断

3.3.1.4 岩ヶ崎高校の被害⁵⁾

建物調査概要

調査対象建物である岩ヶ崎高校は、宮城県栗原市栗駒に位置する。3階建RC造校舎と平屋建の昇降口棟があるが、3階建校舎3棟について被害調査を行った。これらの校舎は全て昭和57年（1982年）3月竣工の新耐震設計法直前の建物である（写真－3.3.8）。1階の主な柱の断面は700mm×700mm、主筋20-D25、せん断補強筋4-D13（せん断補強筋比 $p_w=0.7\%$ 程度）と、3階建校舎としては比較的断面が大きく、鉄筋も十分に配筋されているため、柱の強度・変形能力に富む部材となっていると思われる。



写真－3.3.8 岩ヶ崎高校校舎の全景

耐震診断結果

2004 年度に行われた耐震診断⁵⁾の結果、3 棟とも各階・各方向で構造耐震指標 I_s が判定指標値 $I_{so}=0.7$ を上回り、耐震補強の必要はないと判断されている。3 棟の桁行方向の1 階の耐震診断結果の概要を表－3.3.4 に示す。

表－3.3.4 普通教室棟 耐震診断結果

階	C	F	E_0	S_D	T	I_s	$C_{Tu} \cdot S_D$
管理教室東棟							
1	0.086 1.026	0.80 1.00	1.026	0.926	0.997	0.947	0.950
管理教室西棟							
1	0.168 0.886	0.80 1.00	0.886	0.950	0.999	0.822	0.823
特別教室棟							
1	0.153 0.824	0.80 1.00	0.824	0.950	0.990	0.775	0.782

被害状況と被災度区分判定

・管理教室東棟の被害

図－3.3.6 に管理教室東棟1 階伏図と損傷度を示す。管理教室東棟の被害は、桁行方向（長手方向）の1 階、2 階が大きく、1 階の柱4 本、2 階の柱1 本に比較的大きなせん断ひび割れ（幅1～2mm 程度）が生じた（被災度区分判定による損傷度 III、写真－3.3.9 左）。また、1 階放送室の前の壁に大きなせん断ひび割れ（幅2mm 以上）が生じ一部コンクリートが圧壊した（損傷 IV・写真－3.3.10）ほか、トイレ外壁や、廊下消火栓・配電盤スペースの非構造壁にもせん断ひび割れが発生した（損傷度 III）。他の柱にも、柱頭・柱脚の曲げひび割れやせん断ひび割れが発生しているが、構造躯体の損傷は比較的軽微であり、せん断補強筋が比較的多く配筋されていることから、耐力・塑性変形能力の低下はあまりないと考えられる。2 階の梁端には多数

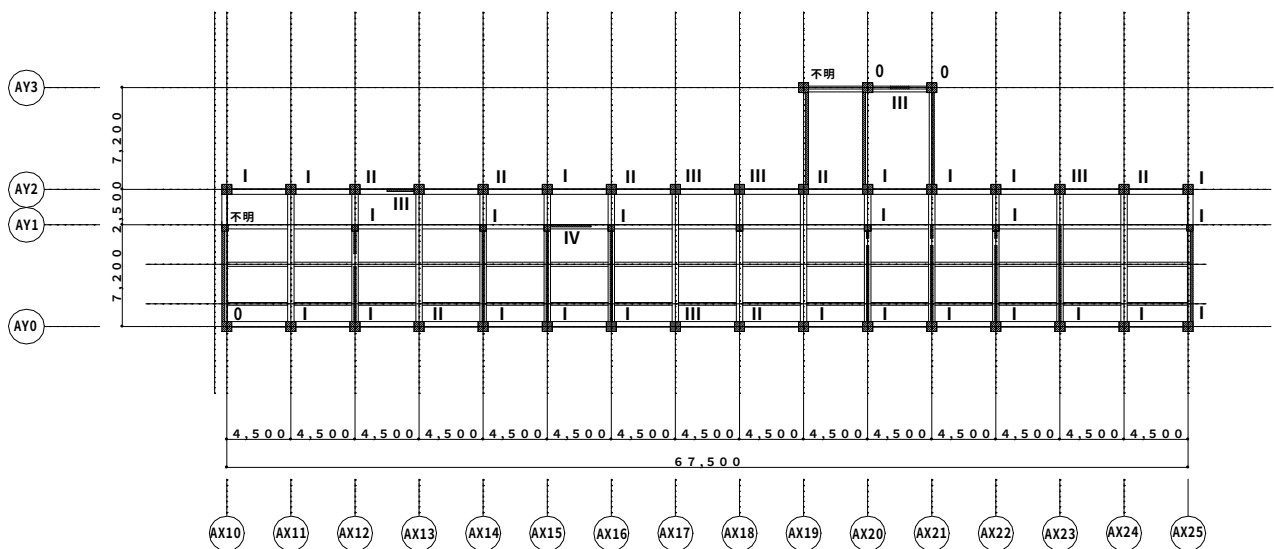
の個所で曲げひび割れや仕上げの軽微な剥離が見られ、梁降伏型のメカニズムを形成しある程度の層間変形を生じた可能性も考えられる。その他、管理教室西棟とのエキスパンション・ジョイント部に建物の振動による衝突でカバーの損傷（写真－3.3.9 右）や、境界部分の梁・壁の一部仕上げに損傷が生じている。また一部、躯体コンクリートにジャンカ（写真－3.3.11）が見られた。被災度区分判定⁷⁾の結果、1, 2, 3 階の残存耐震性能率 R はそれぞれ、80%, 84%, 94%で、各階とも「小破」判定されるが、3 階については、ほぼ「軽微」と考えても問題ない被害程度であった。なお、耐震診断の結果では、1 階柱の多くはせん断柱と診断されているが、実際のひび割れ状況を見ると、柱頭・柱脚に曲げひび割れが発生し、残留ひび割れが生じていることから、被災度区分判定では、曲げ柱と判断して残存耐震性能率 R を求めた。



写真－3.3.9 (左) 柱のせん断ひび割れ (損傷度 III)
(右) EXP. Joint カバーの損傷



写真－3.3.10 せん断破壊した壁 (損傷度 III)



図－3.3.6 管理教室東棟 1 階伏図と柱・壁の損傷度



写真－3.3.11 曲げ圧壊した柱脚（ジャンカが見られる）

・管理教室西棟の被害

管理教室西棟の被害は、管理教室東棟とほぼ同様な状況で、1 階の柱 2 本に比較的大きなひび割れ（損傷度 III）、トイレの非構造壁は 1 階から 3 階まで大きなせん断ひび割れ（損傷度 IV）が生じた。

被災度区分判定の結果、1, 2, 3 階の残存耐震性能率 R はそれぞれ、82%, 87%, 93% で、各階とも「小破」判定されるが、3 階については、ほぼ「軽微」と考えても問題ない被害程度であった。

・特別教室棟の被害

特別教室棟の被害状況は、管理教室東棟・西棟と比較すると全体として軽微であり、損傷度 III の柱は無く、すべて損傷度 II 以下であった。最も被害が大きいののは 2 階で、トイレの非構造壁に大きなせん断ひび割れ（損傷度 III・写真－3.3.12）が生じた。

