

海溝型巨大地震による長周期地震動と  
土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言

2006年11月20日

社団法人 土木学会  
社団法人 日本建築学会

## 目 次

. はじめに .....	1
. 検討の経緯 .....	3
. 総括的提言 .....	5
1 ) 地震動 .....	5
2 ) 土木構造物 .....	5
3 ) 建築構造物 .....	5
. 個別提言・解説 .....	7
1 ) 地震動 .....	7
2 ) 土木構造物 .....	10
3 ) 建築構造物 .....	25
V . 巨大地震対応共同研究連絡会関係委員会 .....	45
. 土木学会関係委員会 .....	47
. 日本建築学会関係委員会 .....	49

## はじめに

2003年9月26日の十勝沖地震は改めて巨大地震の脅威を知らしめた。土木学会と日本建築学会はこれを契機に「巨大地震対応共同研究連絡会」を設立し、海溝型巨大地震に対する備えは充分であるのか不十分であればいかに対応すべきかを緊急に共同調査することになった。

巨大地震は広い震源域をもち、そこから発せられる地震動は長い継続時間を有し、長周期成分を多く含むと共に、伝播経路に存在する浅部地殻構造や堆積盆地等により惹起される表面波を含むものであり、いわゆる長周期地震動の特徴をもつ。現在では地震観測網も充実しつつあり、震源モデル、堆積盆地モデルの解明も進み、巨大地震における地震動予測手法は急速に進展しつつある。

建物・構築物の耐震設計は巨大地震の一つである1923年の関東地震直後に震度法として始まった。震度法は強度設計であり、基本的には現在迄脈々として踏襲されている。しかし、度重なる被害経験、地震応答解析技術の進歩によって、地震動の構造物への荷重効果として、力のみならず変形が重要であることが明らかとなった。力と変形の積はエネルギーであり、地震の荷重効果はエネルギーであると云える。地震がもたらすエネルギーを吸収する為に変形の中でも塑性変形が重要である。塑性変形は、最大塑性変形、累積塑性変形、残留変形としてとらえられる。塑性変形が増大することは構造物の損傷度が深まることと同義である。

現行の耐震設計は想定した設計地震動の下で構造物の損傷を許容限度内に納めるものである。耐震構造の発展型として、重力を支える構造主要部分の損傷を極力抑え、付加的に設置されたエネルギー吸収機構で地震エネルギーを吸収させる免震構造、制震構造が普及しつつある。

我が国では、高層建築が林立する大都市が海溝型巨大地震に見舞われたことはない。従って、最新技術を駆使して予測される想定地震動を用いて既存構造物の耐震性を検討することは極めて重要である。短周期地震動に関しては1995年の兵庫県南部地震が貴重な経験となった。短周期域の地震入力は場所によっては現行の設計地震入力の2倍を超えていた。しかし、現行の耐震設計法に従って設計された建築物は概ね致命的な損傷を免れた。従って、長周期地震動においても、予測地震動が現行の設計地震入力を上回っても、既存構造物が危険であると即断はできない。地震波の発生と伝播のプロセスに由来する地震動のバラツキ、地表地震動と構造物への実効入力の違い、地震動予測手法に内在するバラツキ、構造物の耐震余力を明らかにして、総合的な判断がなされるべきである。

以上のような状況の下で、共同研究の具体的課題は次のようにまとめられる。

1. 巨大地震における地震動予測
2. 想定地震動の下における既存構造物の損傷度の評価
3. 現行の耐震設計法の妥当性の評価

#### 4. 耐震補強法の整備

また、構造安全性の評価を発展させて、地震時の避難計画が主要テーマとして加えられ、更に、耐震安全性に対する意識昂揚に向けて、地震防災に関する研究開発、情報共有化、教育のあり方に対する検討が加えられた。

土木学会、日本建築学会は共同研究を支援する特別調査研究組織を各学会の総力を挙げて組織し、上記課題に取り組んだ。

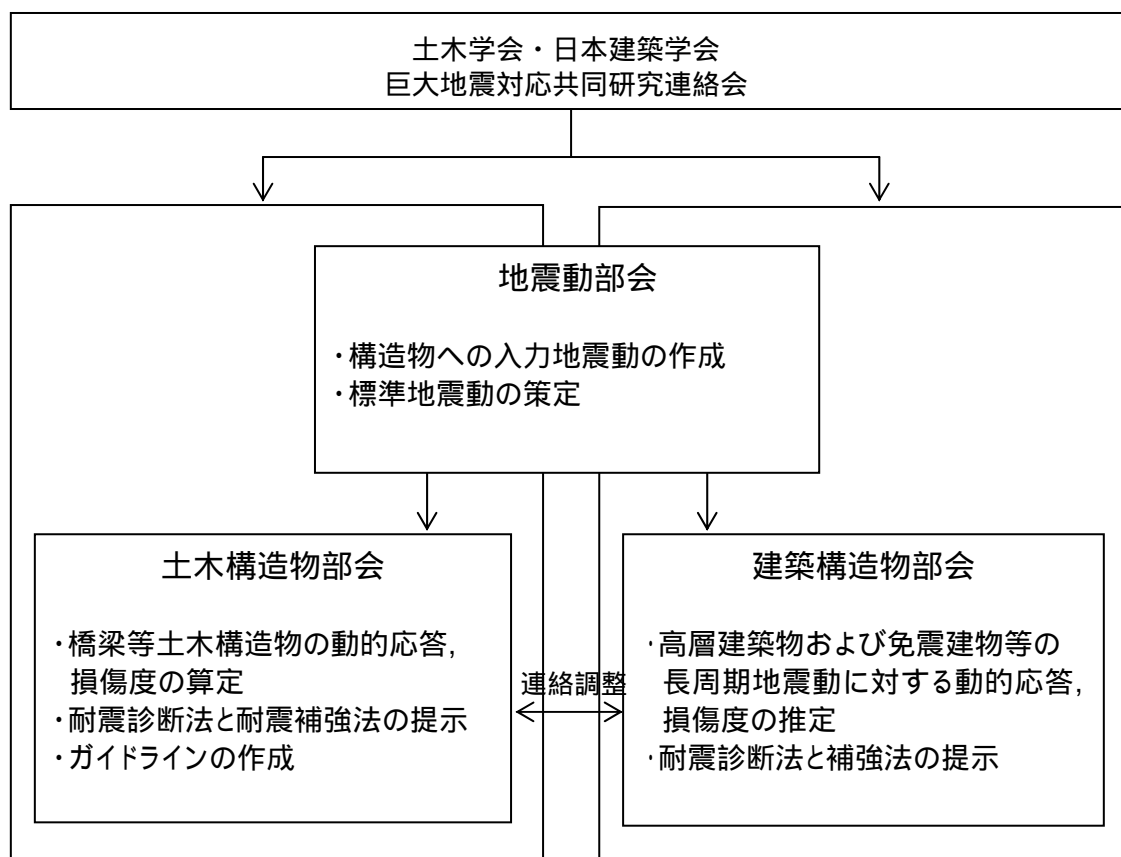
研究推進の調整は「巨大地震対応共同研究連絡会」が行い、研究の成果はここに提言としてまとめられた。提言は総括的提言とそれを補足する個別提言から成り、それぞれ、地震動・土木構造物・建築構造物の3編から成っている。土木学会、日本建築学会の共同提言が更に社会一般の共通認識として共有され、来るべき巨大地震に対する周到な備えを構築する為の枠組みとなることを切に願うものである。

