

建物設計者の視点による強震観測の活用と課題

今枝裕貴

株式会社日建設計、エンジニアリング部門構造設計グループ主管

1. はじめに

「設計者の意見を聞きたい」、「委員に設計者がいた方が良いのでは」という意見が強震観測小委員会ではあり、弊社へ本小委員会への設計者の参加の打診があった。筆者は社内で最近開発したヘルスマonitoringシステムの担当をしており、本小委員会へ参加することになった。しかし、本小委員会へ参加して日も浅く、強震観測に特段の見識や経験がある訳でもなく、技術的なことを論じるだけの知見は持ち合わせていない。

本稿は、強震観測の研究を行ってきた訳でもない、小委員会ともやや距離のある立場の一設計者として、強震観測建物の事例、および、ヘルスマonitoringシステムに関わった経験を踏まえて、強震観測が普及していくための課題や対策について、本小委員会に対してやや客観的な立場から述べたものである。

2. 設計者が取り組んだ強震観測事例

2.1 事例概要

設計者が取り組んだ強震観測の事例を示す。2003年に竣工した高さ＝約60mの鉄骨造のオフィスビルである。サーボ型の加速度計を建物内、地表、杭先端に設置し、定常的に地震動を測定する地震観測システムを導入している[1][2]。加速度計はコアのEPS内を中心に配置し、上層階では大梁中央にも設置している。また、制振部材（粘性体制振壁、座屈補剛ブレース）に変位計を取り付け、制振部材の変位を直接計測できるシステムとしている。

建物概要

建築主 : 株式会社日建設計
所在地 : 東京都千代田区飯田橋
階数 : 地下1階、地上14階、塔屋1階
軒高 : 59.85m
延床面積 : 20,580m²
構造種別 : 鉄骨造（柱CFT）
基礎 : 場所打ちコンクリート杭



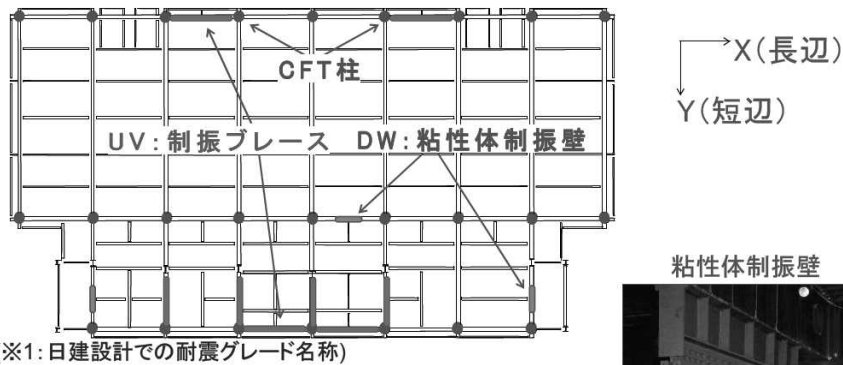
写真1 建物全景

2.2 計測、および、検討事例

竣工直後の2003年4月～12月の15回の地震記録（表1参照）をもとに、建物全体の解析モデルとの比較、ロングスパン大梁の振動性状、逸散減衰の効果、上下動地震時の振動性状などを解析と比較し、分析を行っている[1]。また、本建物が最大加速度を計測した2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録と解析の比較検討を行っている[2]。

S※1グレードの制振構造

(大地震時:無被害(構造体 弾性範囲内))



(※1:日建設計での耐震グレード名称)

設計目標性能 層間変形角

L1(25cm/sec): 1/400~1/300

L2(50cm/sec): 1/200~1/150

制振ブレース
(100N/mm²級)

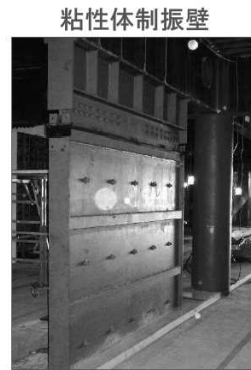
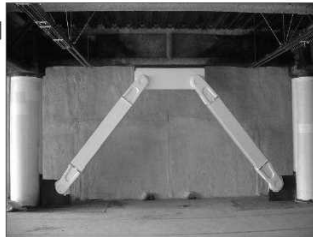


