

3.3.9 建築分野

3.3.9.1 被害調査、現地対応

国総研は、(独)建築研究所と合同で、今回の地震で被災した地域への支援要請に備えるとともに、建築物を中心とした被害状況の把握により今後の地震や津波対策に生かすため、3月12日(土)朝9:00から「国土技術政策総合研究所・建築研究所合同建築物震災対応検討会議」を立ち上げ、現地調査も含めた活動を開始した。被害調査は、初動期(地震発生後約2週間)には国土交通省住宅局の要請の調査として、その後は自主調査として、地震動、津波及び火災による建築物等の被害について調査を実施しており、平成24年1月27日まで約10ヶ月間に、青森県、岩手県、宮城県、山形県、福島県、茨城県、栃木県、千葉県、東京都及び神奈川県

被災地に、合計43回、国総研のべ49人、(独)建築研究所のべ91人の職員を派遣した。被害調査の実施状況を表-3.3.9.1に示す。

また、把握した被害状況からみて、安全対策となる技術基準の見直し等が必要と考えられたことから、建築構造分野の技術基準原案について有識者に審議いただく「建築構造基準委員会」を4月に設置するとともに、委員会による現地調査を実施した。これら初期段階で把握された地震被害を踏まえ、国が技術基準の策定・見直しを行う際の技術的知見を収集整理するための基準整備促進事業において、基準の設定、見直し等が必要と判断された津波、液状化、天井脱落、エスカレーター落下等による被害に関連した課題を立て、外部の協力を得ながら調査研究を実施した。

表-3.3.9.1 被害調査の実施状況

	時 期	場 所	派遣者数		内 容	要請元
			国総研	建研		
1	平成23年 3月12日	茨城県	1人	1人	茨城空港ターミナルビルの天井落下被害を調査	住宅局
2	3月14日	茨城県	—	1人	液状化に伴う県営住宅(木造住宅)の倒壊危険性調査	関東地方整備局
3	3月14日 —16日	岩手県 宮城県	1人	3人	木造建築物の地震動による被害調査	住宅局
4	3月14日 —15日	福島県	2人	2人	RC建築物の地震動による被害調査	住宅局
5	3月15日	茨城県	1人	2人	建築物全般の地震動による被害調査	住宅局
6	3月16日	茨城県	1人	3人	建築物全般の地震動による被害調査	住宅局
7	3月23日	茨城県	1人	2人	木造建築物の地震動による被害調査	住宅局
8	3月24日 —26日	宮城県 福島県	2人	3人	RC建築物等の地震動による被害調査	住宅局
9	3月24日 —25日	福島県 栃木県	1人	1人	木造建築物の地震動による被害調査	住宅局
10	3月24日	茨城県 千葉県	1人	2人	宅地地盤の地震動による被害調査	住宅局
11	3月25日	茨城県	—	4人	木造建築物の地震動による被害調査	住宅局
12	3月30日 —31日	茨城県	1人	1人	鉄骨造建築物の地震動による被害調査	
13	3月30日 —31日	茨城県	—	3人	鉄骨造建築物の地震動による被害調査	
14	3月30日 —4月2日	岩手県 宮城県	2人	3人	建築物全般の津波による被害調査	
15	3月31日	千葉県	1人	1人	液状化による一般住宅の復旧調査	関東地方整備局
16	3月31日 —4月3日	宮城県 岩手県	1人	—	国土交通省による被災状況把握及び緊急復旧のための現地調査	
17	4月6日 —9日	岩手県 宮城県	1人	4人	建築物全般の津波による被害調査。港湾空港技術研究所と共同実施。	
18	4月6日 —9日	宮城県	3人	3人	木造建築物の津波による被害調査	

19	4月8日 -10日	宮城県	—	1人	建築物の地震動による火災の被害調査。東京理科大と共同実施。	
20	4月11日 -12日	茨城県	1人	2人	鉄骨造建築物の地震動による被害調査	
21	4月12日	茨城県	—	2人	鉄骨造建築物の地震動による被害調査	
22	4月15日 -16日	宮城県 福島県	2人	1人	宅地地盤の地震動による被害調査	
23	4月20日 -22日	宮城県 岩手県	3人	—	建築物の地震動による火災の被害調査	
24	4月21日 -22日	宮城県 福島県	3人	2人	国土技術政策総合研究所の建築構造基準委員会（委員長：久保哲夫東京大学教授）が行う建築物被害調査	
25	4月21日	茨城県	1人	4人	木造建築物の地震動による被害調査	
26	4月24日 -26日	宮城県	—	2人	建築物の地震動による火災の被害調査	
27	4月26日 -28日	青森県	2人	—	建築物の地震動による火災の被害調査	
28	4月27日 -29日	宮城県 栃木県	1人	4人	木造建築物の地震動による被害調査	
29	5月11日 -14日	福島県 茨城県 栃木県	1人	4人	RC 建築物の地震動による被害調査	
30	5月24日 -27日	岩手県 宮城県	1人	6人	木造建築物の津波による被害調査	
31	6月1日 -2日	宮城県 山形県	2人	3人	免震建築物の地震動による被害調査	
32	6月27日 -30日	宮城県	—	2人	建築物全般の津波による被害調査。 ASCE との共同調査。	
33	6月30日 -7月2日	岩手県	1人	1人	建築物全般の津波による被害調査。 ASCE との共同調査。	
34	6月30日	茨城県	—	2人	鉄骨造建築物の地震動による被害調査	
35	7月1日	茨城県	1人	2人	鉄骨造建築物の地震動による被害調査	
36	7月4日	東京都	2人	1人	免震建築物の地震動による被害調査	
37	7月6日	茨城県	1人	2人	鉄骨造建築物の地震動による被害調査	
38	7月8日	宮城県	2人	1人	免震建築物の地震動による被害調査	
39	8月29日 -30日	宮城県	1人	—	耐火建築物の地震動による火災被害調査。 国土交通省営繕部と共同実施。	
40	8月31日 -9月1日	宮城県	1人	2人	建築物全般の地震動による被害調査。 アメリカ人研究者チーム（UJNR メンバー）との共同調査。	
41	9月22日 -24日	宮城県	1人	2人	木造建築物(公営住宅)の津波による被害調査	
42	10月13日 -16日	宮城県	1人	5人	木造建築物の津波による被害調査	
43	11月30日	神奈川県	2人	1人	免震建築物の地震動による被害調査	

3.3.9.2 地震による建築物の被害

地震による建築物の被害については、まず地震動そのものについて建築物及び地盤等での観測記録に基づき分析を行った。また、鉄筋コンクリート造、鉄骨造、木造、免震構造の各種構造分野のほか、地盤の液状化、非構造部材について、現地被害調査及びその結果に基づく詳細分析等を実施した。概要を以下に示す。

(1) 地震動及び応答の分析

観測記録の分析を行い、以下の特徴が確認された。

本震の広い震源域の破壊過程に起因する、長時間かつ高レベルの強震記録が広範囲で多数観測された。また、その後が続いて発生した多くの大規模余震においても、多くの大振幅記録が得られた。被災地を中心に記録された地震動の変位応答スペクトルについては、特定の周期帯域に限定すれば、過去の地震における大きなレベルのものと同程度であった。長周期地震動に関しては、被災地および首都圏において周期4秒以上の成分は特別大きいものではないものの、**図-3.3.9.1**に示す通り、埼玉や大阪など震源から遠く離れた地点で長周期成分が卓越した地域がいくつかあった。特に、大阪府湾岸の超高層建築物では、上層階（52階）で最大振幅130cm程度の応答が10分以上継続する記録が得られた。

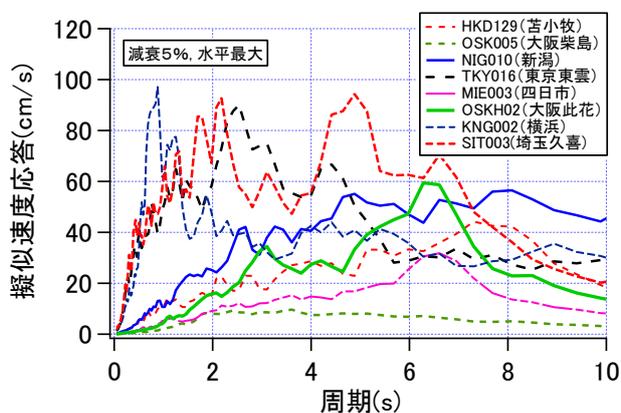
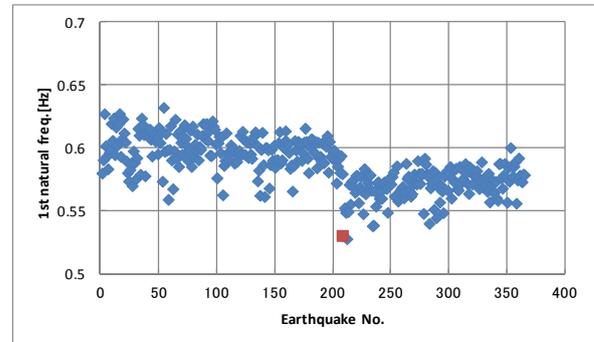


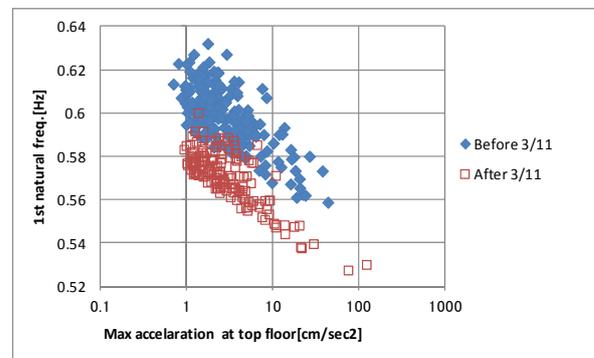
図-3.3.9.1 被災地以外の観測記録の擬似速度応答スペクトル (K-NET 及び KiK-net^{3.3.10-1})

また、構造の損傷（大破を含む）を受けた際の強震記録が得られた。観測記録を用いたシステム同定解析では、**図-3.3.9.2**に示すとおり本震の前後で一次固有周期や一次減衰定数の変化が確認された。さらに本震発生後に建物及び周辺地盤に地震計を追加設置し、余震を利用した各建築物の挙動確認を行った。これらの観測記録に基づきエキスパンションジョイント部の相対変位の算出、建築物の固有周期や減衰の評価、入力

損失の検討などを行った。さらに、天井脱落被害に関して、余震観測結果からこの建築物（体育館）の本震時における入力地震動を推定したところ、天井の吊り元となる屋根面には2G程度以上の応答加速度が生じることが示され、相当激しく揺れたものと考えられる。



(a) 一次固有周期 (■が本震)



(b) 応答加速度と一次固有周期の関係

図-3.3.9.2 鉄骨造建築物（21階建、東京都内）における本震前後の観測記録の解析結果

その他、強震観測を実施している超高層建築物等において、その建物利用者を対象として、各利用者の地震時の行動や、被害、避難、事前対策の効果などに関するアンケート調査を実施してその結果を整理した。