被災度区分判定の結果、1, 2, 3 階の残存耐震性能率 R はそれぞれ、95%, 91%, 97% で、1, 3 階は「軽微」、2 階は「小破」と判定されるが、2 階についても、ほぼ「軽微」と考えても問題ない被害程度であった。



写真－3.3.12 非構造壁のせん断ひび割れ（損傷度 III）

3.3.1.5 上野目小学校での常時微動観測⁵⁾

建物調査概要

前述したように、2008年岩手・宮城内陸地震においては、大崎市内にある同年代に建設されたほぼ同様の構造系式を持つ3つの小学校で被害の程度に大きな差が見られた。本報では、これらのうちで唯一大きな被害を受けた上野目小学校について、地震後に旧校舎およびグラウンドで行った常時微動観測結果を報告する。

上野目小学校の敷地概要

図-3.3.7 に上野目小学校の敷地概要を、グラウンドで行った常時微動観測の測線とともに示す。建物被害は前報のとおりであるが、敷地西側にある盛土や擁壁・アスファルトに亀裂などが見られた。また擁壁近くに建つ体育館ではブレースの破断、体育館に隣接する旧校舎では中央から西側にかけて柱に損傷度Ⅲ～Ⅳ程度のせん断ひび割れが生じるなどの被害が見られた。被害状況から察するに敷地西側にある盛土の挙動が建物被害に何らかの影響を与えたことが推察される。

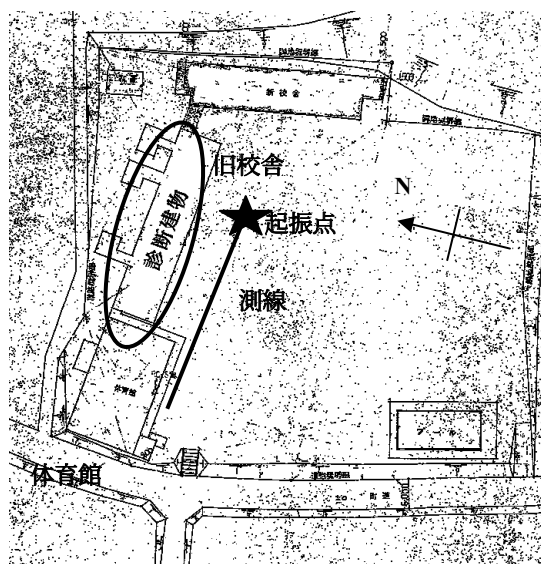


図-3.3.7 上野目小学校敷地概要

旧校舎での常時微動観測

余震観測のための地震計を撤去した後、ほぼ同位置にセンサーを設置して常時微動観測を行った。計測器には電磁式速度計（東京測振社製）を用い、サンプリング周波数は100Hzとした。図-3.3.8 および図-3.3.9 に建物短辺、長辺方向について2階／1階のフーリエスペクトル比を示す。計測は10分間行い、1セット40.96秒として10セットについて求めたフーリエスペクトル比の平均と採用している。短辺方向ではおよそ5.7Hzに、長辺方向ではおよそ2.5Hzと7.8Hzにピークが見られる。スペクトル比の結果は余震観測結果とも概ね対応しており、このあたりが建物の卓越周波数と考えられる。また、フーリエスペクトル比の倍率は長辺方向のほうが短辺方向に比べて約2～4倍程度大きな増幅率を示している。図-3.3.10 および図-3.3.11 には建物短辺、長辺方向について2階／1階のコヒーレンス関数

を示す。短辺方向では6Hzより少し低周波数側からコヒーレンスが大きく低下している。また、長辺方向では2.5Hz前後でコヒーレンスの低下が大きく、4Hz付近ではほぼ0を示しており、図-3.3.8 および図-3.3.9 が示す卓越周波数をほぼ裏付ける結果となっている。図-3.3.12 および図-3.3.13 には1階西側／1階中央、2階西側／2階中央のコヒーレンス関数を示す。特に長辺方向では、1階はほぼ同様な挙動を示していることが窺えるが、2階の挙動は卓越周波数付近でのコヒーレンスが強く、その前後で低下していることがわかる。

