

第2章 本研究での建築物地震観測と観測記録の整理結果

2.1 本研究での観測対象建築物

本研究での観測対象建築物一覧を表 2.1-1 及び 2.1-2 に示す^{注1)2)}。表 2.1-1 は、免震建築物以外の建築物であり、表 2.1-2 は免震建築物である。各表では、階数の少ない順に並べている。建築物階数と1次固有周期との相関関係が免震とそれ以外では大きく異なるので、免震建築物は表を別にしてある。また、各建築物の観測実施機関は各表右欄に示すとおりであり、国土技術政策総合研究所(国総研)、建築研究所(建研)、又は、都市再生機構(UR)及びその共同研究実施機関(民間施工会社)のいずれかである。

表中のいずれの建築物でも、建築物内と周辺地盤で地震観測が実施されている。観測対象建築物は計 58 棟であり、うち免震建築物は計 9 棟である。

各表では、建築物記号を示すとともに、観測建築物の所在地、階数、高さ、主要構造、観測点、観測期間、地盤データの有無、観測実施機関を掲げている。以下、本書では、表中の建築物記号でもって建築物を識別する。

図 2.1-1 は、階数に応じた建築物棟数の内訳を示している。また、図 2.1-2～図 2.1-4 は、観測建築物の建設位置を地図上にプロットしている。



図 2.1-1 階数に応じた観測建築物の内訳

なお、表 2.1-1 及び表 2.1-2 において、本研究期間内(2010～2013 年度)に新たに地震計を設置した建築物は、国土技術政策総合研究所(国総研)による建築物 17 棟、(独)建築研究所による 6 棟(HSG, SN2, TRZ, CG7, OS1, SNN)、屋内のみに地震計が設置されていた既存の観測建築物の周辺地盤に地震計を追加した 4 棟(NBO, SMZ, NIG, MYZ, OSK)の計 27 棟である。また、EDG、TKS 及び NIT での PS 検層は、地震記録を分析するために、本共同研究で実施したものである。

注 1) 表 2.1-1 及び表 2.1-2 においては、建築物のみならず周辺地盤にも地震計を設置し同時に観測を実施している建築物のみを示しているが、(独)建築研究所においては、建築物のみの地震観測も実施している。(独)建築研究所による全ての地震観測建築物については付録 1.1、又は、<http://smo.kenken.go.jp/>を参照されたい。

注 2) 地震観測に用いた地震計のメーカー、型番等とサンプリング周波数を付録 1.2 に示す。

表 2.1-1 地震観測建築物一覧(免震以外:49棟)

建物 記号	所在地	階数			高さ (m)	主要 構造	観測点	観測期間	地盤データの有無		観測実施機関
		地上	地下	塔屋					N値	PS検層	
NLG	茨城県つくば市	1	0	0	17.75	RC+S	屋根下はり,1F,地表	2011~	○	-	国総研
ARJ	埼玉県川越市	3	0	0	10.65	RC	3F,1F,地表	2011~	○	-	国総研
KNU	高知県高知市	3	0	1	11.13	RC	3F,1F,地表	2012~	-	-	国総研
ONG	東京都江東区	3	0	0	11.4	RC	3F,1F,地表	2012~	○	-	国総研
KKS2	北海道釧路市	3	0	0	11.5	RC	3F,1F,地表	2012~	○	-	国総研
ARK	東京都北区	3	0	1	12	RC	3F,1F,地表	2011~	○	-	国総研
SMD	茨城県筑西市	3	0	1	12.3	RC	3F,1F,地表	2012~	○	-	国総研
NUR	埼玉県さいたま市	3	0	0	13	RC	3F,1F,地表	2011~	○	-	国総研
EDG	千葉県野田市	3	0	0	13.58	RC	3F,1F,地表	2011~	○	○	国総研
UTM	栃木県宇都宮市	3	1	0	16.1	RC	3F,B1F,地表	2011~	○	○	国総研
KDI	東京都小平市	3	0	0	16.6	RC	3F,1F,地表	2002~	○	-	建研
NBO	宮城県延岡市	3	0	2		RC	4F,1F,地表	地表: 2012~	-	-	建研, 国総研(地表)
KKS4	北海道釧路市	4	0	0	16.6	RC	4F,1F,(地表)	2012~	○	-	国総研
YYG	東京都渋谷区	4	1	0	25.4	RC	7F,B1F,地表	1996~	○	-	建研
NDLA	東京都千代田区	4	8	0		RC	4F,1F,B4F,B8F,地表	2010~	○	○	建研
TKS	千葉県千葉市	5	0	0	13.75	WRC	5F,3F,1F基礎梁,地表	2011~	○	○	国総研
TSM	愛知県津島市	5	0	2	27.6	RC	PH(6),1F,地表	2012~	○	-	国総研
WUM	高知県高知市	6	1	0	17.6	RC	6F,1F,地表	2012~	-	-	国総研
YCY	千葉県八千代市	6	1	2	20	RC	7F,B1F,地表	1996~	-	-	建研
SMZ	静岡県静岡市	6	0	1	23	SRC	6F,1F,地表	地表: 2012~	○	-	建研, 国総研(地表)
NIT	埼玉県南埼玉郡	6	0	0	30	RC	6F,1F,地表	1998~	○	○	建研
NIG	新潟県新潟市	6	1	2		RC	7F,B1F,地表	地表: 2012~	-	-	建研, 国総研(地表)
MYK	岩手県宮古市	7	0	1	24.9	RC	7F,1F,地表	2002~	○	-	建研
MST	埼玉県三郷市	7	1	0	29.8	SRC	7F,1F,地表	1996~	-	-	建研
TUF	東京都港区	7	0	1		SRC	7F,1F,地表	1996~	-	-	建研
NCT	茨城県つくば市	7	0	0		RC	8F,1F,地表	2005~	-	-	建研
CHB	千葉県千葉市	8	1	1	31.4	SRC	8F,1F,地表	1996~	○	○	建研
TKM	香川県高松市	8	1	1	31.9	SRC	9F,B1F,地表	1998~	○	-	建研
TDS	埼玉県戸田市	8	1	2	34.4	SRC	8F,B1F,地表	1996~	-	-	建研
ANX	茨城県つくば市	8	1	1	35.4	SRC	8F,B1F,地表,地中	1998~	○	○	建研
FNB	千葉県船橋市	8	0	1		RC	8F,1F,地表	1996~	-	-	建研
UTK	東京都文京区	9	0	0		SRC	7F,1F,地表	1996~	-	-	建研
MYZ	宮城県宮崎市	9	1	3		SRC	9F,1F,地表	地表: 2012~	-	-	建研
FKO	福岡県福岡市	10	1	2	49	SRC	10F,B1F,地表	1998~	○	-	建研
NRK	神奈川県横浜市	11	0		29.5	SRC+RC	11F,6F,1F,地表	2010~	○	○	飛島, UR
OHJ	東京都北区	11	0	0	30.95	SRC	RF(12),1F,地表,地中,杭	1975~1991	○	○	UR
NGY	愛知県名古屋市	11	2	2	43.6	SRC	12F,B2F,地表	1998~	○	○	建研
OSK	大阪府大阪市	15	3	3	66.2	S	18F,B3F,地表	地表: 2011~	○	-	建研
UKM	東京都北区	20	0	3	59.9	RC	20F,10F,1F,地表	2012~	○	○	国総研
TSU	東京都港区	24	1		72.6	RC	RF(25),12F,B1F,地表,地中	1988~	○	○	UR
HSG	愛知県名古屋市	25	0	1	75.25	RC	25F,1F,地表	2011~	○	○	建研
NKS	大阪府大阪市	25	1	3	103.1	S	24F,12F,B3F,地表	2012~	○	○	国総研
HPP	東京都練馬区	30	1		88.4	RC	30F,15F,1F,地表,杭	1988~	○	○	UR
HMB	埼玉県草加市	30	1		95.9	RC	RF(31),15F,B1F,地表,地中	1999~	○	○	戸田, UR
SN2	東京都江東区	32	0	4	97.45	RC	32F,B1F,地表	2011~	○	○	建研
SO1	東京都港区	32	1		103.8	RC	RF(33),24F,14F,1F,地表,杭	2000~	○	○	鴻池, UR
DIB	東京都港区	33	0	0	99.95	CFT	33F,B1F,地表	2012~	○	○	国総研
TRZ	東京都中央区	33	4	1	155	S	33F,15F,B4F,地表	2011~	○	○	建研
CG7	東京都千代田区	33	2	1	156.67	S	32F,16F,B2F,低層棟1F	2011~	○	○	建研

表 2.1-2 地震観測建築物一覧(免震:9棟)

建物記号	所在地	階数			高さ (m)	主要構造	観測点	観測期間	地盤データの有無		観測機関
		地上	地下	塔屋					N値	PS検層	
NMW	東京都台東区	3	1	0	11.4	RC	1F(免震層上部),B1F(免震層下部),地表	1999~	○	-	建研
URM	神奈川県川崎市	6	0		18.6	RCプレストレス	RF(7),1F(免震層上部),BF(免震層下部),地表,地中	2001~	○	○	UR
KCH	高知県高知市	8	0	2	29	RC	PH2F,B1F(免震層上部),地下ピット(免震層下部),地表	2012~	-	-	国総研
OS1	大阪府大阪市	8	1	1	29.53	SRC	8F,1F(免震層上部),B1F(免震層下部),地表	2011~	○	-	建研
NG2	愛知県名古屋	8	0	2	34.7	SRC	8F,1F(免震層上部),B1F(免震層下部)	2012~	○	-	国総研
YMN	山梨県甲府市	8	1	3	37.1	RC	8F,1F(免震層上部),B1F(免震層下部),地表	2003~	○	○	建研
KGC	北海道釧路市	9	1	1	44.3	SRC	9F,1F(免震層上部),B1F(免震層下部),地表,地中	1998~	○	○	建研
HCN2	岩手県八戸市	10	1	1	42.8	SRC	10F,1F(免震層上部),B1F(免震層下部),地表,地中	1998~	○	○	建研
SNN	東京都江東区	36	0	2	114	RC	36F,4F(免震層上部),3F(免震層下部),1F,地表	2011~	○	○	建研

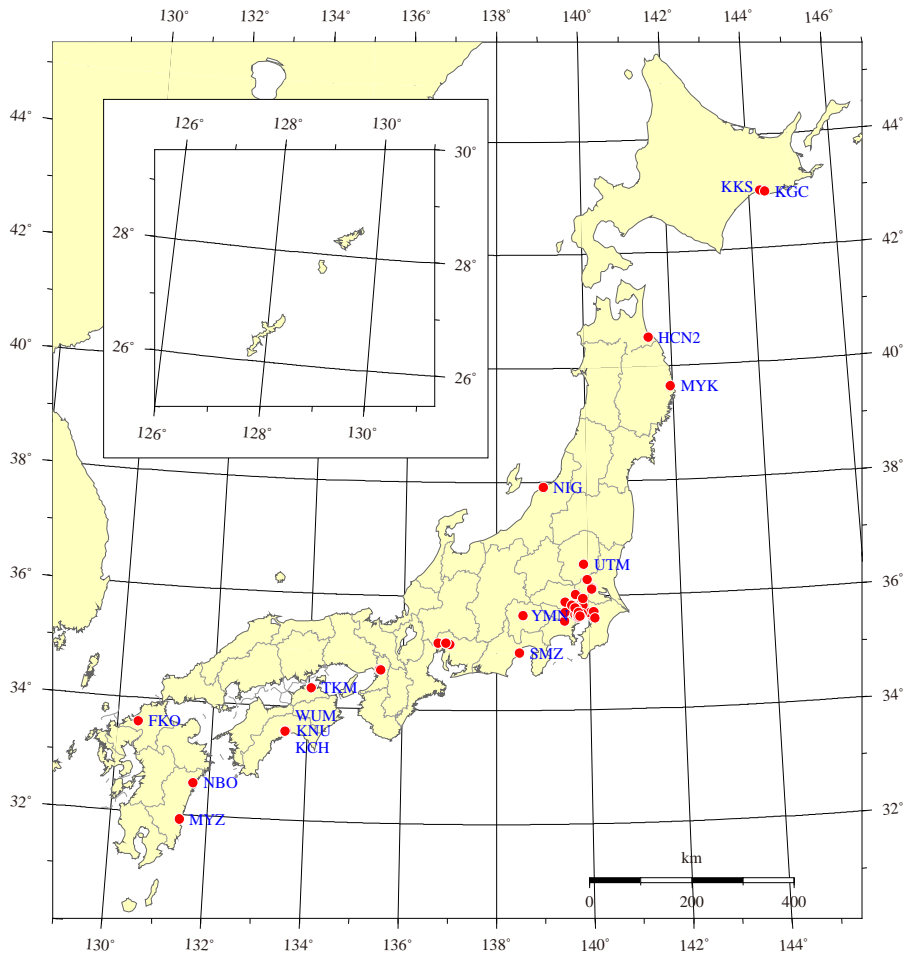


図 2.1-2 建築物地震観測点の配置(1)

