CERS 法を用いた地震記録に基づく超高層ビル SKS の

制振装置を含む動特性の変遷

中村 豊¹⁾, 齋田 淳²⁾, 佐藤 勉³⁾

 (株)システムアンドデータリサーチ,代表 工博 e-mail:yutaka@sdr.co.jp
 (株)システムアンドデータリサーチ,主任研究員 e-mail:Jun@sdr.co.jp
 (株)システムアンドデータリサーチ,主任研究員

e-mail:tsato@sdr.co.jp

要 約

SKSビルは、遠地大地震である2011年東北地方太平洋沖地震で予想外の大振幅で揺れ続け、地 震後、制震装置による共振対策が施された。このビルではこの地震の直前から地震観測が始ま っており、記録は公開されている。この共振現象の原因や付加された制振装置の効果について、 公開記録を基にCERS法により波動伝播時間や減衰定数の変化を時系列的に分析して調べた。 その結果、この共振現象は、地震動の周期が建物の固有周期に接近するとともに減衰が急に低 下したことが原因と推測された。そして熊本地震本震でも再び減衰が急に低下した。 ここでは、CERS法による分析結果を報告する。

キーワード: CERS法, 伝播速度, 減衰, 高層建物、地震、制振装置

1. はじめに

鉄骨造のSKSビルが、遠く離れた東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日14時45分頃発生、以下311地震と称する)で長い間揺れ続けたのは、多くの研究者の興味を引いた。このビルでは、311地震発生前から制振装置による地震対策が検討されており、2014年1月にはオイルダンパーと鋼材系ダンパーの設置工事が完了している。さらに、想定南海トラフ地震対策として、制震装置を増設する計画とのこと。SKSビルでは、ちょうど311地震の直前から地震観測を始めており、2011年3月9日の地震から記録が残っている。記録のいくつか、311地震や2016年4月16日の熊本地震本震など、を入手してCERS法で分析した。SKSビルの動特性の変化を追跡することにより、311地震などの影響や、制振装置の効果などを明確にしたい。

2. 解析方法

まずCERS法について、以下に簡単に説明する。詳しくは、中村(2017)を参照されたい。 CERS法は、次の4つの方法、C法、E法、R法およびS法の総称である。C法は端面と反射面に挟まれた媒質に おける、端面と媒質内で波動伝播方向に並んだ測点間の伝播速度と減衰を、当該2測点で計測された振動波形 に基づいてリアルタイムに算定するものである。E法は端面ないしは端面と反射面の間で反射面の近傍を除 く媒質内の1測点における振動波形を用いて、端面と反射面間の伝播時間や減衰をリアルタイムに算定する。 R法とS法は二点間のみかけの伝播時間をリアルタイム算定するもので、二点における計測波形の最大相関に 基づくものがR法、最小単純誤差に基づくものがS法である。

ここでは主としてC法を用いる。地震観測点は、図1に示すように、1F、18Fおよび38Fのフロア中心付近、 52Fの両サイド付近(52FNと52FS)の5点である。C法は測点の並びが波動伝播方向と概ね一致していること が前提なので、ここでは、52Fの両サイドの記録を平均することで、52Fフロア中心付近の振動を推定し、52FC と名付けて、1Fから38Fまでの観測点とほぼ同一鉛直線上の測点として取り扱う。

ただし、52FNの記録のうち、2014年3月14日と2014年11月22日の公開記録については、サンプリング間隔 に異常が認められたので、52FSのサンプリング間隔に合わせた補正をおこなった。サンプリングずれの発生 個所や程度を特定するため、R法を用いている。この補正によって、52FNの波形にはそれぞれ2か所に欠損部 分が生じた。欠損部分には52FSの記録を充填したが、1か所1秒以下で、結果には大きな影響を与えない。

C法により52FCを基準とし目標波形を38F、18Fおよび1Fとして、52FCから各測点までの波動伝播時間と減 衰定数を推定した。この時、局部的な短周期振動を誘発することが少ないと思われるM6以上の地震記録をC 法やE法の解析対象とした。解析結果から各観測点間の伝播時間や伝播速度を算出するとともに、各観測点 間の減衰定数を算出した。また、E法により1Fの記録を分析して得た伝播時間を4倍して、入力地震動の周 期とした。建物の固有周期は、52FCと1Fの間の伝播時間を4倍して求めた。いずれも平均化には指数平滑を 用い半減期を40秒とした。以上の算出結果を用いて、SKSビルの地震動特性について検討する。