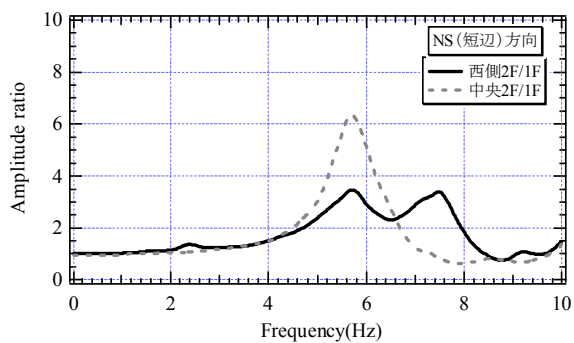


図-3.3.8 旧校舎のフーリエスペクトル比（建物短辺方向）

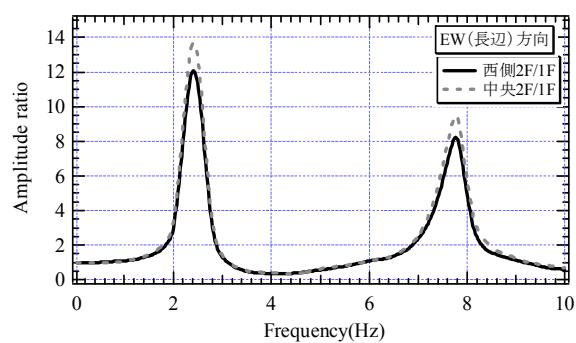


図-3.3.9 旧校舎のフーリエスペクトル比（建物長辺方向）

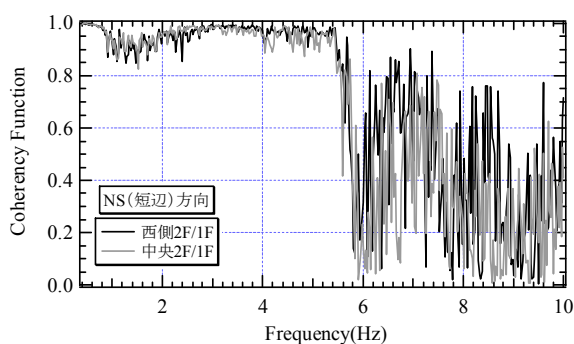


図-3.3.10 コヒーレンス関数（建物短辺方向）

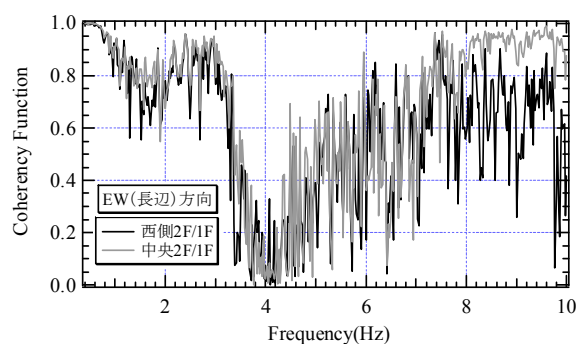


図-3.3.11 コヒーレンス関数（建物長辺方向）

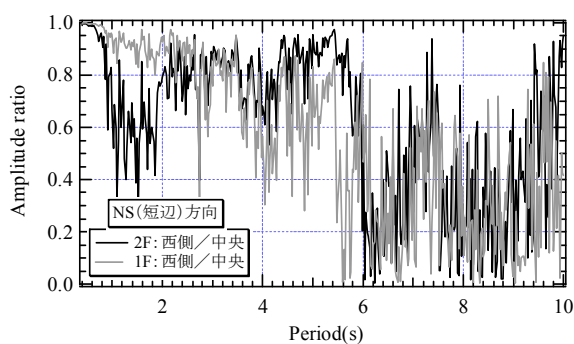


図-3.3.12 コヒーレンス関数（建物短辺方向）

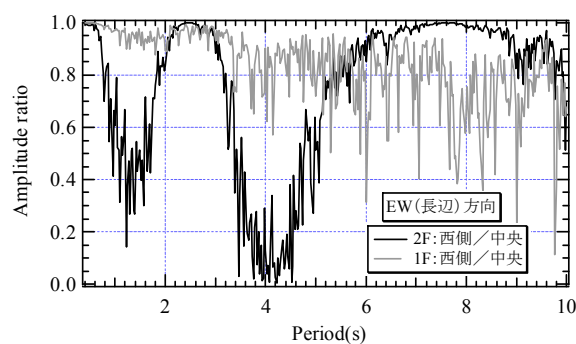


図-3.3.13 コヒーレンス関数（建物長辺方向）

3.3.1.6 上野目小学校の地震応答推定⁸⁾⁹⁾

本節では、本震および余震観測記録に基づき、各小学校での地震入力の違いを推定し、大破した上野目小学校敷地地盤での本震時の地盤応答を推定した。検討結果についてはあくまで可能性の一つとして参照されたい。

建物概要と被害状況

上野目・真山・西大崎小学校と、本震時の強震記録が観測された岩出山観測点の位置関係を図-3.3.14 に示す。上野目小学校の校舎は昭和 38 年に建てられ、鉄筋コンクリート造の校舎に木造下屋が付随している。骨組形式として桁行、梁間方向ともラーメン架構であり、梁間方向の一部に耐震壁が配置されている。耐震診断報告書によると、基礎形式としては杭基礎であるが詳細は不明である。代表的な柱断面を図-3.3.15 に示す。柱断面は 450×450mm と小さく、主筋・帯筋の量も少ない。真山・西大崎小学校校舎については、構造形式、柱断面、建設年代はほぼ同一であるが、基礎形式は直接基礎となっている。



図-3.3.14 各小学校の位置関係

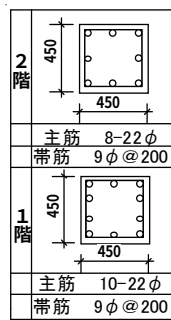


図-3.3.15 柱断面

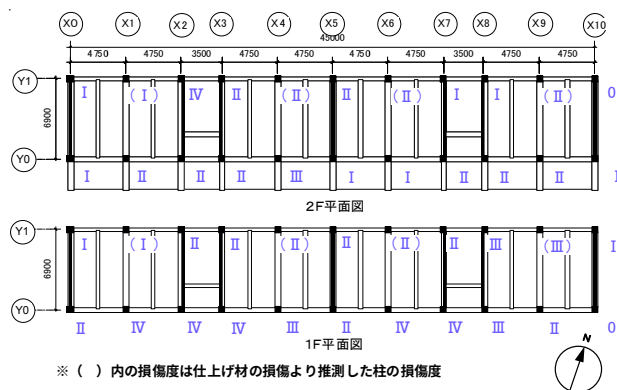


図-3.3.16 平面図と損傷度

上野目小学校校舎の各階柱の損傷度を図-3.3.16の平面図中に示す。1階では、柱22本のうち、柱4本に幅10mmを超える大きなせん断ひび割れが生じ（損傷度IV）、柱3本にも大きなせん断ひび割れが生じた（損傷度III）。2階の被害は、1階と比較して損傷度は小さく、損傷度II以下の柱が半数を占めたが、局所的に損傷度の大きい柱も見受けられた。被害調査の結果、1階で大破、2階で中破の被害を受けたと判断した。周辺の被害状況としては擁壁の移動や亀裂、道路に多数の亀裂があり、地盤が非線形化したことが推測できる。一方、真山・西大崎小学校校舎の被害については、

階段踊り場部分の損傷や柱脚付近の軽微な曲げひび割れ等にとどまり、被災度は軽微で上野目小学校校舎と比較しても小さいものであった。

対象建物の解析モデル

解析対象は小学校校舎の桁行方向（EW 方向）とし、柱及び梁を、剛域を持つ線材に置換した。剛域は柱・梁のフェースまでとし、基礎はピン支持で剛梁により固定されるものとした。各線材の挙動は、材端曲げバネ、せん断バネ及び軸バネによって考慮している。履歴特性には武田モデルを用いた。静的漸増載荷解析の結果、層間変形角が約 1/250rad で損傷限界（1 階の梁の一端が降伏）、1/100rad で層崩壊（1 層のすべての柱頭・柱脚が降伏）という結果を得た。図-3.3.17 には 1 質点系への縮約を行い算出した耐力曲線と岩出山観測点の本震の S_a - S_d スペクトル（EW 方向： $h=5\%$ ）を示す。

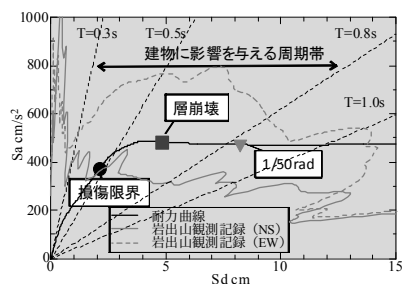


図-3.3.17 耐力曲線と岩出山の S_a - S_d

図-3.3.17 より建物の弾性固有周期 0.3 秒周辺では、上野目小学校は他の 2 校に比べて揺れやすいことが推察される。ただし、各小学校での観測記録の長周期領域にはノイズとみられる成分が混入していることが見られたため、周期約 0.8 秒よりも長周期領域では信頼性が低くなっていると考えられる。

余震観測記録

2008 年 7 月 2 日から 8 月 1 日の 1 か月間にわたって、上野目・真山・西大崎小学校において余震観測を行った（地表面加速度の最大が上野目の 37gal）。本震時の入力地震動の推定を目的として、岩出山観測点と各小学校の地表面で得られた余震記録から応答スペクトル比を算出した（各サイトで記録の得られた 6 波、真山小については 4 波）。図-3.3.18 に EW 方向の加速度応答スペクトル比を示す。図-3.3.17 より建物の弾性固有周期 0.3 秒周辺では、上野目小学校は他の 2 校に比べて揺れやすいことが推察される。ただし、各小学校での観測記録の長周期領域にはノイズとみられる成分が混入していることが見られたため、周期約 0.8 秒よりも長周期領域では信頼性が低くなっていると考えられる。