図1 構造伏図、制振部材写真

加速度計設置位置

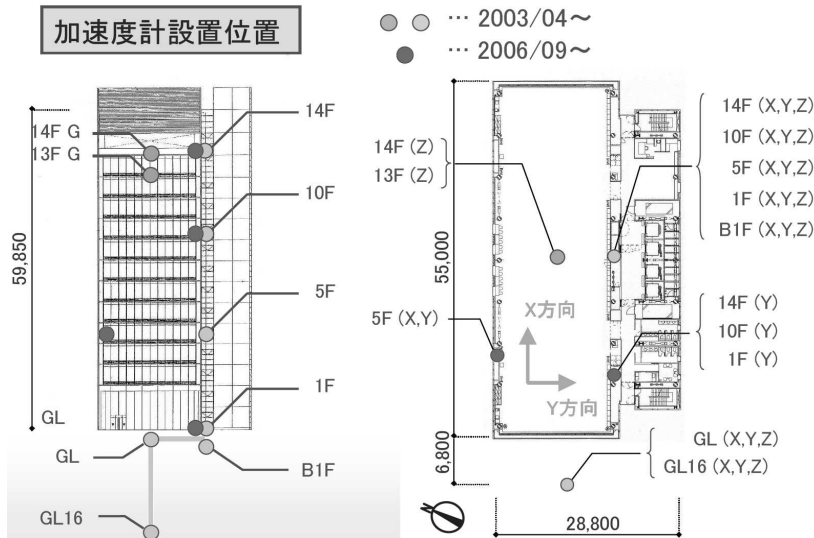


図2 地震観測システム

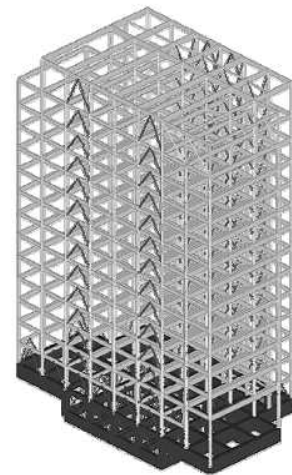


図3 架構概念図

(1) 振動解析モデルと観測記録の比較

振動解析結果と計測記録の比較を行っている。解析モデルは部材レベルでモデル化した立体解析モデルであり、各部のモデル化は慣用的な手法を用いている。層間変形=1mm程度の微小振幅下での検証例である。固有振動数はほぼ一致していたが、減衰は若干過大評価する傾向が確認された。これは制振部材の配置によるもので、梁の変形や全体曲げ変形の影響により制振部材に生じた変形がやや小さくなったためと推察している。

表 1 観測地震波(2003年4月~12月)

記録 No.	観測日時			地震情報				観測情報											
	日付	時刻	震度階	震央位置	震央 距離 (km)	震源 深さ (km)	規模 (M)	X方向						Y方向					
								最大加速度値(cm/s ²)			増幅率			最大加速度値(cm/s ²)			増幅率		
							GL16	GL	1F	14F	GL/GL16	14F/1F	GL16	GL	1F	14F	GL/GL16	14F/1F	
1	4/8	4:17	1	茨城県南部	85	47	4.6	2.1	6.3	3.0	4.8	3.1	1.6	2.6	8.2	3.5	4.7	3.1	1.3
2	5/10	11:46	2	千葉県北西部	74	70	4.5	2.4	6.3	4.2	4.4	2.7	1.1	2.4	6.9	3.7	6.1	2.9	1.6
3	5/12	0:57	3	茨城県南部	77	47	5.2	15.9	32.5	21.1	22.0	2.0	1.0	9.7	31.8	21.2	32.3	3.3	1.5
4	5/12	0:59	3	茨城県南部	76	50	4.6	4.4	13.5	8.1	11.6	3.1	1.4	4.8	15.6	10.1	9.1	3.3	0.9
5	5/17	23:33	2	千葉県北東部	114	47	5.1	1.8	4.7	3.2	7.5	2.6	2.3	2.4	7.2	5.1	5.9	3.1	1.2
6	5/26	18:25	3	宮城県沖	425	71	7.0	6.1	11.5	9.0	21.9	1.9	2.4	7.5	13.2	11.0	32.9	1.8	3.0
7	7/26	7:15	1	宮城県北部	367	12	6.2	1.3	2.0	1.4	6.0	1.5	4.2	1.4	2.1	1.6	7.2	1.4	4.4
8	8/4	20:57	1	茨城県北部	160	58	4.9	2.3	6.8	3.1	2.0	2.9	0.7	2.2	5.6	3.3	3.1	2.5	0.9
9	8/18	18:59	2	千葉県北西部	73	69	4.6	4.7	12.7	7.4	13.0	2.7	1.8	5.7	11.1	5.8	8.0	1.9	1.5
10	9/20	12:54	3	茨城県北西部	83	70	5.8	9.9	21.1	18.1	27.4	2.1	1.5	12.8	29.1	21.8	23.4	2.3	1.1
11	9/26	4:53	1	十勝沖*	812	42	8.0	1.5	2.3	1.8	5.1	1.5	2.9	1.4	2.5	1.8	9.3	1.8	5.2
12	10/15	16:30	3	千葉県北西部	62	74	5.1	14.4	49.4	19.0	22.3	3.4	1.2	11.1	68.0	22.1	18.4	6.1	0.8
13	10/31	10:07	2	福島県沖	400	33	6.8	1.6	2.0	1.7	5.6	1.3	3.4	1.5	2.4	2.0	10.1	1.6	5.0
14	11/12	17:28	2	紀伊半島沖	296	390	6.5	5.8	14.8	11.5	15.6	2.6	1.4	6.0	26.0	11.9	12.4	4.3	1.0
15	11/15	3:43	2	茨城県沖	175	48	5.8	2.8	11.3	6.0	9.3	4.1	1.6	2.4	9.5	4.3	6.6	4.0	1.5