図1 SKS ビルの外観と地震観測点の位置ならびに制振装置の配置状況

3. 解析したSKS観測記録と付加された免震装置の配置状況

表1に解析に用いた強震記録のリストを掲げる。また、SKSビルに付加された免震装置の配置状況を図1に 示す。これには、地震観測点を赤丸で示している。観測記録から算出した52FCの想定位置をピンクの丸で示 す。SKSビルの地震対策資料(文献4)によれば、表1の観測期間における免震装置は、建物長手方向(X: EW方向)には鋼材系ダンパーが使われ、建物短手方向(Y:NS方向)にはオイルダンパーが使われている。 また、強震観測が行われている1Fと18Fの間(以後A区間と称する)および18Fと38Fの間(以後B区間と称す る)には、資料図によるとオイルダンパーがそれぞれ80台および64台設置されている(合計144台、なお資料 図記載の合計は140台)。鋼材系ダンパーは、A区間に128台、B区間に24台設置されている。つまり、鋼材系 ダンパーはX方向の主としてA区間に設置され、オイルダンパーはY方向のA区間とB区間に設置されている。

表1 解析対象地震(伝播解析は M>6 の地震を対象)

Eq. No.	SKS	Date	Epicenter	N	E	М	h(km)	∆(km)	Amax (Gal)	Ijma	Rimax	5HzPGA (Gal)	Length (s)
1	Without	2011/3/9 11:45	Off Sanriku	38.3281	143.2781	7.3	8	813	0	0.4	1.3	0.7	900
2	Damping	2011/3/11 14:46	Off Sanriku	38.1031	142.8600	9	24	769	34	3.0	3.8	15.0	999
3	Devices	2011/3/11 15:15	Off Ibaraki Pref.	36.1081	141.2647	7.6	43	555	9	2.5	3.5	8.9	960
4		2011/3/12 3:59	N Nagano Pref.	36.9850	138.5967	6.7	8	387	1	1.1	1.8	1.6	999
5		2011/3/15 22:31	E Shizuoka Pref.	36.3081	138.5967	6.4	14	309	1	1.3	1.6	1.7	999
6		2011/4/7 23:32	Off Miyagi Pref.	38.2031	141.9197	7.2	66	704	2	1.3	2.0	2.0	960
7		2011/4/11 17:16	Hama-dori, Fukushima Pref.	36.9450	140.6717	7	6	539	1	1.0	1.7	1.4	900
8		2011/7/5 19:18	N Wakayama Pref.	33.9900	135.2331	5.5	7	74	4	1.6	1.7	4.6	720
9		2011/7/10 9:57	Off Sanriku	38.0317	143.5067	7.3	34	816	1	1.0	1.9	1.5	840
10		2011/8/1 23:58	Suruga Bay	34.7081	138.5467	6.2	23	286	1	1.2	1.5	1.9	670
11		2011/10/9 16:18	S Osaka Pref.	34.5031	135.4900	3.9	12	16	5	1.2	1.0	2.5	344
12		2013/4/13 5:33	Near Awaji−shima	34.4181	134.8281	6.3	15	59	23	2.8	2.9	18.6	400
13	With	2014/3/14 2:06	Iyo-nada	33.6917	131.8897	6.2	78	340	1	1.2	1.3	1.5	600
14	Damping	2014/11/22 22:08	N Nagano Pref.	36.6917	137.8897	6.7	5	319	1	1.0	1.7	1.4	600
15	Devices	2015/5/30 20:23	W Off Ogasawara Is.	27.8600	140.6817	8.1	682	904	2	1.3	2.0	1.9	600
16	X: Steel	2016/4/1 11:39	SE Off Mie Pref.	33.3231	136.3817	6.5	29	171	4	2.2	2.5	4.5	600
17	Y: Oil	2016/4/14 21:26	Kumamoto, Kumamoto Pref.	32.7417	130.8081	6.5	11	475	0	0.6	0.9	0.7	600
18		2016/4/15 0:03	Kumamoto, Kumamoto Pref.	32.7000	130.7767	6.4	7	480	0	0.0	0.9	0.5	600
19		2016/4/16 1:25	Kumamoto, Kumamoto Pref.	32.7531	130.7617	7.3	12	478	6	2.4	3.1	6.4	600
20		2016/10/21 14:07	C Tottori Pref.	35.3800	133.8547	6.6	11	164	8	2.5	2.5	8.9	600
21		2016/11/19 11:48	S Wakayama Pref.	33.8417	135.4631	5.4	51	88	4	1.8	1.8	4.4	240
22		2016/11/22 5:59	Off Fukushima Pref.	37.3531	141.6031	7.4	25	633	2	1.6	2.2	2.3	600
23		2017/6/25 7:02	S Nagano Pref.	35.8667	137.5850	5.6	7	239	1	0.7	0.8	1.1	600
24		2018/6/18 7:58	N Osaka Pref.	34.8431	135.6217	6.1	13	29	98	4.0	4.2	81.8	600
25		2018/6/19 0:31	N Osaka Pref.	34.8581	135.6067	4.1	10	30	2	0.3	0.5	1.5	300