## ．検討の経緯

東海地震等の海溝型巨大地震および東京湾北部の地震や宮城県沖地震の発生の緊迫性が指摘されている。このため土木学会は「巨大地震災害への対応検討特別委員会」を平成 15 年 10 月に設置し、主要土木構造物の耐震性を照査して、必要な対策方法を検討することとした。それとともに、土木構造物のみならず、建物・建築構造物を含めた都市と地域の社会基盤施設の耐震性を高め安心・安全な社会の構築に寄与することは土木・建築分野共通の課題であることから、日本建築学会に対して共同研究を提案した。

日本建築学会は、従来より建築構造物の耐震性向上や社会の地震防災研究に積極的に取り組んで来ており、関連分野との連携を重視していたこともあり、上記提案を契機に、土木学会との共同研究に同意し、「東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会」を設立して土木学会との共同研究を推進することとした。

東海地震等の海溝型巨大地震では、既往の耐震補強で想定した地震動を上回る強い地震動の発生と、高層建物、長大橋、大型貯槽等の長い固有周期を有する構造物での耐震性が懸念されている。土木学会と日本建築学会の共同研究では、巨大海溝型地震によって発生する長周期地震動を含む広帯域の地震動の予測および既存構造物の耐震診断と耐震補強が主要な調査・研究課題となった。



共同調査研究を連絡調整するために「巨大地震対応共同研究連絡会」を設置され、この共同連絡会の下に両学会の共同構成による「地震動部会」、土木学会で構成する「土木構造物部会」、日本建築学会で構成する「建築構造物部会」の3部会を置いた。

共同研究の課題のうち、長周期地震動の予測手法と発生地震動の具体的予測に関しては、内閣府より「平成16年度 長周期地震動対策の必要性の検討に係る調査」および「平成17年度 長周期地震動対策に関する調査」を受託して実施した成果も活用した。

平成16年度は、地震動部会において長周期地震動の予測手法に関する既存資料の整理と最適予測手法を検討し、土木構造物部会および建築構造物部会は構造物の耐震性照査手法の検討と、照査対象とする代表的な既存構造物を選定した。また、平成17年度は、地震動部会は東海・東南海・南海などの巨大地震が発生した場合の地震動を予測し、それによって得られた地震動により土木構造物部会および建築構造物部会は代表的構造物の耐震性照査を実施し、必要な場合は耐震補強などの対策手法を提示した。

#### 土木学会・日本建築学会「巨大地震対応共同研究連絡会」

##### 土木学会：

御巫 清泰 ((社)土木学会第91代会長)  
入倉 孝次郎 (京都大学名誉教授)  
濱田 政則 (早稲田大学教授)  
西村 昭彦 ((株)ジェイアール総研エンジニアリング)  
古木 守靖 ((社)土木学会)

##### 日本建築学会：

秋山 宏 (日本大学・(社)日本建築学会前会長)  
表 佑太郎 ((株)大林組)  
和田 章 (東京工業大学)  
小野 徹郎 (名古屋工業大学)  
西川 孝夫 (首都大学東京名誉教授)  
斎藤 賢吉 ((社)日本建築学会)

## ．総括的提言

### 1) 地震動

- 1 . 海溝型巨大地震の長周期地震動の予測に関する最新の研究により確立されつつある定量的地震動予測技術に基づき、将来の地震発生時の地震動予測とそれにもとづく災害インパクトを総合的に評価する必要がある。
- 2 . 地震とサイト特性を特定したシナリオ型強震動予測手法の高度化に資する強震観測網の維持・拡充と地下構造モデル高度化に資する地下構造調査を推進する体制の一層の強化を図る必要がある。

### 2) 土木構造物

- 3 . 既存の土木構造物の地盤・基礎を含めた構造系全体の耐震性を照査し、損傷レベルと機能に与える影響を明確にして、耐震性が不足する場合は適切な補強を行う必要がある。このため、構造物の大変形挙動と破壊過程の解明、地盤の液状化や側方流動に対する研究を今後とも推進する必要がある。
- 4 . 海岸防潮堤、河川堤防の強化・整備および避難計画等の津波対策を推進するとともに、陸上に遡上した津波の挙動および津波が構造物に及ぼす外力特性に関する調査研究を推進する必要がある。
- 5 . 防災情報の共有化に向けて障害となっている社会的・技術的課題を解決するため、防災関連機関・団体の協力体制を構築すべきである。
- 6 . 継続的な防災教育、特に幼児・児童を中心とした防災教育を地域コミュニティの連携のもとに推進する必要がある。

### 3) 建築構造物

- 7 . 海溝型巨大地震下で起こり得る地震動の地震入力と現在設計に用いられている地震入力を明確に対比して現行設計レベルの妥当性を検討しなければならない。

- 8 . 建物、構築物の地震入力レベルと損傷レベルとの対応を明確にし、現行設計レベルに対する安全余裕度を明らかにすることは、現行の設計レベルの妥当性を検討する上で不可欠であり、より一層研究を推進する必要がある。
- 9 . 耐震安全性が不足する建物・構築物に対する補強策を完備する必要がある。
- 10 . 大規模建築物においては避難等の安全性の確保に向けた地震時の避難計画が明示されなければならない。



## ．個別提言・解説

### 1) 地震動

#### 研究者コミュニティへの提言

提言 1 巨大地震の震源モデルの高度化を含む予測手法の確立に向けた研究の必要性  
プレート境界及び周辺領域に発生する海溝型巨大地震の震源像構築に関する研究を進めることによる長周期地震動を含む広帯域強震動の生成過程の解明及びその予測手法の確立に向けた研究推進を必要とする。

繰り返すプレート境界の巨大地震の断層破壊が類似していることが最近の地震学の知見から指摘されるなど、プレート境界地震の震源破壊過程についての分析が進んできている。また、プレート境界においてはサイレント地震やスロー地震と呼ばれる地殻活動があり、地殻変動情報からプレート境界のカップリングの空間的な性質についての研究が進んできている。さらに長測線の地殻構造調査や微小地震震源決定精度の向上から、プレート境界面の3次元構造が明らかにされつつある。これらプレート境界に関する測地学的・地震学的知見を踏まえたプレート境界巨大地震の繰り返し発生に関するシミュレーションも試みられるようになってきた。

長周期地震動を含む広帯域強震動の予測の観点にたつて、震源破壊過程の研究成果のみならず測地学・地震学的な知見を各イベントのパラメータ設定に応用し、強震動予測のためのプレート境界巨大地震の震源モデルの高度化を含む予測手法の確立に向けた研究を進めていくことが必要である。

提言 2 地殻構造および大規模堆積盆地構造の調査と三次元モデル化の研究の必要性  
巨大地震時の長周期地震動を含む広帯域地震動予測のため、震源から対象サイトまでの地殻構造および大規模堆積盆地構造の三次元速度構造モデル構築が必要である。