注) *: 2003年十勝沖地震 震度階: 気象庁震度階級 規模: 気象庁マグニチュード **太字**: 各欄の最大値を示す

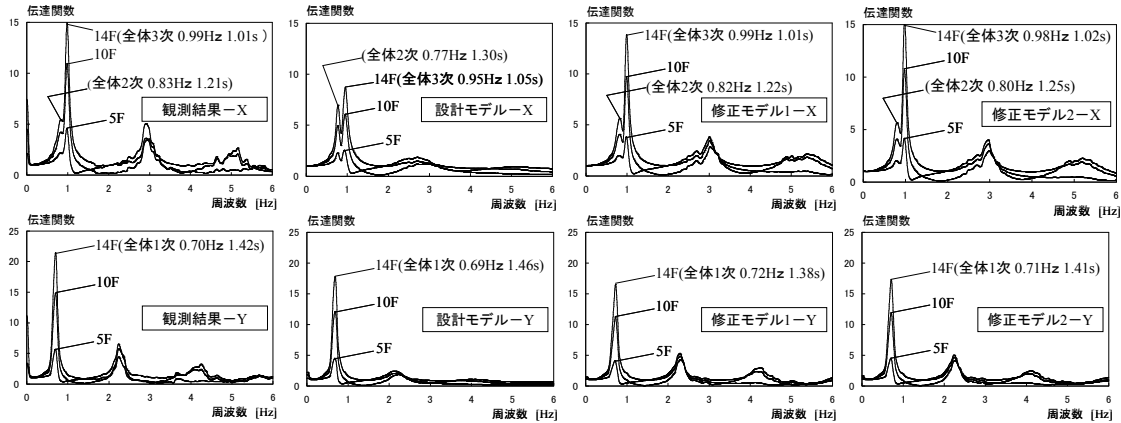


図 4 伝達関数 (観測結果) 図 5 伝達関数 (設計モデル) 図 6 伝達関数 (修正モデル 1) 図 7 伝達関数 (修正モデル 2)

(2) ロングスパン大梁の振動性状

最上階のロングスパン大梁 (スパン=17.6m) の上下方向の振動性状を検討している。大梁の上下動解析モデルと計測記録 (表 1 の NO3、5 の地震) の比較を行い、固有振動数や減衰定数を検証している。固有振動数は解析モデルとほぼ一致することを確認している。また、梁端部と梁中央部での観測記録から大梁の伝達関数を算定し、梁の減衰定数=7~8%程度あることを確認している。携帯型振動測定機を用いて 2 人歩行やヒールインパクトによる測定結果と観測記録の比較を行っており、地震時に確認された固有振動数や減衰定数と概ね一致することを確認している。