List of Analyzed Events, wave propagation analysis was conducted M>6 events

4. リアルタイム震度RIでみた各区間の増幅度の変化

ここでは、各地震で記録された1F~38Fおよび記録から算出された52FCの波形を用いて、観測階のリアル タイム震度(中村、2003)の変動を算出した。図2に311地震とその最大余震、熊本地震本震および大阪北部 地震の場合を例示する。これらの震度変動から、A区間(1Fと18Fの間)、B区間(18Fと38Fの間)および38F と52Fの間(以後C区間と称する)の震度増幅の時間変化をそれぞれ算定した。その際、制振装置設置前後を 区別した。各地震での各測点間の最大震度増幅値を抽出し、区間毎に示したのが図3である。この図によると、 制振装置設置前、A区間の平均増幅度は0.1/階より大きかったが、制振装置設置後、0.1/階より小さくなり、 それぞれの区間階数にほぼ比例した増幅度0.08/階前後になっている。つまり増幅度の平準化が実現してお り、制振装置全体の効果として注目される。ただ、制振装置が設置される前の311地震の最大余震によるA区 間の増幅度と制振装置が設置された後の熊本地震本震によるA区間の増幅度がそれぞれ他の増幅度とはかけ 離れて大きくなっている(0.14-0.18/階)ことは注目に値する。また、制振装置設置後の熊本地震本震でみ られた共振が鋼材系ダンパーを設置した方向で生じていることも興味を引く事柄である。



5. CERS法による波動伝播解析

5.1 地震毎の伝播解析結果

伝播解析結果を地震毎に集約して、図4に示す。これは全部で20地震に対する解析結果を集成したもので、 制振装置設置前10地震、設置後10地震となっている。また建物のX方向とY方向に分けて示した。図中の丸で 囲んだ数字は表1に示した地震番号で、上部番号の下には発生年月日を示し、下部番号の下には地震の諸元を 示した。図の上段には伝播速度の変化を区間ごとに色分けして示し(青:C区間、緑:B区間、橙:A区間、 左目盛:単位m/s)、IFと52FCにおけるリアルタイム震度の変化をそれぞれ赤と紫で示した(右目盛)。リ アルタイム震度は3方向成分を使って算出されるため、X方向もY方向も同じ変化図となっている。ここでは、 IFと52FCのリアルタイム震度変化を図示したが、両者の差が大きいほど建物の地震動増幅度が大きい。図の 下段には、上から建物の固有周期の変化(黒、右目盛:単位1/100秒)、入力地震動の周期変化(赤、右目盛: 単位1/100秒)、各区間の減衰定数(青:C区間、緑:B区間、橙:A区間、左目盛:単位0.1%)および建物全 体の平均的減衰定数を示すものとして52FC-1F間の減衰定数(黒、左目盛:単位0.1%)を示した。なお、ピ ンクの透過帯と透過線はそれぞれ、建物耐震化検討委員会が調査した建物固有周期の存在域、並びに当初の