1995年兵庫県南部地震以降、地球物理学的手法による地下構造調査が精力的に行われ、強震動予測の社会的重要性の高い関東・濃尾・京阪神地域等の堆積盆地構造モデルが複数の研究グループにより構築され、実地震記録によるモデルのキャリブレーション研究がすすめられている。堆積盆地においては、縁辺部に活断層がある場合、急激に堆積層深度が変わるなど複雑な形状をしている場合が多く、また地質的に同じ層であっても水平方向に地震波速度が変化するなど複雑な様相を呈しており、それらの地震動への影響評価と、複雑性を解明するには、地球物理学的手法による構造探査の追加実施や自然地震観測を継続することが必要である。これら地下構造モデルの高度化に資する地球物理学的手法による探査や

地震観測を推進して既存地下構造モデルの高度化を図るとともに、構築されている堆積盆地構造モデルに新たな知見を統合したコミュニティ標準地殻・地盤構造モデルを確立していくことが望まれる。

**提言 3 予測強震動の観測地震動による検証作業とモデルパラメータの更新**

震源モデルや地下構造モデルの妥当性を観測地震動記録によって検証し、それにもとづくモデルパラメータのチェックと改良を行っていく必要がある。

提言 1、2 で構築された震源モデルおよび地殻・地盤構造モデルを用いて実観測記録による検証作業をすすめ、震源モデルと地殻・地盤構造モデルの信頼性（説明能力）の向上を進めるとともに、震源や地下構造に関して新たな探査結果や情報に基づく知見を得て、モデルパラメータを更新し、予測地震動の確度を上げていく不断の継続的な研究が必要である。

**提言 4 バラツキの原因としてのモデルパラメータの予測強震動への定量的影響評価**

震源や地下構造のモデルパラメータが予測強震動の地震動特性へどのようにどの程度影響するかを整理し、主要モデルパラメータを抽出することが必要である。

震源モデルや地下構造モデルの高度化とそれらの信頼性向上に関する研究とともに、予め確定することが困難である震源モデルのパラメータや、十分な正確さがない地下構造モデルのパラメータに関して、モデルパラメータのバラツキが予測強震動の卓越周期や震動継続時間に具体的にどのように影響をするのかを明らかにして、予測強震動の位置付けを明確にする必要がある。またこれに基づき、予測地震動の特徴を左右するモデルパラメータの重要度を評価し、影響の大きなパラメータを主要ターゲットにして予測手法の高度化を進める必要がある。

**実務者コミュニティへの提言**

**提言 5 震源・サイトを特定した予測強震動の効果的利用の推進**

想定される地震の震源モデルおよび想定地震の震源域から対象サイトまでの地殻・地盤構造モデルを考慮した予測強震動をもとに、構造物耐震性を評価する必要がある。この予測強震動の効果的利用を推進するため、地震動研究者と実務者の間のコミュニケーションをより一層緊密にする必要がある。

大規模堆積盆地での長周期地震動特性は想定地震の断層破壊シナリオ、及び地震動予測地点（サイト）によって卓越周期や震動継続時間が変化することが再確認された。具体的には、ある想定地震の断層破壊シナリオであっても、堆積盆地内の地点によって広帯域地

震動特性が異なり、またある特定サイトであっても地震シナリオであるアスペリティ位置や破壊様式等が異なる場合は震動レベルや卓越周期が異なる、ということである。このことは2004年紀伊半島南東沖地震の関東・濃尾・大阪平野等の観測事実、2003年十勝沖地震の被害地に近い港湾技術研究所苫小牧西港での20年以上に及ぶ期間に得られた大地震の観測事実からも明らかである。従って強震動の予測に当っては、想定される地震の震源モデルおよび震源域から対象サイトまでの地殻・地盤構造モデルを考慮できる方法を用いる必要がある。当然こうして求められた予測強震動は特定サイトにおいて特定地震シナリオを想定した場合の予測地震動であることを前提として利用すべきである。

このような震源とサイトの関係によって規定される予測強震動特性の重要性について、実際にそれを利用する側の実務者コミュニティにおいて未だ十分に理解されているとは言い難い面も見受けられる。予測強震動の効果的利用を推進するため、地震動研究者と実務者間のコミュニケーションをより一層緊密にする必要がある。

#### 提言6 予測強震動の特徴と留意点

巨大地震による大規模堆積盆地上における予測強震動は、震源およびサイトによる特徴的な卓越周期と長い震動継続時間を持つものとなる。その特徴を考慮できる手法による予測地震動を入力地震動として考慮すべきである。

巨大地震発生時の特徴である長周期地震動の精度よい評価を含む広帯域地震動の推計には、長周期側を決定論的な震源モデルと大規模堆積地盤構造を含む地殻構造モデルに基づいて弾性波動論に基づいた差分法等で評価し、短周期側を統計的グリーン関数法によって評価してそれらを足し合わせるハイブリッド法による手法、また適切な要素地震記録がある場合は経験的グリーン関数法もしくはそれに準ずる方法によることが現時点での最良の方法と考えられる。これらの手法には対象地震の断層破壊シナリオの設定や、サイト特有の卓越周期等が再現できる堆積盆地構造モデルを組み込むことができる。

#### 提言7 予測強震動のバラツキの考慮

震源とサイトを特定した予測強震動の推定には震源モデル及び伝播経路・サイトのモデルパラメータの不確定性によるバラツキが含まれる。これらのモデルパラメータの不確定性に基づく予測強震動のバラツキを考慮した評価が必要である。

震源モデルや地下構造モデルの高度化とそれらの信頼性向上に関する研究とともに、予め確定することのできない震源モデルのパラメータや、十分な正確さがない地下構造モデルのパラメータに関して、モデルパラメータのバラツキが予測強震動の卓越周期や震動継続時間に具体的にどのように影響をするのかを明らかにして、予測強震動の位置付けを明確にする。予測強震動の利用に際しては、この想定し得るパラメータの変動による予測結果のバラツキの程度に配慮して応答結果の評価をすることが望まれる。

## 2) 土木構造物

### 土木構造物の耐震性照査と補強

#### 提言1 既存構造物の耐震補強

構造物の耐震補強に当たっては構造物の重要度と考慮する地震動の特性に応じて必要とする耐震性能を定め、それを確保することが重要である。土木構造物の種類は多岐にわたり、同種の構造物であっても構造形式や使用環境も異なるため、耐震性能は対象とする構造物の目的や機能、重要度などを考慮して定めるのがよい。しかし、原則として最低限構造物全体が崩壊しないことを保証する必要がある。

既設構造物の耐震性照査および耐震補強に当たって、目標とする耐震性能は、新設構造物と同等とすることを原則とし、対象とする構造物の目的や機能および重要度を考慮し、地震動のレベルや特性に応じて定めるのがよい。また、土木構造物は種類が多く、構造形式も多様であり、建設環境、使用環境等も異なる。土木構造物部会で取り上げた構造物も、橋梁、ダム、タンク、港湾構造物、地下構造物、堤防盛土等土構造物、上下水道管路と多種にわたっている。したがって、それぞれ目的や機能が異なるので構造物の耐震性能は構造物毎に定める必要がある。

しかし、既設構造物はすでに供用されており、個所数が膨大であったり、新設構造物と同等の耐震性能を有する補強が困難な場合があるが、その場合でも重要度等を考慮し、原則として構造物全体が崩壊しないように補強する必要がある。