上野目小学校の地盤増幅特性

図-4.3.19 に示すように上野目小学校周辺でボーリングデータ得られている。N 値の情報から、各層におけるせん断波速度を太田・後藤の式¹⁰⁾を用いて算出し(図-3.3.20)、一次元重複反射理論を用いた等価線形解析¹¹⁾により、上野目小学校表層の 10m による地盤増幅特性を求めた。地盤の非線形特性を図-3.3.21 に示す¹²⁾。ここでは、岩出山の本震記録を解放基盤面での地震動と仮定して解析を行った。尚、文献 8)9)からの修正で、表層地盤の非線形特性を GL-4m までは'Sand6'を、GL-4m~5m を'Sand7'、それ以下の層を'Gravel'としてモデル化した。図-3.3.22 に線形解析の場合と比較した上野目の増幅スペクトルを、図-3.3.23 には岩出山で観測された時刻歴波形を、図-3.3.24 には解析の結果得られた上野目の推定地震波時刻歴波形を、図-3.3.25 にはフーリエスペクトルを示す。時刻歴波形ではそれほど顕著な差は見られないが、フーリエスペクトルおよび増幅スペクトルの比較からは、線形解析では 0.1~0.2 秒の短周期成分にピークが見られるが、地盤の非線形性を考慮すると 0.3 秒付近に増幅のピークが移動し、建物の推定耐力曲線から求められる弾性固有周期とほぼ近い周期帯での増幅が励起されると思われる。

まとめ

大きな被害の見られた上野目小学校では余震観測記録からも他の 2 校に比べて大きな地震入力があったと推察される。地盤の非線形性を考慮した地震応答解析結果からは定性的には被害を説明する結果が得られるが、まだ十分ではなく、今後は局所的な地盤破壊や建物のねじれ振動の影響などについて検討する必要があると考えている。

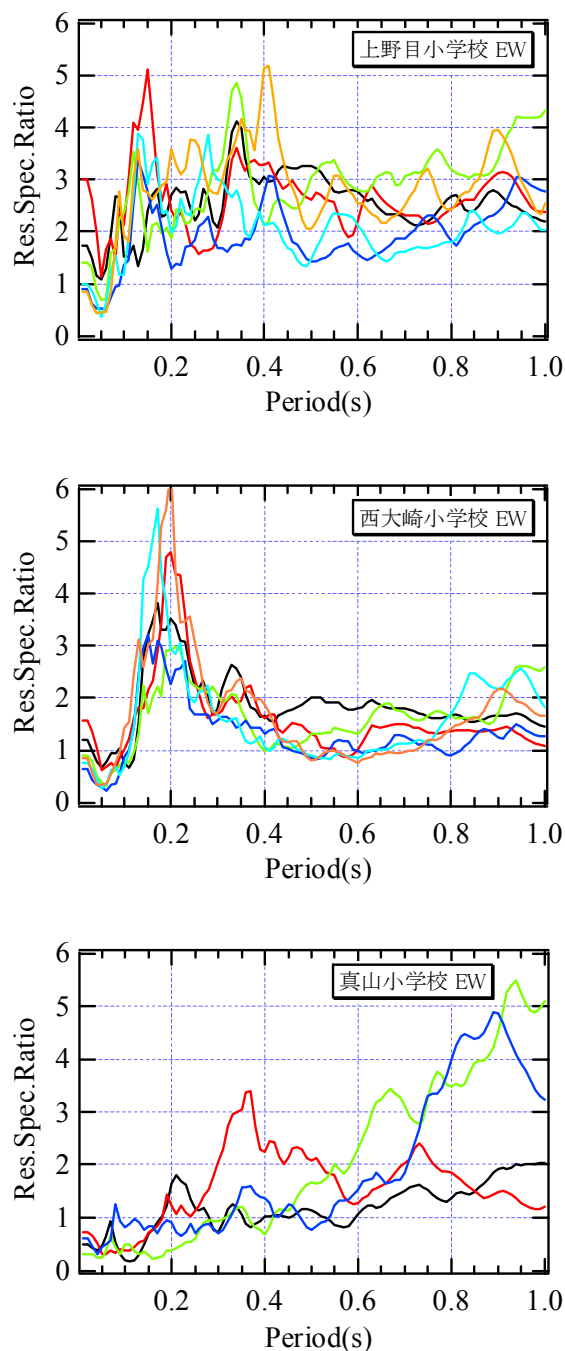


図-3.3.1.18 加速度応答スペクトル比
(EW 方向: 各小学校/岩出山)

謝辞

本報告は筆者も参加した東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻リハビリテーション工学研究室での被害調査に基づいて執筆しました。執筆にあたり、東北大学・前田匡樹准教授に感謝いたします。調査、観測にあたり大崎教育委員会、学校関係各位に感謝いたします。地震観測記録については、気象庁から公開されている自治体震度計のデータ、および東北大学理学研究科地震・噴火予知研究観測センター大都市圏強震動観測ネットワーク（宮城県、東北大学工学研究科災害制御研究センター）のデータを使用しました。余震観測は鹿島建設小堀研究室と共同で行いました。被害調査については東北大学リハビリテーション工学研究室と宮城高専共同で行いました。岡野創氏、山添正稔氏、迫田丈志助手、李晩在准教授および研究室の学生の方々には多大なご協力をいただきました。関係者各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 内閣府防災情報のページ：平成 20 年度(2008 年)岩手・宮城内陸地震被害の状況・政府の主な対応一覧,
<http://www.bousai.go.jp/jishin/iwate/2008iwate.html>
- 2) K-NET:<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 3) 気象庁:「平成 20 年(2008 年)岩手宮城内陸地震」の特集
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2008_06_14_iwate-miyagi/index.html
- 4) 前田匡樹, 中埜良昭: 2008 年 6 月 14 日岩手・宮城内陸地震による建築物の被害調査報告, ビルディングレター 2008 年 8 月号, 日本建築センター, pp63-74, 2008 年 8 月。
- 5) 前田匡樹ら, 2008 年岩手・宮城内陸地震で被災した学校建築物の調査と余震及び常時微動観測(その 1)～(その 5), 地震工学会年次大会, pp.324-pp.333, 2008.11
- 6) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 2001.
- 7) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準 および復旧技術指針, 2002.8.
- 8) 三辻和弥, 中神宏昌, 松川和人, 前田匡樹, 2008 年岩手・宮城内陸地震により被災した RC 造学校建築の入力地震動と被害要因に関する研究 その 2 余震観測記録の分析と本震時地震応答の推定, 日本建築学会大会梗概集 C-2, pp.349-pp.350, 2009.8
- 9) 三辻和弥, 前田匡樹, 中神宏昌, 松川和人, 2008 年岩手・宮城内陸地震で被災した RC 造建物の地震応答の推定, 第 44 回地盤工学研究発表会, pp.1507-1508, 2009.8
- 10) Ohta, Y. and Goto, N., 1976, "Estimation of S-wave velocity in terms of characteristics indices of soil", *Buturi-Tanku*, 29(4), pp.34-41
- 11) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B., 1972, "SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites", Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley.
- 12) 宮城県地震地盤図作成調査報告書, 宮城県, 1985.3