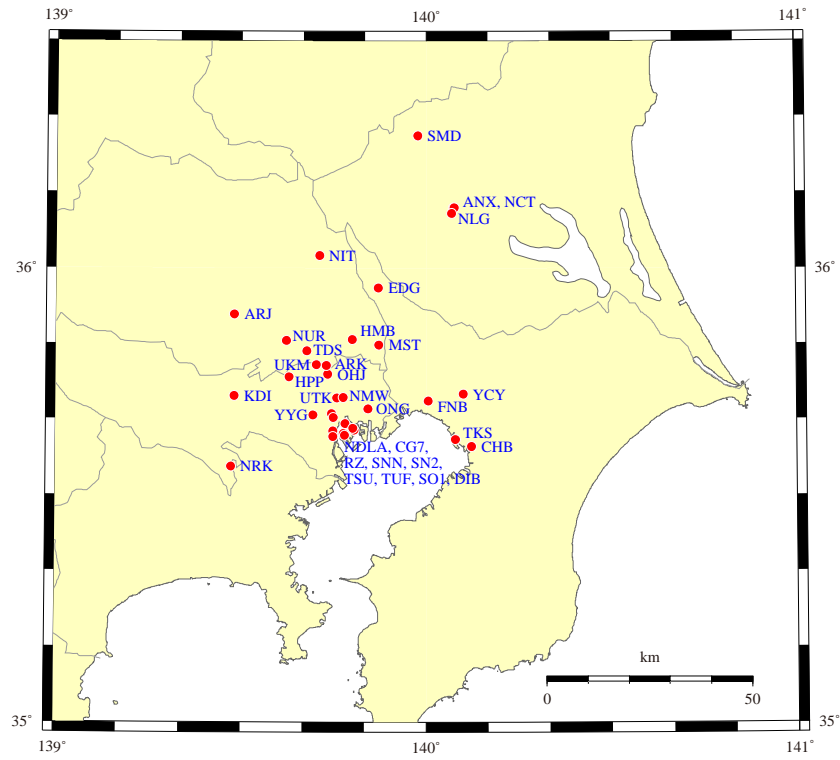


図 2.1-3 観測対象建築物の分布 (2)

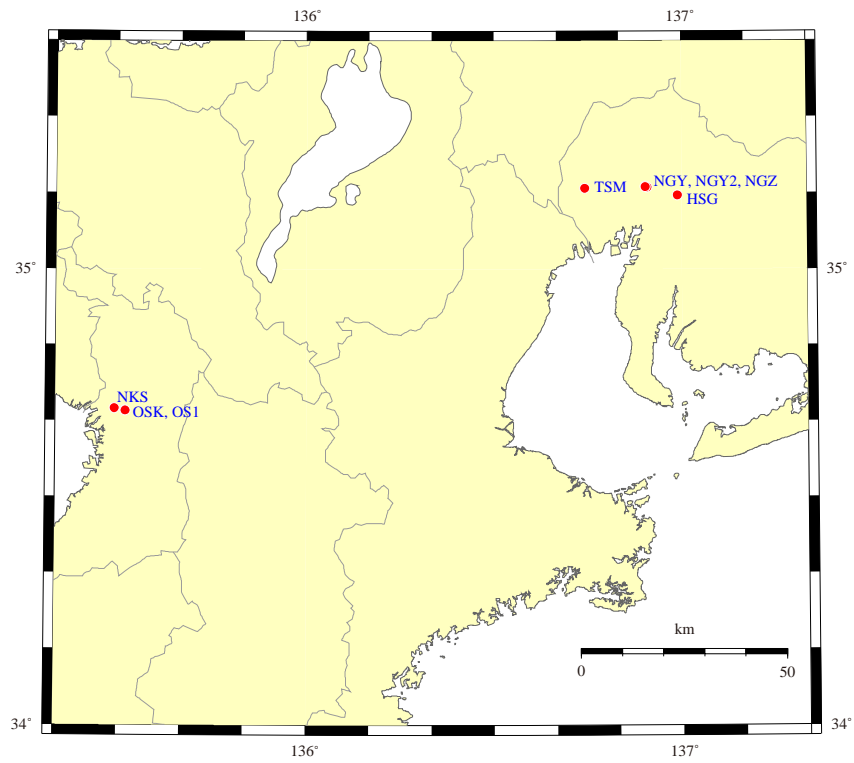


図 2.1-4 観測対象建築物の分布 (3)

2.2 地震観測記録の整理項目

各地震観測建築物の地震記録の整理に当たっては、表 2.2-1 の整理項目を定めた。

なお、本書付録 2 に、次節で取り上げる 12 棟の観測建築物について、この項目に従い地震記録を整理した結果を例として示す。

表 2.2-1 地震観測記録の整理項目

1. 観測点情報

「1.1 建築物緒元」「1.2 地盤情報」及び「1.3 機器配置及び方位」の各項を設け、地震記録分析の条件となる情報を示す。

2. 観測記録概要

観測建築物で記録された地震の情報を示す。記録された地震の発生位置と建築物の位置との関係を明示するため、震央と観測地点の位置を地図上で示す。また、(1)震央距離とマグニチュードの関係、(2)(3)震央距離と地表の最大加速度 PGA 及び最大速度 PGV の関係、(4)(5)等価卓越振動数 f_A, f_V とマグニチュードの関係、及び、(6)(7)等価卓越振動数 f_A, f_V と震央距離の関係をグラフ化する。

- (1) 震央距離とマグニチュードの関係
- (2) 震央距離と地表の最大加速度 PGA の関係
- (3) 震央距離と地表の最大加速度 PGV の関係
- (4) 等価卓越振動数 f_A とマグニチュードの関係
- (5) 等価卓越振動数 f_V とマグニチュードの関係
- (6) 等価卓越振動数 f_A と震央距離の関係
- (7) 等価卓越振動数 f_V と震央距離の関係

等価卓越振動数 f_A, f_V は以下により求める。

$$f_A = \text{PGA} / \text{PGV} / 2\pi \quad (2.1)$$

$$f_V = \text{PGV} / \text{PGD} / 2\pi \quad (2.2)$$

ただし、(2.1)式中の PGV は PGA の発生する時刻の前後 2 秒以内での PGV とし、同様に、(2.2)式中の PGD は PGV の発生する時刻の前後 2 秒以内での PGD とする¹⁾。

3. 最大加速度、最大速度、計測震度

地震記録から得られる最大加速度、最大速度及び計測震度を以下の関係としてグラフ化する。なお、以下では最下階の最大加速度、最大速度を PBA、PBV と、最上階の最大加速度、最大速度を PTA、PTV と表記している。

- (1) PGA と PBA 及び PTA の関係
- (2) PGV と PBV 及び PTV の関係
- (3) GL の計測震度と最下階及び最上階の計測震度の関係

- (4) PGA と PBA/PGA 及び PTA/PGA の関係
- (5) PGV と PBV/PGV 及び PTV/PGV の関係
- (6) GL の計測震度と(最下階-GL)及び(最上階-GL)の計測震度の差
- (7) PBA と PTA の関係
- (8) PBV と PTV の関係
- (9) 最下階の計測震度と最上階の計測震度の関係
- (10) PBA と PTA/PBA の関係
- (11) PBV と PTV/PBV の関係
- (12) 最下階の計測震度と(最上階-最下階)の計測震度の関係

4. 地震動の等価卓越振動数と最大加速度比及び最大速度比

地震動の周期特性が等価卓越振動数により表されると考え、これと建築物の最大地震応答との関係を把握するため、以下の関係をグラフ化する。

- (1) 等価卓越振動数 f_A と PBA/PGA 及び PTA/PGA の関係
- (2) 等価卓越振動数 f_V と PBV/PGV 及び PTV/PGV の関係
- (3) 等価卓越振動数 f_A と PTA/PBA の関係
- (4) 等価卓越振動数 f_V と PTV/PBV の関係

5. 建築物の固有振動数

建築物の固有振動数の実態を把握するため、観測記録から推定される固有振動数について、以下の関係をグラフ化する。

- (1) 経年と固有振動数(TOP/BASE)の関係
- (2) 経年と固有振動数(TOP/GL)の関係
- (3) 最大加速度と固有振動数(TOP/BASE, TOP/GL)の関係

なお、固有振動数(TOP/BASE)は、建築物を 1 自由度系と見なした場合に、入力を最下階での加速度とし出力を最上階での加速度として得られる固有振動数を、固有振動数(TOP/GL)は、入力を地表での最大加速度とした場合の固有振動数を表す。

6. フーリエスペクトル比

地表 GL から建築物最下階 BASE、地表 GL から最上階 TOP、及び、最下階 BASE から最上階 TOP への伝達特性を把握するため、対応するフーリエスペクトル比(BASE/GL, TOP/GL, TOP/BASE)をグラフ化する。観測建築物の伝達特性は必ずしも一定ではなく、特に 2011 年東北地方太平洋沖地震(以下「311 本震」と略記する)時に建築物に多少の損傷が生じたため、その前後(以下「311 前、311 後」と略記する)で変化したものが多いこと、損傷の有無に係らず応答の振幅によっても変化すること、また、振幅を一定範囲に限っても、地震動の特性等様々な要因によりばらつきが予想されることから、以下のように項目立てしてグラフ化する。ここで、計測震度と地盤や建築物の応答振幅には乖離があるとも言われているが、ある程度の

相関性があると考え、地震記録を震度毎に分けて整理している。

- (1) 震度毎の平均スペクトル比(311 前)
- (2) 震度毎の平均スペクトル比(311 後)
- (3) 震度 2 の記録の平均フーリエスペクトル比と標準偏差(311 前)
- (4) 震度 3 の記録の平均フーリエスペクトル比と標準偏差(311 前)
- (5) 震度 4 の記録の平均フーリエスペクトル比と標準偏差(311 前)
- (5) 震度 2 の記録の平均フーリエスペクトル比と標準偏差(311 後)
- (6) 震度 3 の記録の平均フーリエスペクトル比と標準偏差(311 後)
- (7) 震度 4 の記録の平均フーリエスペクトル比と標準偏差(311 後)
- (8) 311 前後の平均フーリエスペクトル比(震度 2)
- (9) 311 前後の平均フーリエスペクトル比(震度 3)
- (10) 311 前後の平均フーリエスペクトル比(震度 4)
- (11) 311 本震のフーリエスペクトル比と震度 2 の平均フーリエスペクトル比(TOP/GL)
- (12) 311 本震のフーリエスペクトル比と震度 2 の平均フーリエスペクトル比(TOP/BASE)
- (13) 311 本震のフーリエスペクトル比と震度 2 の平均フーリエスペクトル比(BASE/GL)

なお、フーリエスペクトル比は幅 0.1Hz の Parzen window により平滑化を行う。

7. 2011 年東北地方太平洋沖地震の記録

2011 年東北地方太平洋沖地震での記録が観測された建築物については、その結果を整理して示すことにする。

表 2.2-1 の「3. 最大加速度、最大速度、計測震度」における(1)(2)の関係であるが、文献 2) では、1995 年兵庫県南部地震での記録及び解析に基づく整理分析結果が示されている。これによると、基礎応答の最大値は地表と比較し、最大加速度で 7 割、最大速度で 9 割程度に低減されると報告されている。しかしながら、このような最大値の低減には地震動の周波数特性も影響することは明らかである。そのため、文献 1) では、多数の地震記録を用いて簡易的に振動数領域での分析を行うために、表中の(2.1)(2.2)式による等価卓越振動数を導入し、さらに、最大加速度と最大速度における入力損失効果を、等価卓越振動数から求められる無次元振動数と関係づけて統一的に評価することを可能としている。このように、地表と建築物内の応答の最大値を比較する場合には、振動数領域での検討が必須であると考えられるが、最大値相互の単純な比較もこれまで数多く行われてきており、ある程度、建築物への地震入力や応答を考える際の有効な尺度となり得ると考えられることから、これらを整理項目に加えている。

また、フーリエスペクトル比の整理においては、幅 0.1Hz の Parzen window により平滑化を行うこととしている。これは、平滑化していない状況にてフーリエスペクトル比のピーク値に着目しても、現象の本質を捉えにくくすると考えたことによる。

ただし、このような平滑化によりピーク値が下がることにより、特に減衰の小さな建築物においては、応答増幅倍率が過小に評価される可能性もある。そこで、以下において、減衰の比較的小さな超高層建築物を対象に、フーリエスペクトル比の平滑化の影響を確認しておくことにする。

対象建築物は、鉄筋コンクリート造の超高層建築物 SN2(32F+B1F, 連壁+杭基礎)と、鉄骨造の超高層建築物 CG7(33F+B2F, 杭基礎)である。2段組みに配置した図 2.2-1 から図 2.2-6 までにおいて、左側が SN2 であり、右側が CG7 である。これらの図では、2011 年東北地方太平洋沖地震以後の記録を取り出した上で、Parzen window を掛けない場合、平滑幅を 0.05Hz とした場合及び 0.1Hz とした場合の 3 通りについて、フーリエスペクトル比の震度毎のアンサンブル平均(太線: 震度 2, 中線: 震度 3, 細線: 震度 4)を示している。また、図において、赤線は、地表の加速度に対する建物最上階の加速度の比を、青線は、建物最下階の加速度に対する建物最上階の加速度の比を、緑線は、地表の加速度に対する建物最下階の加速度の比を表す。これらの色の使い分けは、本報告書のその他の図においても、共通である。