#### 提言2 耐震性能の確保

耐震性能の確保に当たっては目標性能を適切に評価できる工学的指標とその限界値を定め、応答値がそれを超えないことを確認することが必要である。とくに地震動が大きい場合は、部材や構造系が持つ耐力のみを指標とするのではなく、変形性能など地震動のエネルギーを吸収できる能力も評価すべきである。

しかし、大変形領域での構造物の挙動の解明は十分とはいえない。とくに巨大地震における継続時間の増大に伴う損傷度の累積などに関する研究が必要である。

耐震性能の確保にあっては、構造物の性能を適切に評価できる工学的指標とその限界値を定める必要がある。一般にその指標としては、構造物部材の耐力や基礎の支持力に加え、構造物の水平および鉛直変位、残留変位、傾斜、さらには構造物全体や部材および基礎の変形性能等が挙げられる。

とくに地震動が大きい場合は、地震時の応答値が耐力や支持力を超える可能性も高く、

その場合は変形性能に着目する必要がある。構造物の変形性能が大きい場合は、地震エネルギーの吸収能力が大きく、巨大地震にも耐えうるが、しかし変形が大きくなるため、地震後の残留変位や沈下、傾斜あるいは浮き上がり等に対する対応を考える必要がある。

しかし、大变位領域での構造物の挙動の解明は現時点では十分ではない。鋼や鉄筋コンクリート部材の性状は大変位領域での載荷試験の積み重ねにより、かなり解明されているが、基礎や土構造物に関する研究は未だ不十分である。特に地盤の大ひずみ領域での応力～ひずみ関係に関する研究成果は少ない。さらに基礎と地盤の動的相互作用における地盤の変形特性や強度等についても十分な研究は行われていない。今後、これらの課題に対する研究の推進が必要である。

### 提言3 耐震性能照査の方法

構造物は一般に、上部構造、下部構造、基礎構造およびそれを支える地盤等から構成されており、したがって、その耐震性能照査は、これらの要素を考慮した構造物全体系の挙動に着目して行う必要がある。そのためには、人工材料である鋼、コンクリートなどと比較すると地盤に対する諸物性の推定精度は不十分であるため、それを考慮して耐震性能の照査の方法を決定する必要がある。また、形式や剛性等が異なる構造物が隣接する場合はその影響も考慮しなければならない。

このような耐震補強の照査方法確立のためには、今後、E-ディフェンスを利用した実大実験等が有効である。

構造物の耐震性能の照査は、構造物全体系の挙動を把握し、地震時の応答値が設定した耐震性能を満足していることを確認しなければならない。一般に構造物は上部構造、下部構造、基礎構造およびそれを支える地盤から構成されており、構造物が目標とする耐震性能を満足していることを確認するためには、これらの構造全ての照査が必要であり、見落としが無いよう注意を払う必要がある。特に地盤と構造物の動的相互作用の評価も重要である。

しかし、全体系で安全性を照査するには、それらを構成している材料の諸定数の推定精度を考慮する必要がある。一般に鋼、コンクリートに比較すると土の推定精度は下がるとされており、それに対応するためには精度の良い調査と安全係数等に対する配慮が必要となる。

照査対象構造物の挙動を把握する場合、一般に対象とする構造物のみをモデル化する例が多いが、隣接する構造物が例えば、橋桁の長さ、橋梁形式、固有周期等が異なり、対象構造物に影響を及ぼす可能性がある場合はそれらを含めてモデル化する必要がある。しかし、非線形を考慮した全体系の動的解析の精度についてはまだ、十分確かめられておらず、これを評価するためには今後E-ディフェンスを利用した実大実験等が必要である。

#### **提言4 免震・制震構造の活用**

既設構造物は旧基準で設計されており、現在の基準に規定する耐震性能を確保することが困難な場合が多い。したがって耐震補強に当たっては耐力の増強のみを考慮するのではなく免震・制震の考え方も取り入れるべきである。ただし、免震・制震の効果は構造物が位置している個所の地盤特性や地震動の性状に大きく影響されるため、地震動のばらつき等を考慮して、3に述べた地盤を含めた構造系全体の動的解析によりその効果を確認する必要がある。

免震・制震構造は、構造物の目標性能を満足するために設置するものであり、一般には主要な構造部材の損傷を最小限（降伏以内）に収めることを目標とする場合が多い。そのためには構造物の強度や固有周期などの諸性状を十分把握するとともに、免震・制震装置あるいは構造形式の性能およびその限界状態を把握しておくことが必要である。

ここにいう免震構造とは長周期化と高減衰化により構造物の動的応答の低減を図った構造物をいい、制震構造とは、長周期化はしないが、オイルダンパー等の装置により高減衰化を図った構造物や、センサーにより構造物等の応答を計測しその情報に基づいて剛性や減衰力を変化させたり、制御力を作用させたりして動的応答の低減を図った構造物を言う。

免震構造は構造物の長周期化と減衰力の向上を図るものであるが、この長周期化に伴い免震構造の変形は大きくなるので、その変形が構造物に悪影響を及ぼさないよう注意が必要である。また、軟弱地盤では地盤の塑性化に伴って、地震動も長周期化する場合があるので、それに対する装置の適用性も考える必要がある。

制震装置は一般に固有周期が長く、応答変位が大きい構造物に用いると有効である。近年は既設構造物の耐震補強に用いられる事例が増えているが、その場合曲げ破壊に比べ、せん断破壊は小さい変形で生じる可能性が高いため、剪断破壊型の構造物の耐震補強では、装置の適用性を十分検討しなければならない。

免震・制震構造の効果は構造物、地盤および地震動等の性状に左右されるので、適用に当たっては、動的解析によってその効果を十分に確認する必要がある。

#### **提言5 耐震補強工法の策定**

構造物の耐震補強工法の策定にあたっては、まず対象とする構造物の現状や環境条件の把握が重要である。そして、構造物の修復性や損傷制御の考え方を導入した経済的な対策工法を考えることが必要である。

また、施工に制約条件があり、耐震補強が困難な場合が多い既設構造物に対する耐震補強では補強というハードの面だけでなく、復旧資・機材の確保などソフト面の対応も考慮するのがよい。

既設構造物の耐震補強は、耐震診断で目標とする耐震性能を満足しない構造物に対して、工法あるいは装置を構造物に施して、耐震性能を満足させることである。その場合、構造物の現状の強度あるいは変状等の有無あるいはその環境条件を知ることが基本となる。すなわち診断および補強の対象となる構造物はすでに存在しており、建設されてかなりの年数を経過しているのが一般である。したがって、強度等は建設時あるいは設計で期待した値とは異なっている可能性もある。さらに変状等を生じている可能性もある。また多くの場合、供用しつつ補強工事を施工することになるので、周囲の環境の維持(騒音振動問題)、狭隘な場所での施工法、施工容易な材料の選択などに配慮しなければならない。

耐震補強工法の選定にあたって考慮する条件を以下に挙げる。

1) 耐震補強工事の種類・内容

耐震補強工事の種類・内容を検討する。例えば、どこをどのように補強するか等である。

2) 既設構造物の環境・形式等の条件

耐震補強工法の選定において、既設構造物の環境・形式等の条件は空頭確保や機械設置等の施工条件に大きく影響する。したがって、既設構造物の条件に配慮する。

3) 施工条件・地盤条件

補強工事は対象構造物および隣接構造物の常時の健全度に影響を与えないように実施しなければならない。したがって、補強工事の施工条件や地盤条件を十分考慮する必要がある。