(2) 鉄筋コンクリート造 (RC 造) 建築物

RC造建築物の被害を分類し、1995年兵庫県南部地震における被害分類と比較した。**表-3.3.9.2**に示す通り、部材レベルの被害としては兵庫県南部地震で報告されたものとはほぼ同じ被害が今回でも発生したが、建築物の層（架構）レベルでの破壊に関しては、僅かに発生しただけで非常に少なかった。特に1981年以降の現行耐震基準により設計された建築物では、このような層レベルでの被害は見られていない。したがって今回見られた被害を技術基準の観点から見ると、これらの大部分に対しては、これまでの地震被害に基づく技術基準の見直し等により、対処されていると考えられる。

表-3.3.9.2 1995年（兵庫県南部地震）と2011年（東北地方太平洋沖地震）で確認されたRC造建築物の被害分類の比較

	1995年兵庫県南部地震で見られた被害 3.3.10-2), 3.3.10-3)	被害の有無	
		1995	2011
部材レベルの破壊	1) 柱のせん断破壊	○	○
	2) 柱の曲げ圧壊	◎	◎
	3) 柱頭・柱脚の曲げ破壊（含：引張・圧縮の軸力による破壊）	◎	◎
	4) 柱段落とし部の軸降伏	◎	—
	5) 柱帯筋端部 90°フックの定着破壊	○	○
	6) 柱や梁の付着割裂破壊	○	○
	7) 梁のせん断破壊（含：有開口）	◎	○
	8) 壁のせん断破壊（含：有開口）	◎	◎
	9) 壁の曲げ破壊	◎	◎
	10) 柱はり接合部のせん断破壊	◎	△
	11) 鉄筋のガス圧接部の破壊	○	—
	12) 集合住宅の非構造壁の損傷	◎	◎
架構レベルの破壊	13) ピロティ階の崩壊・大破	◎	○
	14) 壁の偏在に起因するねじれ応答による隅柱等の破壊	○	○
	15) 低層建築物での中間の特定階の崩壊または大破	○	○
	16) 中高層建築物での中間の特定階の崩壊または大破	○	—
	17) セットバックの影響による層崩壊	○	—
	18) 建築物全体の転倒	○	—
	19) パンケーキ状の崩壊	○	—
	20) 隣接建物との衝突	○	—
	21) 異種構造間での破壊	◎	—
	22) ペントハウスの傾斜、転倒、落下	○	○
	23) プレキャストコンクリート屋根の落下	○	—

注：「被害の有無」欄は、該当する被害が見られた場合に○を、見られなかった場合に—を記す。なお、破壊には至らない程度の損傷の場合には△を、現行耐震基準により設計された建築物に被害が見られたものには◎を記す。

1981年以前の旧耐震基準で建設されたRC造建築物11棟を対象に、被災度区分判定⁴⁾を含む詳細調査を実施した。11棟の被災度の内訳は大破と中破がそれぞれ

4棟ずつ、小破が3棟である。明らかに軸変形が分かるような短柱のせん断破壊（写真-3.3.9.1）や耐力壁のせん断破壊のような重大な構造被害を受けた建築物もあれば、構造部材の損傷は比較的軽微であっても、非構造壁の破壊（写真-3.3.9.2）、内外装材の落下、方立て壁のせん断破壊などの非構造部材の被害、並びに、それに伴う落下危険物の存在により、継続使用を見合わせたケースも確認された。既存建築物の地震時における機能維持のためには、耐震改修を行って構造安全性を確保するのみならず、非構造部材の損傷軽減も重要であることを改めて示したものと見える。



写真-3.3.9.1 短柱のせん断破壊



写真-3.3.9.2 非構造壁のせん断破壊

さらに、短柱のせん断破壊により大きな被害を受けた建築物については、腰壁・垂れ壁に構造スリットを設けることで等価1自由度の応答では十分靱性が期待できる変形角に収まる解析結果となることを確認した。すなわち、建築物全体の補強を含めた耐震改修工事が工期、予算、耐用年数等の観点から困難な場合は少ないが、純ラーメン部分に一定以上の強度と靱性能が確認できれば、あくまで応急的な処置ではあるが、構造スリットを設ける工事を先行させることで地震被害の軽減に効果があると考えられる。

一方、偏心の大きな建築物について、耐力割増また

は偏心改善を行った建築物モデルを作成して地震応答解析を実施した結果、耐力割増モデルではねじれ挙動の改善効果はほとんど確認できなかった。一般に偏心が大きな建築物に対しては、単に耐力を割り増すのではなく、まず偏心の改善について検討することが推奨される。

(3) 鉄骨造（S造）建築物

S造建築物については、被災地域における現地調査の結果を踏まえて、工場や倉庫建築物の類型と見られる学校体育館を対象として、旧耐震基準及び現行耐震基準により設計された学校体育館の構造形式の比較のほか、耐震改修済み学校体育館も含めて、被害の状況について詳細に分析を行った。その結果は以下のとおりである。

旧耐震基準の学校体育館（55棟）の構造の被害を6種に分類した。それらのうち①鉛直ブレース材の座屈・破断と接合部の破断及び②ラチス柱の斜材の座屈は大破に分類される被害であり、その棟数は4棟（被害率1割弱）であった。この被害率は、2004年新潟県中越地震の同様の調査^{5)~7)}における旧基準の体育館の被害率（3割程度）よりも小さい。これらの旧耐震基準の体育館は、現行耐震基準で設計されている体育館に比べれば、ブレース部材や柱部材で耐力が不足していることや、接合部の保有耐力接合が行われていないことが考えられ、これらが主な被害原因になっているものと思われる。今回の調査では、ブレースの補強による耐震改修が行われていた体育館では、ほとんど無被害であったことから、適切な耐震改修によって、被害を軽減することが可能と考えられる。

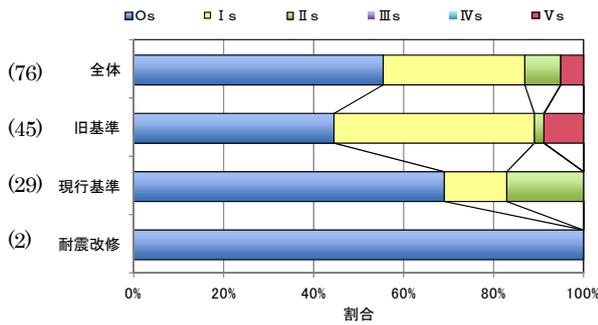
一方、現行耐震基準の体育館（29棟）の構造被害には上記①②は見られないが、他の被害形式である③RC造柱とS造屋根の接続部（支承部）のコンクリートの剥離、ひび割れ、④屋根面水平ブレースのたわみ、座屈、破断、⑤柱脚コンクリートのひび割れ及び⑥その他（床束の転倒等）の被害があった。ただし、これらの被害の被災度区分判定⁴⁾の結果は、ほとんどが小破であり、1棟のみが中破と判定された。旧耐震基準と現行耐震基準の被害率を比較すると、現行耐震基準では小破以上の被害率が少なく、大破と判定されたものもなかった。なお上記の被害のうちでは写真-3.3.9.3に示すような③の支承部（接合部）被害に分類されるものが比較的多く見られたが、これらについては、例えば日本建築学会「各種合成構造設計指針」⁸⁾に破壊形式とその対策が記されている。また、RC造柱や妻壁

部分とS造屋根の接続部（支承部）の設計法としては、耐震診断や補強設計で用いられている方法として、最上層における建物の保有水平耐力から、屋根面に作用する震度を求め、地震力が屋根面に均等に作用するとして、屋根の面積比に応じて屋根面せん断力を算定して設計する方法や、略算的な方法として、屋根面が伝達すべき重量に $0.55 \times A_i \times F_{es}$ を乗じて必要耐力を計算し、それに対して屋根面水平ブレースや接続部を設計する方法等、がある¹⁰⁾。このような方法に基づき適切な設計を行うことで、この部位の地震被害を軽減することができると考えられる。

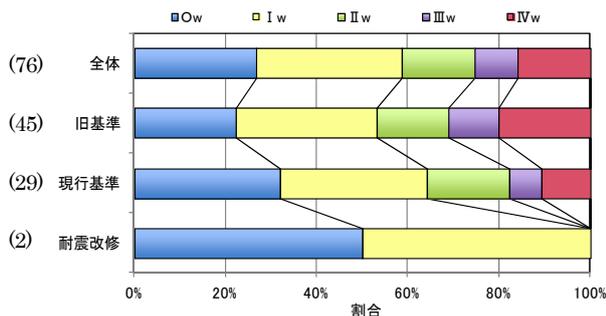


写真-3.3.9.3 RC造柱とS造屋根接続部（支承部）の被害例

上記のほか、体育館の非構造部材の被害に関して、旧耐震基準の体育館では、天井、照明の脱落、外壁の脱落、内壁の脱落、軒天の脱落、窓ガラスの破損など、比較的大きな被害が観察され、天井が広範囲に脱落したものが4棟程度あった。また、現行耐震基準の体育館については、天井の破損や脱落の被害が比較的多く観察された。天井被害に関しては、旧耐震基準と現行耐震基準に被害の傾向に大きな差はないが、非構造部材の被災度区分でIIw以上の比較的大きな被害の割合は、現行耐震基準の方がやや多くなっていた。



(a) 構造骨組の被災度区分



(b) 非構造部材の被災度区分

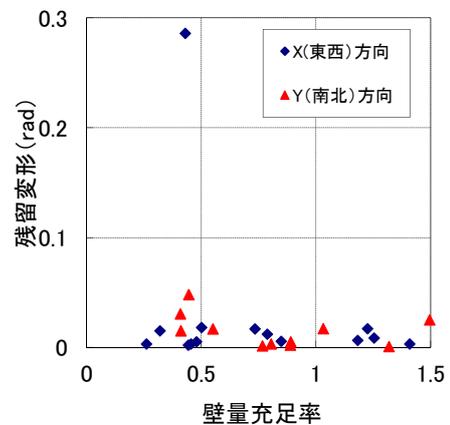
図-3.3.9.3 設計基準毎の被災度区分の割合（最左列 ()内の数字は棟数を示す）

(4) 木造建築物

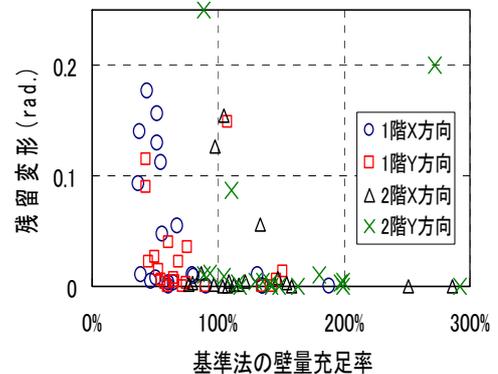
木造建築物については、宮城県大崎市、福島県須賀川市、栃木県那須郡那須町、茨城県常陸太田市、那珂市などで地震動による被害が多く確認された。宮城県栗原市では、震度7を記録したにもかかわらず、木造建築物の被害は過去に震度7を記録した地震と比べて大きくない結果となった。構造躯体以外の被害として、造成宅地の地盤変状による被害が宮城県仙台市、栃木県矢板市などで大きく、被害棟数もそれなりに多かった。また屋根瓦の被害などは、地震が頻繁に発生する宮城県よりも、むしろ福島県、茨城県の方が多いという印象であった。その他、低湿地や水田を埋め立てたなどの宅地では、地盤変状が発生しなくても地震動が増幅した可能性があることが、宮城県栗原市、大崎市、栃木県那須町、茨城県常陸太田市、那珂市、常総市、龍ヶ崎市などで看取された。