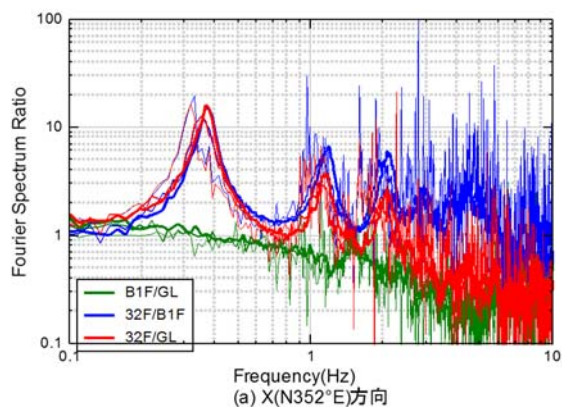


図 2.2-1 フーリエスペクトル比
(2011.0311 以後、SN2、Parzen=0.0Hz)

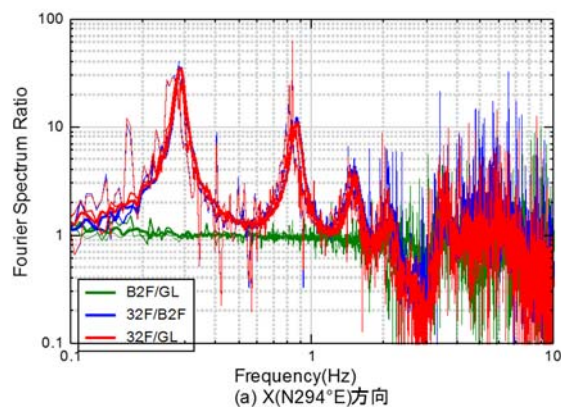


図 2.2-2 フーリエスペクトル比
(2011.0311 以後、CG7、Parzen=0.0Hz)

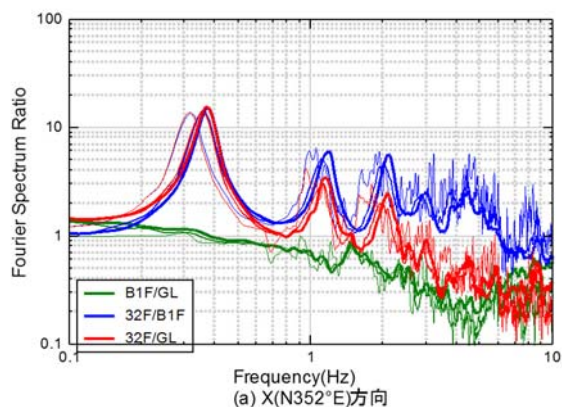


図 2.2-3 フーリエスペクトル比
(2011.0311 以後、SN2、Parzen=0.05Hz)

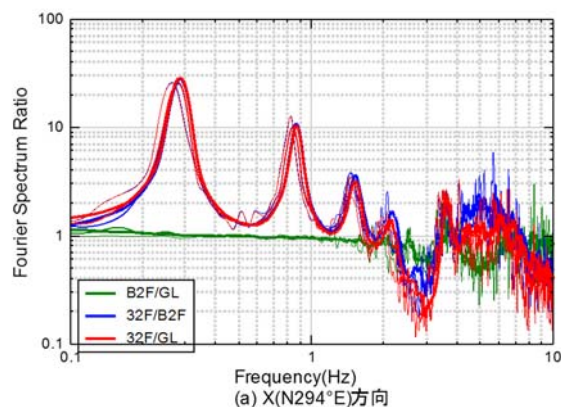


図 2.2-4 フーリエスペクトル比
(2011.0311 以後、CG7、Parzen=0.05Hz)

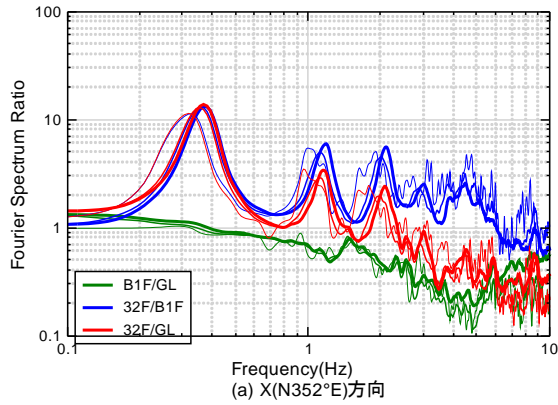


図 2.2-5 フーリエスペクトル比
(2011.0311 以後、SN2、Parzen=0.1Hz)

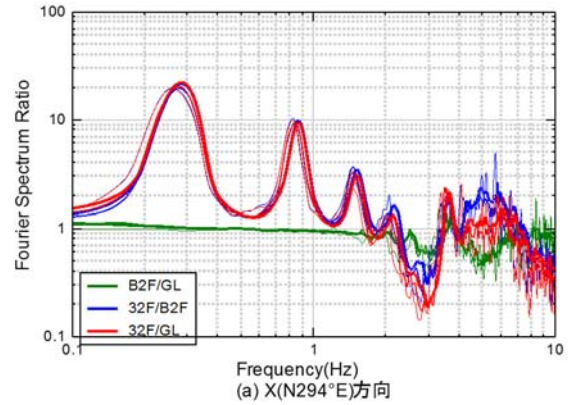


図 2.2-6 フーリエスペクトル比
(2011.0311 以後、CG7、Parzen=0.1Hz)

結果として、幅を 0.1Hz とすると、スペクトル比のピークがやや丸みを帯びるようになり、かつ、ピーク高さが低くなる傾向が見られる。また、超高層の場合には、平滑化を行わなくても、比較的明瞭なフーリエスペクトル比のピークが見出されることが分かる。しかしながら、中低層の場合には、一般的に、記録にノイズが含まれることが多くなり、この場合には、フーリエスペクトル比のピークを見出すには、フーリエスペクトル比に対する平滑化が必要になってくる。本研究では、どちらかと言えば超高層建築物よりは中低層建築物の振動特性を把握することを重視しており、平滑化のための幅を建築物高さに応じて変えることも煩雑であることから、中低層から超高層まで平滑化の幅を一律に 0.1Hz としている。

2.3 建築物区分に応じた地震観測記録の整理結果

2.3.1 建築物区分について

一般に、地盤 - 構造物の影響は低層建築物の地震応答に現れ易いと考えられることから、観測建築物を階数等に基づきいくつか区分した上で、区分ごとに表 2.3-1 の観測建築物を取り上げて、地震観測記録に現れる地盤 - 構造物の動的相互作用の影響について考察する^{注1)}。

2.2 節で定めた整理項目の中から、まず、振動数領域における動的相互作用の影響を把握するため、フーリエスペクトル比の整理結果に着目して各建築物で比較する。次に、地盤 - 構造物の動的相互作用の影響の相違が時間領域での最大応答にどのように影響するかを見るため、本節では、特に、表 2.2-1 中の(2.1)式による等価卓越振動数 f_A と最大加速度比関係に着目して、各建築物で比較する。

表 2.3-1 中の各建築物は、地震記録が比較的多く得られており、かつ、地盤特性がボーリング調査と PS 検層により明らかにされている。

表 2.3-1 本節での検討対象建築物

階数等区分	建築物記号	概要	表層地盤の卓越周期(s)
I (5F 以下)	UTM	3F+B1F、直接基礎	0.08
	EDG	3F、杭基礎	0.68
	TKS	5F、杭基礎	0.46
II (6F~10F)	NIT	6F、杭基礎	0.95
	ANX	8F+B1F、直接基礎	0.66
III (11F~20F)	OHJ	11F、杭基礎	0.73
	NRK	11F、杭基礎	0.20
	UKM	20F、杭基礎	0.89
IV (21F~)	HMB	30F、杭基礎	1.20
	SN2	32F+B1F、連壁基礎	1.12
	CG7	33F+B2F、直接基礎	0.24
V 免震	MRM	6F、杭基礎	0.57

注1) 表中の12棟のうち、UTM、EDG、TKS、NIT、ANX、UKM及びSN2の7棟についてはシミュレーション解析を実施している。これらの結果については本書別添に示す。

2.3.2 区分 I (5F 以下) の建築物について

本節で検討対象とする 3 棟の建築物の概要を表 2.3-2 に示す。

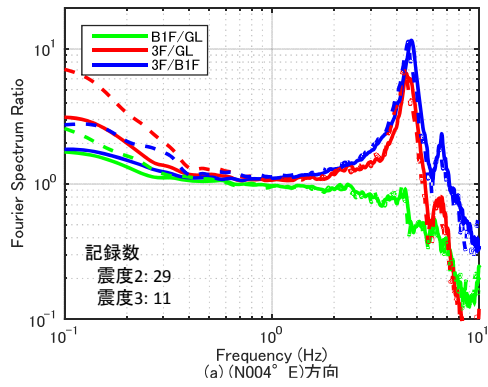
3 棟の建築物とも建築物平面形は長方形であり、以下においては短辺方向及び長辺方向と方向を区別して、各方向についての地震記録の整理結果を示す。なお、TKS は、平面寸法が 7m×66m で、高さ 14m の板状建築物であり、他の 2 棟と比較し、細長い建築物となっている。

図 2.3-1～2.3-3 は、2011 年東北地方太平洋沖地震以降に観測された地震に対するフーリエスペクトル比の整理結果である。グラフでは、周辺地盤地表での震度 2～4 の範囲で、震度毎の平均値を示している。UTM の場合には震度 4 の記録が無いが、震度 2 と 3 で大きな違いはない。また、EDG の場合には、震度 4 の記録もあるが、各フーリエスペクトル比で震度による違いはあまり見られない。以上に示される範囲では建築物の剛性、減衰及び地盤ばねとも振幅依存性はあまり大きくなく、ほぼ線形に留まっていると判断される。TKS の場合には、点線で示される震度 4 の場合に、特に長辺方向において、緑線の 1F/GL と赤線の 5F/GL のピークが低振動数側に移動する傾向が見て取れる。青線の 5F/1F のピークは震度に応じあまり変動しないので、TKS の場合には、これをスウェイロッキングモデル(SR モデル)として考えた場合にスウェイばねが非線形化し易い傾向にあると考えられる。

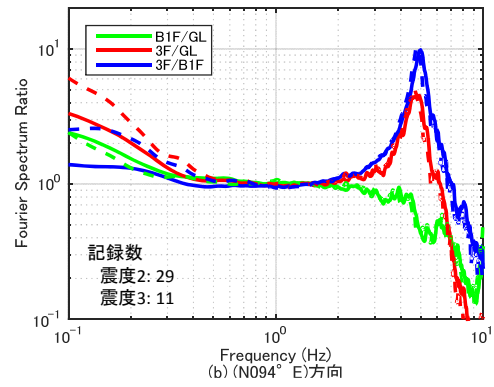
各建築物で、赤線で示すフーリエスペクトル比 TOP/GL(最上階/地表)と、青線で示すフーリエスペクトル比 TOP/BASE(最上階/最下階)とを比較する。UTM の場合には、赤線と青線がピークとなる振動数にほとんど差がみられない。一方、EDG 及び TKS の場合には、青線がピークとなる振動数に対し、赤線がピークとなる振動数は明らかに低振動数側に移動している。フーリエスペクトル比 TOP/GL と TOP/BASE の差は、SR モデルとして考えた場合のスウェイばねの影響程度に対応する。EDG 及び TKS の場合にはスウェイばねの変形が建物変形に比して大きくなり易く、これにより赤線のピーク位置が低振動数側に移動したのと考えられる。

表 2.3-2 建築物概要

	UTM	EDG	TKS
外観			
建設地	栃木県宇都宮市	千葉県野田市	千葉県千葉市
用途	事務所	事務所	集合住宅
階数	3F+B1F	3F	5F
高さ(m)	16.1	13.58	13.75
代表階平面寸法(m)	14.0×36.0	23.0×18.0	7.0×66.0
主体構造	RC 造	RC 造	RC 造
基礎構造	直接基礎	杭基礎	杭基礎

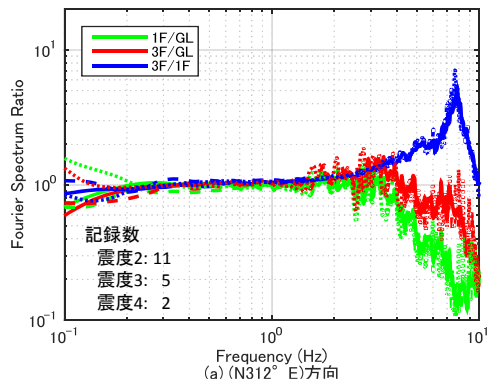


X: 短辺方向

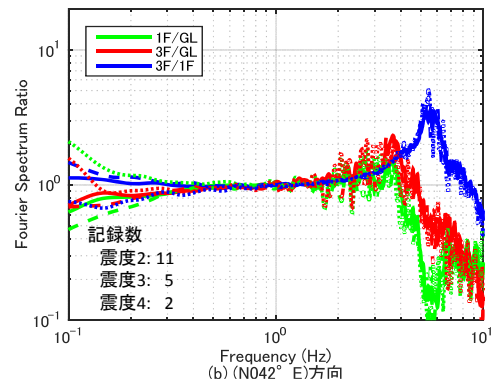


Y: 長辺方向

図 2.3-1 震度毎の平均スペクトル比(UTM, 311 後), ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3