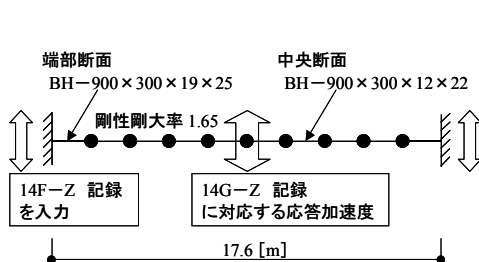


図 8 大梁上下動解析モデル

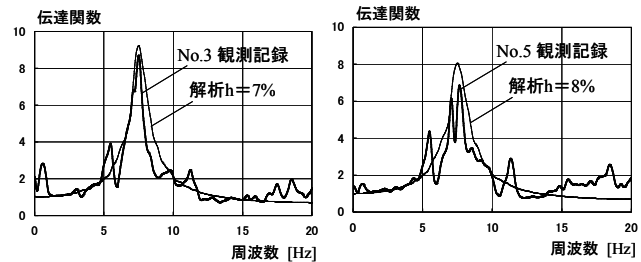


図 9 観測結果と解析結果の比較

(3) 地盤増幅と入力損失

工学的基盤に位置する杭先端 (GL-16m)、地表面 (GL) と建物基礎底 (B1F) の観測記録から地盤増幅、および、入力損失による地震力の低減効果を検討している。地盤増幅は一次元重複反射理論 (SHAKE) との比較を行い、解析と一致することを確認している【3】。また、地表面 (GL)、および、建物基礎底 (B1F) に対する建物頂部 (14階) の伝達関数の比較から高振動数ほど入力損失効果が高くなることを確認している。

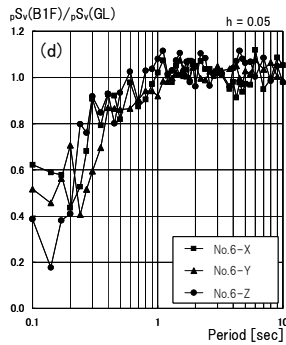


図10 自由地表面と建物地下1階の擬似速度応答スペクトル

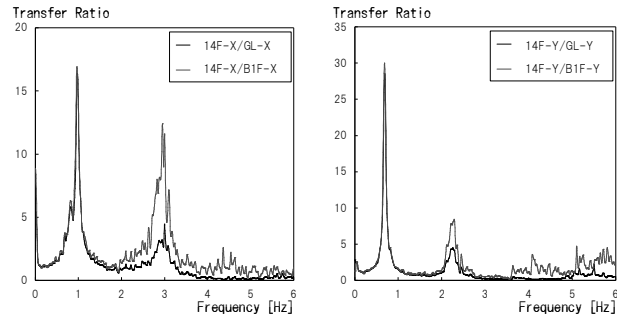


図11 14F/B1F と 14F/GL の伝達関数

(4) 地下逸散減衰を考慮した鉛直方向解析モデル

鉛直動 (上下動) は水平動と比較して短周期であり、地盤との逸散減衰効果を考慮して解析を行うことがある。逸散減衰の効果を考慮した解析手法はこれまでも多く提案されている【4】。ここでは、逸散減衰の効果を評価したダッシュポットを設けたモデルで解析を行っている。ロングスパン梁の応答加速度を対象に、基礎固定モデルとダッシュポットを設けたモデルで比較して、後者のモデルで観測記録と近い値となることを確認している。

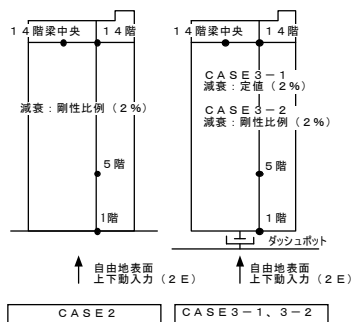


図12 解析ケース

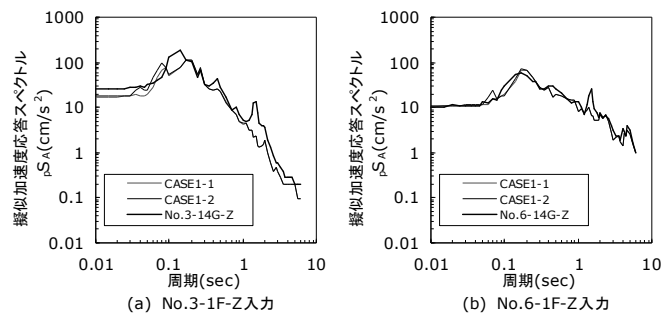


図13 14階梁中央レスポンススペクトル (E+F 入力、減衰 2%)