4) 周囲の環境

施工によっては、振動・騒音を発生する工法もある。人家に近接する場合はそれらを極力抑える必要がある。

耐震診断および補強を実施する場合は、これらを考慮して慎重に行う必要がある。また、経済性の検討も重要である。一般的に用いられる補強工法の施工に多額の費用を要する場合は、構造物及び部材の変形性能を増大させ、地震エネルギーを吸収できる工法ないしは免震・制震工法を検討するのがよい。

さらに、既設構造物の耐震対策に当たっては、上記の条件等から必要な耐震性能を確保することが困難な場合も想定される。その場合は、対象構造物の強度等のレベルを考慮して、損傷を受けた場合復旧に必要な資・機材の確保や代替システムの整備等を考慮するのがよい。

### 提言 6 液状化・側方流動への対策

液状化が生じる可能性のある地盤の動的挙動は、液状化による有効応力の変化を考慮できる有効応力により推定することが望ましい。この場合、継続時間の長い地震動では変形予測精度が低下する可能性があるため、液状化後の繰り返しせん断変形特性に関するデータや継続時間の長い振動実験結果の蓄積等が必要である。また、液状化地盤の側方流動に対する構造物基礎およびライフライン埋設管路の耐震性の向上が必要である。

液状化に対しては過去に多くの研究がなされ、発生の判定方法や発生を防ぐ対策工法が開発され、実務に適用されるようになった。しかし、液状化の発生防止に力点が置かれ、発生後の地盤及び構造物の挙動に関してはまだ、研究が十分とはいえない。巨大地震のもとでは、液状化の発生を完全に防止するのは困難な場合もあり、構造物の沈下量等を許容範囲にとどめるという対策が必要となる。

しかし、現状では、液状化時の構造物等の変位量計算には手法によるばらつきも大きく、確立されるには至っていない。今後は大地震時における土の挙動に関するデータの積み重ねや、構造物を含む地盤振動実験の積み重ねが必要となろう。また、液状化に伴う地盤の流動の予測手法および構造物基礎および埋設管路の耐震性の向上対策も研究する必要がある。

#### **提言7 津波への対策**

海溝型の地震による津波対策は緊急の課題である。従来、津波による被害は、波高や浸水高さに関係づけられてきたが、近年のインド洋大津波の被災例などから平坦な臨海地域などでは、流速や波力も重要なことが示された。しかし津波による外力評価、漂流物などによる被害、構造物の被災メカニズム等に対する研究は未だ不十分で、今後推進しなければならない。

海溝型巨大地震は過去の例を見ても津波を伴っている。とくに南海地震は一般的に震害よりも津波による被害の方が大きい。また、最近ではインドネシアで発生した地震で発生した津波により、東南アジアの国々で多くの人命、財産が失われた。日本では気象庁による津波警報が地震発生後早期に出されるため、迅速で適切な避難を実施することにより、津波による人命の損失を最小限に留めることができると考えられるが、構造物に与える影響の評価方法は十分に研究が進んでいるとはいえない。特に、沿岸近くに立地する石油タンク施設、下水処理施設等は具体的な対処法を検討する事が望ましい。

構造物の津波対策を立てるには構造物の被災メカニズム、津波の及ぼす力等の解明が必要となる。インドネシアで鋼橋は津波により流失などの被害を受けたが、コンクリート橋は比較的無事であった事例は参考となろう。一方、都市化した地域では、船舶、車、建物など、津波による漂流物になるものが多く、これらが被害拡大の要素ともなっているが、この現象は十分研究されていない。今後は被災メカニズム等の解明と津波外力、漂流物による被害に関する研究が重要となる。



### **提言 8 橋梁の耐震補強**

旧基準が適用された既設橋梁の中には、現在の基準で目標とされている耐震性能を確保できない場合がある。したがって、想定される地震動の特性や橋梁の構造特性を考慮した適切な耐震診断と、それに基づく耐震対策を実施する必要がある。

また、河川橋や跨線橋・跨道橋、吊橋や斜張橋などの特殊橋や長大橋については、一般的な橋梁に比べて耐震対策工法の施工が困難な場合もあるので、このような橋梁に対する効果的な耐震対策法の研究、開発が必要である。

橋梁は、道路や鉄道を構成する構造物の一つであり、人的及び物的流通を確保する上で重要な役割を担っている。地震時には、橋梁の利用者及び交差道路や高架下利用者等の第三者に対して、落橋や倒壊等による致命的な被害を防止するとともに、地震後には、復旧・復興活動を円滑に行うことができるように、できるだけ早期にその機能を回復することが要求される施設である。

兵庫県南部地震以降に制定された基準を満足する橋梁構造物に、地震動部会より提示された想定地震動を用いて検討した事例では、落橋や倒壊という致命的な損傷には至らないとともに、比較的早期に橋梁としての機能の回復が期待できる程度の損傷にとどまるという結果が得られた。しかしながら、地域によっては今回検討した地震動よりも大きな地震動に遭遇する可能性も否定できず、また、旧基準が適用された既設橋梁の中には、現在の基準で目標とされている耐震性能を確保できない場合もある。したがって、想定される地震動の特性や橋梁の構造特性を考慮した適切な耐震診断と、それに基づく耐震対策を実施する必要がある。

橋梁の耐震対策は、これまで順次進められるとともに現在も進行中であり、橋梁の耐震性の全体的な水準は向上してきていると考えられる。しかし、施工上の制約が大きい河川橋や跨線橋・跨道橋、吊橋や斜張橋などの特殊な橋梁及び長大橋については、一般的な橋梁に比べて対策が困難な場合が多く、耐震対策の検討が必要な箇所も残されている。このことから、このような施工条件等の厳しい橋梁に対する効果的な耐震対策法の研究、開発が必要である。

### **提言 9 港湾施設の耐震補強**

岸壁は地震直後の緊急支援物資や復旧・復興のための人・物の搬入出等の拠点となるべき重要な施設であり、耐震診断を実施し、有効な耐震対策を実施する必要がある。また、岸壁だけでなく、その上に設置されるクレーン等の施設に対しても診断を実施し、効果的な耐震対策を実施する必要がある。

岸壁は地震直後にも、緊急物資輸送や、背後地域の経済活動を停滞させないため幹線貨

物輸送の機能を確保するため、耐震性を確保しておくことが重要である。既存岸壁の耐震診断および耐震補強に関しては、既存施設の構造形式、使用状況、耐震補強後の要求性能に即して実施することになる。例えば、緊急物資輸送用の岸壁に関しては、地震直後に使用出来ることが求められ、幹線貨物輸送用では、軽微な修復によって短期間のうちに荷役が再開されることが求められる。また、荷役用のクレーンや、岸壁のある臨港地区と背後地域を結ぶ経路（道路・鉄道・橋梁など）の耐震対策との協調・連携も地震直後に求められる岸壁の機能を維持するうえで重要となる。

