

# 常時微動計測・強震観測に基づく動的相互作用の階数依存性に関する研究

## - S造及びSRC造10階建て建物の建設段階毎の動特性の変化 -

名古屋大学大学院工学研究科建築学専攻 博士課程前期課程2年

構造設計工学講座 福和研究室 小島宏章

### 1. はじめに

建物と地盤との動的相互作用(以下,SSIと略記)は中低層建物の地震時挙動に大きな影響を及ぼすと指摘されている。兵庫県南部地震の被害報告書<sup>1)</sup>によると、震度7地域に立地した1982年以降に建てられたRC造建物(ピロティ構造・施工不良の建物を除く)で、中破以上の被害を受けたものは3階建てで1.5%、7~10階建てで21.3%であり、階数が高くなるほど被害率が高くなる傾向がある。一方、震度7地域での地表面加速度は1000gal以上と推定されており、新耐震設計法の2次設計で想定している地震動レベルの300~400galを遙かに上回っている。しかし、中低層建物の被害率は極めて低いものであった。その原因の一つとして、SSIによる地震力低減効果が指摘されている<sup>2)</sup>。

原子力関連施設や超高層建物などの重要構造物では,SSIに関する理論的解析や実験・観測が多く行われている。しかし、一般的な中低層建物では,SSIに着目した詳細な計測はあまり行われていないため、その地震時挙動には不明な点が多く残されている。一方、建築基準法の改正で導入された限界耐力計算法により、SSIの影響を設計時に考慮できるようになった。したがって、中低層建物の振動性状に影響を及ぼすSSI効果を実証的に把握することは、耐震設計の性能設計化を促進するために極めて重要である。

そこで本研究は、構造種別・構造形式と基礎形式の異なる2棟の10階建て建物を対象として、建設段階毎に常時微動計測を行うとともに、S造建物の建設中に継続的に強震観測を行うことにより、それぞれの建物で地盤・基礎条件が全く同一のまま階数のみが増える場合での振動特性の変化に関して検討を行う。また、竣工後の地震記録より、構造種別・構造特性による振動特性の違いを検討する。

### 2. 対象建物と計測概要

#### 2.1 対象建物

対象建物は名古屋大学東山キャンパス内に立地する2棟の10階建て建物であり、場所打ち杭で支持されたS造のIB電子情報館(以下,S造建物と略記)と、PHC杭で支持されたSRC造の工学研究科新1号館(以下,SRC造建物と略記)である。表1に両棟の建物概要を示す。

#### 2.2 常時微動計測概要

常時微動計測は、階数変化と2次部材の付与によるSSI効果の変化を把握するために、図1に示すように建設段階に沿って行った。S造建物ではスラブが2フロア打設される毎に計測を行った。S造建物は図1に示すように、スラブ打設に先行して鉄骨が順次立ち上がっていた。SRC造建物では各階コンクリート部分が打設される毎に計測を行った。ただし、ロッキングの計測は7階建て時以降でのみ行った。SRC造建物はコンクリート部分が打設される前に、鉄骨が最上階まで組み上がっていた。

### 2.3 強震観測概要

地震動と常時微動は建物への入力特性が異なるため、両記録から得られる建物振動特性を比較する必要がある。

そこで、S造建物の上部構造物建設時に、建物頂部と地下部に可搬式の強震計を仮設して強震観測を行った。竣工後は両建物で強震計を設置して観測を行っている。

### 3. 常時微動に基づく振動特性の変化

#### 3.1 固有振動数の変化

SSIによる固有振動数の変化に着目して、各建設段階(2, 4, 6, 8, 10階建て時)での地盤-建物連成系(Top/GL)、スウェイのみ拘束した基礎固定系(Top/1F)、スウェイとロッキングを拘束した基礎固定系(Top/(1F+H0))の張間方向のフーリエスペクトル比を図2に示す。図2に記した $\times$ ,  $\circ$ ,  $\square$ 印はそれぞれTop/GL, Top/1F, Top/(1F+H0)の固有振動数である。図2を見ると、S造建物の2, 4階建て時の1次固有振動数は明瞭には現れていない。これは図1に示したように、スラブ打設に先行して組み上げられた鉄骨フレームが影響しているためと考えられる。そこで、スラブ