図4(a)(b) 制振装置設置前の伝播解析結果-地震毎の伝播速度、減衰定数、入力周期などの変動



After Damper Installation; Change of Dynamic Characteristics of SKS building

図4(c)(d) 制振装置設置後の伝播解析結果-地震毎の伝播速度、減衰定数、入力周期などの変動

計測固有周期(いずれも右目盛:単位1/100秒)を示している。図の横軸は時間軸で単位は秒である。なお、 解析結果は1/100秒のサンプリング時間ごとに算出されているが、ここでは100個置きに抽出し、1秒毎にして 示している。ただし、リアルタイム震度については、直前1秒間の最大値を示すようにした。また、各区間の 波動伝播速度や減衰定数の目盛スケールは相互に比較できるように全地震で共通にしている。

5.2 建物固有周期と全体減衰定数

まず建物の固有周期と減衰定数について、時間的変動や入力震度や入力周期に対する変動を検討する。

(1) 時間的変動

建物の固有周期は、311地震時、X方向は当初の起振機実験による固有周期約6.2秒から7.03秒まで増大し、 Y方向は同じく当初の固有周期約5.8秒から6.58秒まで増大している。いずれも当初のほぼ13%増になってい るが、地震後緩やかに回復に向かっている。このように、建物固有周期は地震毎に変動しているが、制振装 置設置前についてみると、X方向もY方向も、概ね初期の計測固有周期を下限としている。一方、制振装置設 置後については、Y方向は同様の範囲に固有周期が存在し剛性変化がないことを示唆しているが、X方向は概 ね初期の計測固有周期を下回り剛性が高くなっている。つまり、オイルダンパーは剛性を変化させないが、 鋼材系ダンパーは剛性を高めることが確認できる。

次に、建物全体の減衰定数の変化についてみる。まずX方向については、311地震の前には概ね4%強であったものが、311地震で約1.5%に急減した。その後回復しつつあったものが、30分後の余震で再び減少している。翌日の地震では3%近くまで回復しているものの、余震が多かったためか、約4か月近く経過した7月の地震でも4%近くまでしか回復していない。鋼材系ダンパーを設置した後、X方向は、熊本地震本震まで概ね4%~6%と、311地震前の地震時よりやや大きな値であったものが、熊本地震本震で1%近くにまで急減して共振状態になった。その後は回復して2%から6%の間を変動している。Y方向の減衰定数については、311地震の前の地震では2%~4%であるが、311地震によって1%を下回る小さな値に急減して共振状態に陥り、以後少なくとも4日間は1%を下回っている。4月7日の地震では2%以上に回復しているが、4月11日の地震で再び1%を下回っている。それから3か月以上経過した地震では2%以上に回復した。オイルダンパーを設置後のY方向減衰定数は、熊本地震本震で2%近くに低下するも概ね4%を中心に変動し、共振には至っていない。

(2)入力震度や入力周期に対する変動

図5は、建物の固有周期や減衰定数と、入力震度や入力周期との関係を見たもので、制振装置を設置する前 と後を分けて示している。

設置前のX方向固有周期は、入力震度や入力周期とともに増大する傾向が認められる。これに対して、Y 方向の固有周期は、入力震度や入力周期に対してほぼ一定となっている。X方向の減衰定数はY方向のそれと 比べて大きく、311地震でY方向がより長く共振状態に陥ったことと整合する。Y方向の減衰定数は概ね4%以



Relationship between Natural Period or Damping Ratio of High-rise Building SKS and RI at 1F (Left Side) or Input Period (Right Side)

図5 SKS ビルの固有周期や減衰定数と入力震度や入力周期の関係

下に分布して、入力震度とともに減少する傾向を示すが明瞭ではない。一方、入力周期の増大とともに、減 衰定数はX・Y方向ともに減少する傾向が明らかである。

制振装置設置後のX方向固有周期は、設置前と同様に入力震度に対して増大する傾向を示すが、入力周期 に対してはほぼ一定となっている。Y方向の固有周期は、入力震度に対してほぼ一定で、入力周期に対して も、約1.5秒以下で固有周期がやや長くなるものの、それ以外は概ね一定である。減衰定数に関しては、X・ Y方向とも概ね8%以下に値が分布しており、入力震度に対しては減少するものと増大するものが混在してい る。入力周期に対しては概ね減少しているが、オイルダンパーを設置したY方向では、概ね2%以上であるの に対して、鋼材系ダンパーを設置したX方向では長周期入力に対して2%を下回り、熊本地震本震でX方向が 共振状態に陥ったこととの関連で注目される。