#### **提言 10 地下構造物の耐震補強**

兵庫県南部地震以降に制定された基準に基づいて設計された開削トンネルは提供された地震動に対して十分な耐震性能を有していることがわかった。しかし、既設の地下構造物では兵庫県南部地震における大開駅の被害が示すように地盤条件、作用する地震動の大きさ等によって被害を受けることも推定される。したがって、適切な耐震診断とそれに基づく耐震対策を実施する必要がある。

また、水道施設においては構造物を形成する部材の破壊の他、目地の損傷による漏水や土砂流入等の危険性があり、部材の補強に先立って目地の耐震性を確保する必要がある。

しかし、一般に耐震対策の困難な開削トンネル等において、新設構造物と同様の耐震性能を要求することは困難な場合が多く、構造物の重要度、対策の施工性を考慮した合理的かつ現実的な対策を策定する必要がある。また、地下構造物の特性に配慮した効果的な耐震対策法の研究、開発も急務である。

従来、地下構造物は周辺地盤に追随した挙動を示すため、耐震性は比較的高いと考えられてきた。しかし、兵庫県南部地震や新潟県中越地震における開削トンネルや山岳トンネルの被害事例から、地下構造物においても条件によって大きな被害を受けることが明らかとなった。これまでに建設された地下構造物は、レベル2地震動や性能設計等が規定されていない旧設計指針・基準に準拠して設計されたものが大多数であるため、現行の耐震設計指針・基準で安全性を見直すと、所定の耐震性能を有していないことが予想される。上下水道施設においては、部材が破壊に至らなくても目地の損傷によって貯水槽内の水が外部に漏出したり、外部の土砂や地下水が貯水槽内に流入することによって施設としての機能が維持できなくなることも予想される。したがって、想定される地震動に対し、適切な評価手法を用いた耐震診断を早急に行い、被災後もそれぞれの施設として目標とする機能を維持できるように効果的な耐震補強対策を実施しておく必要がある。

一般に地下構造物は、その立地条件より耐震補強対策の施工が困難な場合が多い。既設の地下構造物を対象とした対策工法としては、構造物周辺を地盤改良や免震材を配置することで構造物に作用する地震力を低減するような工法がいくつか提案されている。しかし、

このような構造物の外部から対策する工法は、その材料特性や施工法等に問題点も残されており、十分な効果が期待できない場合もある。一方、構造物内部からの対策は、既設の地下構造物では作業空間や作業時間に制約が多いこと、建築限界により補強スペースが限られること等より、効果的な対策工法の選定が困難な場合が多い。現状では、橋梁等の地上構造物に対する補強工法を地下構造物に適用している事例が多いが、大開駅と同様の中柱構造形式に関しては早急な耐震対策をとる必要があるため、中柱の線路方向の両側に鋼製の添え柱を配置する工法が採用された例がある。また、構造物の脆性的な破壊モードを回避するために、側壁等のせん断耐力を向上し部材として曲げ破壊先行型とする補強工法として、後施工で鉄筋等を挿入する補強工法も提案され、徐々に耐震対策工法として適用されつつある。

また、耐震診断の際には構造物の挙動を忠実に再現できるような解析手法やモデルを十分検討し、精度の高い診断を実施する必要がある。例えば、解析モデルを二次元から三次元にするとか、非線形有限要素解析や動的解析を行うことによって診断の精度が向上する場合もある。現地調査結果に基づいた材料特性を解析に適用することも重要である。

さらに、既設の地下構造物に対して、計算上必要と判断される全ての箇所を補強するという一般的な耐震対策の考え方を実行に移すことは、実質的に不可能である。また、全ての既設構造物に対して新設構造物と同レベルの耐震安全性を要求することも不合理である。耐震診断結果だけでなく、構造物の重要性、耐震対策の施工性、あるいは構造物の建設年度などを基に、より合理的で現実的な耐震対策を対象構造物ごとに考えていく必要がある。したがって、今後も耐震対策の研究・開発に取組み、効果的かつ効率的な耐震対策工法を確立する必要がある。

#### **提言 1 1 上下水道管路および浄水場等の耐震補強**

上下水道では耐震管路の使用が効果的である。また、斜面崩壊による被害防止として、斜面に管路を布設する場合は山側にすることが望ましい。しかし、既設管路の耐震対策については、現状では有効な方法は無く、新技術の開発が必要である。

また、海岸近くに設置される浄水場等の津波対策も重要である。

上下水道管路は地中線状構造物であり、合理的な地震対策としては構造長手方向の継手間に変位を吸収する可とう継手などの規格製品を使用することで、地震時のひずみを吸収することが可能となる。ただし、現在想定される最強地震動の発生、地盤剛性急変部や液状化が予測される軟弱層への管路布設など複数の条件が重なる特殊状況下では別途対応が必要となってくる。兵庫県南部地震以降、上下水道では可とう継手など耐震性能を有した管路材料が普及し、新潟県中越地震では上水道で使用した耐震管路が効果を発揮している。

一方、下水道においては埋戻し土の液状化により、管路やマンホールの沈下・浮上などの著しい被害が発生したことから、管路布設時において埋戻し土に対する液状化対策の必要性が求められている。また、兵庫県南部地震と新潟県中越地震との共通被害としては、道路盛土の斜面崩壊により道路谷側に布設されていた上下水道管路が破損し、その結果漏水を引き起こしたことで盛土崩壊を増大させた可能性がある。よって、今後斜面に管路を設置する場合には、崩壊の可能性が低い山側に布設することが望ましい。

現状において新設管路に対する耐震対策はある程度普及しているが、既設管路での耐震対策については有効な方法が少なく、早急な新技術の開発・提案が必要である。ただし、今後想定される東海、東南海、南海の巨大地震については、広範囲に被害が及ぶことが想定され、面的な広がりがある上下水道管路全てに対し耐震補強を行うことは現実的でない。耐震補強以外の対策としては、上下水道管路のシステム面を重視した多重化やネットワーク化など、バックアップ機能の充実が挙げられる。また、巨大地震に伴い津波の発生も予想されることから、管路以外の重要施設となる浄水場および下水処理場の機能確保のための対策も重要となる。津波による浸水は泥水浸水であり、十分なカバーを有していない下水処理施設は泥に埋没してしまう事になる。この事態は飲料水を除く全ての生活用水が数ヶ月間停止する事になる。上下水道施設はライフラインであることから、被災後の早期復旧を目指した人的支援・経済的支援のあり方、支援組織体制についても十分議論しておく必要がある。

### **提言 1 2 大型液体タンクの耐震性**

石油タンクに多用される浮屋根式貯槽においては、スロッシングによる内容液の波高が側板余裕高を超える可能性があり、溢流と着火防止対策に十分な留意が必要である。その際浮屋根に対しては、十分な補剛材を配置することにより、スロッシングに対する耐震強度を確保することが重要である。

また、LNG タンク、上下水道用タンクに用いられる固定屋根式貯槽においては、スロッシングによる内容液波動が屋根に及ぼす衝撃圧に対して留意が必要である。

大型の石油タンクにはほとんど浮屋根が用いられる。長周期地震動の卓越周期とタンク内容液のスロッシング周期（1次モード）が合致すると、側板部には共振的に大きな波高を生じる。この1次モードのスロッシング周期は、浮屋根の存在にあまり左右されない。この波高が側板余裕高を超えると浮屋根の性質上溢流を生じ、浮屋根と側板部との衝突等により火災を生じやすいので、十分な対策が必要である。