表1 建物概要

	S造建物	SRC造建物
骨組形式	ラーメン構造	壁付きラーメン構造
階数	地上10階, 地下1階	地上10階, 一部地下1階
軒高	41.1m	39.3m
面積(基準階)	821m <sup>2</sup>	1,057m <sup>2</sup>
(1階)	821m <sup>2</sup>	1,404m <sup>2</sup>
基礎形式	杭基礎	杭基礎
(杭種別)	(場所打ち杭 42m)	(PHC杭 45m)
(杭径)	(1,200~1,400φ, 拡底部:1,700~2,400φ)	(600φ)
基礎底面深さ	GL-7.5m	GL-2.3m, 一部GL-7.8m

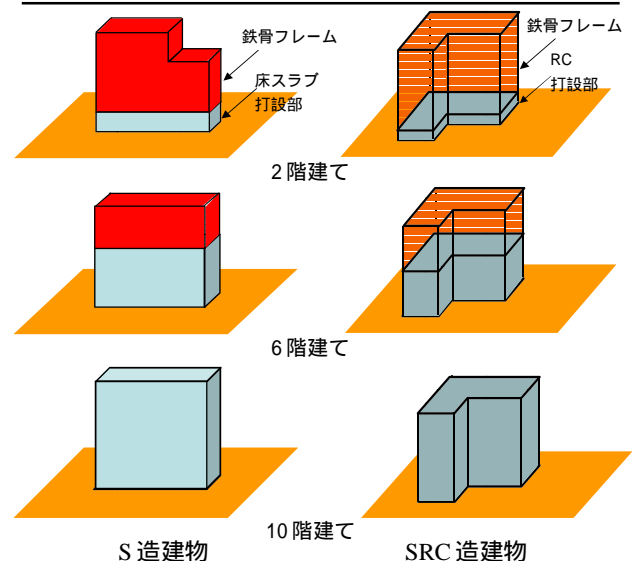


図1 常時微動計測時の建物形状

打設部以下の固有振動数を特定するために、各建設段階で基礎固定系の立体フレームモデルを作成して固有値解析を行った。解析は、建物全体のモデル（以下、全体モデル）、スラブ打設部より上の鉄骨フレーム部分（以下、上部モデル）、スラブ打設部以下の部分（以下、下部モデル）の3モデルで行った。図3に固有値解析より得られた1次固有振動数の変化を示す。全体モデル（図3の印）の固有振動数は、2階建て時は上部モデルの固有振動数に近いが、建設段階を追う毎に下部モデルの固有振動数に近づいていき、8階建て時にはほぼ一致する。

この結果を参考にして、図2を縦に見て建物階数による変化に着目する。S造建物は階数増加とともに1次固有振動数が1Hz付近まで低下しながら、ピークが高く鋭くなる。10階建て時には5次固有振動数まで明瞭に現れている。SRC造建物は、2階建て時は明瞭なピークは認められないが、6階建て時以降はピークが現れ、階数増加に伴って固有振動数が2Hz付近まで低下し、ピークが鋭くなる。

次に、図2のS造建物とSRC造建物のTop/GL, Top/1F, Top/(1F+H0)の1次固有振動数を比較する。S造建物は、3つの1次固有振動数に殆ど差がないため、相互作用の影響は少ないと考えられる。高次モードでは固有振動数に差は認められないものの、振幅比の差は大きくなっている。それに対し、SRC造建物は6階建て時にTop/GL（図2の印）とTop/1F（図2の×印）の固有振動数の差が大きい。階数増加に伴ってその差は減少するものの、10階建て時においてもTop/GL, Top/1F, Top/(1F+H0)で差が認められる。

以上より、SSIが固有振動数に及ぼす影響は、低層時で大きく、階数の増加に伴って減少することが分かった。また、S造建物に比べSRC造建物の方がSSIの影響が強いことも分かった。

### 3.2 スウェイ率・ロッキング率・弾性変形率の変化

表2に地盤-建物連成系1次固有振動数における張間方向のスウェイ率・ロッキング率・弾性変形率を示す。但し、S造建物の4階建て時以前は、地盤-建物連成系の固有振動数が特定できていない。また、SRC造建物の7階建て時以前は、ロッキングを分離できる計測を行っていない。

表2のS造建物を見ると、6階建て時でも弾性変形率が9割以上を占めており、建物階数による変化は殆ど認められない。それに対しSRC造建物は、8階建て時に比べ10階建て時のスウェイ率が減少し、弾性変形率が増加している。S造建物とSRC造建物を比較すると、SRC造建物では地盤変形に伴うスウェイ率・ロッキング率が大きく、SSI効果の大きいことが分かる。この差の原因として2棟の建物の構造種別、構造形式、建物重量、平面形状、杭基礎種別、基礎底面深さの相違などが考えられる。