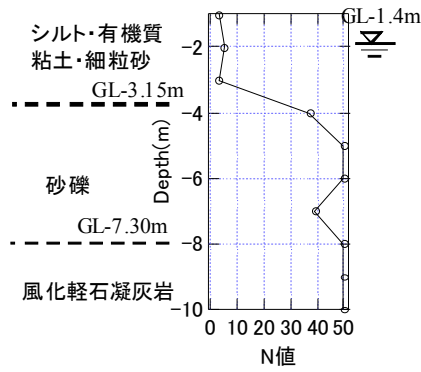


図-3.3.1.19 上野目のボーリング柱状図の N 値

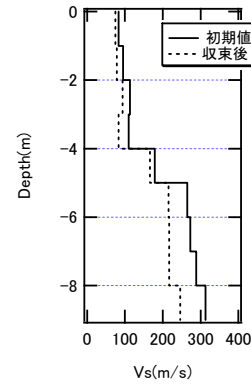


図-3.3.1.20 上野目の推定せん断波速度

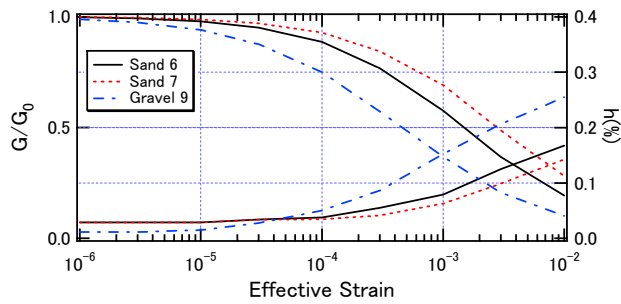


図-3.3.1.21 非線形特性

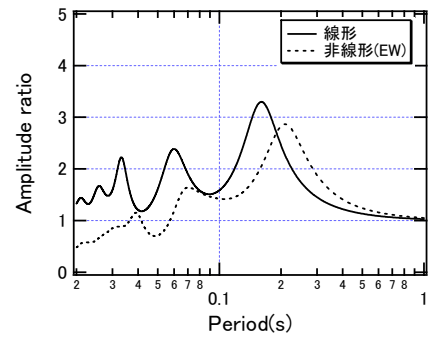


図-3.3.1.22 上野目の増幅スペクトル

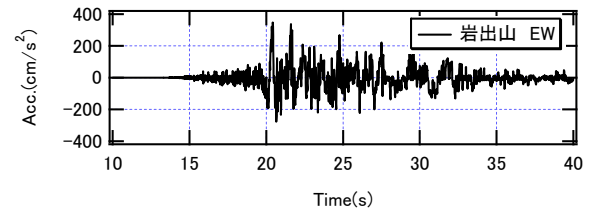
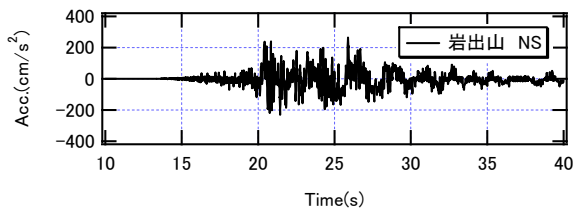


図-3.3.1.23 岩出山の観測時刻歴波形

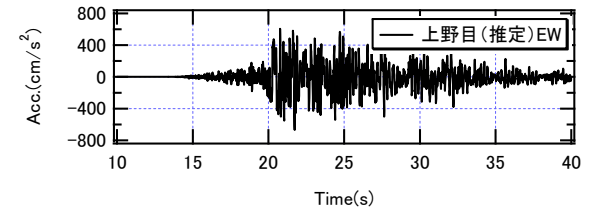
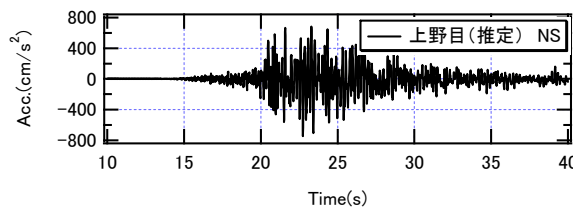


図-3.3.1.24 上野目の推定時刻歴波形

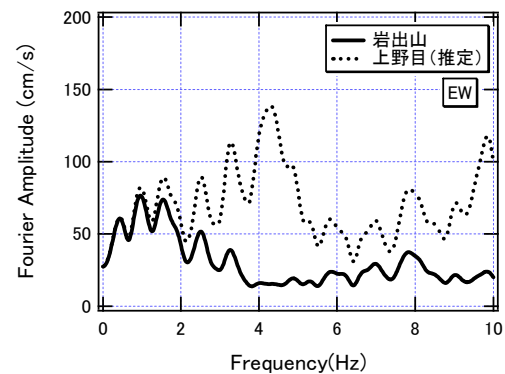
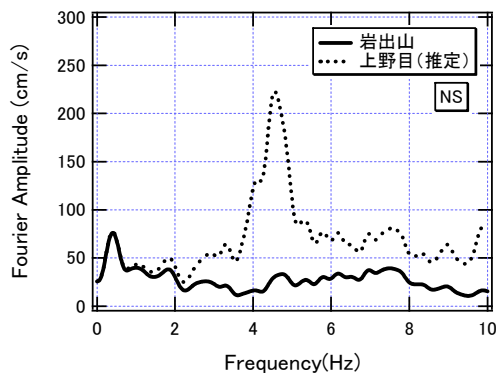


図-3.3.1.25 上野目の推定フーリエスペクトル

3.3.2 地震前後での建物の固有振動数変動¹⁾

3.3.2.1 はじめに

常時微動観測に基づく既設構造物の振動特性評価は、比較的簡易に高頻度で実施できるという利点を有することから、構造健全性診断への応用が期待されている²⁾。その場合、振動観測に基づく構造物の構造健全性診断を実用化するためには、構造物の振動特性に損傷とは無関係な変動がどの程度含まれているかを知ることが必要である。宮城大学（食産業学部）では、鉄筋コンクリート構造物を対象として、その通常使用状態における振動特性の長期間にわたる変動を把握・評価することを目的として、常時微動の長期継続観測を行ってきた。また併せ、振動特性の地震時変動の検出を行うことを目的として、強震動についても長期間にわたって観測を行ってきた。

2008 年岩手・宮城内陸地震が発生した折りも、常時微動・地震動観測が継続して行われていたが、本震記録収録中にトラブルがあり、観測が中断することとなった。記録中断より 1 日半程度の欠測期間を経て、観測システムを再び起ち上げ、常時微動・地震動の長期継続観測を再開した。こうして収録された本震前後の常時微動記録の分析から、構造物の固有振動数の地震時変動が検出されたので、以下報告する。