木造建築物の被害の詳細調査として、比較的被害が大きかった地区の十数棟について建築物の構造仕様、耐震要素の配置などとその被害状況について調査し、壁量充足率（法令上必要とされる耐力壁の量を1とした場合の調査建築物に存在する耐力壁の量の比率を示したもの）と残留変形との関係について検討を加えた。今回の詳細調査結果からは、建築物の残留変形が小さ

かったこともあり、図-3.3.9.4 (a)に示す通り、壁量充足率と残留変形との間に明確な傾向は読み取れなかった。なお、偏心率と残留変形との関係についても同様の結果が得られている。比較のため図-3.3.9.4 (b)として併記した2004年新潟県中越地震における同様の検討結果¹¹⁾では壁量充足率が大きくなると残留変形が減少する傾向が見られたが、この理由としては、2004年新潟県中越地震と比較して今回の調査地域が震度7の地域を含んでいない（6弱～6強）こと、木造建築物の被害に関連する地震動の特性の違いなど、いくつかの要因が考えられる。ただし、調査物件数が少ないため断言はできない。



(a) 2011年東北地方太平洋沖地震（1階のみ）



(b) 2004年新潟県中越地震（震度7）¹¹⁾

図-3.3.9.4 壁量充足率と残留変形の関係

さらに、木造建築物の被害が大きな地域で得られた強震記録^{1),12)}（JMA古川三ヶ日、K-NET古川、K-NET石巻、K-NET大宮のそれぞれNS、EW方向計8波）を用い、2階建て木造住宅を想定した建築物モデルに対して、各階の壁量充足率をパラメータとした地震応答解析を実施した。結果としてJMA古川三ヶ日およびK-NET古川の入力に対して、壁量充足率が1.0より小さくなると急激に応答が増大し、最大応答変位1/10radを超え

るものが見られた。一方、K-NET 石巻、K-NET 大宮の入力に対しては、壁量充足率が 0.6 程度でも、最大応答変位は 1/10rad を超えなかった。この結果と詳細調査による木造建物の被害状況を比較すると、宮城県石巻市、茨城県那珂市、常陸太田市の被害状況は解析結果と概ね一致するが、宮城県古川市の被害状況は解析結果よりも被害が小さいといえる。

(5) 免震建築物

宮城県内の 16 棟及び山形県内の 1 棟の免震建築物（事務所や医療機関など）を対象に、現地調査を実施した。いずれも構造躯体に損傷は生じておらず、震度 6 弱を超える大地震に対しても、免震構造として十分な性能を発揮したものと考えられる。ただし、エキスパンションジョイントや、その周辺のカバー等の中には、地震時の免震層の水平変形に追従できずに、破損（写真-3.3.9.4）や脱落を生じたものがあり、設計上想定していない被害となった場合があった。調査した免震建築物のうち 8 棟で、地震時の免震層の変位を確認できるよう罫書き式の変位計が設置されており、多くは 20cm 程度の変形を確認したが、40cm 程度の大きな変形を生じているものもあった。また免震部材のうち、特に鉛ダンパーにおいて、断面欠損と見られるひび割れ（写真-3.3.9.5）が生じており、実際に交換されたものもあった。また、鋼材ダンパーにおいては、表面の塗装の剥がれ落ちや、鋼材部分の残留変形が見られたものがあった。これらの変状は、3月11日の本震を含む今回の一連の地震で生じたものと考えられる。さらに一部の免震部材で、取付部等の表面にさびなどが生じているものがあった。また、津波被害を受け免震層が冠水した建築物もあった。これらの建築物においては、免震性能が低下したという報告はなく、直ちに免震性能に影響はないものと思われるが、免震部材本体及び接合部の耐久性を評価するための適切な維持管理が必要であると考えられる。なお、関東地方の免震建築物 3 棟でも同様の調査を実施し、応答や損傷の程度は小さいものの同様の傾向が見られている。

免震層周辺及び免震部材において、地震後の現地調査等で被害が見られた部分のうち、免震部材（ダンパー）及びエキスパンション部それぞれについての対策等が、一般社団法人日本免震構造協会の報告書¹³⁾にまとめられており、参考にできる。

小規模な免震建築物である戸建て免震住宅について、宮城県内の 10 棟を対象とした現地調査を実施した。これらの免震住宅の周辺では計測震度 5.5（6 弱）～6.2



写真-3.3.9.4 衝突等によるカバーの破損



写真-3.3.9.5 鉛ダンパー屈曲部の変状

（6 強）の地震動が観測されているが、いずれも構造躯体に損傷は生じておらず、免震構造として十分な性能を発揮したものと考えられる。ただし、構造躯体以外では、玄関口周辺の階段部分の被害、地震の振動や津波の作用による建物外周の基礎立上り部分のブロックの破損、免震層の応答に追従できない外構部分の被害があった。罫書き式の変位計の記録を確認できたものは 5 棟あり、その多くで最大変形は東南方向に生じ、数値は 10cm 程度のものから、35cm 以上の軌跡を描いたものがあった。

上記を含め、免震建築物で実施されている地震観測及び罫書き式変位計等で記録された地震時挙動を整理した。観測記録を整理した範囲では、免震層下部の最大加速度は、福島県の建築物¹⁴⁾で最も大きく、続いて、宮城県、茨城県の順となり、東京都や神奈川県では小さくなっていった。図-3.3.9.5 に示す通り、免震層下部の最大加速度が大きくなるにつれて、免震層上部の最大加速度との比率が小さくなる傾向にあった。加速度記録を用いて計算した免震層の変位軌跡は、宮城県では円形に近い形状を、福島県では東西方向で特に大きくなる形状を描いた。免震層の原点からの最大変位は、福島県の建築物で最も大きく、24.5cm であった。また、

図-3.3.9.6に示す通り、免震層の最大変位は、最寄りの地震観測記録の計測震度と良い相関が見られた。罫書き式変位計の設置は、免震層の応答性状を直接確認できるだけでなく、変位軌跡を解析結果と照合することで、解析の妥当性の検証にも利用することが可能であり、非常に有効である。

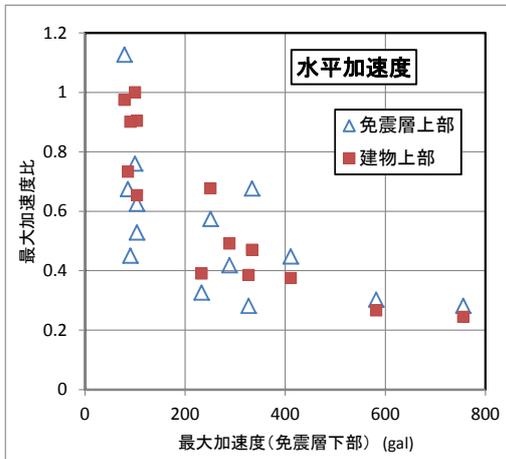
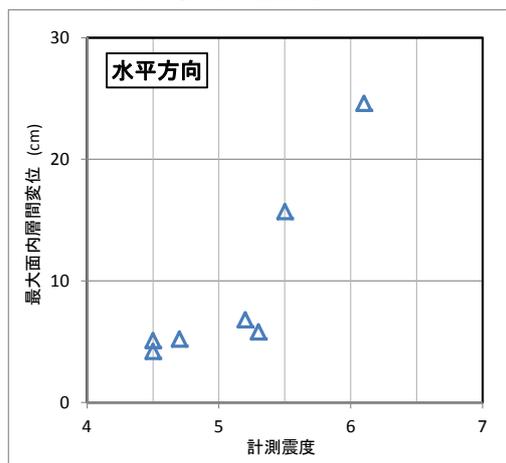
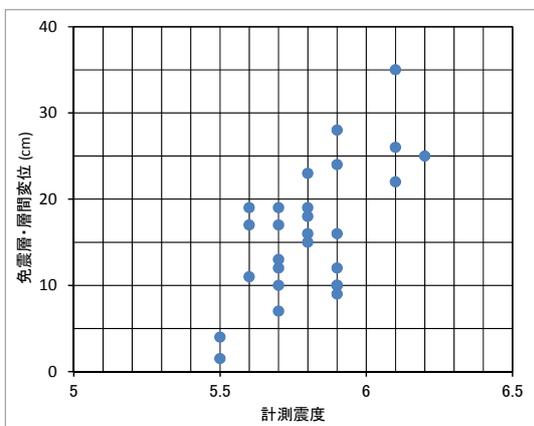


図-3.3.9.5 免震層下部に対する免震層上部および建物頂部の最大加速度比



(a) 一般の免震（計測震度は観測値）



(b) 免震住宅（計測震度は最寄りの観測点）

図-3.3.9.6 地震動の計測震度と免震層の最大面内層間変位の関係

免震建築物の居住性等について、免震・非免震建築物での居住者・使用者アンケートを実施した。免震建築物では、揺れをやわらげる免震の効果が発揮され、建築物居住者・使用者の恐怖感や不快感が低減され、行動難度についても、免震では「行動できない」とする回答が少なかった。また家具の状況等を比較した場合、免震では、明らかに食器等の落下、家具の転倒等の室内被害が低減されており、結果として医療施設等では、ライフラインの被害に対して自家発電や非常給水による対応が取られることで、室内被害がなく地震直後から業務を継続して行うことが可能であったことを確認した。ただし、被害が見られた免震建築物もあり、転倒した家具の寸法から推定される加速度は約 160cm/s^2 以上となった。免震建築物の設計に当たってはこうした状況も想定しておくことが望ましい。

(6) 地盤の液状化

地盤の液状化に関して、千葉港及び夢の島における鉛直アレイ強震記録^{15)~17)}を対象として1次元有効応力解析を行い、地震動の等価繰返し回数を推定した。また、推定された等価繰返し回数と地震マグニチュードの関係から、現行の建築基礎構造設計指針¹⁸⁾の液状化判定におけるマグニチュードによる補正係数の扱いについて、その妥当性を検証している。

今回の地震における東京湾岸部の地震波形記録は、過去の液状化地盤上のそれに比べて、格段に継続時間が長い。また、液状化発生時刻の前後で、波形の様相（振幅や周期）が大きく異なっている。表-3.3.9.3に示す通り、解析によって求めた今回の地震における千葉港および夢の島の液状化に関する地震動の等価繰返し回数は20~60程度で、1987年千葉県東方沖地震におけるその2倍程度と推察される。ただし、いずれの地点・地震でも、等価せん断応力比が小さく、液状化強度曲線を下回ったため、液状化に至らなかった。なお、1995年兵庫県南部地震における神戸市ポートアイランドの液状化に関する地震動の等価繰返し回数は5~10程度と推察される¹⁹⁾。また、本節の解析で用いた千葉港の液状化強度曲線は、当該地震動の等価繰返し回数（20~50回）の範囲では、室内試験データがなく、これらを外挿して仮定されたものであることに注意を要する。

結果として本節の解析で得られた地震のマグニチュードと液状化に関する地震動の等価繰返し回数の関係は、図-3.3.9.7に示す通り、既往の提案^{19)~21)}（外挿を含む）と大きな矛盾がないように見える。ただし、