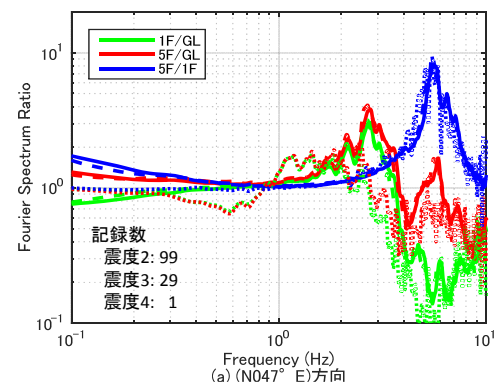


X: 短辺方向

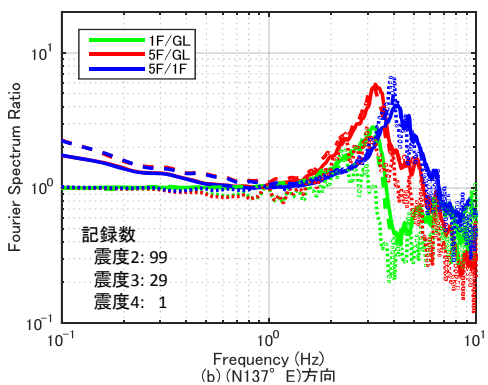


Y: 長辺方向

図 2.3-2 震度毎の平均スペクトル比(EDG, 311 後), ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3, 点線: 震度 4



X: 長辺方向



Y: 短辺方向

図 2.3-3 震度毎の平均スペクトル比(TKS, 311 後), ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3, 点線: 震度 4

杭基礎の EDG と TKS で、フーリエスペクトル比の整理結果を比較する。EDG と TKS で赤線のピーク高さを比較すると、EDG の方が明らかにピークは低くなっている。赤線がピークとなる振動数近辺においては、緑線で示されるフーリエスペクトル比 $1F/GL$ とほとんど差が見られない。また、EDG では青線で示されるフーリエスペクトル比 $3F/1F$ のピークも、短辺、長辺方向とも比較的低くなっている。

別添第 3 章では、このようなフーリエスペクトル比の特性がシミュレーション解析によって再現できるか検証した上で、フーリエスペクトル比 $3F/1F$ が小さくなった要因として、杭支持層の剛性が比較的小さく、層の厚さも薄いため、杭先端が沈み込み又は引っぱり上げられて建築物基礎にロックが生じたためとしている。ただし、図 2.3-2 を見ると、短辺方向で、青線には 8Hz 近傍で際立ったピークがあるが、シミュレーションではこのようなピークまで再現されていない。

TKS の場合には、青線で示すフーリエスペクトル比 $5F/1F$ のピーク位置が、短辺方向では、長辺方向よりも低振動数側にある。これは短辺方向では回転地盤ばねの剛性が長辺方向に比して小さいためと考えられる。別添第 4 章に示すシミュレーション解析によっても上部構造に回転ばねを取り付けたロックモデルの固有値解析によって、回転変形を考えた場合には長辺方向より、短辺方向の方が、青線のピークに対応するロックモデルの 1 次固有周期は長くなることが確かめられている。

なお、TKS では、短辺方向の両端に地震計を設置しており、ロックの計測が可能である。図 2.3-4 では、フーリエスペクトル比 $5F/GL$ 及び $5F/1F$ に加え、 $5F/(1F+H\theta)$ を示している。ピンク線で示す $5F/(1F+H\theta)$ のピーク位置は上部構造の固有振動数に対応するが、明確なピークは現れず、記録には何らかのノイズが生じているものと考えられる。しかしながら、回転地盤ばねの影響を受けるフーリエスペクトル比 $5F/1F$ は、明らかに $5F/(1F+H\theta)$ より低振動数側に位置しており、回転地盤ばねの影響によって固有振動数が長くなっていることを裏付けている。

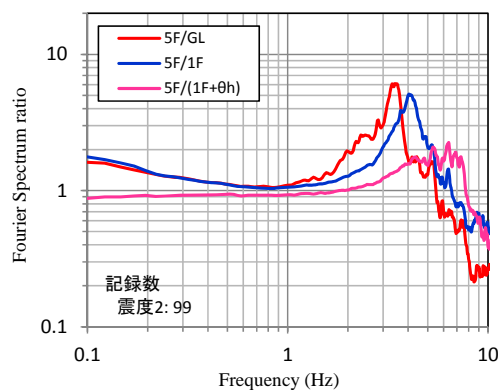


図 2.3-4 TKS の短辺方向の平均フーリエスペクトル比(311 後、震度 2)

各建築物で、緑線で示すフーリエスペクトル比 $BASE/GL$ を比較する。フーリエスペクトル比 $BASE/GL$ には上部構造の慣性力の影響が含まれるが、概ね基礎入力動に対応すると考えられる。3 棟の場合とも、入力損失効果によって、高振動数側では明らかに 1.0 を下回るようになる。

赤線で示されるフーリエスペクトル比 TOP/GL のピーク位置近傍でのフーリエスペクトル比

BASE/GL の様相に着目する。赤線のピークが位置する振動数は、地盤 - 構造物相互作用系の 1 次固有振動数に対応する。UTM では、赤線のピークは長辺、短辺方向とも約 4.5Hz にあるが、この近傍においても、緑線は明らかに 1.0 を下回っている。UTM は半地下階を有しており、これによる根入れ効果が現れたものと考えられる。この緑線が 1.0 を下回っていることに対応して、赤線のピーク高さも、青線のピーク高さより明らかに低くなっている。このことにより、根入れによる入力損失効果によって、地表で設定された地震動に対する上部構造の地震応答倍率は、最下階で設定された地震動に対する場合より低減され得ると予想される。

これに対し、EDG 及び TKS の場合には、上部構造の慣性力の影響もあるため、グラフから直ちにフーリエスペクトル比 BASE/GL が 1.0 を下回っているかどうかは判別しづらい。そのため、別添第 3 章及び第 4 章ではシミュレーション解析により上部構造慣性力の影響を取り除いた基礎入力動を求めている。その結果、EDG 及び TKS の場合とも、2Hz 前後から基礎入力動が地表面応答より低減されることが示されている。こうした入力損失効果が建築物の地震応答低減にどれほど寄与するかは、第 3 章の課題とする。

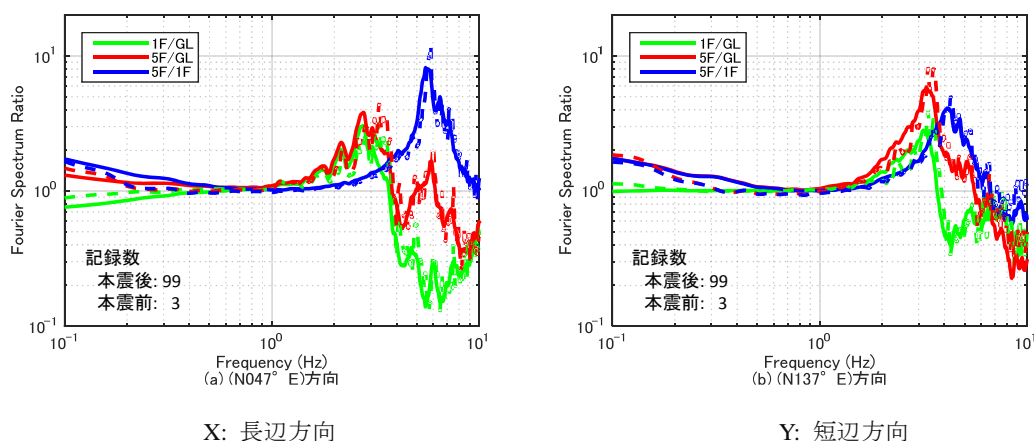


図 2.3-5 311 前後の平均フーリエスペクトル比(TKS, 震度 2), ※実線: 本震後、破線: 本震前

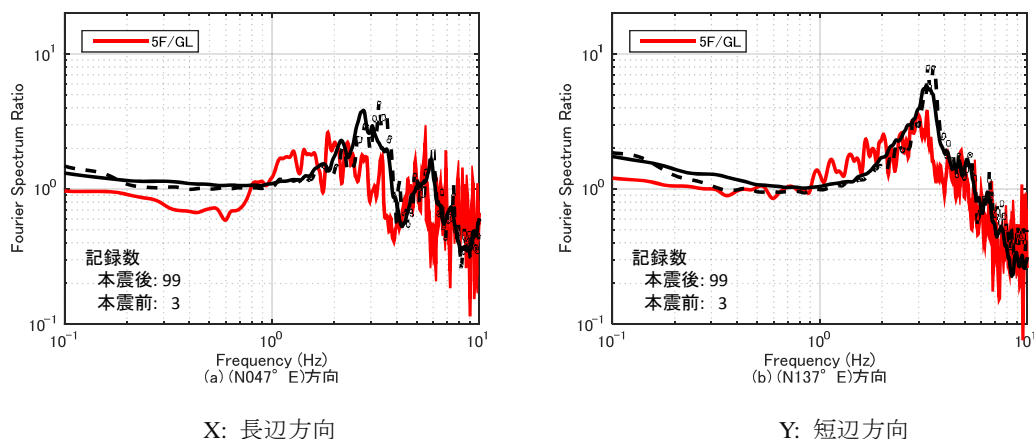
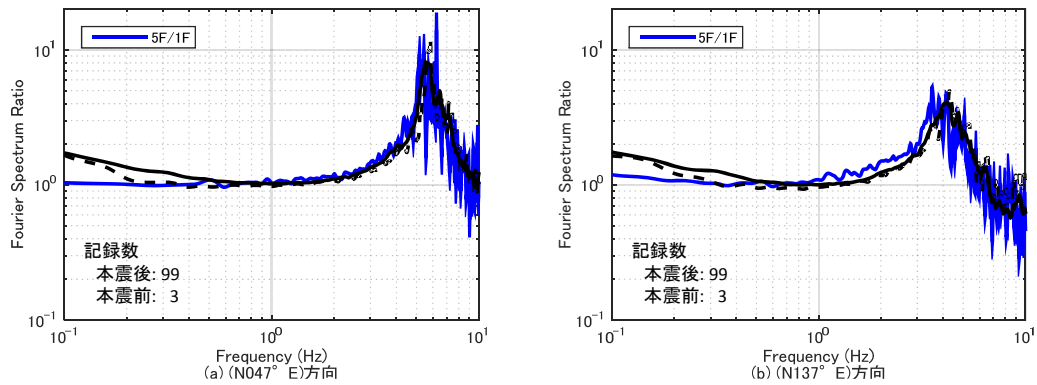


図 2.3-6 311 本震と震度 2 の地震の比較(TKS, 5F/GL), ※黒実線: 本震後、黒破線: 本震前



X: 長辺方向

Y: 短辺方向

図 2.3-7 311 本震と震度 2 の地震の比較(TKS, 5F/1F), ※黒実線: 本震後、黒破線: 本震前



(a) 北東床下屋内

(b) 南西妻側屋外

写真 2.3-1 液状化の様相



写真 2.3-2 周辺地盤の液状化の様相

TKS については、2011 年東北地方太平洋沖地震が観測されている。図 2.3-5 は、この地震前後で震度 2 の地震におけるフーリエスペクトル比を比較している。差はあまり生じていない。

図 2.3-6 及び図 2.3-7 は、本震時と、本震前後の震度 2 の記録のフーリエスペクトル比 5F/GL と 5F/1F とを比較している。図 2.3-6 の 5F/GL の場合には、図 2.3-7 の 5F/1F の場合と比較し、本震時でのピークが低振動数側に移動し、かつピーク高さも低くなっている。写真 2.3-1 及び写真 2.3-2 は地震直後の建築物床下と側面及び周辺地盤での液状化の様相を示すものである。別添第 4 章のシミュレーション解析では、TKS での地盤モデルについて有効応力解析を実施している。その結果、深さ 3m~8m で液状化したと推定されている。これらを踏まえると、本震時におけるフーリエスペクトル比 5F/GL の変化には液状化による地盤ばねの剛性低下の影響が反映されたと見なせ

る。一方、5F/1F にはあまり大きな変化は見られないことから上部構造は弾性を保持したと考えられる。また、図 2.3-5 で、フーリエスペクトル比 5F/GL が本震前後であまり変わらなくなるのは地盤ばねの剛性が地震後においてある程度回復したためと考えられる。

以上より、UTM のフーリエスペクトルの整理結果には、特に入力損失効果の影響が現れ、EDG 及び TSK の結果には、地盤ばねの影響が明らかに現れていることを示した。地盤ばねの影響は慣性の相互作用の影響ともいえる。これらの時間領域での最大応答に対する影響を、特に、等価卓越振動数 f_A と最大加速度比(TOP/GL, BASE/GL)との関係に着目して概観する。