3.3.2.2 観測対象建物概要と解析法

観測対象建物は、宮城大学食産業学部南研究棟(仙台市太白区、北緯 140°48′、東経 38°13′)であり、一部鉄骨造の 4 階建て鉄筋コンクリート(RC 造)建物である(2005 年 12 月竣工)。対象建物の概略を図-3.3.26 に示す。微動・地震動の長期連続観測を同研究棟 4 階 429 研究室(図-3.3.26 中、”観測点 No.0”)において実施している。竣工後約 8 ヶ月を経た 2006 年 9 月に観測を開始し、2010 年 2 月現在も継続実施中である。観測量は、強震動から常時微動レベルまでのそれぞれ水平 2 方向の加速度と上下方向加速度である。

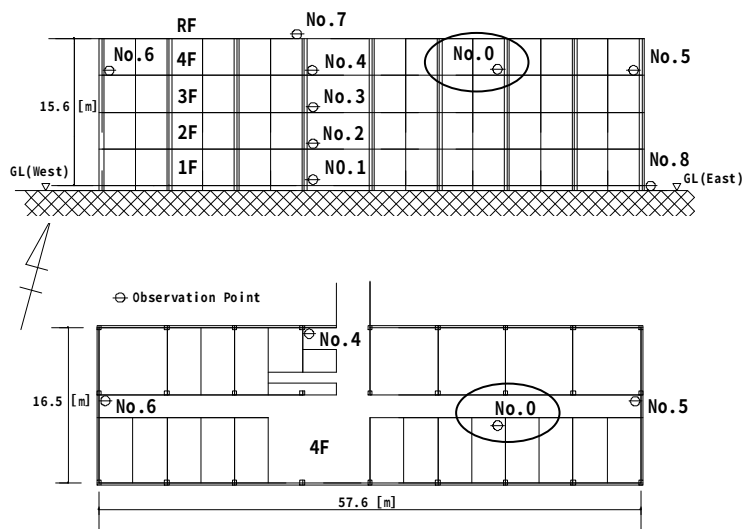


図-3.3.26 観測対象建物 (上) 断面図 (下) 4F 平面図

全観測記録を重複しないように 5 分ごとの小サンプルデータに分割した後、各小サンプルデータに対して、ARMA モデルによる振動モード同定法(以下、ARMA 法と称する)³⁾を適用して、対象建物の振動特性を同定した。日変動をより明確に把握するために、日変動の影響を除去せず、スパイクノイズを除去できるよう窓幅 60 分の移動平均によるフィルタを、季節変動、経年変動については、日変動およびスパイクノイズの影響を除去するために窓幅 1 日の移動平均によるフィルタを適用した。また、各振動特性変動と気象条件との相関を確認するため仙台市気象庁観測点の気象観測データを用いた。また同定対象とする固有振動数を抽出するため、 $\pm 0.1\text{Hz}$ のバンドパスフィルタを使用した。

3.3.2.3 固有振動数の日変動の検出

(1) ある時間断面における対象建物の振動特性を同定した結果を観測値と対比して図-3.3.27 に示す。最大振幅値との比が 0.1 以上のピークを与える振動数を固有振動数と

表-3.3.5 振動特性同定結果

No	次数	固有振動数[Hz]	減衰定数[%]
1	NS-1次	2.507	0.258
2	NS-2次	2.821	1.179
3	NS-3次	3.362	1.223
4	EW-1次	2.735	1.803
5	EW-2次	2.943	1.839

して採用したところ、NS(短辺)方向で 3 次まで、EW(長辺)方向で 2 次までのモードが同定された(表-3.3.5)。

(2) 固有振動数 (f_j) の日変動の一例を図-3.3.28 に示す。 f_j は(一見)大気温と相関を持ちつつ日変動しており、一定の周期で変動している(正月休暇時などには殆ど日変動を示さない。このことは大気温との相関ではないことを示す)。対象建物内外の温度差が影響している可能性がある

⁴⁾ 図-3.3.28(a)には 2006 年 9 月 15 日から同年 10 月 2 日までの NS 方向 1 次固有振動数、図-3.3.28(b)にはその応答振幅値の経時変動をそれぞれ示す。図-3.3.28(c)には同時期の仙台市の気象庁観測点における大気温の経時変動を示す。このように、固有振動数は、外気温の高い日中に高く、外気温の低い夜間に低下するような、1 日周期の日変動をしており、観測対象建物の例で、日変動の幅： $\Delta f=0.05\text{--}0.1\text{Hz}$ 程度である。ただし、応答の二乗平均平方根(RMS 値、図-3.3.28(b))も同様に、(人間活動の多い)日中に大きく、(人間活動の少ない)夜間に小となるような日変動をしており、固有振動数の日変動が、応答振幅、或いは、外気温(或いは対象建物内外の温度差)のどちらにより多く起因しているかは、ここからだけでは判断が付かない。今後の検討課題である。

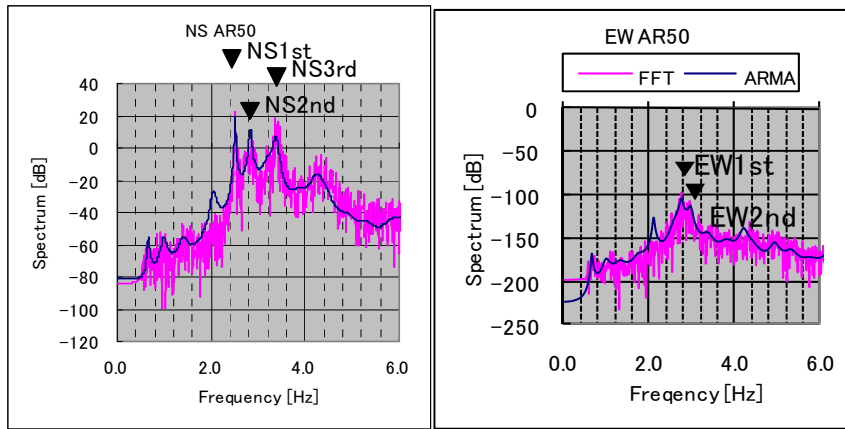
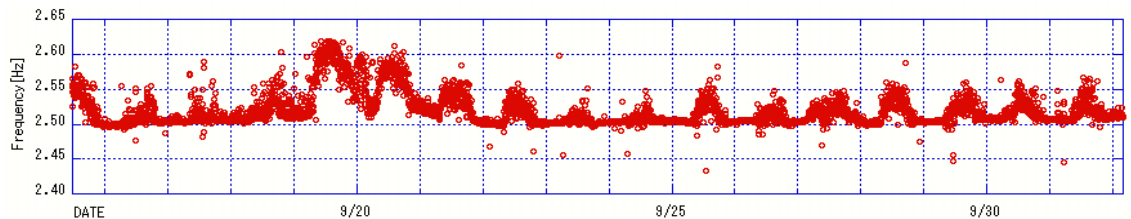
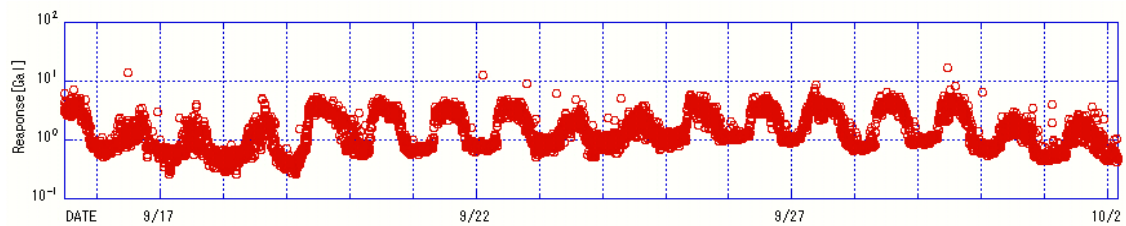