今後、さらに多面的な検討が必要である。

表-3.3.9.3 液状化に関する等価せん断応力比と等価繰り返し回数の関係

地震	地点	等価繰り返し回数	等価せん断応力比
2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_w = 9.0$)	千葉港	20-50	0.12-0.18
	夢の島	30-60	0.10-0.15
1987年千葉県東方沖地震 ($M_j = 6.7$)	夢の島	10-30	0.05-0.08
1995年兵庫県南部地震 ($M_w = 6.9$)	神戸市ポートアイランド	5-10	0.3-0.5

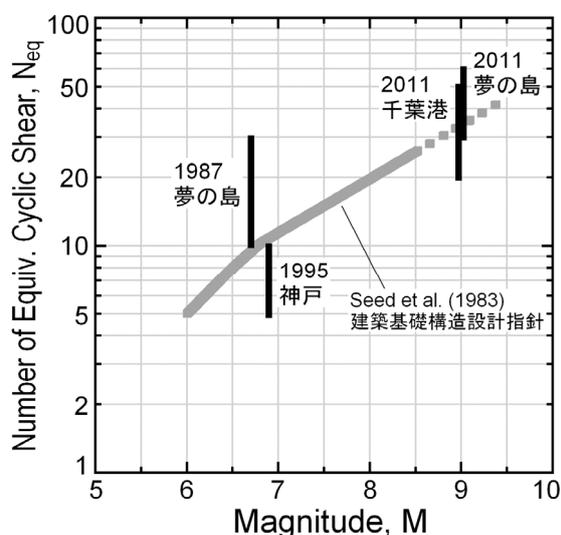


図-3.3.9.7 地震のマグニチュードと地震動の等価繰り返し回数の関係

(7) 非構造部材

非構造部材の被害では、比較的古い構法によるものが多く被害を受けているのが確認された。また、比較的高所に設置された非構造部材の破損・落下も確認された。天井については、システム天井の被害程度が構造骨組の被災度に従って大きくなる傾向が見られ、構造体や、天井の吊り元である屋根の水平ブレースあるいは支承部に目立った損傷が確認された場合に、いずれの天井でも被害程度が大きくなる傾向が見られた(写真-3.3.9.6、写真-3.3.9.7)。ガラスについては旧耐震基準の屋内運動場の方が現行耐震基準によるものよりも被害程度が大きくなることを確認した。



写真-3.3.9.6 在来工法による天井の脱落被害



写真-3.3.9.7 システム天井の脱落被害

3.3.9.3 津波による建築物の被害

(1) 現地調査および検討の経緯

国総研はこの大震災の全容を把握するには津波被害の実態も把握することが必要であること、復興時に津波避難ビルの構造的要件・位置的要件・機能的要件等に関する情報が必要になること、などの理由により、(独)建築研究所の合同の自主調査という位置付けで総勢27名の津波被害調査班を構成し、平成23年3月17日に第1回津波被害調査検討会議を開催した。津波被害の発災後約3週間が経過した平成23年3月30日から現地調査(第1班)を開始し、合計3回の初動現地調査を実施した。

その後、平成23年度国土交通省建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」や平成23年度独立行政法人建築研究所基盤研究「津波避難ビルの構造安全性及び避難安全性に関する基礎的検討」等が開始され、津波避難ビルの建築基準等に関する調査研究が開始された。平成23年度建築基準整備促進事業は、(独)建築研究所と事業採択者である東京大学生産技術研究所との共同研究として実施され、国土交通省は平成23年7月と10月に2度の中間報告の提出を受けた。中間報告では、被害調査結果と被害調査結果に基づいた津波荷重の評価、津波避難ビルの設計要件等が示された。

国土交通省はこれらの中間報告を踏まえて、津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法に係る追加的知見(平成23年11月17日)や津波避難ビル等の構造安全基準である平成23年国土交通省告示第1318号(津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対して安全な構造方法等を定める件 平成23年12月27日)を制定した。一方、平成23年5月以降も国総研及び(独)建築研究所は現地調査等を実施し、津波による建築物等の被害の全容把握に努めてきた。とくに木造建築物については、平成23年5月、9月、10月に宮城県と岩手県の現地調査を実施して被害状況を把握し、木造住宅の津波抵抗性能に関する計算方法を検討した。

(2) 鉄筋コンクリート造建築物の被害に関する検討

東北地方太平洋沖地震では、津波によってRC造建築物にも様々な被害が発生したことは特筆すべき事象であった。その一方で、多くのRC造建築物は津波の後も残存しており、特に建設年代が比較的新しいと推測されるRC造建築物ではその傾向が強い。残存したRC造建築物には構造躯体の顕著なひび割れ等は見られず、また、非構造壁なども大きな損傷を受けずにほぼ無被

害の状態が残っているものが多い。ただし、そのような建築物においても、開口部の窓ガラスやドアのほとんどは津波によって破壊されていた。

1) 津波避難ビルAにおける検討

建築物Aは宮城県南三陸町に建つ壁式鉄筋コンクリート構造4階建て共同住宅で、2006年に竣工した本建物は外部階段を使って屋上に避難できる構造となっており、津波避難ビルに指定されていた(写真-3.3.9.8参照)。

屋上階の床上1m程度まで浸水したが、非構造部材等の被害を除けば建物躯体には地震動によるものも含めて構造的な被害は発生しておらず、津波後も残存していた。建物所在地での津波浸水深は15.4mとされており、本建物周辺では多数の建物が破壊、あるいは流失する被害を受けていた。静水圧による津波水平荷重に対する建物1階の保有耐力の比は1.70となり、建物1階の保有耐力が津波荷重を十分に上回る結果となって、津波襲来後も建物が残存した状況と整合した。



写真-3.3.9.8 津波避難ビルA

2) 建築物Bにおける検討

建築物Bは幅10.5m×奥行4.5m、建物高さ6.1mの2階建て鉄筋コンクリート構造物(写真-3.3.9.9参照)であり、1×2スパンの耐震壁付きラーメン構造物である。本建築物は宮城県女川町に所在し、津波により杭が引き抜かれ、転倒していた。

静水圧により建築物に作用する転倒モーメントに対する建築物の抵抗モーメント(建築物に作用した浮力や杭引き抜き抵抗の影響を含む)の比は79%程度であり、解析結果は建築物が転倒した実被害結果と整合する。



写真-3.3.9.9 建築物B

3) 建築物Cにおける検討

建築物Cは宮城県女川町に1993年に竣工した鉄筋コンクリート造 3 階建てと 2 階建ての建物で(写真-3.3.9.10 参照、それぞれC-1 棟と C-2 棟と称する)、C-1 棟では津波が越流することはなく避難者は救出されたが、C-2 棟では津波が建物高さを超えたため犠牲者が発生した。津波荷重に対する 1 階張間方向の保有耐力の比率は、C-1 棟では 1.12 となり津波襲来後も建物が残存した状況と整合した。一方、C-2 棟では 0.79 となり保有耐力が津波荷重を下回る結果となったが、建物は残存していた。

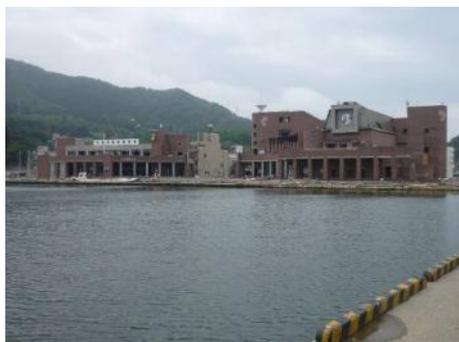


写真-3.3.9.10 建築物C

4) 建築物Dにおける検討

建築物Dは宮城県仙台市に所在する鉄筋コンクリート造 3 階建ての建築物であり、津波作用荷重によって外壁および付帯する柱および梁に面外変形が生じた(写真-3.3.9.11 参照)。外壁が破壊した区画は 1 階床から屋上階まで吹抜けとなっており、桁行外構面の 4 スパンであった。

本建築物では建築物全体ではなく外壁のみ破壊しており、壁板に想定する破壊線に応じて津波により崩壊荷重が変化する。そこで、本検討では耐力壁における

計測結果等から破壊面を仮定し、仮想仕事法による解析的な検討を行った。被害調査では建築物内部に浸水痕跡(5.0m)が確認されたため、耐力壁前面の波力に加えて壁背面からも静水圧が作用すると仮定し、津波外力による仕事を計算した。津波外力による仕事量は建築物崩壊機構における内力による仕事量の 98% に相当しており、本仮定における津波外力は実被害と整合していた。



写真-3.3.9.11 建築物D

5) 建築物Eにおける検討

建築物Eは1970年に建設された壁式プレキャストRC造(リブ付中型コンクリートパネル造)2階建ての公営集合住宅である(写真-3.3.9.12 参照)。近隣のRC造3階建て集合住宅の前面における計測浸水深は7.5mであった。本建築物の被害状況としては、周辺地盤の洗掘による傾斜や、漂流物の衝突によるとみられる2階妻壁の損傷が見られたものの、構造的な大きな損傷は確認されなかった。

建築物の保有耐力は静水圧により作用する津波波力の37%程度となり、解析結果は建築物が残存した実際の被害状況と整合しなかった。これは、1階長辺方向に多数存在する大きな開口から海水が建築物内部に回り込んだことにより、建築物に作用する波圧が軽減された可能性が考えられる。



写真-3.3.9.12 建築物E

(3) 鉄骨造建築物の被害に関する検討

津波波圧を受けた鉄骨造建築物は、早期に外装材が流され津波の大きな波圧を受けなかったために残存したと考えられるものが多く見られる一方で、崩壊、転倒、移動、流失したものも相当数確認されている。これらは、外装材が流される以前に大きな波圧を受けたものと推測される。

建築物が崩壊する場合の水平荷重と等しい静水圧荷重の浸水深 η' を「建物耐力相当時の浸水深」とし、現地調査において測定された最大浸水深 η_m を「計測最大浸水深」とする。 η' / η_m を水深係数 a と定義し、各調査建築物の被害と水深係数の関係を検討した。

崩壊機構を仮定した単純な塑性解析を行うことで建築物の耐力を算定した。外装材が比較的残っている状態とほぼ骨組のみとなった状態を考慮して、開口率を一律に 0.3 及び 0.8 の 2 種類に設定した。(すなわち無開口建築物に対する荷重低減率 α は 0.2 及び 0.7 となる)

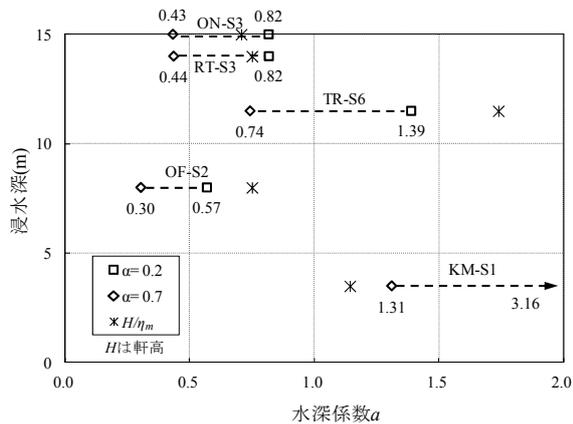


図-3.3.9.8 残存する鉄骨造骨組の耐力から推定した水深係数 a

図-3.3.9.8に5棟の鉄骨造の残存骨組に関する検討結果を示す。計測最大浸水深 η_m が 14~15m の女川町の例 (ON-S3) と陸前高田市の例 (RT-S3) では破線で示した水深係数 a の範囲は 1 以下となっている。 η_m が 11.5m の宮古市田老の例 (TR-S6) では a の範囲は 1 前後である。一方、 η_m が 3.5m で小さい釜石市の例 (KM-S1) では a の範囲は 1 を大きく上回っている。 a が小さいながら残存した大船渡市の例 (OF-S2) では、海側や周辺に他の建築物が残存していたことから、津波による作用荷重は他の例に比べて小さかったことが考えられる。以上の結果から η が 10m を超える地域では最大浸水深に達する前に建築物周囲に水が回り込んだり、多方向からも津波が押し寄せたりする状況が生まれるなどしたため、計測最大浸水深相当の静水圧荷重が片側から作用するような状態にはならなかったと