### 3.3 減衰定数の変化

常時微動記録に基づいて、1/2法とRD法<sup>4)</sup>を用いて地盤-建物連成系の減衰定数を推定した。表3に得られた結果を示す。但し、推定は両建物とも1次固有振動数が明瞭となった6階建て時以降を対象とした。表中の(-)は減衰定数の推定が出来なかったものを表す。得られた結果は推定方法によってばらつきがあるものの、S造建物ではいずれの

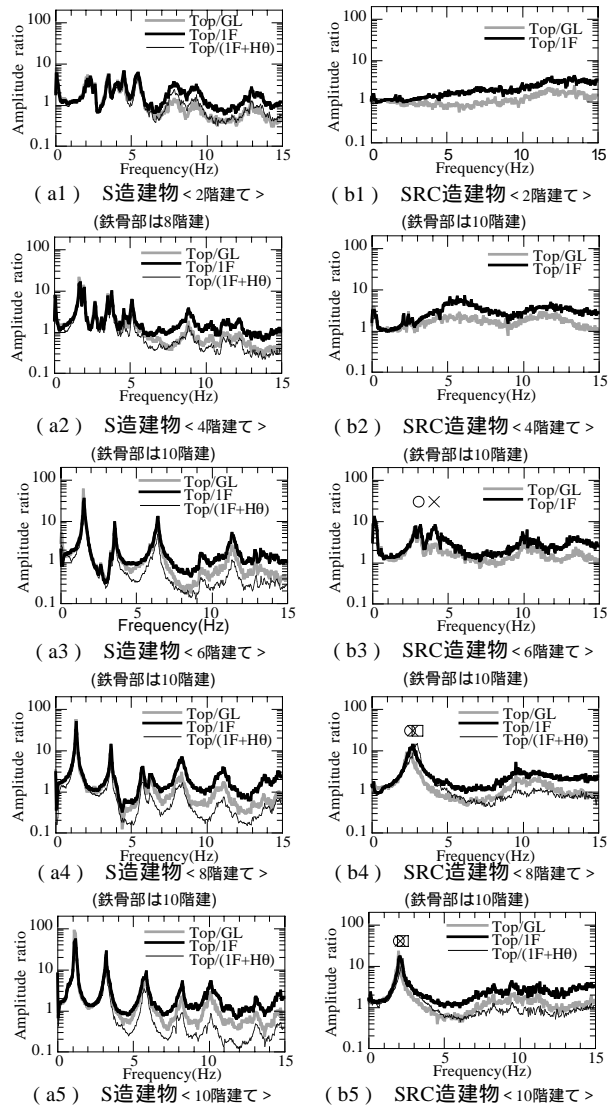


図2 建設段階毎のフーリエスペクトル比 (Top/1F, Top/GL, Top/(1F+H0))

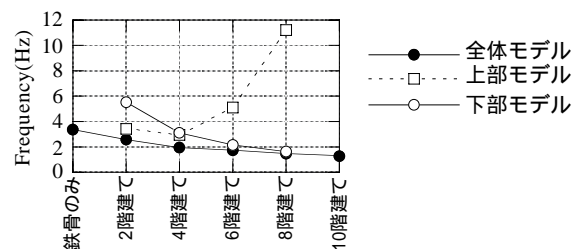
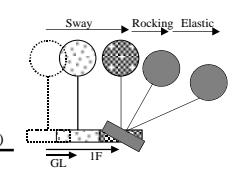


図3 固有値解析の結果（1次固有振動数の変化）

表2 建設段階毎のスウェイ率・ロッキング率・弾性変形率

	(a) S造建物		
	Sway(%)	Rocking(%)	Elastic(%)
6階建て	4	7	94
8階建て	3	7	94
10階建て	2	5	96
	(b) SRC造建物		
	Sway(%)	Rocking(%)	Elastic(%)
8階建て	9	12	82
10階建て	7	13	80



階数時でも1%以下の減衰しか有していない。それに対し、SRC造建物は建物が高くなるほど減衰定数が低下する傾向が現れているが、10階建て時でも2.5%程度の減衰を有している。S造建物に比べ、SRC造建物で減衰定数が大きくなったことは、図2に示したTop/1F, Top/(1F+H0)のフーリエスペクトル比のピーク高さや、表2に示したスウェイ率・ロッキング率・弾性変形率の差に対応している。