図-3.3.27 振動特性の同定 (1)NS 方向 (2)EW 方向

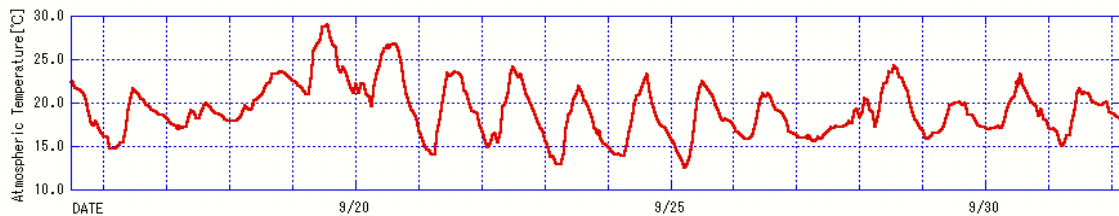
日付に関するグリッド：0 時(24 時) DATE [month/day]



(a) NS 方向 1 次固有振動数



(b) NS 方向応答振幅の RMS 値



(c) 大気温（仙台市における気象庁観測点）

図-3.3.28 検出された固有振動数の日変動例

3.3.2.4 地震前後での建物の固有振動数変動

前小節においては、固有振動数の、損傷とは無関係な変動を取り扱ったが、本小節では、固有振動数の地震時変動を取り扱う。報告の性質上、本小節では、2008 年岩手・宮城内陸地震本震（以下、本震と略す）時に、本節において観測対象としている建物の固有振動数にどのような経時変動が観測されたか、に限定して記載する。

(1) 当観測点における本震時最大加速度の推定

前述のとおり、2008 年岩手・宮城内陸地震本震を観測することは出来なかったが、本小節において記述する事項から考えると、当観測点での最大加速度はどの程度であったかは重要であると考え、次のような方法で、当観測点での

最大加速度を推定した；

本震と同じ震源域で発生した別の地震(余震)について、（当観測点に最も近い k-net 観測点である）k-net 仙台観測点で観測された記録⁵⁾の最大加速度と当観測点で得られた記録の最大加速度との比を求め、本震時に k-net 仙台観測点で観測された記録の最大加速度にその比を乗じて当観測点での本震時の最大加速度の推定値とする。このようにして求められた当観測点での本震時の最大加速度の推定値は、NS 成分：46.6gal, EW 成分：169.7gal, であった。（本震時、当観測点の震源距離は、97.4km であった。）

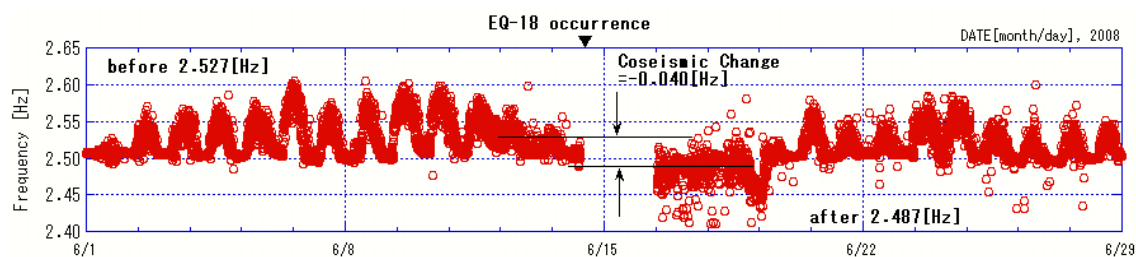
(2) 本震時における固有振動数変動の検出

前小節においてと同様の解析手法を用いて、本震前後における常時微動の連続観測記録から、本震時における固有振動数の変動を検出する。

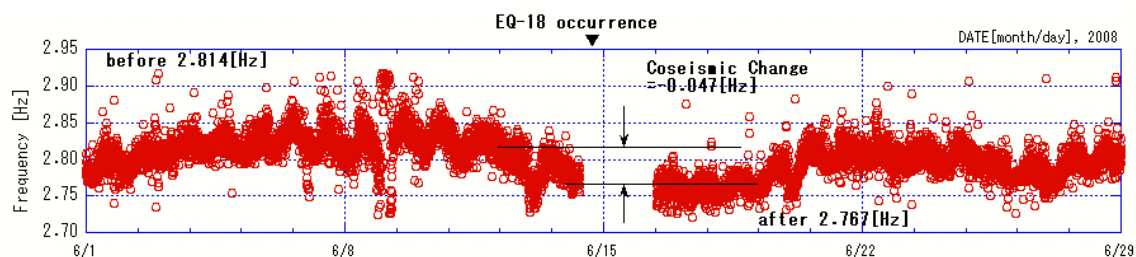
図-3.3.29(1)に本震前後での NS 方向（1 次～3 次）固有振動数および応答振幅値の変動を、また、図-3.3.29(2)には本震前後での EW 方向（1 次～2 次）固有振動数および応答振幅値の変動を、いずれも 2008/6/1-29 の期間について抽出した結果を示す。

これらの図より、次のことが判明した；

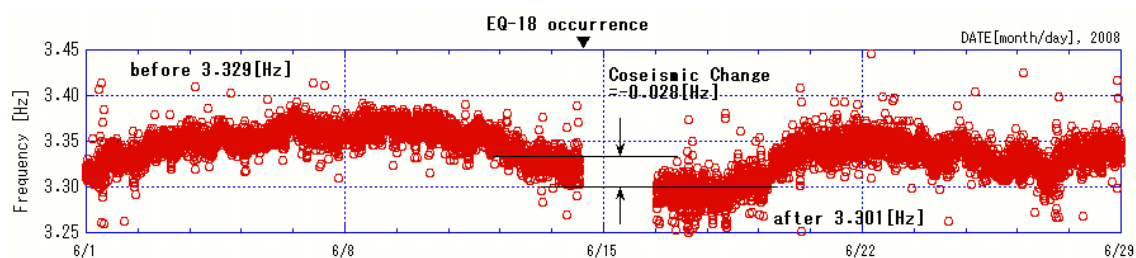
(a) NS 方向固有振動数では、次数が進むにつれて、日変動は次第に不明瞭となるが、本震後に平均的に変動幅： $\Delta f=0.03\text{--}0.05\text{Hz}$ 程度低下し、5 日程度後に、本震前のレベルに回復する、との現象が、1-3 次まで共通に観測された。この固有振動数の地震時低下量は、日変動などで検出された 1 日あたり変化量と比してほぼ同程度であり、構造健全性診断の観点からは、通常使用状態での変動を観測・把握しておくことの重要性が示されたものと言える。