5.3 区間毎の波動伝播速度と減衰定数の変動

(1) 全般

図4をみると、C区間の伝播速度はバラつきも少なく地震中の変動もほとんどなく安定している。つまりC 区間の部材は、解析対象とした地震動に対して線形応答の範囲内にとどまっているとみられる。B区間の伝 播速度はややバラつきが大きくなり、地震中の変動もやや大きくなっている。これらに対してA区間の伝播 速度は大きくばらつき、地震中の変動も大きい。A区間では層間変形角が大きくなって非線形挙動をしてい ると推測される。減衰定数については、どの区間でも、地震毎のバラつきも地震中の変動も大きい。

制振装置設置前のX方向の減衰定数は、大きくばらつくものの、概ね、地震①ではA区間4%、B区間0-4%、 C区間6-10%、全体では概ね4%に分布していた減衰定数が、地震②(311地震)以後急減し、A区間2-4%、B 区間はマイナスに陥り、C区間は3-4%、全体で2%を下回っている。地震④以降次第に回復し、概ね、A区間 は2%、B区間は0-2%、C区間は3-4%、全体としてはほぼ2-4%となっている。地震⑩(約5ヶ月後)に至っ てようやく311地震前の状態を回復している。Y方向は、地震①では、A・B区間は0-2%、C区間は6-9%で、 全体としては2-4%となっているものの、地震②では、減衰定数が急減して、A・B区間では1%を下回り、C 区間では2%、全体としても1%を下回って共振状態に陥っている。以後この状況が続き、地震⑥で一旦回復 したかに見えたが、地震⑦で再び減少し、約5ヶ月後の地震⑩で311地震前の状態に復している。

制振装置設置後のX方向については、地震(19)(熊本地震本震)で、減衰定数が急減してすべての区間で2% 以下となり、全体としても1.5%程度になって共振状態に陥っている。その他の地震では、全体で概ね4-6%、 A区間0-1%、B区間2-7%、C区間は大きくばらつくが12%前後となっている。Y方向についてもばらつきが大 きいが、全体が2%を下回ることがなく、地震(19を除いて、A区間で2%以上、B区間で4%以上、C区間で3% 以上が確保されている。地震(19ではA区間の減衰定数が0%になることがあるものの、全体の減衰定数は2% 以上が確保されており、Y方向が共振状態に陥ることはなかった。

(2) 各区間の伝播速度の異方性ほか

区間ごとの伝播速度は振動方向によって異なっており、明らかな異方性が認められる。C区間の伝播速度 はいずれの方向でも100m/sを下回り、X方向が90m/s程度、Y方向が概ね65m/sと、Y方向の剛性がかなり低く なっている。これに対して、B区間の伝播速度は概ね150m/s前後であり、Y方向の剛性がやや大きい程度であ る。これらの区間に対して、A区間の伝播速度の性状は大きく異なったものとなっている。X方向振動のA区 間伝播速度は概ね200m/sと推定されるが、311地震時(地震②)には大きな揺れとともに170m/s程度まで減少 し、その後回復傾向を見せるものの、地震③ではさらに低下している。地震④で回復しているものの、記録 が小さすぎるためか記録の後半では計算結果が不安定になっている。一方、Y方向の伝播速度は、特異な性 状を示し、地震毎にまた地震中も大きく変動している。A区間のY方向には、図1に見られるように、接地圧 を緩和するため、8Fから1Fにかけて末広がりの構造体となっており、この部分で剛性が大きくなっている。 A区間のY方向振動の伝播速度が複雑に変化するのはこの構造体の影響と考えられる。

(3) 入力震度と入力周期に対する変動

次に、各区間の伝播速度や減衰定数が、入力震度や入力周期に対してどのように変化するか検討する。結果を図6に示す。制振装置設置前後および方向ごとに示した。

制振装置設置前のX方向の伝播速度をみると、A・B区間では、入力震度が大きくなったり入力周期が長く なったりすると、伝播速度が低下する傾向が認められるが、C区間ではほとんど変化しない。これに対して、 Y方向の伝播速度は、入力震度に対しても、入力周期に対しても、B・C区間ではほとんど変化しないが、A 区間では、入力震度が大きくなると明確に伝播速度が低下するものとさほど低下しないものの二種類が存在 するように見える。入力周期に対しては、入力周期が長くなるとともにA区間の伝播速度が大きくなる傾向 が明らかに認められる。この現象はA区間にある末広がり構造に関係するものと推測される。