2003 年十勝沖地震における大規模な火災は、このような共振的スロッシングが発生し、浮屋根が座屈破壊したり、沈没したりすることにより引き起こされた。本来危険物を露出させないように設置される浮屋根が破壊・沈没することは、大火災に繋がり易いことにな

る。そのため、2005年の消防法改正では、従来規定のなかった浮屋根の耐震強度を確保する条項が採り入れられている。しかし、巨大地震を想定する時には、波高が規定されたレベルを上回る可能性もあるので、耐震強度の確保には十分な配慮が必要である。

シングルデッキ形式浮屋根では、デッキ部の剛性が乏しく、剛性の大きい外周部ポンツーンに座屈に繋がるような大きな応力が集中するので、ポンツーン部の補強が非常に重要である。その意味で、ダブルデッキ形式のように全体の剛性を高くすることは一つの対策である。しかし、今回検討されたように、全体に剛性を高くすると、2次、3次等高次モードのスロッシング周期が短周期側に移り、それらの応答により浮屋根にかなり高い応力が発生する可能性もある。浮屋根の耐震設計には浮屋根と内容液との連成挙動を考慮するなど、十分な注意が肝要である。

また、LNGタンクや上下水道タンクには固定屋根が用いられる。スロッシングによる波高が側部余裕高を超えると、固定屋根には衝撃圧が作用する。固定屋根がスロッシング衝撃圧で破壊された例は、1964年新潟地震の際に石油タンクにおいて見られる。LNGタンクの場合には、従来から3波共振法等を適用して、過大なスロッシング波高と衝撃圧への対策が検討されて来ているが、上下水道タンクでは従来この種の検討が実施された例が少なく、一般に側部余裕高もそれほど大きく取られていない。特に、大型の上下水道施設で平屋根の場合等には、大きな衝撃圧の作用が予想されるので、そのような場合耐震強度には変形性能の確保も含めて十分な留意が必要である。

### **提言 13 盛土等土構造物の耐震補強**

盛土は変形を生じやすいが、靱性に富んだ構造物であり、その耐震性評価に当たっては円弧すべり等の解析のみでなく、変形を考慮できる解析手法を用いた評価を行うのがよい。その場合土の物性や強度のばらつき、解析の精度を考慮すべきである。

道路、鉄道、宅地盛土、河川堤防などの盛土構造物は、それぞれ重要性や2次災害に対する影響など条件が異なることから、構造物ごとに安全性や復旧性などを総合的に検討し、要求性能を決定するのがよい。また、既設構造物の耐震補強においては、河川堤防の止水性など、地震以外の要求項目について十分に配慮して耐震補強工の選定を行う必要がある。

盛土構造物に対して設定された要求性能に対して耐震性評価を行う場合、一般に震度法に基づく円弧すべり法が多用されているが、盛土構造物は軟弱な支持地盤上の場合を除き、靱性に富んだ構造物であり、円弧すべり法など変形を扱わない手法では、強震動時には合理的な耐震性評価が行えない場合がある。したがって、直接変形量が計算できる変形解析手法を用いて、既存および耐震補強後の盛土構造物の耐震性評価を行うのがよい。特に盛土の基礎地盤の液状化により大変形を起す可能性が高い河川堤防では変形解析手法を用いた耐震性評価が有効である。しかし、土構造物の耐震性評価を適切に行うために、基礎地

盤や盛土材料の土質調査、試験が重要であることに注意が必要である。たとえば基礎地盤が一様でない想定される場合には、一個所のボーリングデータでは不十分であるし、精度良い有効応力解析結果を得るためには過剰間隙水圧の上昇に関する試験が必要である。変形解析は、土質試験の内容に応じて採用できる手法が限定されることから、不十分な土質試験結果しかない場合にはあまり高度な解析手法を採用すべきでない。また、有効応力解析などの変形解析手法は現在も発展途上にあり、熟練した解析者においても解析結果にばらつきが見られるのが現状である。したがって、解析結果の評価に際しては、土のばらつきだけでなく、変形解析手法の解のばらつきも考慮し、盛土構造物の耐震性を評価しなければならない。

ただし、構造物の重要度、復旧性、耐震補強費用、耐震性評価費用など総合的に判断し、簡易な耐震性評価手法や見なし規定による方が合理的と判断される場合にはこの限りではない。

#### **提言 14 ダムの耐震性能照査**

ダムは、基本的には高い耐震性を有しており、地震動により軽微な損傷を受けることはあっても、機能を喪失するような重大な損傷を受けることは極めて稀であると推定される。しかし、世界に目を転じると過去の地震で重大な被害を受けた事例が報告されている。このため、将来の巨大地震に対してダムの安全性を照査し、地震発生時には迅速かつ適切な安全確認が出来るようにしておくことが大切である。

我が国では、1957年にダムの設計基準が制定され、ダムの耐震設計が初めて明文化された。現在、ダムの耐震設計は、河川管理施設等構造令及び同施行規則に準拠して震度法に基づいて行われており、高さ15m以上のダムが適用対象となっている。兵庫県南部地震以降、既設ダムに関しては、地震時の実現象に即した耐震性能照査の必要性が認識され、既設ダムの耐震性能が動的解析によって照査されるようになりつつある。既設ダムでは、建設後の時間が経過すればするほど耐震診断の必要性が高くなり、非常に強い地震動が想定され、地震被害が想定されるような場合には、ダムの建設年代や規模や種類によらず、精度・信頼性の高い耐震診断が求められるものと考えられる。

ダムに要求される基本的機能は貯水機能であり、それに連動して放流機能の保持も要求される。ダムの耐震性能としては、非常に強い地震動を想定した場合には、ダムが構造的に重大な地震被害を受けた場合でも、ダムの貯水機能および放流機能が保持されることが要求されるものと考えられる。

過去の地震被害を集約すると、コンクリートダムでは、堤体・基礎岩盤でのクラックの発生、フィルダムでは、すべり破壊、液状化、沈下、残留変形等の発生が主たる地震被害となっているので、ダムがこうした地震被害が発生しても、貯水機能と放流機能は保持さ

れることを確認することが必要である。コンクリートダムでは、万が一貯水が越流した場合でも、越流がダムの決壊に帰結する可能性は低いと考えられるが、フィルダムでは、貯水の越流がダムの決壊に直結する危険性が高いと考えられるので、越流の回避も重要なポイントになる。

これまで、ダムの耐震的配慮は基本的に設計段階において考慮されてきたが、明治、大正、昭和、平成と、それぞれの時代によって耐震基準類が異なっている。したがって、様々な時代に建設された既設ダムに関しては、地震工学、防災工学の進展に合わせて最新の技術レベルを踏まえて耐震診断を行うことが必要である。近年では、都市化の進展、都市域の拡大に伴い、ダム地点が都市域に隣接するようになるケースも見られるようになってきているので、都市域に隣接するダム地点に関して、大地震によってダムが重大な構造的損傷を受けた場合でも、人的被害や二次災害の派生がないように、平素から地震防災性能の向上させておくことが大切である。

なお、アーチダム、コンクリート重力式ダム、ロックフィルダムの代表的ダム形式について、地震動部会から提供された対象ダム地点の想定地震動を用い、安全性を照査してみた。