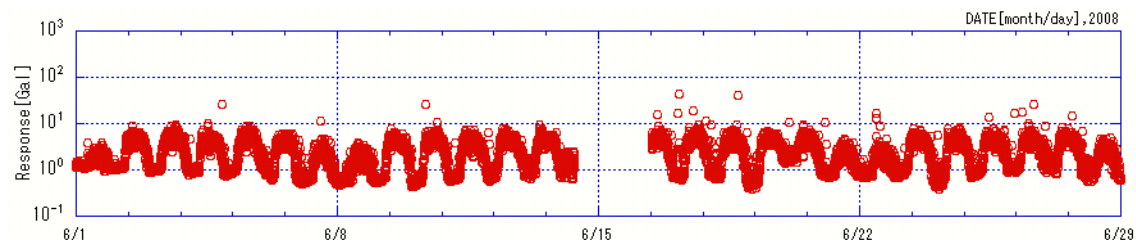
(a) NS 方向 1 次固有振動数



(b) NS 方向 2 次固有振動数



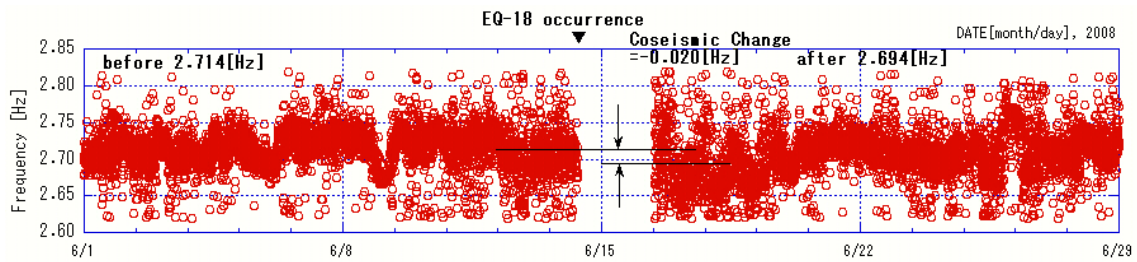
(c) NS 方向 3 次固有振動数



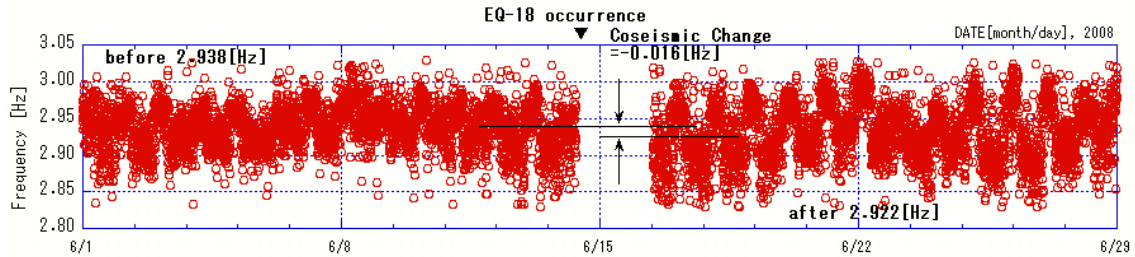
(d) NS 方向応答振幅の RMS 値

図-3.3.29(1) 本震前後での NS 方向固有振動数および応答振幅値の変動（2008/6/1-29）

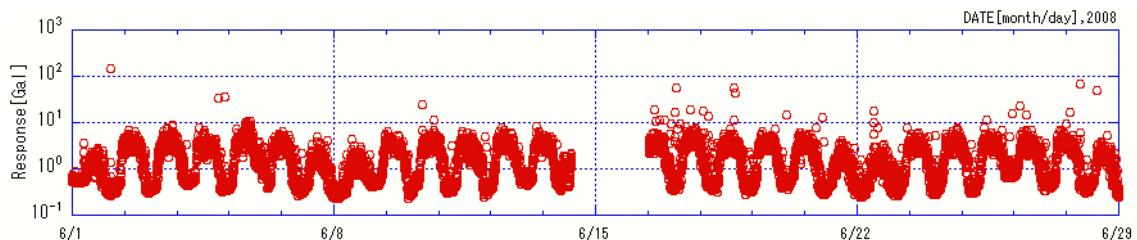
(注) 上図中，“EQ-18”は、2008 年岩手・宮城内陸地震本震のことである。



(a) EW 方向 1 次固有振動数



(b) EW 方向 2 次固有振動数



(c) EW 方向応答振幅の RMS 値

図-3.3.29(2) 本震前後での EW 方向固有振動数および応答振幅値の変動 (2008/6/1-29)

(注) 上図中, "EQ-18" は, 2008 年岩手・宮城内陸地震本震のことである。

(b) EW 方向より NS 方向の固有振動数の低下のほう
が明瞭であり, 低下量も大きい傾向が見られた。推
定値ではあるが, 本震では EW 方向で最大加速度
169.7gal を記録しており, 最大加速度の大きさと固
有振動数の低下量に対応していないことになる。

(対象建物では他の地震時においても, NS 方向で
明瞭な地震時変動が確認でき, EW 方向ではその変
動が確認できたものは少なく, 確認できたとしても,
不明瞭であった。また, EW 方向では日変動も明瞭
ではない。これらの原因の探求は今後の課題であ
る。)

(c) 応答振幅値の日変動については, 地震前後で大
きな変化はなく, ほぼ一定の変動を繰り返している。
地震直後に着目すると, 応答振幅値のばらつきが大
きくなっているようにも見えるが, このばらつきが
地震による影響だとしても, その後収まっており,
応答振幅値の変動に影響を与えるほどの損傷はな
かったと考えられる。

謝辞

§3.3.2.4(1)において, 防災科学技術研究所が運用する
k-net からのデータを使用させて頂いた。ここに記して謝意
を表する。

引用文献

- 1) 本小節の前半は, 以下に既発表の文献から多くを引用
(一部改変)したものであるが, 本小節の主たる小々節:
§3.3.2.4 を記述する上で必要と考え, 再録した;
・上島照幸, 佐藤和敬, 金澤健司: 常時微動の長期継続観
測を通じた構造物の振動特性変動の検出, 土木学会第
64 回年次学術講演会, VI-350, 2009 年 9 月.
- 2) 山本鎮男: ヘルスマニタリングー機械・プラント・建
築・土木構造物・医療の健全性監視, 共立出版, 1999.
- 3) 金澤健司, 平田和太: クロススペクトル推定法による
多自由度系構造物の振動モード同定, 日本建築学会構
造系論文集, 第 529 号, pp.89-96, 2000 年 3 月.
- 4) 金澤健司: コンクリート系建物の固有振動数の日変動
メカニズムの解明, 日本建築学会構造系論文集, 第 612
号, pp.63-71, 2007 年 2 月.
- 5) 防災科学技術研究所運用の k-net :
<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>