制振装置設置後は、設置前にくらべて、X方向では、A・B区間で伝播速度が明らかに大きくなっている。 また、設置前と同様に入力震度の増大とともに伝播速度が低下する現象のほか、A区間では低下しないもの も認められるようになる。さらに、A・B区間とも入力周期の増大とともに伝播速度が大きくなる現象も認め られるようになり、鋼材系ダンパーが多く設置されたA区間で特に顕著である。これらの現象は、設置前のA 区間のY方向の状況に類似しており、鋼材系ダンパーの補剛効果に起因するものと推測される。Y方向の伝播 速度については、C区間では大きな変化はないが、A・B区間ではわずかに大きくなっているようにみえる。 Y方向にはA区間とB区間にオイルダンパーが設置されているが、若干の剛性増加が伴うようである。



図 6 超高層ビル SKS の固有周期や減衰定数と入力震度や入力周期の関係

一方、減衰定数についてみると、制振装置設置前はX方向がY方向よりも明らかに大きかったが、制振装置 設置後は、X方向とY方向があまり変わらない大きさになっている。より詳しく見ると、制振装置設置後、制 振装置が設置されていないC区間でX方向の減衰定数が大きくなっているが、制振装置設置前は311地震の影 響で全体的に減衰定数が小さくなっていたものが元に復したため、見掛け上大きくなったように見えるもの と思われる。C区間のX方向で注目すべきは、長周期入力の場合の減衰定数において、設置前よりも小さな2% 以下のデータ群が一部(熊本地震本震)にあることである。

X方向についてみると、制振装置が設置されているA区間では、入力震度が大きくなるとともに減衰定数は 大きくなる傾向にある。A区間の1/5以下の制振装置しか設置されていないB区間では入力震度が大きくなる とともに概ね減衰定数は低下している。A・B区間では、入力周期が2秒以下の短周期入力に対しては設置前 後で減衰定数に大きな変化はないものの、5秒を中心にした長周期入力に対しては制振装置設置前よりも減衰 定数が明らかに低下している。短周期入力に対して減衰定数が低下してマイナスになることもある現象や、 長周期入力に対して制振装置設置前よりも減衰定数が小さいのは注意すべき事柄である。後者は、311地震で Y方向に生じた減衰の急減に伴う共振現象との関連で、より詳細な分析が必要と思われる。

次にY方向の減衰について検討する。制震装置設置前では、いずれの区間にも311地震の影響によると考えられる0%~2%の小さな減衰定数のデータ群がある。C区間には、このほか2%~10%程度のデータ群も認められる。入力周期に対しては、311地震関係とみられる2%前後の減衰定数を除くと、制振装置設置の前後で、

C区間の減衰定数は増加傾向にある。A・B区間の減衰定数については、制振装置設置後、入力震度の増大とともに概ね増加傾向を示し、入力周期の増加に対しては明らかに減少傾向を示すものの下限値が存在するように見える。いずれにせよ設置前に比べると明らかに大きな減衰定数となっている。

6. 議論

6.1 制振装置の効果に関するまとめ

制振装置の効果をまとめると、次のようになる。

X方向について、鋼材系ダンパー設置後、A・B区間ともに剛性に関係する伝播速度は大きくなった。伝播 速度は入力周期の増大とともに大きくなり5秒前後でピークとなる。特にA区間で顕著である。鋼材系ダンパ ー設置後、減衰定数は、A・B区間ともに低下し、特に入力周期が5秒から6秒では1%程度以下となっている。 っまり、鋼材ダンパーは、長周期入力に対して、剛性強化にはなるが減衰の増大には寄与していない。

Y方向について、オイルダンパー設置後、剛性に関係する伝播速度は、A・B区間とも若干増加するがほとんど変化せず、減衰定数は、入力周期の増大に対して明確に減少するものの、設置前と比較してかなり増大し、特に入力周期5秒付近では、ほぼ0%だったものが2%(A区間)から4%(B区間)に増えた。