図 2.3-8 は、UTM の長辺方向と TKS の短辺及び長辺方向の整理結果を示している。各図において、図 2.3-1 及び図 2.3-3 の震度 2 のフーリエスペクトル比 TOP/GL の平均(赤線)がピークとなる振動数を▲印で示している。図 2.3-8 に示す結果は振動数依存性のあることを示しており、最大加速度比(TOP/GL)は▲印の近傍で大きくなる傾向がある。この最大加速度比を相互に比較すると、UTM の場合が他と比較し、小さくなる傾向が認められる。緑で示す加速度比(BASE/GL)が他と比較し、1.0 を大きく下回っていることから、この結果には入力損失効果が働いたものと推定される。TKS の場合には短辺方向の方が長辺方向より最大加速度比(5F/GL)は大きくなる傾向にある。

これらの結果は、次項で示す区分Ⅱの ANX の場合等、地盤 - 構造物の動的相互作用があまり影響しない建築物の結果と比較すると、総じてより小さくなる傾向が認められる。

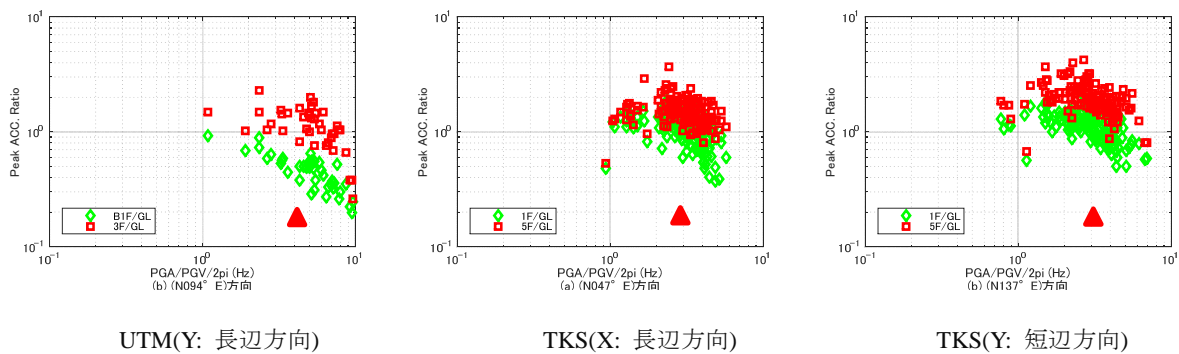


図 2.3-8 等価卓越振動数 f_A と最大加速度比 (BASE/GL, TOP/GL) の関係

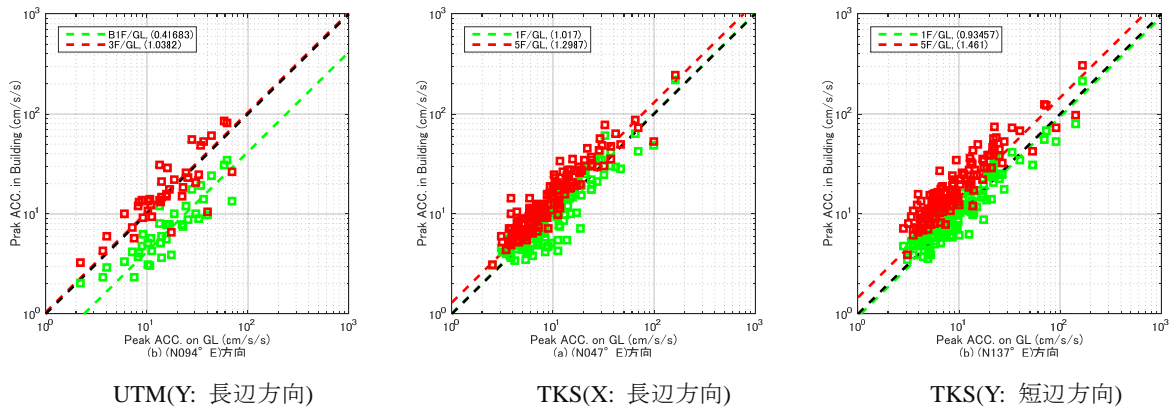


図 2.3-9 PGA と PBA 及び PTA の関係

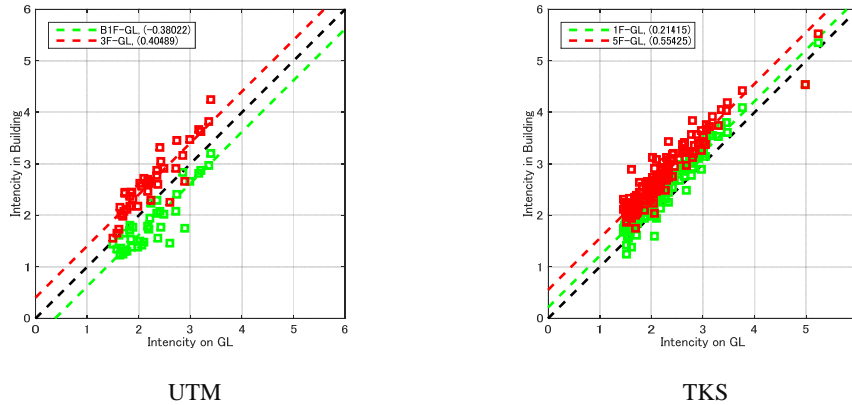


図 2.3-10 GL の計測震度と、最下階及び最上階の計測震度の関係

周辺地盤と建築物内で、単純に最大加速度と計測震度を比較した整理結果も見ておくことにする。図 2.3-9 は UTM の長辺方向と TKS の長辺方向及び短辺方向についての最大加速度に関する整理結果であり、図 2.3-10 は計測震度に関する整理結果である。

各グラフで回帰直線が引かれており、また、その傾きが凡例部分に書き入れてある。

図 2.3-9 において緑で示す PGA(地表での最大加速度)と PBA(最下階最大加速度)の關係に着目する。UTM の場合には PBA は PGA の 0.42 倍となっている。TKS の場合には、短辺方向で PBA は PGA の 0.93 倍、長辺方向で 1.02 倍となる。フーリエスペクトル比の整理結果によると、TKS の場合は慣性の相互作用の影響が現れ、これにより上部構造の応答は基礎固定系と見なした場合より低減されることもあり得ると予想されるが、単純な建築物の内と外での最大加速度の比較結果から見ると、あまり地震力は低減されず、長辺方向のように、むしろ増大されることもあるという結果となる。

計測震度の場合については、UTM の場合、建築物最下階の計測震度と周辺地盤の計測震度の差は-0.380 となり建築物内では外よりも計測震度は小さくなる。一方、TKS の場合、この差は+0.21 となって建築物内では外よりも逆に計測震度は大きくなる。このような建築物内部での震度の増大は、図 2.3-3 に示される通り、TKS の場合にはフーリエスペクトル比 BASE/GL(緑線)が UTM より増幅される結果となっていることと整合していると考えられる。

2.3.3 区分Ⅱ (6F~10F)の建築物について

本節で検討対象とする2棟の建築物の概要を表2.3-3に示す。

いずれも建築物平面形は長方形であり、以下においては短辺方向及び長辺方向と方向を区別して、各方向についての地震記録の整理結果を示す。

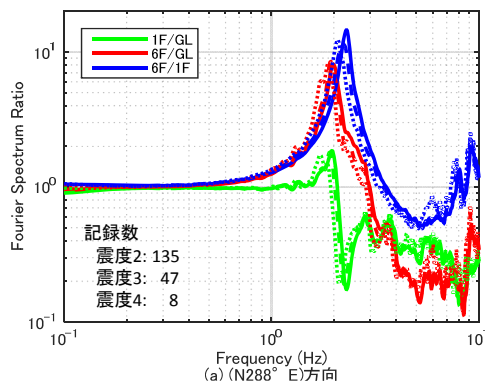
図2.3-11及び図2.3-12は、2011年東北地方太平洋沖地震以降に観測された地震に対するフーリエスペクトル比を震度毎に平均してグラフ化したものである。震度毎の違いを見た場合、図2.3-12に示されるANXの長辺方向及び短辺方向とも、点線の震度4の場合に赤色のフーリエスペクトル比8F/1Fと青色の8F/B1Fとも、ややピーク位置が高くなり、かつ、低振動数側に移動する様相が目立つのが特徴的である。

各建築物で、赤線で示すフーリエスペクトル比TOP/GL(最上階/地表)と、青線で示すフーリエスペクトル比TOP/BASE(最上階/最下階)とを比較する。NITの場合には、区分ⅠのEDG及びTKSの場合と同様、赤線のピークは青線のピークより低振動数側に位置する。ただし、赤線と青線のずれ具合は区分Ⅰの場合より小さい。ANXの場合には赤線と青線はほとんど一致しており、これにより地盤ばねの変形は小さく慣性の相互作用の影響は少ないと見なせる。

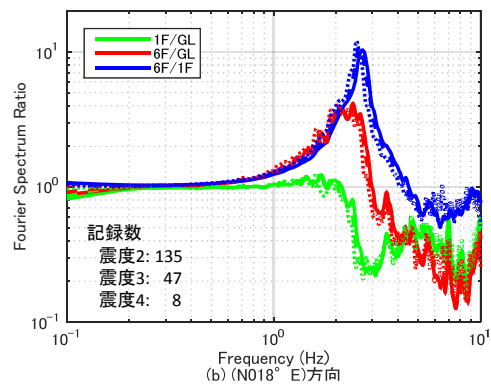
各建築物で、緑線で示すフーリエスペクトル比BASE/GLを比較する。いずれも、より高振動数側で、1.0を下回るようになる傾向が見られる。赤線のピーク位置でのフーリエスペクトル比BASE/GLに着目する。

表 2.3-3 建築物概要

	NIT	ANX
外観		
建設地	埼玉県南埼玉郡	茨城県つくば市
用途	学校校舎	事務所
階数	6F	8F+B1F
高さ(m)	30.0	35.4
代表階平面寸法(m)	63.0×25.0	26.0×21.0
主体構造	RC造	SRC造
基礎構造	杭基礎	直接基礎

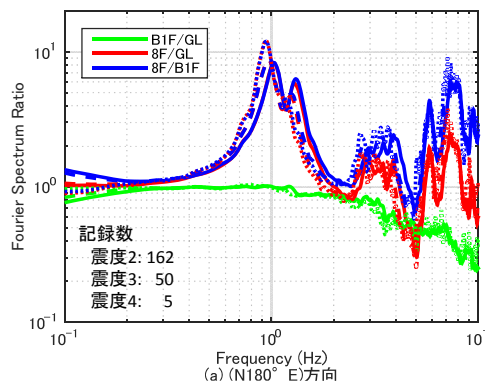


X: 長辺方向

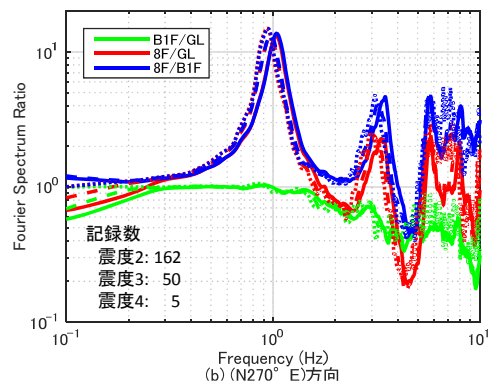


Y: 短辺方向

図 2.3-11 震度毎の平均スペクトル比(NIT, 311 後), ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3, 点線: 震度 4



X: 長辺方向



Y: 短辺方向

図 2.3-12 震度毎の平均スペクトル比(ANX, 311 後), ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3, 点線: 震度 4

図 2.3-11 の NIT の場合には赤線のピークは長辺方向で 2Hz 近傍に、短辺方向で 2Hz 強のところに位置する。これらの位置での緑線の様相を見てみると、上部構造の慣性力の影響もあり、特に長辺方向では、1.0 を下回るか否かは直ちには判別しづらい。別添第 5 章によると、上部構造を取り去ったシミュレーション解析の結果(3.9 地震の場合)から、これらの振動数域での基礎入力動/GL の伝達関数の値は 0.9 前後と推定されている。なお、別添第 5 章では、基礎入力動/GL を推定するに当たり、基礎杭のほか、基礎梁と部分ピットの埋込みまでモデル化することによって、地震記録との整合性が得られるとしている。よって、本建築物の入力損失にはこれらの埋め込みも影響していると考えられる。

図 2.3-12 の ANX の場合は、赤線のピークは長辺、短辺方向とも 1Hz 近傍に位置する。緑線のフーリエスペクトル比 B1F/GL に現れる上部構造慣性力の影響は NIT の場合ほど大きくないが、この振動数域においてフーリエスペクトル比 B1F/GL の低減程度は小さく、どの程度 1.0 を下回っているか、グラフからはやはり判別しづらい。別添第 6 章での基礎入力動の解析結果によると、振動数 1Hz で約 0.9 と推定されている。