推察される。

(4) 木造建築物の被害に関する検討

最大浸水深が 1 階窓まぐさ程度 (約 1.5m~2m) 以下の場合には、ほとんどの木造建築物が残存していた。最大浸水深が 1 階高さ程度 (3m~4m) では、多くの木造建築物は流失していたが、残存している事例も小数ながら確認された。最大浸水深が 1 階階高超え (4m 超) では、木造平屋、2 階建共にほとんどの木造建築物が流失する可能性が比較的高かった。

詳細調査を行った木造公営住宅 1 棟を対象として、水平耐力と津波荷重を計算し、実際の被害と比較を行い、計算式の妥当性の検証を行った。検討対象とした木造住宅は、東松島市の市営住宅 (洲崎住宅) である (写真-3.3.9.13 参照)。

津波荷重を水深係数 $a = 1.0, 1.5, 2.0$ の場合で計算した結果を図-3.3.9.9 に示した。建物の高さ方向に波圧を積分し、開口の低減は行っていない。被害調査結果では浸水深は 4.5m 前後であった。検討結果では 4.5m 程度の浸水深で $a = 1.0$ で水平耐力を上回るようになるが、調査結果では約半数が大破したものの流失は免れていた。本調査物件は、津波の入射方向に RC 造の建物がある影響も考えられる。



写真-3.3.9.13 残存した木造公営住宅

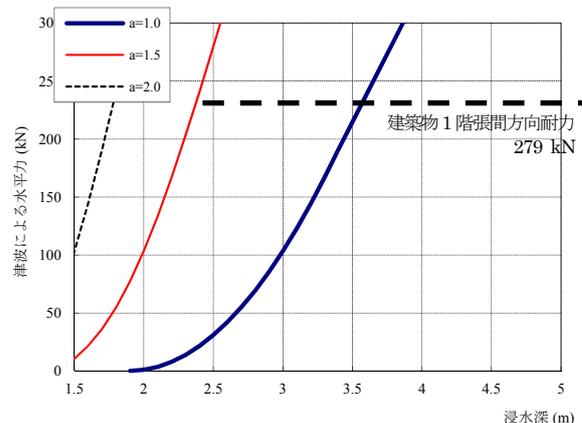


図-3.3.9.9 建築物耐力と津波荷重との関係

(5) 津波避難ビルの構造設計法に関する検討

2005年に内閣府から示された「津波避難ビル等に係るガイドライン」²²⁾(以下、本節では「ガイドライン」と呼ぶ)の巻末資料②には、(財)日本建築センターの2004年度の自主研究の成果に基づき「構造的要件の基本的考え方」が示されている。建築物が想定する津波荷重に対して倒壊、転倒および滑動しないことを検証する内容となっている。また、受圧面(津波波圧を直接受ける建築物の面)における耐圧部材が、水平力に対する抵抗能力や鉛直支持能力を失わないよう、波圧により破壊しないことを確認することが求められている。今回の検討においても津波避難ビルの構造設計の方針として上記の考え方は変更せず踏襲しており、津波避難ビルの設計においては表-3.3.9.4の3項目に関する検証を行う。また、受圧面の部材の扱いは、従来通り耐圧部材(津波波圧を直接受け、破壊しないように設計する部材)と非耐圧部材(津波波圧を直接受け、破壊することを許容する部材)に分類し、耐圧部材では津波波圧に対して破壊しないことを確認している。図-3.3.9.10に設計の流れを模式図で示す。津波避難ビルの構造設計は下記の流れで行う。

表-3.3.9.4 津波避難ビルの構造設計方針

建築物の各層について津波荷重が水平耐力を下回る 転倒モーメントが浮力を考慮した抵抗モーメントを下回る 津波荷重が基礎の摩擦力または杭の水平耐力を下回る ※別途水平移動に対する抵抗については考慮してよい ※受圧面における耐圧部材は、津波波圧に対して破壊させない

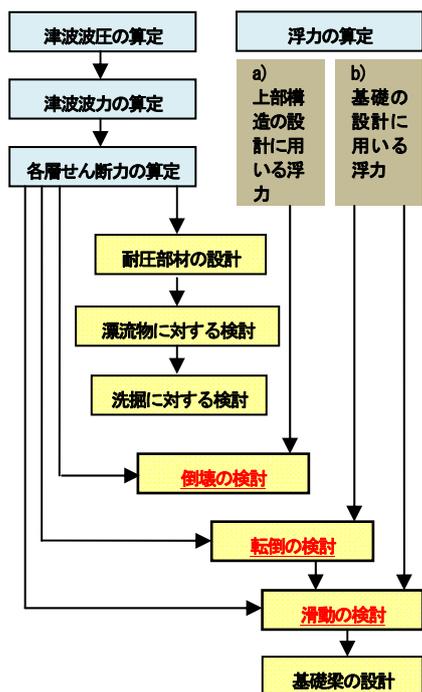


図-3.3.9.10 津波避難ビルの構造設計の流れ

「ガイドライン」では、水深係数 a を3とし、津波の波圧を設計用浸水深の3倍の静水圧が建築物の片側から掛かるものとして与えている。これは、直立護岸を越流し陸上に遡上した津波により建築物に作用する津波波圧に関する朝倉らの提案であり、波高、周期等の波特性、水路の斜面勾配、構造物の位置などを変化させた模型実験の結果、波圧分布は三角形分布であり、その高さは最大で浸水深のほぼ3倍であったことを踏まえたものである。すなわち、この静水圧による津波波圧算定式には、陰に流速の影響が含まれている。

今回の検討においては、現地調査の結果から「ガイドライン」の波圧算定法における「3」が津波の勢いなどによって変化するものと考え、この「3」を「 a (水深係数)」とおき、被害の実態に基づき a を検証することとした。検証においては、被害を受けた構造物(比較的単純な工作物と建築物)の破壊形式等に応じてその耐力を推定し、静水圧分布を仮定した場合に構造物の耐力と等しくなる水深係数 a を、その場所の計測浸水深を用いて逆算した。なお、津波の専門家等へのヒアリングの結果、東日本大震災における津波の波圧は必ずしも考えられる最大のものではなく、この被害のみから津波波圧の最大値を修正することは適切ではないとの考えが示された。そこで、従来からの知見である「設計用浸水深の3倍の静水圧」を最大の波圧が作用する場合とし、そこから水深係数 a を低減できる条件を調べることにした。その結果得られた水深係数 a を表-3.3.9.5に示し、以下の1)、2)に、水深係数に関する検討の詳細を示す。

表-3.3.9.5 水深係数 a の設定

	遮蔽物あり		遮蔽物なし
	500m 以上	500m 未満	距離によらず
海岸や河川等からの距離	500m 以上	500m 未満	距離によらず
水深係数 a の設定	1.5	2	3

1) 検討事項 1 (遮蔽物の影響)

水深係数 a を低減できる条件として、建築物よりも津波の来襲方向に津波の波力を低減できる遮蔽物がある場合を取り上げた。検討では、波力低減を期待する遮蔽物として、他の建築物のほか、湾口防波堤や津波高さに対し十分な高さ(津波高さの概ね1/2以上と仮定)を有する防波堤・防潮堤などを考慮した。検討の結果、津波の波力低減を期待する遮蔽物がある場合の水深係数 a は無い場合に比べて、概ね1/1.5に低減されることが分かった。よって、津波波力低減を期

待できる遮蔽物がある場合には、水深係数 a を $3/1.5$ すなわち「2」にできることとした。

2) 検討事項 2 (海岸および河川からの距離の影響)

次に、水深係数 a を低減できる条件として、海岸や河川からの距離を取り上げた。検討の結果、海岸や河川からの距離に応じて津波の勢い(フルード数 Fr)が低減され、海岸や河川から 500m 以上離れた場合には $a=1.0$ 程度と見なせることが分かった。なお、今回の検討では、現地調査で得られたデータが限られること、耐力算定が略算の結果であること、津波シミュレーションに基づく浸水深と計測浸水深にはばらつきが認められること等を勘案し、現地調査の結果に 1.5 倍程度の余裕度を見込むこととした。そのため、遮蔽物があり、かつ、海岸や河川から 500m 以上離れた場合の水深係数 a は 1.5 とすることにした。なお、当該建築物周辺の地形等に留意し、流れが集中するような建物配置や下り勾配等によって、流速が増加するような要素がないことを確かめる必要がある。

3.3.9.4 火災による建築物の被害

(1) 火災調査の概要

東北地方太平洋沖地震では、青森県から千葉県にかけての太平洋に面した県及び東京都・埼玉県・神奈川県を中心とした極めて広範な地域で、地震や津波に関連する多数の火災が発生した。火災に関する調査結果の概要を以下に示す（詳細は、国総研資料 674 号を参照）。

津波浸水範囲の内外ともに多数の火災が発生したこと、津波浸水範囲内において大規模延焼火災が発生したこと、石油コンビナート施設で大規模な火災が発生したことなどが、今回の大震災における火災被害の特徴である。

火災が多く分布している地域は、津波浸水被害のあった地域、東京都区部及びその周辺、千葉市、横浜市などの都市部、それ以外では、概ね震度 5 強以上の地域となっている。

市町村ごとの 1 万世帯あたりの火災件数(出火率)をみると、震度が大きい程出火率が高く、震度 6 弱以上と 5 強以下では出火率に大きな差が見られ、2004 年新潟県中越地震と同様の傾向を示している。しかしながら、津波被害の有無により分類して出火率を算定すると、津波浸水被害のなかった市町村の出火率（震度 6 強以上の地域で約 0.25 件/1 万世帯）が中越地震（同約 1.0 件/1 万世帯）の 1/4 程度であるのに対し、津波浸水被害のあった市町村の出火率は 8.14 件/1 万世帯と極めて高いことが分かった。

個別の火災状況に関する情報を得るため周辺住民や消防本部等へのヒアリングを実施し、以下のことが得られた。

津波浸水範囲外で発生した火災の発生時刻は、本震直後及び本震当日から 4 月 15 日までの 18 時から 24 時の時間帯に集中している。本震直後に発生した火災の出火要因は、使用していた電気ストーブや廃油ストーブ等の火気設備や天井器具、変電設備、電気配線に関するものである。出火元建物は住宅が多いが、消防活動が有効に機能したことで約 7 割が 1 棟のみの焼損であった。

津波浸水範囲内では、延焼面積は全体で 72ha に上り、大火とされる延焼面積が 3.3ha（10,000 坪）を超える火災区域は、宮古市（田老）、山田町（中心部）、大槌町（中心部）、気仙沼市（鹿折地区）、気仙沼市（南西岸部）、石巻市（門脇地区）、名取市（閑上地区）の 7 区域となっている。平成 7 年の阪神・淡路大震災では、全体で約 63ha、延焼面積が 3.3ha を超える火災区