(5) 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録と解析モデルの比較

2011 年東北地方太平洋沖地震は本建物で最大加速度を記録した地震である。観測記録をもとに補間計算等を行い、各階の層間変形角を算定している。最大層間変形角=約 1/560 (層間変形=約 7.0mm) である。前節までの記録と比較すると大きな変形となっており、固有周期や減衰定数に変化が見られた。同地震の本震前後で比較すると、減衰定数は増加し、固有振動数は 10%程度低下したことが確認された。外装材等の仕上げ材の影響によると考えられている。地表面 (GL) と建物 1 階の観測記録を入力地震動として振動解析を行い、観測記録との比較を行った。解析モデルは前述のモデルである。1 階での観測記録を入力地震動とした場合の解析結果は観測記録とほぼ一致していることが確認された。

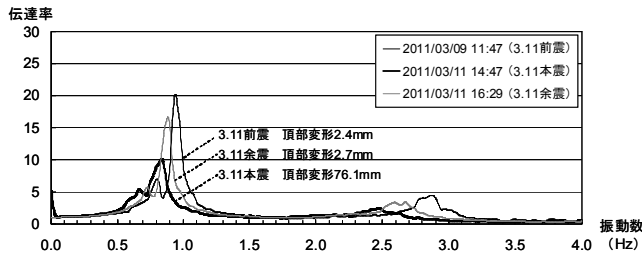


図14 本震前後の伝達関数 (14F-X/1F-X)

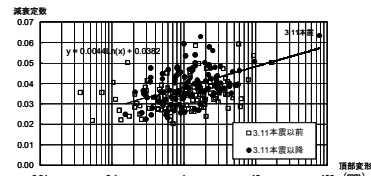


図15 X方向1次減衰定数の振幅依存性

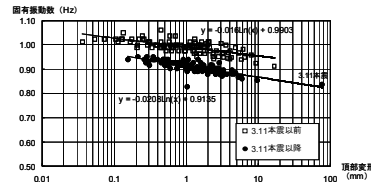


図16 X方向1次固有振動数の振幅依存性

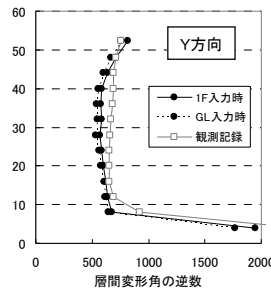
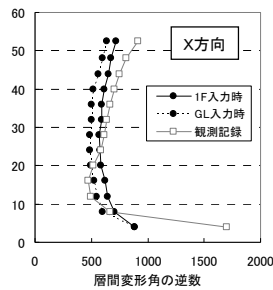


図17 最大層間変形角

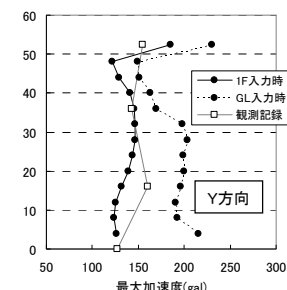
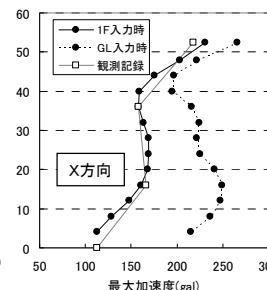


図18 最大床応答加速度

3. 強震観測の課題

3.1 強震観測記録の設計への反映

前章の建物設計者はなぜ強震観測を行ったのだろうか。設計時の想定通りか確認したい、また、実構造物の挙動はまだ不明な点もあるだろうから、それらを確認して今後の設計へ活かしたいためと推察される。

前章で紹介した検討結果より、設計へ反映された事があったかと言うと、色々な検証を行っているが、特筆すべき内容はないと思われる。解析と観測記録は概ね一致していたためかもしれないが、複数のモデルで検証を行っており、モデルが変われば異なった結果となっている。大梁の振動性状や地盤への逸散減衰の効果など、貴重なデータは得られている。上下動解析モデルの検討は、その後の解析モデルの検討には実測例として用いられているが、その結果を受けて解析の見直し等には至っていない。

理由としては、対象建物が1棟であること、評価の妥当性を検証するほどの大きな地震記録ではないことなどが考えられる。1棟では偶然の一致なのか、モデルの精度の高さによるものか、判断できない。弊社は非常に多くの設計事例があるが、強震観測を行っている事例は非常に少ない。観測したとしてもその記録を設計者が利用して解析や検証をした例はほぼないのが実情である。

2011年東北地方太平洋沖地震では、前節の建物の健全性の問い合わせが設計者の元に多く寄せられ、観測記録を用いた説明が行われた。この経験から、いち早く地震後に建物の状況を判定できるシステム、ヘルスマニタリングシステムへの関心が高まり、強震観測を用いた同システムの開発へと推移した。