NIT 及び ANX の場合とも 2011 年東北地方太平洋沖地震及びその前後での記録が得られている。

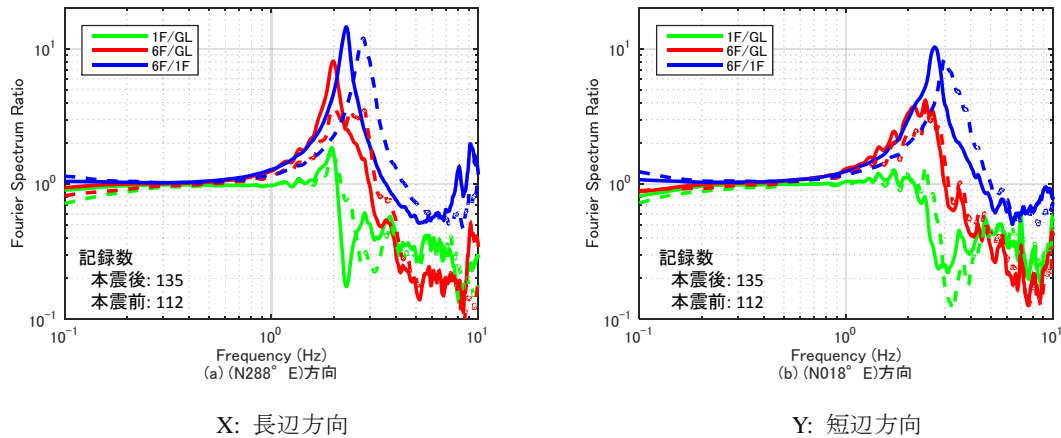


図 2.3-13 311 前後の平均フーリエスペクトル比(NIT, 震度 2), ※実線: 本震後、破線: 本震前

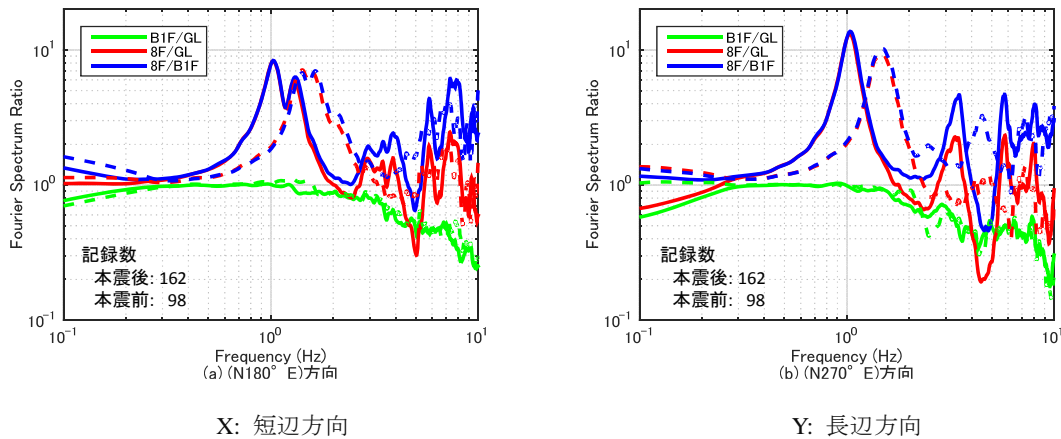


図 2.3-14 311 前後の平均フーリエスペクトル比(ANX, 震度 2)

図 2.3-13 及び図 2.3-14 では、本震前後での震度 2 の地震に対する平均フーリエスペクトル比を比較している。

図 2.3-13 の NIT の場合、青線のフーリエスペクトル比 6F/1F のピークが本震後に低振動数側に移動している。これにより上部構造が何らかの損傷を受けたと推定される。建築物管理者へのヒアリングにより、本震時に 1F での耐力壁にひび割れが生じ、補修工事が行われたことが確認されている。赤線のフーリエスペクトル比 6F/1F との関係で見た場合、本震後も青線はこれと一致せず、依然、両者のピークはずれたままとなっている。ただし、長辺方向において本震後のフーリエスペクトル比 6F/1F を示す赤の実線は、本震前の 6F/1F を示す破線より、ピーク位置が高くなっている。

図 2.3-14 の ANX の場合においても、青線のフーリエスペクトル比 8F/B1F のピークは本震後に低振動数側に移動している。やはり上部構造の損傷が予想されるが、事実、本震で建築物が損傷したため、補修工事が行われている。赤線のフーリエスペクトル比 8F/B1F との関係で見た場合は、本震前後とも、赤線と青線両者のピークはほぼ一致したままである。

前述の TKS のように本震時に地盤ばねのみが非線形化した場合と異なり、上部構造が非線形化した場合は、剛性等が元に回復しづらく、本震前後でフーリエスペクトル比の様相が異なる結果となった。図 2.3-15 及び図 2.3-16 では NIT 及び ANX の上部構造の 1 次固有周期の推移に関する整理結果を示している。

これらの図では横軸は西暦としている。2011 年で固有振動数の急激な低下が生じたことが分かる。その後、固有振動数には若干の回復傾向はみられるが、2011 年以前よりは固有振動数は高くなっていない。このことの影響が、図 2.3-13 及び図 2.3-14 の結果に現れたものと考えられる。

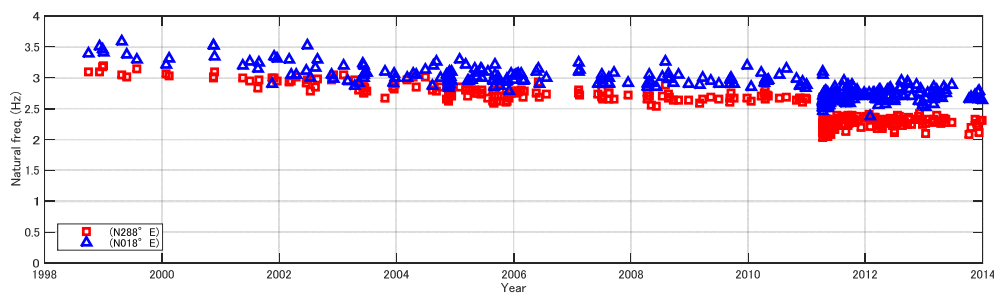


図 2.3-15 固有振動数の経年推移 (6F/1F, NIT)

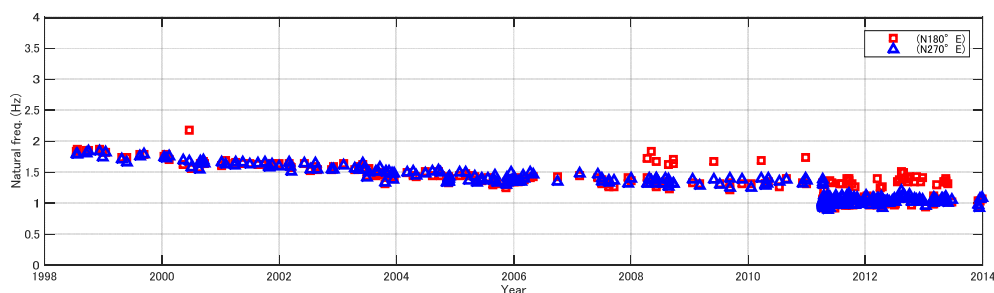


図 2.3-16 固有振動数の経年推移 (8F/B1F, ANX)

以上より、NIT のフーリエスペクトルの整理結果には、区分 I の EDG, NIT の場合と同様に、慣性の相互作用の影響が現れていることを示した。ANX の場合には、フーリエスペクトル比 B1F/GL には入力損失の効果が現れているが、区分 I の UTM の場合と異なり、フーリエスペクトル比 8F/GL 及び 8F/B1F のピークにはほとんど差が出ないことから、この入力損失の効果は上部構造の応答にはあまり影響しないと推定されることを示した。

このような地盤 - 構造物の動的相互作用の出現の違いによるこれらの時間領域での最大応答に対する影響程度を、特に、等価卓越振動数 f_a と最大加速度比(TOP/GL, BASE/GL)との関係に着目して概観する。

図 2.3-17 は、NIT の長辺及び短辺方向と ANX の短辺の整理結果を本震前後まとめて示している。各図において、図 2.3-11 及び図 2.3-12 の震度 2 の平均フーリエスペクトル比 TOP/GL(赤線)がピークとなる振動数を▲印で示している。

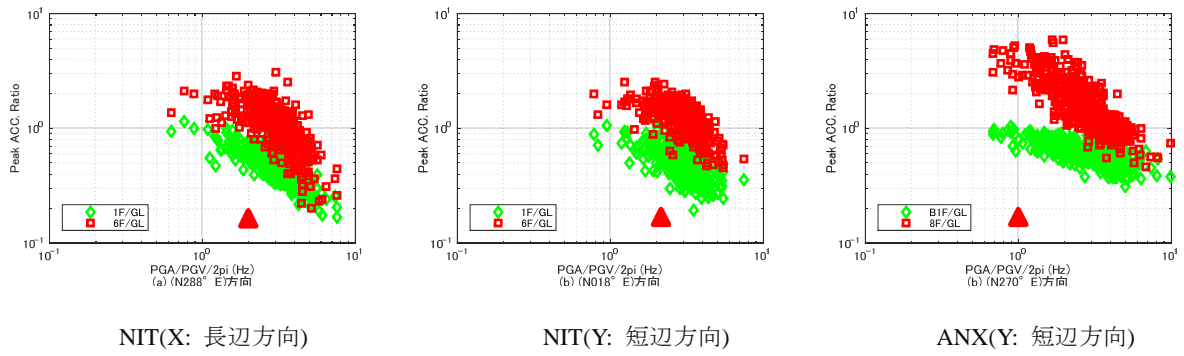


図 2.3-17 等価卓越振動数 f_A と最大加速度比 (BASE/GL, TOP/GL) の関係

図 2.3-17 に示す結果は振動数依存性のあることを示しており、最大加速度比(TOP/GL)は▲印の近傍で大きくなる傾向がある。この最大加速度比を相互に比較すると、ANX では NIT より加速度比(TOP/GL)は大きくなる傾向が見てとれる。

2.3.4 区分Ⅲ(11F~20F)の建築物について

本節で検討対象とする3棟の建築物の概要を表2.3-4に示す。

いずれも建築物平面形は長方形であり、以下においては短辺方向及び長辺方向と方向を区別して、各方向についての地震記録の整理結果を示す。

NRKとOHJの上部構造は同種のものであるが、地盤条件が異なる。

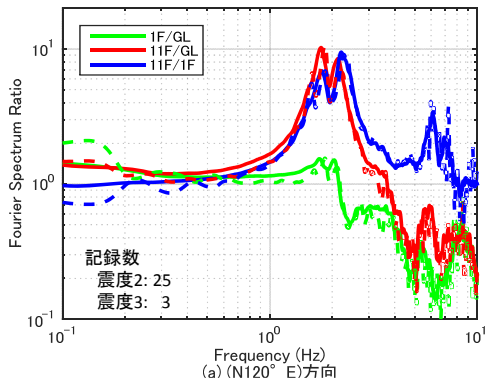
地盤の概要を表2.3-5に確認しておく。両者とも場所打ち杭で支持されており、その支持層はNRKの場合は深さ9.5mの砂礫層($V_s=510\text{m/s}$)であり、OHJの場合は深さ25mの砂礫層($V_s=500\text{m/s}$)である。OHJの場合には、深さ13mまで V_s が100m/s程度の軟弱層が出現しているのが特徴的である。

表 2.3-4 建築物概要

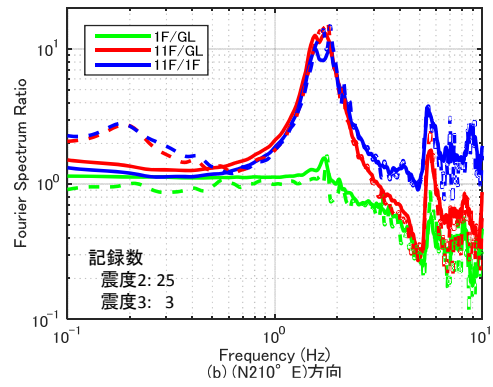
	NRK	OHJ	UKM
外観			
建設地	神奈川県横浜市	東京都北区	東京都北区
用途	集合住宅	集合住宅	集合住宅
階数	11F	11F	20F
高さ(m)	29.5	30.95	59.9
代表階平面寸法(m)	45.0×6.9	8.35×7.8	38.85×33.3
主体構造	RC造	RC造	RC造
基礎構造	杭基礎	杭基礎	杭基礎

表 2.3-5 NRKとOHJの工学的基盤からの地盤の伝達関数

NRK				OHJ			
層厚(m)	地盤種別	S波速度(m/s)	密度(t/m ³)	層厚(m)	地盤種別	S波速度(m/s)	密度(t/m ³)
2.8	埋土	160	1.6	2.0	埋土	150	1.6
1.9	埋土	160	1.6	3.5	ローム	65	1.45
1.75	埋土	140	1.6	3.5	細砂	95	1.5
2.15	粘性土シルト	140	1.5	4.0	砂礫	90	1.55
0.9	シルト混じり砂礫	250	1.8	5.0	粘土	135	1.6
—	砂礫	510	1.9	7.0	砂質粘土	230	1.7
—	—	—	—	—	砂礫	500	1.9