域は、今回と同じ 7 区域 2) であった。その他、複数の連続しない火災跡が距離をおかずに残る地域が多数確認されている。火災状況の情報が得られた津波火災 29 件のうち 21 件は車両火災であり、その多くは津波浸水によって車両の電装部の絶縁不良となり自然に出火したと見られる。大規模延焼が発生した火災区域では、津波により流された倒壊家屋や車両等が延焼を媒介していることが分かった。

3.3.9.5 建築物被害を踏まえた対応

(1) 建築物被害を踏まえた対応経緯

東日本大震災では、建築分野においては、発災翌日から、国総研及び(独)建築研究所が共同で建築物被害等に関する調査を実施した。

なお、被害調査等の結果については、国土技術政策総合研究所資料・建築研究資料として両研究所のホームページ上で公開しているところである。最終報告を平成24年3月に公表したが、このとりまとめにおいて、

- ①津波による建築物被害への対応
 - ②天井等の非構造部材の被害への対応
 - ③長周期地震動への対応
 - ④液状化被害への対応
- をさらに取り込むべき課題として整理している。

また、国総研においては、平成23年4月に構造分野の技術基準原案について検討するための建築構造基準委員会(委員長 久保哲夫東京大学名誉教授)を設置し、同年4月21日及び22日に同委員会による現地調査を実施する等(写真-3.3.9.15参照)、東日本大震災における建築物被害を踏まえた対策の検討を開始した。

同委員会においては、以下のとおり対策について審議を重ねた。

第1回(平成23年6月18日)

- ・建築物の被害調査について
- ・津波による建築物被害を踏まえた対応について
- ・地震動による非構造部材の被害を踏まえた対応について
- ・長周期地震動対策について

第2回(平成23年8月18日)

- ・津波による建築物被害を踏まえた対応について
- ・地震動による非構造部材の被害を踏まえた対応について

第3回(平成23年10月13日)

- ・津波による建築物被害を踏まえた対応について
- ・長周期地震動への対応について

第4回(平成24年7月9日)

- ・東日本大震災への対応状況について
- ・天井脱落対策に係る技術基準原案について
- ・エスカレーター落下防止対策に係る技術基準原案について
- ・長周期地震動への対応について

第5回(平成24年10月22日)

- ・東日本大震災における建築物の被害を踏まえた安全性確保対策について
- ・天井脱落対策に係る技術基準原案について
- ・エスカレーター落下防止対策に係る技術基準原案について

これらの審議を踏まえ、津波避難ビルに関する構造上の要件に関する指針の見直し(平成23年11月17

日付け住宅局長通知)、津波防災地域づくり法に基づく指定避難施設の技術基準告示(平成23年12月27日国土交通省告示1318号等)に反映されるとともに、平成24年7月31日から天井脱落防止のための技術基準原案及びエスカレーター落下防止のための技術基準原案についてパブリックコメントを行った。

また、長周期地震動については、震源から約700km離れた地区においても超高層ビルで大きな変位が計測される等が観測された。こうしたデータも踏まえ、同委員会に「長周期地震動対策検討WG」を設置し、引き続き検討を行っている。

また、非構造壁なども大きな損傷を受けずにほぼ無被害の状態に残っているものが多い。ただし、そのような建築物においても、開口部の窓ガラスやドアのほとんどは津波によって破壊されていた。



写真-3.3.9.14 津波による建築物被害

(2) 津波による建築物の被害分析と技術基準の検討経緯

1) 被害分析と津波避難ビル等の構造上の要件に係る指針の作成

津波による建築物被害については、沿岸地域において広範にみられたところであり、現地調査により建築物等の被害調査を行い、これをもとに、津波避難ビル等の構造設計法に関する技術基準の見直しに取り組んだ。本稿では新たな技術基準について報告する。

東日本大震災では、津波により多くの建築物が滅失・損壊したところであり、特に津波襲来時の一時避難先となる津波避難ビル等の建築物においては、津波に対する構造耐力上の安全性確保の重要性が確認された。このため、国土交通省住宅局及び国総研では、津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等について、早急な検討を進めることとした。具体的には、平成23年度「建築基準整備促進事業」(国土交通省住宅局所管補助事業)において、「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」として調査研究の検討課題を設定し、平成23年4月から事業主体の公募を開始

した。その結果、本調査研究は、事業主体として選定された東京大学生産技術研究所（中埜良昭教授）が耐震改修支援センター（財）日本建築防災協会と連携し、（独）建築研究所との共同研究により取り組むこととなった。



写真-3.3.9.15 建築構造基準委員会による現地調査（女川町）

東京大学生産技術研究所及び（独）建築研究所による調査研究においては、平成23年7月に中間報告1)が提示され、さらに平成23年10月に中間報告(その2)2)が提示された。この成果を踏まえ、国総研において技術基準原案の作成を行い、建築構造基準委員会の審議を経て、津波避難ビル等の構造設計法に関する技術基準案をとりまとめた。

この検討過程においては、地震動による被害分析と異なり、被害建築物毎に津波により生じていた外力を推定することが必要となったが、現地調査のみでは当該外力の推定に必要な情報が十分に確認できなかった面もあり、国総研内でも河川研究部と建築研究部等が連携し検討を行った。これにより、従来のガイドライン（「津波避難ビル等に係るガイドライン」（平成17年内閣府。以下「内閣府ガイドライン」という。））が参照している構造設計法の津波荷重設定では、浸水深の一律3倍の静水圧が設定されていたところを、立地状況等を勘案して浸水深の2倍又は1.5倍の静水圧にまで緩和できるようになり、また、浮力による転倒に関する検討、洗掘への設計上の配慮、漂流物の衝突への設計上の配慮等についても明確化がなされた。この技術基準は、「津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について（平成23年11月17日付国住指第2570号3）」において、「東日本大震災における津波による建築物被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係る暫定指針（以下「指針」という。）」として、国土交通省住宅局長から各都道府県知事あてに通知された。

2.2 津波防災地域づくり法

津波により甚大な被害を受けた地域の復興、さらに将来起こりえる津波災害の防止・軽減のためには、ハード・ソフトの施策を組み合わせた「多重防衛」による津波防災地域づくりを推進することが必要であることから、このための枠組みとして「津波防災地域づくりに関する法律」（平成23年法律第123号。以下「津波防災地域づくり法」という。）が、国会審議を経て、平成23年12月に公布された。

この津波防災地域づくり法に位置づけられた指定避難施設が前述の津波避難ビル等に相当するものであり、指定避難施設の指定にあたっては、以下の基準に適合するものを指定することとされている。

- ①津波に対して安全な構造のものとして国土交通省令で定める技術的基準に適合するものであること
- ②基準水位以上の高さに避難上有効な屋上その他の場所が配置され、かつ、当該場所までの避難上有効な階段その他の経路があること
- ③津波の発生時において当該施設が住民などに開放されることその他当該施設の管理方法が一定の基準に適合するものであること

このうち①の技術的基準について、前述の指針の内容をもとに、同法施行規則第31条及び津波防災地域づくりに関する法律に基づく告示「津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対し安全な構造方法等を定める件（平成23年国土交通省告示第1318号。以下「技術基準告示」という。）」として、基準化に至っている。

(3) 津波避難ビル等に関する技術基準の概要

1) 構造設計法に関する技術基準のポイント

以上の指針、技術基準告示（以下「指針等」という。）について、ポイントを整理し以下に示す（概要は図-3.3.9.11参照）。

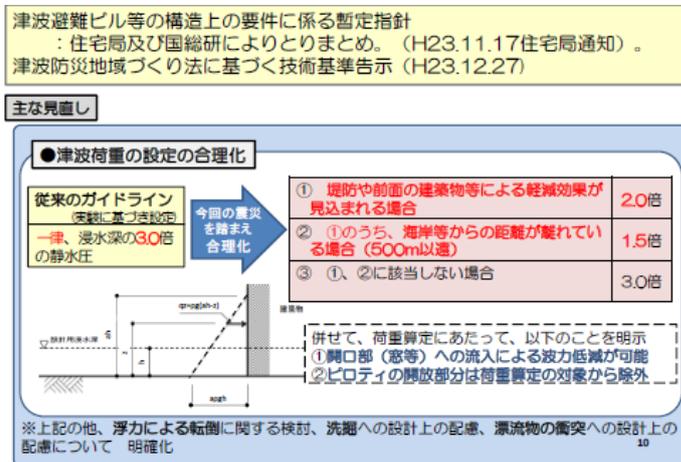


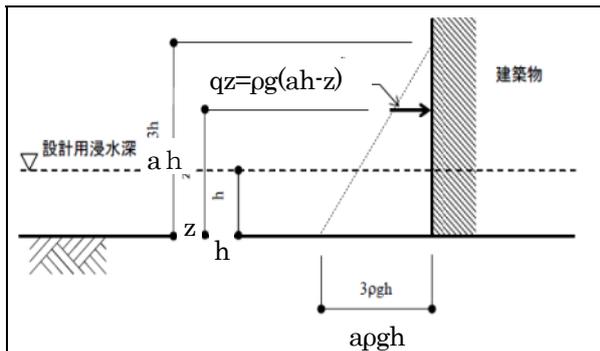
図-3.3.9.11 津波避難ビル等の構造上の要件に関する技術基準の概要

(a) 津波荷重算定式

①津波波圧算定式

内閣府ガイドラインにおいては、設計用浸水深の3倍に相当する静水压を津波波圧とする算定式が示されていたが、前述の東京大学生産技術研究所及び(独)建築研究所による共同研究の成果を踏まえ、指針等において算定式の見直しを行った。

その結果、設計用浸水深の3倍に相当する静水压を基本としながらも、津波の勢いが軽減されることが見



構造設計用の進行方向の津波波圧は下式により算定する。

$$qz = \rho g(ah - z) \dots (i)$$

ここに、

qz : 構造設計用の進行方向の津波波圧 (kN/m²)

ρ : 水の単位体積質量 (t/m³)

g : 重力加速度 (m/s²)

h : 設計用浸水深 (m)

z : 当該部分の地盤面からの高さ (0 ≤ z ≤ ah) (m)

a : 水深係数。3とする。ただし、次の表に掲げる要件に該当する場合は、それぞれ a の値の欄の数値とすることができる。(注：この係数は、建築物等の前面でのせき上げによる津波の水位の上昇の程度を表したものでない。)

	要件	aの値
(一)	津波避難ビル等から津波が生じる方向に施設又は他の建築物がある場合 (津波を軽減する効果が見込まれる場合に限る)	2
(二)	(一)の場合で、津波避難ビル等の位置が海岸及び河川から500m以上離れている場合	1.5

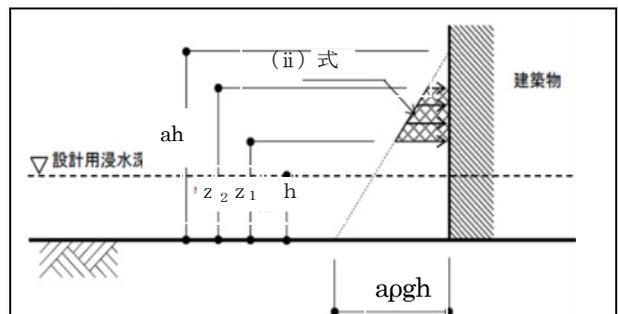
図-3.3.9.12 津波波圧算定式

込まれる場合には、この倍率 ((i)式において新たに水深係数 a と定義) を低減できることとした (図-3.3.9.12)。具体的には、津波避難ビル等から津波が来襲する方向に当該軽減効果が見込まれる施設又は他の建築物等の遮蔽物がある場合について水深係数を3.0から、2.0に、さらにそのうち、津波が来襲する方向において津波避難ビル等の位置が海岸及び河川から500m以上離れている場合について当該2.0を1.5まで低減できることとした。