仮に、具体的な数の見当はつかないが、多くの建物の観測記録が得られて、多くの検証を行うことができ、これまでの設計、解析との比較が行われ、諸々の仮定条件を検証することができるのならば、観測記録を設計へ活かすことに繋がるのではないか。そのためには多くの強震観測建物が必要であるが、前述の通り、少なくとも筆者の周りでは観測建物は多くはない。

3.2 強震観測の課題

では、建物の強震観測がなぜ普及しないのか、筆者の考える主な理由を下記に示す。

(1) 建築主のメリットとコスト

建築主にとって、強震観測によりどんなメリットがあるだろうか。メリットはあまりなく、むしろ、強震観測をするための費用、維持費が必要で、経済的なデメリットが生じる。「地震計を付けても建物の耐震性が向上する訳ではない、設計者にはメリットはあるかもしれないが、建築主にメリットはない。」ここまではっきりと言われることはないが、観測だけでは建築主の同意は得られにくい。費用を設計者が負担する事例もあるが、維持管理にも費用を要するため、設計者側での負担により観測建物数を増やすことは困難である。観測数を増やすためには、建築主にもメリットがあり、建築主の同意が得られ、費用は建築主が負担することが必要であると考えられる。

(2) 情報公開の難しさ

強震観測記録を公表して積極的に研究や設計に利用しても良い、と言う建物はどれほどあるだろうか。建物名を公表しないとしても非常に少ないと思われる。個人情報であるために公表したくないのが理由である。建築主にとっては建物の資産価値につながるため、被害が生じた場合に公表はありえないであろう。弊社ではヘルスマニタリングシステムにより最近の大阪北部地震、北海道胆振東部地震の記録は観測されているが、その記録は建築主の個人的な情報であり、被災度判定結果が伴っている。建築主にとってデリケートな情報であり、公表はしたくないのが実情である。当然ながら、弊社でもこの観測記録、および、被災度判定の結果は非常に慎重に扱うべき情報として扱われている。個人的情報の管理、取り扱いは大きな課題と考えられる。

(3) 設計者の責任

強震観測記録と解析は一致するだろうか。乖離があった場合、特に危険側（解析値の方が変形等が小さい）に乖離がある場合、設計者はその責を問われることにならないだろうか。そうなると、設計者から強震観測を提案しなくなってしまふ。そもそも記録と解析のどの程度の差を乖離と呼ぶのであろうか。一般の方は高度な解析、技術をもとに設計されているから、地震時には想定通りに建物は挙動し、解析と観測記録は一致するものだと考えているであろう。設計者は材料、外力、施工などの多くのばらつきを考慮しながら、安全である建物を設計している。正確に建物の挙動を再現することも設計の目的の一つではあるが、ある仮定条件を考える際に、正確さよりも安全側となる条件を選択して設計していることがある。また、不確定な要素に対してできるだけ鈍感な建物を設計することを心掛けるべきである。解析結果は多くの仮定の組み合わせによる特殊な解の一つであり、実現象と完全に一致することはあり得ず、工学的な視点で解析と観測は一致しているかどうかを判断する。その考え方に一般の方と設計者の間には乖離がある。強震観測と言うことは、設計との比較を伴うものと考えられる。そこに乖離がある場合の設計者の責任問題や、解析と観測記録のどの程度の差を乖離とするのか、考えるべき課題である。

4. 強震観測の課題への対策

前述の課題に対して筆者の考える対策、仕組みづくりについて以下に示す。

4.1 建築主にもメリットのある仕組み

建築主、建物利用者が単に観測記録を見てもメリットはないが、観測記録を用いて地震後に被災状況を提供するヘルスマonitoringシステムであれば、メリットがある。ヘルスマonitoringを行うためには、建物の観測が必要である。建築主には建物の被災状況を提示し、観測されたデータは設計者へ展開、利用することを願う。建築主の許可を得る必要があるが、ヘルスマonitoringシステムはBCP、LCDなどの観点からも建築主にとっても有益な情報を得ることができるため、建築主の了解も得やすいと考えられる。ヘルスマonitoringシステムに関しては、国の基準、防災拠点の設計に際してのガイドラインなどに紹介されており、今後も普及していくことが期待される[5][6]。設計者、研究者だけでなく、建築主にとってもメリットのあるシステム、仕組みとすることで建物の強震観測を増やすことは可能であると考えられる。既に技術は確立されており、比較的安価なシステムも多くある。加えて建物内だけではなく建物近傍の地盤など、ヘルスマonitoringでは不要となる箇所も観測できるようになると設計、研究への活用の幅が広がる。建物外の観測は建築主にメリットはないが、システム全体の費用に対するコストアップは僅かであるため、建築主を説得し、建物外での観測を行うことが望ましい。