減衰定数は推定手法によってばらつきがあること、S造建物では高次モードも明瞭に現れていることから、今後さらに詳細な検討を行う必要がある。また、引き続き強震観測を行い、振幅依存性を検討することも重要である。

### 3.4 有効入力動の変化

図4に対象建物が2, 4, 6, 8, 10階建て時の桁行方向のフーリエスペクトル比(1F/GL)を示す。図4より有効入力動は高振動数になる程減少している。その傾向は両建物でほぼ同様で、階数による差も殆ど認められない。これは両建物がほぼ同様の地盤条件・基礎面積であるためと考えられる。しかし、各階数時において上部構造物の固有振動数付近(図4の印)では、その影響が出ている。この現象は階数の増加に伴って顕著に現れており、S造建物はシャープなピークを生じ、SRC造建物は幅広なピークを生じている。特に、SRC造建物では1次固有振動数の高振動数側での谷が大きくなっている。この差は、前述のSSIの程度に対応している。

### 4. 地震記録と常時微動記録の比較

入力特性の異なる地震動と常時微動を比較するために、S造建物の上部構造物の建設中に地下階(BF)と建物頂部(Top)に可搬式の強震計を仮設して強震観測を行った。4階建て時に鳥取県西部地震(2000.10.6)、8階建て時に三重県中部地震(2000.10.31)、10階建て時に兵庫県北部地震(2001.1.12)の記録が得られた。図5、図6に4, 8階建て時の地震記録の張間方向の加速度波形、加速度フーリエスペクトル、伝達関数(Top/BF, Top/(BF+H0), Top/GL)、スウェイ率・ロッキング率・弾性変形率を示す。但し、地盤記録は建物から約50m離れた地表観測点の記録を用いた。伝達関数は比較のため常時微動記録(Top/1F)も示した。位相はTop/BF(地震動)とTop/1F(常時微動)のみを描いた。また、4階建て時は地盤-建物連成系の固有振動数が特定できていないことから、変形率の比較は行っていない。

図5、図6の加速度波形を見ると、4階建て時は建物頂部と地下部でほぼ同様の動きを示しているが、8階建て時は建

表3 S造建物の固有振動数と減衰定数

		1 / 2法		RD法	
		固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
張間 方向	6階建て	1.5	0.5	1.5	0.7
	8階建て	1.3	0.6	1.4	0.6
	10階建て	1.2	0.7	1.1	0.3

表4 SRC造建物の固有振動数と減衰定数

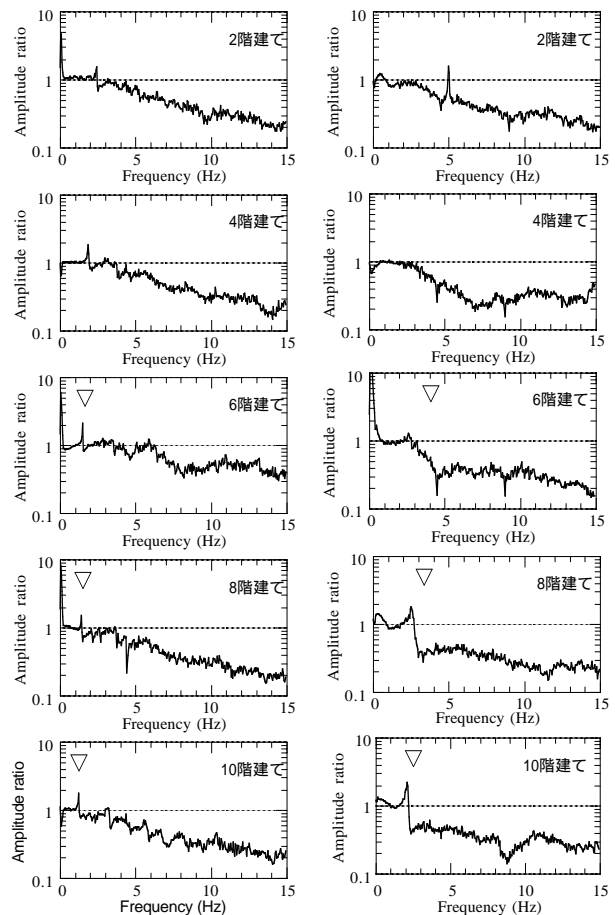
		1 / 2法		RD法	
		固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	固有振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
張間 方向	6階建て	-	-	-	-
	8階建て	2.5	7.9	2.5	7.0
	10階建て	2.0	2.5	2.0	2.6