②津波波力算定式

①の津波波圧は単位面積あたりの津波波力を表していることから、津波波圧を受圧面積について積分することで津波波力を算定することができる。

(ii)式は受圧面の最小高さが z_1 、最高高さが z_2 である場合の津波波力の算定式を示している (図-3.3.9.13)。なお、高さに応じて受圧面の幅が異なる建築物を想定し、受圧面の幅 B を含めて積分を行うこととした。



構造設計用の進行方向の津波波力は、津波波圧が同時に生じると仮定し、下式により算定する。

$$Qz = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz \dots (ii)$$

ここに、

Qz : 構造設計用の進行方向の津波波力 (kN)

B : 当該部分の受圧面の幅 (m)

z_1 : 受圧面の最小高さ (0 ≤ z₁ ≤ z₂) (m)

z_2 : 受圧面の最高高さ (z₁ ≤ z₂ ≤ ah) (m)

図-3.3.9.13 津波波力算定式

受圧面の幅 B は高さに応じて一定でない場合があるが、この場合、各高さに応じた受圧面の幅を用いて積分を行う。

(b) 開口部による低減

指針等においては、開口部による津波波力の低減効果に関して、被害調査結果等を受け、除外する前の津波波力の7割を下回らない事を原則として、開口部における津波波力が算定除外とできる旨を明示すること

とした。ここでいう「開口部」とは、構造骨組みの設計に用いる津波荷重算定に当たり、受圧面にあり、破壊することが確認できる非耐圧部材を想定している。

また、波力低減の方法については、①津波作用幅から開口部の幅の総和を除いて計算する方法、②津波作用面積から開口部の面積の総和を除いた面積を津波作用面積で除して得た数値を乗じて計算する方法の2つが示されている。①については、各層ごとに津波作用幅から開口部の幅の総和を除外して計算し、開口部の幅の総和を除外して計算した波力が、津波作用幅により計算した波力の7割を下回る場合は、当該割合が7割となるような開口部の幅の総和を調整する係数を求め、波力を計算することとした。②については、(低減率) = 1 - (開口部面積の総和 / 津波作用面積) を波力に乘じ、当該低減率は0.7を下回らないこととした。

なお、上述の低減率等の下限値である0.7については、内壁等が存在する場合には、波力の低減効果が小さくなるとされていることから設定されている。

(c) 開放部分の取扱

指針等においては、ピロティ等の開放部分の取扱に関して、開口部と同様に開放部分の津波波力が算定除外とできる旨を明示することとした。なお、開放部分については、開口部と異なり低減率の下限を設けないこととした。

(d) 水平荷重の方向

特に河口付近や港湾付近は地形が複雑であり、津波の進行方向の想定が困難であることから、指針等においては、津波の水平荷重が全ての方向から生じるものとして想定することとしている。この場合、津波の進行方向(X方向)及び直交方向(Y方向)とも同じ大きさの荷重を想定することが原則である。また、引き波についても同じ荷重を見込むことが適当である。ただし、平坦な地形等で、数値シミュレーション結果等を適切に活用することにより、津波の進行方向を想定できる場合はこの限りでないが、そのような場合でも、数値シミュレーションの解析仮定、周辺構造物の配置等によって、津波の進行方向は想定と異なる場合も考えられるため、慎重な検討が必要である。

(e) 浮力の算定

東日本大震災では、建築物が転倒被害を受けた事例が確認されている。こうした建築物については、浮力が発生したことにより、当該浮力を考慮した津波荷重による転倒モーメントに対し、杭等による建物側の耐力が十分でなかったものと考えられる。

現地調査結果等を踏まえると、浮力については、浸

水深以下の部分について最大で建物体積相当分の浮力が発生する可能性があるが、一方で、開口部から水が流入していた事例も多く観察された。こうした結果も踏まえ、指針等においては、津波の水位上昇速度が大きい場合には、建築物内部への津波の流入が必ずしも期待できないため、水没した建物体積(内部空間の容積を含む)に相当する浮力を考慮することとして整理し、建築物に流入する水の体積(浸水体積)を算定できる場合に限り、その体積分を浮力から差し引くことができることとした。なお、この場合、構造躯体そのものの体積分の浮力についても考慮する必要がある。

(f) 特別な調査又は研究

指針等においては、今後の調査研究の発展等に対応するため、津波荷重について、「特別な調査又は研究に基づき算出する場合は、当該数値による」旨の規定を盛り込んでいる。

現時点では、前述の建築基準整備促進事業の報告書^{24), 25)}に示されている、フルード数Fr ($Fr = u / \sqrt{g\eta}$ ここに u :流速、 g :重力加速度、 η :浸水深。フルード数が大きいと流勢が強い。)が一定以下の場合にaを低減するといったことが想定される。

(g) 特別な調査又は研究

指針等においては、以上により設定した津波荷重に対し、建築物の耐力を確かめることとしている。具体的には、

- ①耐圧部材については、津波波圧により破壊しないこと
- ②各方向、各階において、当該建築物の構造骨組みの水平耐力が津波波力を上回ること
- ③建築物が、浮力及び自重を考慮して、津波荷重によって転倒又は滑動しないこと
- ④洗掘、漂流物の衝突に配慮した設計とすることを、それぞれ確かめることとして、整理した(図-3.3.9.14)。

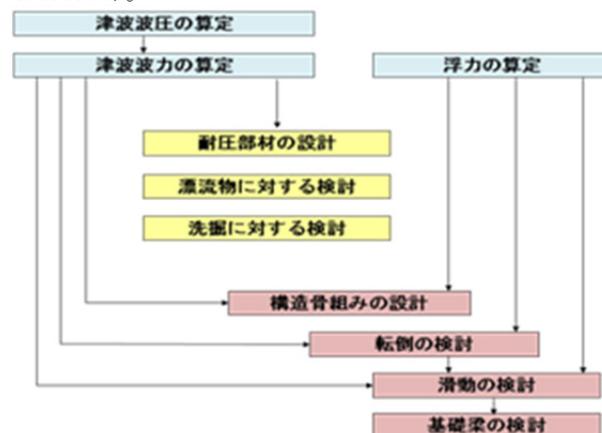


図-3.3.9.14 設計の流れ(概要)

(h) その他の設計上の配慮

洗掘に対しては、杭基礎とするか又は直接基礎の場合は洗掘により傾斜しないようにすることとした。

また、漂流物の衝突による損傷を考慮し、衝突により構造耐力上主要な部分が破壊を生じないこと又は柱若しくは耐力壁の一部が損傷しても、建築物全体が崩壊しないことを確かめることとした。

2) 解説及び設計例の作成経緯

平成 23 年 12 月 27 日に上記の技術基準告示が公布・施行されたが、指針を含めこれらの内容について実務者の技術的支援の観点から、国総研において、指針等の解説資料及び設計例の作成作業に前後して着手した。

作成にあたっては、作成作業全般にわたり、建築研究所の協力を得た。また、設計例の作成にあたって、独立行政法人都市再生機構及び一般社団法人日本建築構造技術者協会の協力を得た。

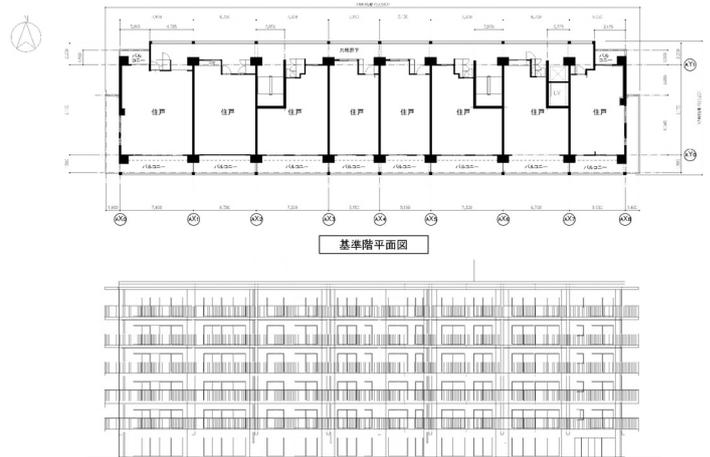
設計例については、実際の計算プロセスを提示することを主眼とし、既存の鉄筋コンクリート造の共同住宅をベースとして、複数浸水深に対応した事例を作成することとして、①設計用浸水深 10m、水深係数 a=2.0 対応の事例及び②設計用浸水深 15m、水深係数 a=2.0 対応の事例を作成した。また、この設計例作成作業を通じて明らかになった運用上留意すべき点については、解説資料に反映した。これらについては、国総研資料（第 673 号）4）としてまとめるとともに、さらに国土交通省補助事業によりこれらに設計例が追加掲載された資料が作成され、地方公共団体の担当者等に対する講習会が実施されたところである。

3) 設計例の概要

本項では、前項の設計例について、概要を示す。

(a) 鉄筋コンクリート造 6 階建て共同住宅

本設計例は、設計用浸水深 10m、水深係数 a=2.0 に対応するものとして作成した。原設計は 8 階建ての共同住宅であるが、6 階建てに修正して作成した（図-3.3.9.15）。この原設計に対し、耐力壁を厚くする（【例：1 階】原設計 230mm→避難ビル対応 350mm）、杭の増設（原設計 18 本→避難ビル対応 20 本）、杭径の変更（原設計 1300φ→避難ビル対応 1900φ）等により、必要な耐力を確保している。

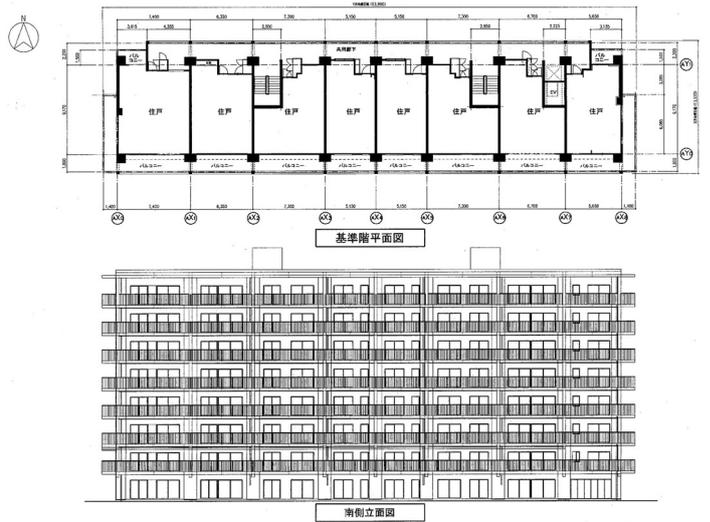


用途、階数	集合住宅、地上 6 階、塔屋 1 階
建物高さ	18.07m
標準階高	2.85m
構造形式	桁行方向 純ラーメン構造 張間方向 耐力壁付きラーメン構造
基礎形式	杭基礎（場所打ち鋼管コンクリート杭）