減衰急減が鉄骨造建物の一般的な性質か、また、制振装置でこれを補えるか、今後とも見守る必要がある。

6.2 共振現象に関連して

311本震②とその余震③および熊本地震本震⑨では共振現象が認められる。これらの地震のX方向とY方向の加速度波形、建物の固有周期や入力地震動周期、建物減衰定数の変動などを比較して、図7に示す。 図7をみると、建物の共振開始と減衰急減がほぼ同時に発生している。311余震③のX・Y方向と熊本地震本



図7 311 本震と余震および熊本地震本震時の共振状況:入力周期と建物固有周期の関係など

震
(9のX方向では、建物の固有周期と入力周期がほぼ一致した時に共振が始まっている。この時に、A区間での震度増幅度が飛びぬけて大きくなっているのは注目に値する。311本震②のY方向では、入力周期が建物固 有周期の90%近くに接近し、減衰の減少と相俟って共振状態となっている。なお、建物の固有周期は、制振 装置設置前についてはX方向の方が大きくいずれの方向でも6.4秒(破線)を上回っているが、設置後について は両者よく似た値となり6.4秒を下回っている。つまり、制振装置設置後、建物の剛性が高くなっている。

急減後の減衰定数についてみると、X方向は、この3地震であまり変わらず、概ね1%(破線)~2%(破線) の範囲内に入っている。一方、Y方向は、制振装置設置前は1%以下だったものが、設置後概ね3%を超えて いる。これらの図から、急減した減衰定数が概ね1.5%を下回ることが共振現象に陥る必要条件と推測される。 なお、311地震や熊本地震本震で急減した減衰定数は、その後緩やかに回復し概ね半年後には元に復している。

また、これらの地震では、共振の前後で上下波形に数秒の間隔でパルス状の波形が重畳している。建物固 有周期と地震動入力周期、減衰定数の減少、共振およびパルス波形などは相互に関連していると考えられ、 共振が発生する条件と絡んで興味深い。特に長周期入力に対するダンパー挙動は、今後も見守る必要がある。

7. おわりに

建物や地盤の物性が地震時や平常時にどのように変化しているかをリアルタイムで追跡することができる CERS法を用いて、超高層建物SKSを伝播する波動伝播速度や減衰定数などが地震中にどのように変化するか 調べた。SKSビルには、地震対策として制振装置が付加されたが、それによって物性値が変化した様子も捉 えられており、興味深い結果が得られた。建物の共振には、建物の固有周期や増幅特性(減衰特性)ならび に入力周期や入力振幅が関係している。共振状態に陥る条件が明らかになれば、共振を防ぐ対策も合理的に 構築できるものと考えられる。今後、さらに詳細な解析を行い、こうした観点からの分析を続けていきたい。

謝 辞

強震記録は独立行政法人建築研究所から提供されました。鹿島俊英博士はじめ関係の方々に深く感謝します。

参考文献

1) 中村 豊:合理的な地震動強度指標値の検討-DI 値を中心にした地震動指標値間の関係-、第27回地震工学研究発表会、2003.12.

2) 中村 豊: 伝播時間と減衰のリアルタイム算定法群 CERS について、2017 年度日本地震工学会年次大会発表論文、P4-20、2017.

3) 佐藤・中村・齋田: CERS 法群を用いたポートアイランド地盤の非線形挙動分析、2017 年度地震工学会年次大会論文、P4-21、2017.

4) 大阪府総務部庁舎整備課:http://www.pref.osaka.lg.jp/otemaemachi/saseibi/taisaku-jyokyo.html、長周期地震動対策工事の実施状況、2018.

Change of the dynamic characteristics of a high-rise building SKS based on observed strong motion records using the CERS methods

NAKAMURA Yutaka¹⁾, SAITA Jun²⁾ and SATO Tsutomu²⁾

System and Data Research, President, Dr. Eng.
 System and Data Research, Senior Research Engineer

ABSTRACT

During the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, the SKS building kept shaking with unexpected large amplitude. After this, damping devices were installed against resonance. This paper investigates the change of the travel time and damping factor in time-series analysis using the CERS methods with opened strong motion records to understand the unexpected resonance and the effect of added damping devices. As a result, the resonance was caused by drastically decreasing the damping with approaching the input period to the natural period of this building. The damping decreased again at the time of the 2016 Kumamoto earthquake.

Keywords: CERS methods, Wave Propagation Velocity, Damping, Earthquake, High-rise Building, Damping Devices