4.2 情報公開、活用できる仕組み

極端な対策ではあるが、ある一定の規模以上の建物は観測を義務化して、観測した結果を公表するような社会、制度にはできないだろうか。大地震時には建物の被災状況を確認した上で帰宅困難者を受け入れる等の対応は減災や防災の観点から求められており、既に条例化されている[7]。観測した記録を公開することに対する建築主の了解を得られにくい、現状においても、大地震時に建物の被災度は応急危険度判定士により判定されている。自分の建物が被災したかどうか、公表したくない建築主の心情は当然かもしれないが、ヘルスマonitoringシステムがないとしても被災度は判定士により判定、公表されている。ヘルスマonitoringシステムも完全ではないので、従来目視による判定と併せて利用すべきであると考え、ヘルスマonitoringも従来の応急判定も同じ判定であり、判定士の結果が公表されているのであれば、ヘルスマonitoringシステムの判定結果が公表されてもおかしくはない。防災に強い街や都市を作るためには、このような情報は少なくとも公共性の高い、不特定多数の人が集まる建物では公表されるべきで、帰宅困難者を受け入れるか否かの判断にも利用すべきである。被災度の判定結果の公表と合わせて、観測記録を公表、利用できる仕組みとすることで、建物の観測記録を増やすことが可能になる。公開することによる建築主のメリットとして、システムを導入する場合や情報を公開した場合に、経済的な補助を受けられること等、仕組みも効果的であると考えられる。とは言え、民間の建物では匿名性を守ることが望ましく、情報の取扱に関する仕組みづくりが必要である。

4.3 設計責任を問わない仕組み

観測を行うと設計との比較を求められるのは必須ではないかと思う。大きな地震後に「今回の地震の揺れは設計の想定通りか、観測記録と比較してください。」と建築主に問われることもあるだろう。観測記録と解析は一致すると思っている一般の方と、ある程度の乖離はあるが工学的な視点から概ね一致すると考える設計者とは、そもそも認識が異なり、議論が平行線を辿る可能性もある。設計者は、乖離の度合いとして、例えば小振幅時では、

例えば、20~30%の乖離があってもおかしくないと思うかもしれないが、このような感覚が一般の方には受け入れられるだろうか。事前の設計段階における建築主への説明が必要と思われる。

JSCA では性能設計メニューの改定が行われ、耐震性能は施主とともに設定して、作りこんでいく、プロセスが整理され、耐震性能を建築主と共有しやすくなった[8]。設計時に想定した地震と同程度の地震が起きた場合に想定以上の変形や被害が生じた場合、施主と協議した耐震性能を満足できなかったことになる。(もちろん施工などの要因もあるので、本当に設計上の問題か、原因究明するのは困難を伴う。) 建築主は設計瑕疵と思うであろう。また、想定以下の被害であった場合でも、過剰設計と思われるかもしれない。設計者は設計当時の技術を駆使して、意匠性、経済性、施工性などを考慮しながら、施主と決定した耐震性を満足する建物を設計しようと努めている。審査やチェックを受けて設計内容に問題ないと認められた場合は、改ざんや故意でなければ、仮に設計時の想定と観測記録に大きな乖離があったとしても、設計者にその責を問わないような仕組みをつくる必要があるのではないかと考える。

設計内容に問題がないことを示す仕組みとしては、第3者による設計内容のチェックを行う。性能評価(超高層、免震)については一定の有識者による評価を得ている。また、性能評価の対象外の建物では、第3者によるピアチェックを受けることで設計の妥当性を認める。あらためて新しい審査、チェック機関を設けると設計者の負担や設計期間が長くなるなど懸念されることから、従前の性能評価や構造計算適合性判定を利用し、法への適合性や安全性を判断するだけでなく、求められる耐震性を有するか否かについても、審査するのが良いと思われる。一定の評価、審査を受けた建物は、仮に解析結果と異なる事象が生じ、設計時に約束した耐震性が満足できていない結果となったとしても、設計の責を問われないような仕組みとする。やや後ろ向きの考えかもしれないが、設計者が建物の強震観測を提案、実行しやすい環境とするためには必要な仕組みではないかと考える。