物の共振成分が大きく、長時間にわたって励起されている。加速度フーリエスペクトルを見ると、地盤記録に明瞭な卓越振動数は認められず、建物によって増幅されていることが分かる。スウェイ率・ロッキング率・弾性変形率と伝達関数は、常時微動記録と地震記録で良い対応を示している。しかし、8階建て時の伝達関数の3.8Hz付近(図6の印)では、常時微動に現れているピークが地震動には現れていない。これは図6の加速度フーリエスペクトルの印の振動数成分が、建物基礎に入力していない事が一因と考えられる。地震記録は常時微動記録に比べピーク振動数が低くなっており、振幅依存性が認められる。

以上より、S造建物では入力特性の異なる地震動と常時微動で同様の現象が認められ、常時微動による現象の把握は地震時にも有効であることが明らかとなった。

5. 構造形式による振動特性の違い

対象建物が竣工後に静岡県中部地震(2001.6.1)の記録が得られた。但し、SRC造建物は増築工事後であり、非対称平面が対称平面となっている。図7にS造建物とSRC造建物それぞれで観測された地震動の加速度波形を示す。S造建物は固有振動数が低く、減衰が小さいため、後続波の部分まで共振して大きく増幅している。それに対し、SRC造建物はS造建物に比べ、固有振動数が高く、減衰も大きいいため応答振幅は小さく、継続時間も短い。この様と同じ10階建ての建物であっても、応答性状が大きく異なる。



(a) S造建物 (b) SRC造建物

図4 建設段階毎の桁行方向のフーリエスペクトル比(1F/GL)

6. まとめ

2棟の10階建て建物(S造建物とSRC造建物)について、建設段階毎に常時微動計測を行った。本研究で行った分析は、それぞれの建物で地盤条件・基礎条件が同一のまま上部構造のみが変化するため、相互作用効果の階数依存性を検討する上で最適といえる。また、S造建物では建設時より強震観測も行った。得られた知見を以下に示す。

- ・固有振動数は2棟それぞれで階数依存性が認められ、その影響は低層時に大きいことが認められた。
- ・スウェイ率・ロッキング率・弾性変形率と減衰定数は、S造建物ではの階数依存性が認められないが、SRC造建物

では認められた。

- ・有効入力動には階数依存性が認められなかった。
- ・2棟の建物でSSI効果に差が認められた。原因として、構造種別、構造形式、建物重量、平面形状、杭基礎種別、基礎底面深さの相違などが考えられる。
- ・S造建物では入力特性の異なる地震動と常時微動とで同様の現象が認められ、常時微動による現象の把握は地震時にも有効であることが明らかとなった。
- ・竣工後の強震観測より、同じ10階建ての建物であっても、応答性が大きく異なることが確認された。