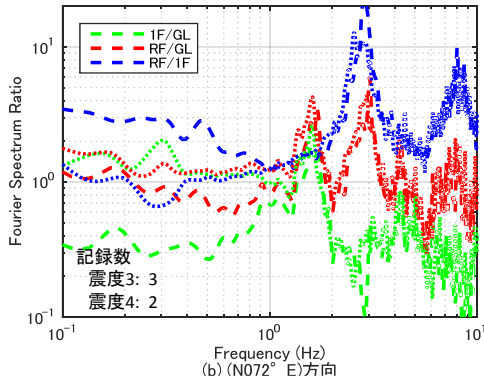


X: 長辺方向

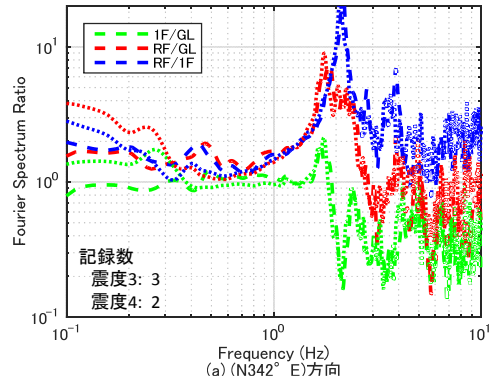


Y: 短辺方向

図 2.3-18 震度毎の平均スペクトル比(NRK, 311 後), ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3

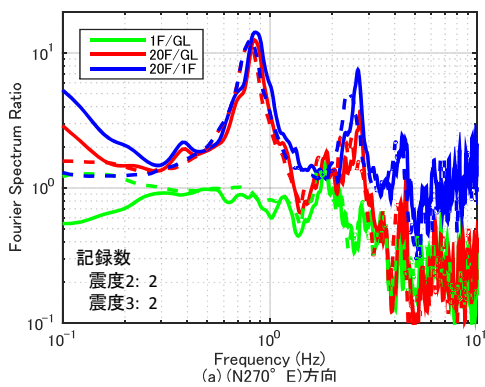


Y: 長辺方向

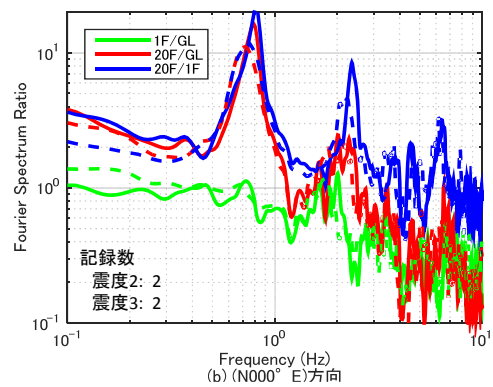


X: 短辺方向

図 2.3-19 震度毎の平均スペクトル比(OHJ, 311 前), ※破線: 震度 3, 点線: 震度 4



X: 長辺方向



Y: 短辺方向

図 2.3-20 震度毎の平均スペクトル比(UKM, 311 後), ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3

NRK の場合は 2011 年東北地方太平洋沖地震(本震)での記録も観測しているが、構造物は無傷であり、非線形現象は生じなかった。OHJ は 1991 年に観測を終了し、UKM は 2012 年から観測を開始している。よって、本節では本震前後で比較したフーリエスペクトル比の整理結果については記載を省略する。

図 2.3-18～図 2.3-20 は、震度毎のフーリエスペクトル比の平均を示したものである。図 2.3-18 の NRK と図 2.3-20 の UKM は本震以降の記録を整理したものであり、図 2.3-19 の OHJ は本震以前の記録を整理したものである。

各建築物で、赤線で示すフーリエスペクトル比 TOP/GL(最上階/地表)と、青線で示すフーリエスペクトル比 TOP/BASE(最上階/最下階)とを比較する。

全て杭基礎であるが、OHJ のみ様相が異なる。他の 2 棟では赤線と青線のピークがほぼ一致する傾向を示すのに対し、OHJ では、青線のピークに対し赤線のピークは明らかに低振動数側に位置している。

各建築物で、緑線で示すフーリエスペクトル比 BASE/GL を比較する。高振動数側で 1.0 を下回る傾向を示すのはこれまでと同様である。

赤線で示されるフーリエスペクトル比 TOP/GL のピーク位置近傍でのフーリエスペクトル比 BASE/GL の様相に着目する。NRK 及び UKM の場合には、この振動数域でのフーリエスペクトル比 BASE/GL の低下度合いは小さく、ほぼ 1.0 に近い値となっている。OHJ の場合は上部構造の慣性力の影響が大きく 1.0 を下回っているか否か判別はしづらいが、NRK の場合と比較すると、1.0 を下回る傾向は見られるようである。

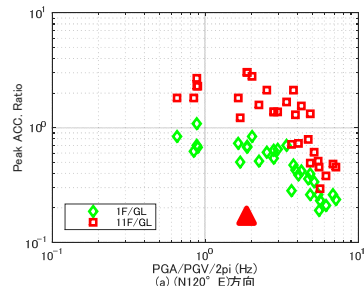
なお、UKM の場合は、長辺及び短辺方向とも、他の場合より 1.0Hz 程度の比較的低い振動数域から緑線のフーリエスペクトル比 BASE/GL は 1.0 を下回るようになっている。また、2.0Hz 弱のところでは山が見られる。赤線のフーリエスペクトル比 TOP/GL については、高次の応答に対応する 2Hz 超のところでは、青線のフーリエスペクトル比 TOP/1F よりも大きく低減するようになる。これらには表層地盤の増幅特性や地盤ばねの特性が影響していると考えられるが、このような現象が解析で再現できるか、特に地盤ばねの周波数依存性の影響を検討するため、別添第 7 章では本建築物についてシミュレーションを実施している。

以上より、他と比較し OHJ のフーリエスペクトルの整理結果には、慣性の相互作用の影響が現れていることを示した。NRK 及び UKM の場合には、この影響は小さいと考えられる。

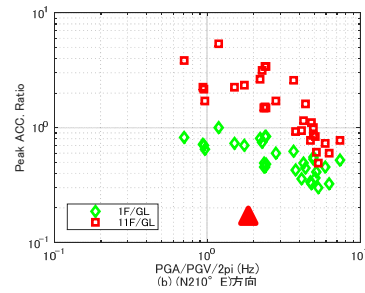
このような地盤 - 構造物の動的相互作用の出現の違いによるこれらの時間領域での最大応答に対する影響程度を、これまで同様、等価卓越振動数 f_A と最大加速度比(TOP/GL,BASE/GL)との関係に着目して概観する。なお、UKM の場合は観測開始から間もなく記録自体の数が少ないほか、建築物の 1 次固有振動数に近い等価卓越振動数の地震も観測されていない。したがって、NRK と OHJ の整理結果のみ示している。また、各図において、図 2.3-18 及び図 2.3-19 の震度 2 の平均フーリエスペクトル比 TOP/GL(赤線)がピークとなる振動数を▲印で示している。

NRK 及び OHJ の両者とも、区分 I の TKS と同じく板状建築物である。長辺方向と短辺方向で比較すると、短辺方向の方が、TOP/GL は大きくなる傾向が見られる。OHJ と NRK で比較した場合には、長辺方向で OHJ の方が TOP/GL は小さくなる傾向にあるようである。ただし、記録の数が少なく、図 2.3-22 の結果のみからは、建築物最大応答に動的相互作用による効果が現れてい

るかどうか判断することは困難である。

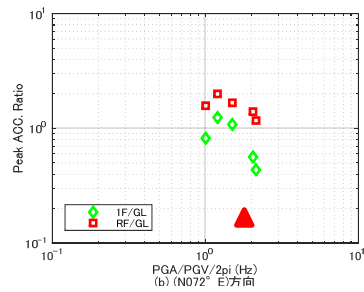


NRK(X: 長辺方向)

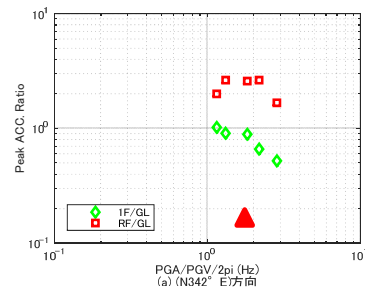


NRK(Y: 短辺方向)

図 2.3-21 等価卓越振動数 f_A と最大加速度比 (BASE/GL, TOP/GL) の関係



OHJ(Y: 長辺方向)



OHJ(X: 短辺方向)

図 2.3-22 等価卓越振動数 f_A と最大加速度比 (BASE/GL, TOP/GL) の関係

2.3.5 区分Ⅳ(21F以上)の建築物について

本節で検討対象とする3棟の建築物の概要を表2.3-6に示す。

いずれも建築物平面形は長方形であり、以下においては短辺方向及び長辺方向と方向を区別して、各方向についての地震記録の整理結果を示す。

3棟の場合とも、2011年東北地方太平洋沖地震(本震)前後の記録が観測されている。

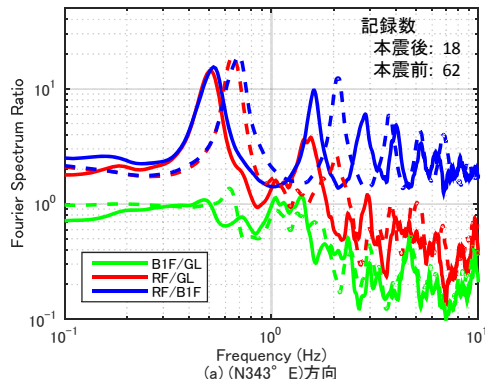
図2.3-23～図2.3-25では、本震前後での震度2の地震に対する平均スペクトル比を比較している。

各建築物で、赤線で示すフーリエスペクトル比 TOP/GL(最上階/地表)と、青線で示すフーリエスペクトル比 TOP/BASE(最上階/最下階)の関係を見た場合、本震の前後で3棟の場合とも両者のピーク位置はほとんど一致している。よって、上部構造の応答に対する地盤ばねの影響は少ないと判断される。

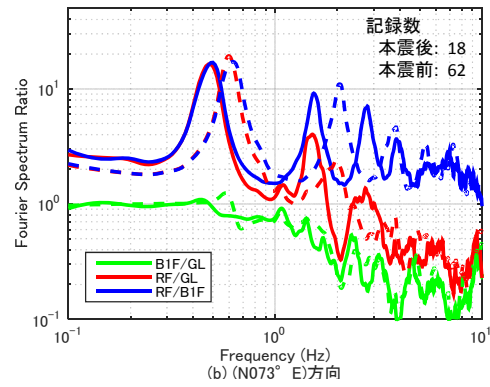
また、(3)項で示した NIT、ANX の場合と同様、3棟の場合とも赤線のフーリエスペクトル比(TOP/GL)と青線のフーリエスペクトル比(TOP/BASE)のピークは本震後に低振動数側に移動している。本震において何らかの損傷が生じたものと判断される。剛性低下型の復元力特性を有する鉄筋コンクリート造と異なり、CG7は鉄骨造の建築物であるが、このような固有周期の伸びは、鉄骨造のCG7の場合にも生じている。

表 2.3-6 建築物概要

	HMB	SN2	CG7
外観			—
建設地	埼玉県草加市	東京都江東区	東京都千代田区
用途	集合住宅	集合住宅	事務所
階数	30F	32F+B1F	33F+B2F
高さ(m)	95.9	97.45	155.82
基準階建築面積(m ²)	2,362	1,596	2,999.69
主体構造	RC造	SRC造	S造
基礎構造	杭基礎	杭基礎+連壁基礎	直接基礎

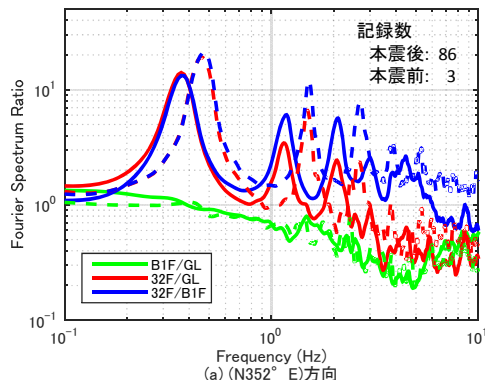


Y: 短辺方向

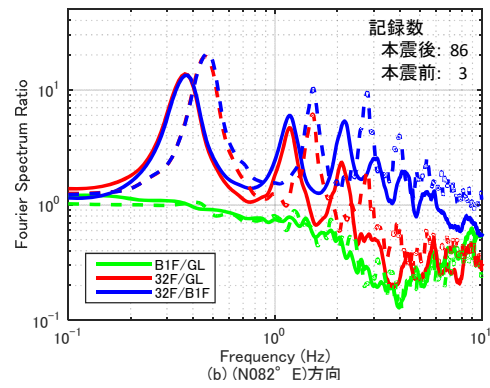


X: 長辺方向

図 2.3-23 311 前後の平均フーリエスペクトル比(HMB, 震度 2), ※実線: 本震後、破線: 本震前

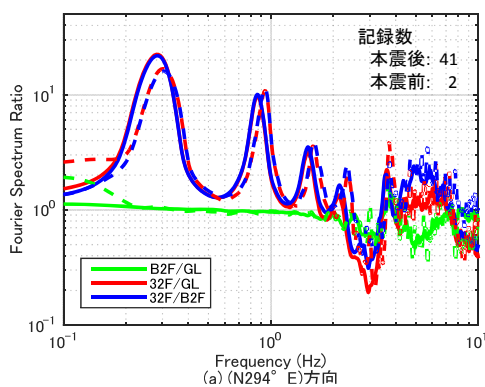


X: 短辺方向

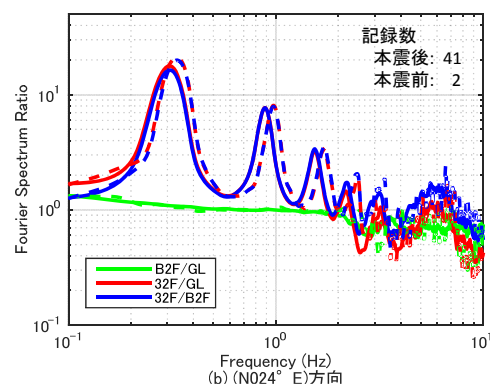


Y: 長辺方向

図 2.3-24 311 前後の平均フーリエスペクトル比(SN2, 震度 2), ※実線: 本震後、破線: 本震前



X: 短辺方向



Y: 長辺方向

図 2.3-25 311 前後の平均フーリエスペクトル比(CG7, 震度 2), ※実線: 本震後、破線: 本震前

各建築物で、緑線で示すフーリエスペクトル比 **BASE/GL** に着目する。いずれも高振動数側で 1.0 を下回るようになる。SN2 の場合は、1.0Hz より低い振動数域でも 1.0 を下回る様相が見て取れる。一方、CG7 の場合は、表 2.3.1 に示される通り、他の 2 棟と比較して地盤の卓越周期がかなり短いため、**BASE/GL** が 1 以下となるのも、かなり高めの振動数領域に限定されている。