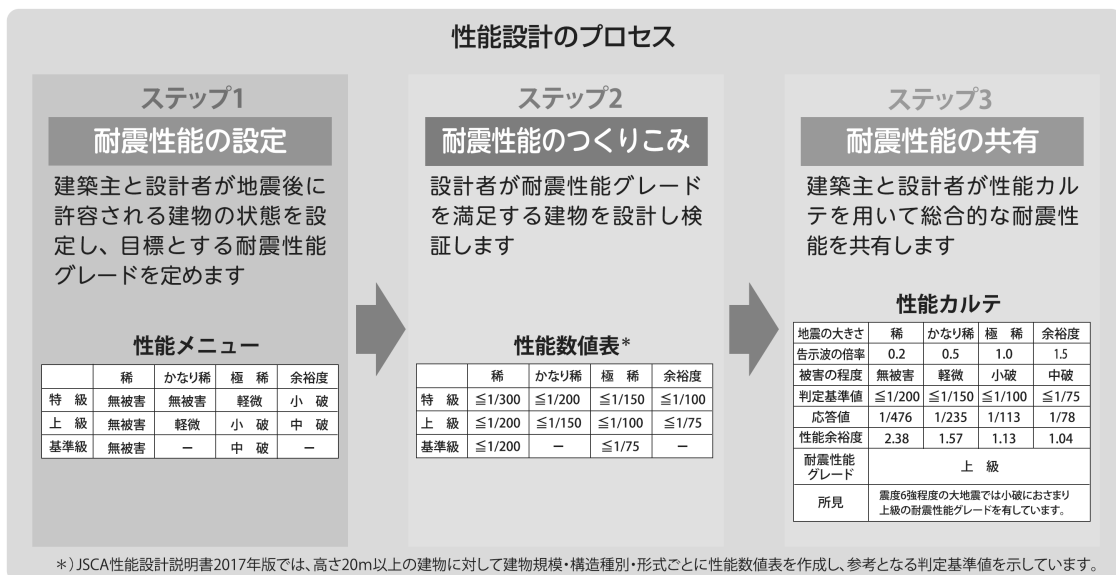


図 19 性能設計のプロセス

5. まとめ

本稿は強震観測に対する特段の経験や知見がある訳ではない、一構造設計者と言う立場で、強震観測の課題や対策を述べた。筆者の周りの強震観測建物の事例、この観測結果が設計へはあまり活用されていないこと、そもそも強震観測した建物の事例が少なくとも筆者の周りでは非常に少なかったことを述べた。一方で強震観測を活用したヘルスマonitoringシステムは急速に普及していることを述べた。

今後、強震観測が設計へ活用されるためには建物の観測数を増やすことが必要であると考え、観測数を増やすための課題とその対策について述べた。特にデータの取り扱い是非常に難しい問題である。ヘルスマonitoringシステムの普及により観測数は増え、その観測記録はビックデータとなる。膨大なデータをどのように扱い、どう活かすか。解析モデルとの検証には多くの検討が必要となるかもしれないので、AIなどの技術を活用していくことも考えられる。検証方法や活用方法も十分に議論していくべきであろう。

また、観測数を増やすことが本当に意義のあることか、検証すべきであろう。そもそも観測結果との検証をしなくても、現時点の設計は実挙動を評価することができており、観測数を増やしたところで、現状の設計の裏付けになるだけではメリットは小さい。

これらの問題は、一企業では到底解決できるものではなく、学会や本小委員会が中心となり、観測データを研究、検討しやすい環境を作り、設計へのフィードバックが進むことを期待したい。

参考文献

- [1]原田公明他：地震観測に基づく日建設計東京ビルの振動性状（その1）～（その6）,日本建築学会大会学術講演梗概集,2004年9月
- [2] 原田公明他：2011年東北地方太平洋沖地震を受けた日建設計東京ビルの地震記録（その1）～（その3）,日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）,2012年9月
- [3] Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed : SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72-12, University of California, Berkeley, 1972.12
- [4]日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計
- [5]国土交通省大臣官房官庁営繕部整備課：建築構造設計基準の資料（平成30年版）
- [6]国土交通省住宅局：防災拠点等となる建築物に閣下る機能継続ガイドライン（平成30年5月）
- [7]東京都：東京都帰宅困難者対策条例
- [8]日本建築構造技術者協会：JSCA 性能設計【耐震性能編】