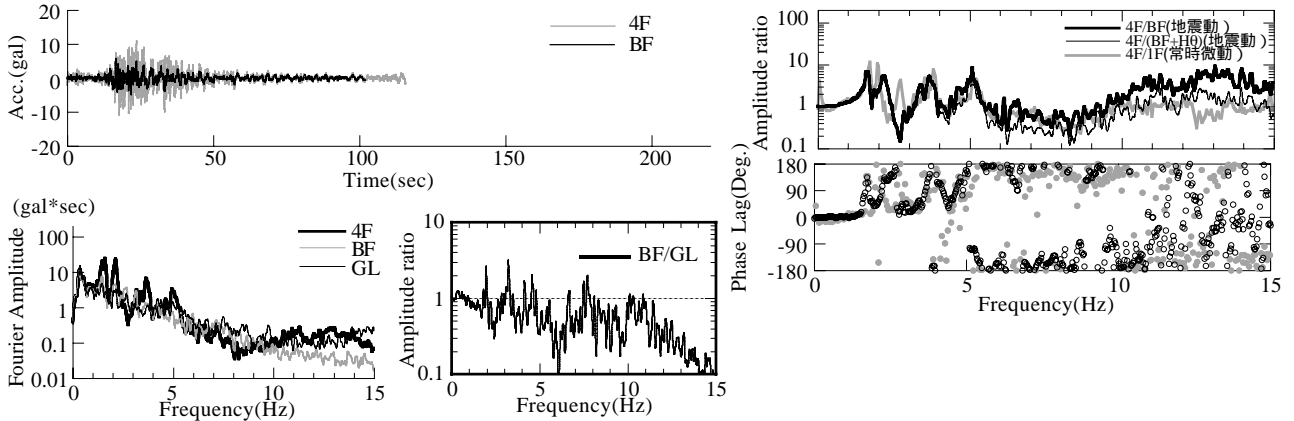


図5 S造建物4階建て時の張間方向の地震動記録<2000.10.6鳥取県西部地震>

(左上: 加速度波形, 左下: 加速度フーリエスペクトル, 中下: 有効入力動(1F/GL), 右列: 伝達関数 [上から振幅・位相], 変形率)

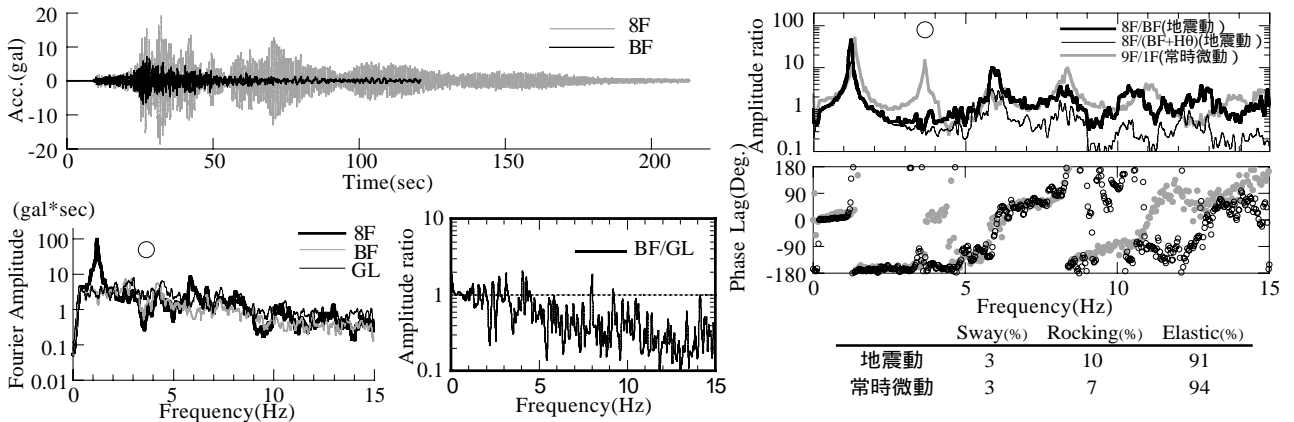


図6 S造建物8階建て時の張間方向の地震動記録<2000.10.31三重県中部地震>

(左上: 加速度波形, 左下: 加速度フーリエスペクトル, 中下: 有効入力動(1F/GL), 右列: 伝達関数 [上から振幅・位相], 変形率)

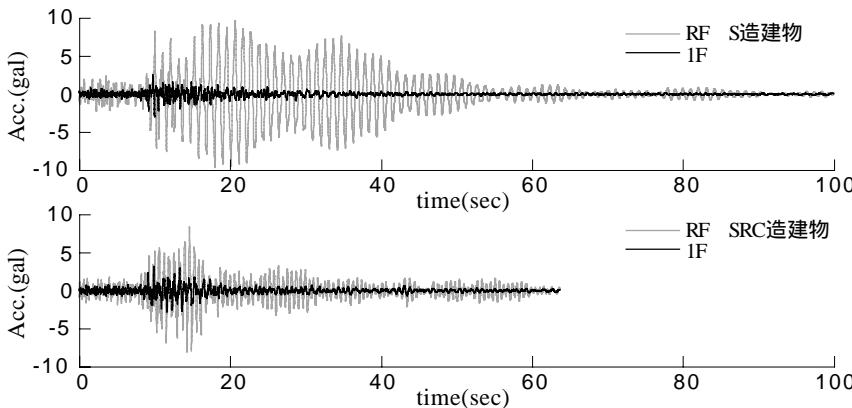


図7 竣工後の張間方向の地震動記録<2001.6.1.静岡県中部地震>

参考文献

- 1) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災調査報告, 建築編-1 鉄筋コンクリート造建築物, 1997.7
- 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, 第512号, pp.111-118, 1998.10
- 3) 理論地震動研究会: 地震動 - その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994
- 4) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文集, 第454号, pp.29-38, 1990