SN2 の基礎構造は杭基礎と連壁基礎の併用であるが、連壁基礎を有する建築物での基礎入力動を検討するため、別添第 8 章では SN2 のシミュレーション解析を実施している。この結果によると、連壁基礎は、水平入力動を減じさせる一方、回転入力動を大きくする影響もあると推定されている。

本節で取り上げた 3 棟の場合は、地盤 - 構造物の動的相互作用は建築物応答にあまり影響しないと考えられるが、これまで同様、等価卓越振動数 f_A と最大加速度比(TOP/GL, BASE/GL)との関係に着目する。より広範の振動数の範囲で、記録が得られている HMB の結果を図 2.3-26 に示す。図 2.3-17 の ANX の場合と同様、動的相互作用を受ける建築物と比較し、最大加速度比 TOP/GL は大きくなる傾向が見て取れる。

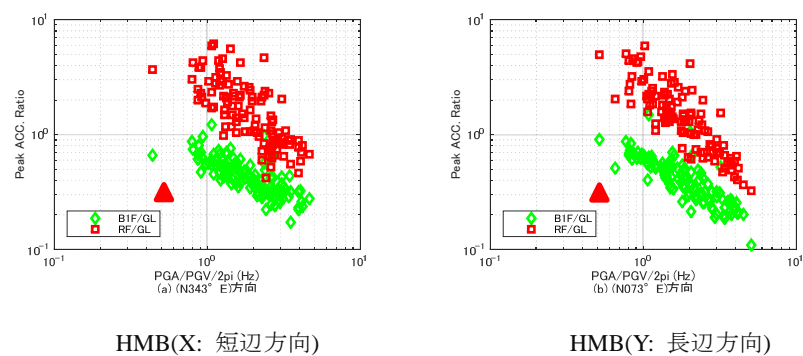


図 2.3-26 等価卓越振動数 f_A と最大加速度比(BASE/GL, TOP/GL)の関係

2.3.6 区分V(免震)の建築物について

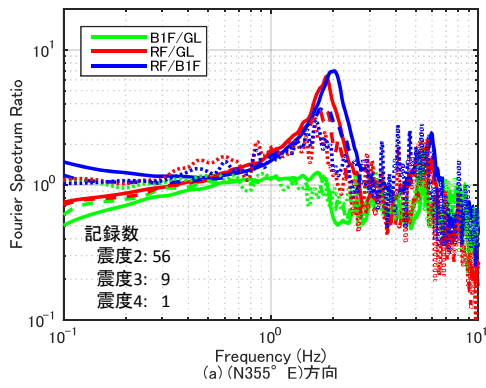
本節で検討対象とする免震建築物の概要を表 2.3-7 に示す。

建築物平面は長方形であるが、両方向で同様の傾向を示すので、以下では短辺方向の地震記録の整理結果のみ示す。図 2.3-27 は 2011 年東北地方太平洋沖地震以降のフーリエスペクトル比の平均を震度別に示したものである。フーリエスペクトル比 RF/GL 及び RF/BF(免震層の下側)の場合とも、震度が大きくなるほど、ピーク位置高さが低くなる。図 2.3-28 は、フーリエスペクトル比(RF/GL)について、2011 年東北地方太平洋沖地震(本震)での記録と震度 2 で観測された記録の整理結果を比較している。震度 2 の地震に対する場合、フーリエスペクトル比(RF/GL)には明確なピークが存在するが、本震時にはピークは低振動数側に移動し、またその形状も不明瞭になっている。この結果から、URM は本震時に長周期化し免震建築物として機能したと判断できる。

図 2.3-29 は、前節までと同様に、等価卓越振動数 f_A と最大加速度比(TOP/GL, BASE/GL)との関係を示している。震度に係らず全ての地震の整理結果を同一のグラフに示している。本震時の記録については↑を示した。全体として振動数依存性のある結果となっており、1Hz から 2Hz にかけて最大加速度比 TOP/GL は大きくなるようである。これは、図に示される震度 4 までのフーリエスペクトル比 RF/GL のピーク位置が存在する振動数域と概ね対応する。しかしながら、図 2.3-26 において、本震時には、その他の地震の場合と比べ、↑記号で示される TOP/GL の値は明らかに小さくなる傾向が現れている。

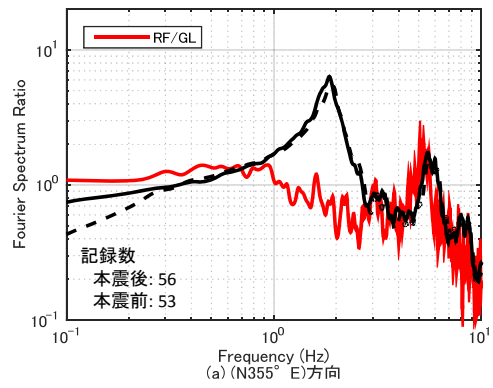
表 2.3-7 建築物概要

	URM
外観	
建設地	神奈川県川崎市
用途	集合住宅
階数	6F
高さ	18.6m
代表階平面寸法(m)	11.4×62.0
主体構造	RC 造、免震
基礎構造	杭基礎



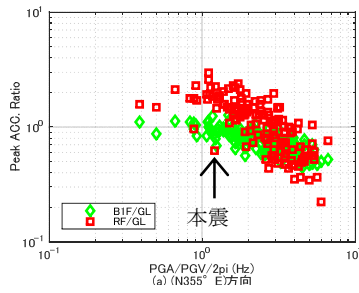
X: 短辺方向

図 2.3-27 震度毎の平均スペクトル比(311 後)
 ※実線: 震度 2, 破線: 震度 3, 点線: 震度 4



X: 短辺方向

図 2.3-28 本震と震度 2 の地震の比較(6F/GL)
 ※黒実線: 311 後, 黒破線: 311 前



X: 短辺方向

図 2.3-29 等価卓越振動数 f_A と最大加速度比(BASE/GL, TOP/GL) の関係

2.3.7 考察

前節までに、特に、フーリエスペクトル比に着目して、地震記録の整理結果に現れる地盤 - 構造物の動的相互作用の影響を把握した。

総じて、地盤 - 構造物の動的相互作用の影響は、区分Ⅰの低層の建築物により大きく現れる結果となった。

地下階を有する直接基礎の場合には、根入れによる入力損失効果が見込まれる。入力損失効果は、高振動数側(短周期側)で強く現れる傾向がある。区分Ⅰの低層建築物 UTM の場合には上部構造の 1 次固有周期が短く、その値が、入力損失効果の現れやすい短周期側の領域に収まっていると見なせるため、入力損失による建築物の応答低減効果が期待できる。一方、区分Ⅱの、より高層の ANX の場合にも、B1F の地震記録には根入れによる入力損失効果が現れるが、UTM に比べ、上部構造の 1 次固有周期がより長くなり、入力損失効果の得られやすい短周期の領域には収まり難いため、上部構造の応答への入力損失の効果は UTM の場合ほどは発揮されないと予想される。

杭基礎の場合には、特に区分Ⅰ又は区分Ⅱの建築物の場合にフーリエスペクトル比 TOP/GL のピークが TOP/BASE のピークより低振動数側に位置するようになる。これは水平地盤ばねの変形が相対的により大きくなって上部構造が剛体的な挙動を示すようになることに対応している。また、応答に対する地盤ばねの減衰の影響も大きくなる。これらにより、上部構造の応答は基礎固定系と見なす場合より低減される場合があると予想される。なお、このようなピークのずれには、区分Ⅲの OHJ(11F)と NRK(11F)を比較した例から見ても、地盤条件が大きく影響することは明らかである。

2011 年東北地方太平洋沖地震(本震)においては、TKS, NIT, ANX 及び超高層の HMB, SN2, CG7 において非線形現象を観測した。これらの影響は、フーリエスペクトル比でのピークのずれ等となって現れる。地盤のみが非線形化した TKS の場合にはフーリエスペクトル比の様相が地震前後であまり変わらなくなることから、地震後に地盤剛性は、ある程度回復したと推定される。NIT, ANX, HMB, SN2, CG7 の場合には、上部構造が損傷しており上部構造の剛性は完全には元に戻らなかったため、地震後もフーリエスペクトル比のピークは地震前のものとずれたままとなっている。

以上に示すように、フーリエスペクトル比には地盤 - 構造物の動的相互作用や地震による損傷の影響が現れる。次章では、地盤 - 構造物の動的相互作用の影響を受け易い建築物を対象に、これらの影響を、非線形現象が観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震での記録も含め、観測記録から定量的に評価することを課題とする。

2.4 まとめ

本章の内容を以下にまとめる。

- 1) 本研究で検討対象とする地震観測対象建築物の一覧を示した。検討対象は、地盤と建築物内で同時地震観測が実施されている 58 棟である。このうち、本研究期間内(2010-2013 年度)に新たに地震計を設置した建築物は 27 棟である。
- 2) 観測建築物の地震記録に関する整理項目を定めた。これらは、1) 建築物・地盤・観測条件に関するもの、2) 観測地震に関するもの、3) 加速度、速度の最大値及び計測震度に関するもの、4) 固有振動数に関するもの、及び、5) 建築物の振動特性に関するもの(フーリエスペクトル比等)に大別される。また、2011 年東北地方太平洋沖地震での記録が観測されている場合には、これも整理項目に加え記録を整理することになっている。
- 3) 地震観測記録の整理結果を示した。その概要は以下の通りである。
 - i) 階数等に応じた 5 つの建築物区分毎に、いくつかの代表建築物を取り上げ、フーリエスペクトル比[TOP/GL(最上階/地表), TOP/BASE(最上階/最下階)及び BASE/GL(最下階/地表)]の整理結果を示した。また、これらを建築物間で比較して、階数や基礎形式に応じた各フーリエスペクトル比の様相を比較し、地盤-構造物の動的相互作用の影響を受ける場合の各フーリエスペクトル比のピークのずれ等の特徴を把握した。
 - ii) 等価卓越振動数と最大加速度比(TOP/GL, BASE/GL)の関係に着目した場合について、上部構造への動的相互作用の影響が予想される建築物においては、最大加速度比 TOP/GL も小さな値となる傾向が確認された。最大加速度比(BASE/GL)については、入力損失効果により、一般に、より高振動数側で 1.0 を下回る傾向が確認された。
 - iii) 2011 年東北地方太平洋沖地震(本震)において、本章で取り上げた建築物のうち、TKS(5F), NIT(6F), ANX(8F+B1F), HMB(30F), SN2(32F+B1F), CG7(33F+B2F)の 6 棟において非線形化現象が生じたことを観測した。また、URM(免震 6F)については、本震時に免震建築物として機能したことを観測した。
 - iv) TKS の場合には、本震時において周辺地盤が液状化し、これに伴い地盤ばねが非線形化したことがフーリエスペクトル比から読み取れることを示した。また、地盤ばねは地震後にある程度回復したと推定されることを示した。
 - v) NIT(6F), ANX(8F+B1F), HMB(30F), SN2(32F+B1F)及び CG7(33F+B2F)の 5 棟の場合には、本震時に上部構造が損傷したが、これに伴い、フーリエスペクトル比(TOP/GL, TOP/BASE)のピークは低振動数側(長周期側)に移動した。このようなずれは地震後も元のままとり建築物

剛性は完全には元に回復していないと推定されることを示した。

本章において、地盤 - 構造物の動的相互作用の影響の有無、程度はフーリエスペクトル比の様相から把握できることを示した。このような様相は強震時には地盤等の非線形化により変化する。次章では、非線形化の影響も含め、フーリエスペクトル比等の地震記録の整理結果から、地盤 - 構造物の動的相互作用の建物応答への影響を定量的に評価することを課題とする。

【参考文献】

- 1) 小島宏章、福和伸夫、飛田潤：強震観測・常時微動計測に基づく中低層建物の入力損失効果に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 587 号、pp.77-84、2005.1
- 2) 安井譲、井口道雄、赤木久真、林康裕、中村充：1995 年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察、日本建築学会構造系論文集、No.512、pp.111-118、1998.10