図-3.3.9.15 設計例(1)の概要

(b) 鉄筋コンクリート造 8 階建て共同住宅

本設計例は、設計用浸水深 15m、水深係数 a=2.0 に対応するものとして作成した。原設計は上記(1)と同じである（図-3.3.9.16）。この設計例では、さらに耐力壁を厚くする（【例：1 階】最大 500mm）、杭の増設（原設計 18 本→避難ビル対応 34 本）、杭径の変更（原設計 1300φ→避難ビル対応 2000φ）等により、必要な耐力を確保している。



用途、階数	集合住宅、地上 8 階、塔屋 1 階
建物高さ	23.77m
標準階高	2.85m
構造形式	桁行方向 純ラーメン構造 張間方向 耐力壁付きラーメン構造
基礎形式	杭基礎（場所打ち鋼管コンクリート杭）

図-3.3.9.16 設計例(2)の概要

(4) 地震動による建築物被害への対応に係る施策支援

1) 天井脱落被害への対応

東日本大震災においては、広範囲に多数の建築物で天井脱落被害が生じている。建築基準整備促進事業における調査では、2,000棟で脱落被害が確認された。

従来、建築基準法施行令において、地震動により脱落しないことは規定されていたが、具体的な技術基準は規定されておらず、技術的助言において対策が示されていた。

今般の被害を踏まえ、建築基準整備促進事業を活用して検討を進めることとし、調査課題として41.地震被害を踏まえた非構造部材の基準の整備に資する検討を設定し、公募により選定された一般社団法人建築性能基準推進協会において、坂本功 東京大学名誉教授を委員長とする委員会が設置され、被害分析等が進められた。

この成果を踏まえ、国総研において、天井脱落基準対策検討STGを建築構造基準委員会技術基準原案作成TGに設置し、基準原案の作成作業を行った。

基準原案においては、適用範囲を6m以上の高さにある面積200㎡以上の吊り天井を適用対象として設定し、仕様ルート、計算ルート、特殊検証ルートを設定することとした。

仕様ルートにおいては、天井部材の質量に応じた仕様基準を設定することとし、常時・地震時に損傷や外れが生じないように、各部を緊結すること、共振抑制のため、斜め部材を一定量釣り合いよく配置すること、衝突による破損・脱落防止のため、天井と周辺部位の間に一定の隙間(クリアランス)を設けること、段差部等は縁切りすること等の基準を設定した。また、これらの仕様のほか、フェイルセーフとして、ネットを張る、部材をひもで吊るといった措置も示した。

計算ルートにおいては、①固定荷重の3倍の力に対して損傷しないこと、②スペクトル法、簡易スペクトル法、震度法のいずれかの方法により、天井面に生ずる加速度を算定し、これによる慣性力によって天井を構成する部材及び接合部が損傷しないこと、③天井面に生ずる水平変位を算定し、周囲の壁等と衝突が生じないことを確かめることとした。

これらのほか、個別の検証を可能とするよう、特殊検証ルートの設置を示した。

以上の技術基準原案について、建築構造基準委員会の審議を踏まえ、住宅局及び国総研によりパブリックコメントを平成24年7月31日から9月15日までの間行った。

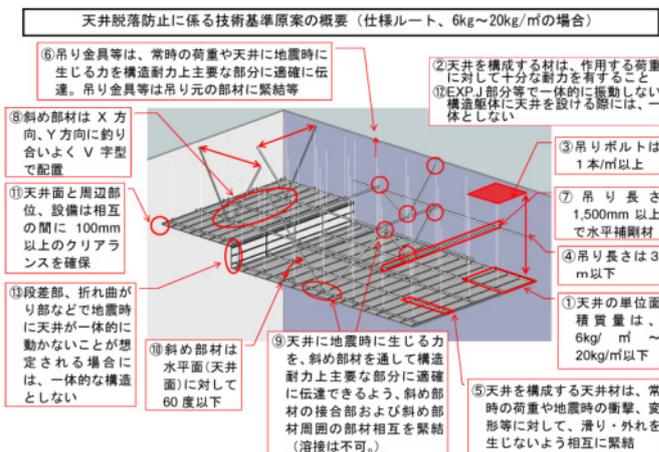


図-3.3.9.17 天井脱落防止に係る技術基準原案の概要

2) エスカレーター落下被害への対応

東日本大震災においては、人的被害はなかったものの、商業施設において、4件のエスカレーター落下が確認された。

エスカレーターの設置については、建築基準法令では構造躯体へのかかり代については、具体的な規定はなかったが、業界の指針において層間変位1/100+20mmのかかり代を設けることとされてきた。

今般の被害を踏まえ、建築基準整備促進事業を活用して被害分析と技術的な要件に係るデータの整理を進めることとして、調査課題として「45.昇降機に係る地震安全対策に関する検討」を設定し、公募により選定された一般社団法人建築性能基準推進協会において、構造分野の有識者、昇降機分野の有識者による委員会が設置され、被害分析と落下防止のための技術的知見の収集整理等が進められた。

この成果を踏まえ、エスカレーターの落下防止対策に係る技術基準原案を、建築構造基準委員会の審議を踏まえ、住宅局及び国土技術政策総合研究所によりとりまとめた。落下防止対策として、十分な「かかり代」を設けることとし、エスカレーターの昇降高さの1/40以上とする等の原案として、天井脱落防止に係る基準と同様にパブリックコメントを平成24年7月31日から9月15日の間で行い、その結果を踏まえた技術基準として整理することを予定している。

3) 外装材脱落被害への対応

東日本大震災における外装材の被害については、大型商業ビルのALCパネルの脱落、外壁タイル・モルタルの落下などが報告されたが、幸いにも人的被害はなかった。ただし、主要構造部にそれほど大きな被害がなかったと報告されている割には、タイル・モルタ

ル仕上げされた外壁の部分的な浮きや剥落等の被害は多かった。

外装材を含めた仕上げ材については、建築基準法施行令第39条および昭和46年建設省告示第109号で構造方法が定められているが、取り付け方法を含め技術的基準については未だ整備されていない。

今般の被害状況を踏まえ、国総研では、耐震安全性に関する法令や技術基準類の整備が不十分なタイル・モルタル等の外装材を対象に、①外装材の耐震安全性を考慮した剥落防止のための技術基準類の確立、②地震後の外装材の健全性を評価する方法の確立を目的として、平成24年度より3カ年の計画で「外装材の耐震安全性の評価手法・基準に関する研究」を進めているところである。

また、これに先立ち、平成23年度には公共施設を対象として東日本大震災における外装材の地震被害調査を実施し、タイル・モルタル構工法およびその施工法と、浮き・剥落などの被害との関係について事例収集を行った。さらに、近年、適用が増えつつある有機系接着剤によるタイル外壁についても業界団体からの調査資料を収集し、外装材について幅広く地震被害データをとりまとめた。

4) 今後の検討課題

長周期地震動については、建築構造基準委員会に、長周期地震動対策検討WGを設置し、中央防災会議や地震対策推進本部における検討状況を踏まえつつ、引き続き検討をすすめている。長周期地震動対策としては、東日本大震災に先立つ平成22年12月に対策試案を公表しパブリックコメントを実施していたところであり、寄せられた意見等も踏まえ、引き続き検討を進めることとしているところである。液状化対策については、戸建て住宅等を想定した簡易な診断法について、建築基準整備促進事業を活用して引き続き調査検討を進めているところである。

参考文献

3.3.9.2 地震による建築物の被害

- 1) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-net）, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) 国土交通省：平成7年阪神・淡路大震災 建築調査委員会報告書一集大成版一、1996
- 3) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計一特徴的被害の原因と設計への提案一、1998

- 4) 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、2001
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成16年新潟県中越地震建築物被害調査、pp.305-353、2006
- 6) 長谷川隆、向井昭義、西田和生、石原直：新潟県中越地震における鉄骨造体育館被害調査 その1 構造被害の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.569-570、2005
- 7) 西田和生、向井昭義、長谷川隆、石原直：新潟県中越地震における鉄骨造体育館被害調査 その2 非構造部材の被害状況の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.571-572、2005
- 8) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2011
- 9) 文部科学省：学校施設の耐震補強マニュアル S造屋内運動場編（2003年改訂版）、2008
- 10) (財)日本建築防災協会、(社)建築研究振興協会：実務者のための既存鉄骨造体育館等の耐震改修の手引きと事例、2005
- 11) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成16年新潟県中越地震建築物被害調査報告、pp.176-223、2006
- 12) 気象庁：強震波形（平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震）、
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index.html
- 13) 日本免震構造協会：東北地方太平洋沖地震に対する応答制御建築物調査報告会資料、2012
- 14) 日本地震工学会：平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震におけるの福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所で観測された強震記録等の強震データ記録、No.10、2011
- 15) 国土交通省：国土交通省港湾局港湾地域強震観測（港湾空港技術研究所地盤・構造部）、
<http://www.eq.pari.go.jp/kyosin/>
- 16) 東京都：東京都港湾局地震観測所で観測した地震動、
<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisojoho/jishindou.html>
- 17) Ishihara, K., T. Muroi, and I. Towhata: In-Situ Pore Water Pressures and Ground Motions during The 1987 Chiba-Toho-Oki Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 29, No. 4, pp. 75-90, 1989

18) 日本建築学会 建築基礎構造設計指針、pp.61-72、2001

19) 新井洋、林康裕、井上和歌子、中井正一、飯場正紀：液状化を考慮した簡便な地震動増幅率評価法、シンポジウム 内陸地震に対して構造設計者はどう対応すればよいか？「地震荷重と構造設計」、日本建築学会近畿支部 耐震構造研究部会、pp.19-26、2009

20) 吉見吉昭：砂地盤の液状化（第2版）、技報堂出版、p.182、1991

21) Seed, H. B., I. M. Idriss, and I. Arango: Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, J. Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.109, No.3, pp.458-482, 1983

3.3.9.3 津波による建築物の被害

22) 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン、2005

3.3.9.4 火災調査の概要

23) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独) 建築研究所：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告、国総研資料第674号、建築研究資料第136号、2012

24) 岩見達也、萩原一郎、成瀬友宏、伊藤彩子：2004年新潟県中越地震時の出火状況、日本火災学会研究発表会概要集、pp340-343、2005

25) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書、1995

3.3.9.5 建築物被害を踏まえた対応

26) 東京大学生産技術研究所：平成23年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書、2011

27) 東京大学生産技術研究所：平成23年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その2、2011

28) 国土交通省：津波に対し構造耐力上安全な建築物の設計法等に係る追加的知見について、2011

29) 国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説（国土技術政策総合研究所資料第673号）、2012

<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0673.htm>

30) 東京大学生産技術研究所：平成23年度 建築基準整備促進事業「40. 津波危険地域における建築基準

等の整備に資する検討」最終報告書、2012

参考になるホームページアドレス

1) 防災科学技術研究所：強震観測網（K-NET, KiK-net）、

<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

2) 気象庁：強震波形（平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震）、

http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index.html

3) 国土交通省：国土交通省港湾局港湾地域強震観測（港湾空港技術研究所地盤・構造部）、

<http://www.eq.pari.go.jp/kyosin/>

4) 東京都：東京都港湾局地震観測所で観測した地震動、

<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisjoho/jishindou.html>

5) 国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説（国土技術政策総合研究所資料第673号）、2012.3、

<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0673.htm>