解析モデルは、ダム - 基礎岩盤 - 貯水池連成を考慮した三次元解析モデルとした。その結果堤体に引張り応力が生じるものの、その値は小さく、堤体天端の中央部に限られていた。さらに発生は瞬間的であるため、天端中央部の堤体表面の一部に微細なクラックが発生することはあっても、ダムの耐震性能は十分に保持されるものと考えられる。このように良質な岩盤の上に建設されているダムに関しては、高い耐震性を有しているが、基礎地盤が軟質なダムに関しては、地震動の増幅の影響、長周期成分の影響が大きくなるので耐震性照査の際に留意することが必要である。

#### **提言 15 構造物の現状調査と補強の優先度**

既設構造物の耐震性能照査に当たっては、対象構造物の現状調査を精度良く行い、その状態を把握しておくのがよい。既設構造物は建設後経過した時間や荷重・環境作用の変化等によって劣化や変状を生じている場合もある。そのような構造物の耐震性を設計時の強度に基づいて照査することは好ましくない。したがって既設構造物では現状調査を実施するのがよい。

また、道路施設など数の多い構造物の耐震対策に当たっては、構造物の重要度、地震リスク等に基づいて、施設の優先度を決定することが望ましい。しかし、優先度の設定方法については十分な研究がなされているとはいえず、一般に認められる方法を検討すべきである。

既設構造物の耐震性能照査にあたっては、すでに5. で記述したように構造物を新設する場合にはあまり考慮しなくてもよい構造物の現状の強度あるいは変状等の有無等を知ることが基本となる。すなわち耐震性能照査の対象となる構造物はすでに存在しており、建設されてかなりの年数を経過しているのが一般である。したがって、強度等は建設時あるいは設計で期待した値とは異なっている可能性もある。さらに変状等を生じている可能性もある。しかし、マイナス面ばかりでなく、強度が設計値より向上している場合もあり、現状を把握することにより、効果的かつ経済的な耐震補強が出来る可能性もある。したがって、現状調査はできうる限り実施するのがよい。

また、耐震補強は予算も限られていることから、優先度を定めて順次耐震対策を進めていくことが現実的である。優先順位に関係する要因としては、構造物の重要度、保有耐震性、残存供用期間、補強の容易さ、補強効果、地点の地震危険度、といった様々なものが考えられ、これらを総合的に反映して優先順位を定めることが好ましい。そのひとつとして上記要因を定量化して評価する地震リスクに基づく方法があるが、まだ研究途上にあり今後のさらなる研究が望まれる。

## 地震防災分野における技術開発、情報共有および教育について

### 提言 16 地震防災の技術開発の促進

急変する都市において巨大地震に対する劇的減災を実現する地震防災技術は、国民の多くが強く期待する技術である。地震防災の技術開発を推進するために、地震防災に関わる学会の連携による組織化と技術の普及の場となる地域防災システムの構築が必要である。

阪神大震災以降、地震工学は急速な発展を遂げ、また、他の先端技術の進歩とともに、実効ある技術を開発する下地は十分できている。事実、地震防災に関わるさまざまな分野で先端的な研究開発が実を結びつつある。この下地や成果を最大限活用するためには、地震防災技術研究のさらなる活性化が必要であり、それには地震防災の各分野を有機的に連携させることが望ましい。

連携の具体的な形として、地震防災に関わるさまざまな学会の連携が望まれる。分野を横断した適切な研究開発組織を作るべきである。このような組織が、従来よりも格段に総合的かつ包括的な減災を実現することが期待できる。

研究開発された防災技術の普及も重要な課題となる。巨大地震の発生は極低頻度であるため、優れた技術であっても実用はややもすると後回しになるからである。普及の主体として、地域防災システムの構築が望まれる。これは地域の拠点となる大学を中心に行政等が集結し、常時の地震防災に関わる人材育成と発災時の対応の技術支援を目的と



した組織である。

都市や社会の地震安全性を高めるためには、地震防災技術のたゆまぬ研究開発の他、十年を越える長期的視野に立った研究支援が必要である。我が国では地震予知に関する長期研究プロジェクトが進められてきたが、長期的研究ならではの直接・間接成果があげられている。研究者の自助努力を呼びかけるとともに、このような成果をもたらす地震防災技術に対する国家的支援を強く期待する。

### **提言 17 災害情報の共有の促進**

巨大地震の減災対策を進めるために防災関連機関・団体の情報共有は最重要課題の一つである。しかし、容易な課題ではなく、社会的・技術的問題点が多数あることも事実である。見出された問題点を解決し、情報共有を促進すべきである。

自然災害のためには多岐他用な災害情報の共有が重要であり、特に巨大地震災害では、広域で多数の機関や団体間の協調が必要とされる。情報共有のシステムを用意することが焦眉の課題である。しかし、諸機関や諸団体内で使われている情報システムはその組織のために最適な形に作られているのが常であり、プライバシー保護や情報セキュリティ確保も要求されることから、緊急時といえどもシステム間で情報を交換・共有することは容易でない。

情報共有の困難さを綿密に検討し、技術的問題点が抽出されている。そもそも、共有すべき防災情報が曖昧である。また、情報共有システムの導入や見直し・改修は膨大な作業が必要である。情報システムが陳腐化する危険性が常にあり、維持更新は決して意簡単ではない。さらに、実効的運用にはシステムのユーザの質や量も問題となる。このような技術的問題点以外に、情報共有には社会的問題点もあり、防災情報の種類や複数の機関・団体での運用等、さまざまな視点から問題点が抽出されている。

阪神・淡路大震災以降、情報共有の重要性は痛感され、さまざまな取り組みがされてきた。しかし、期待されたほどの成果があげられていないことが現状である。情報共有の実現にはという掛け声で終わるのではなく、情報共有を促進するためには、抽出された問題点を解決することが重要である。また、抽出された技術的・社会的問題点は、実際に情報共有のシステムを構築したり整備したりするためのチェックリストとして有効に活用されるべきである。

### **提言 18 幼児・児童からの防災教育**

家庭や教育現場では、発達段階や生活環境に合わせた防災教育プログラムを用いて、幼児期から防災教育を始め、災害から自らの生命や生活を守る力を養う。特に幼稚園・保育園は、幼児に対する防災教育を行うだけでなく、地域コミュニティとの連携をとりながら保護者や社会への防災教育の発信基地となるべきである。

適切な防災行動を選択できる人材を育成するためには、正しい災害像の把握と判断力の強化が有効であり、これらを含めた防災教育が、家庭や教育現場で、そして発達段階や生活環境に合わせて展開されねばならない。特に、建造物の倒壊によって失われる人命を救うためには、耐震化に対する理解と取り組みを促進することが重要である。この視点に立てば、今まで見過ごされてきた幼児からの防災教育は重要である。

幼児たちの防災教育には、幼稚園・保育園だけでなく家庭や社会の協力が不可欠である。それによって家庭・地域における防災意識の高揚も図ることができる。また、幼稚園・保育園における毎月の防災・防火・防犯訓練を、地域コミュニティと共同で行えるようなプログラムの開発も必要である。

幼児・児童を中心とした防災という共通認識を地域社会が育めば、子ども自らが自分の命を守ることに、そして園や学校での役割、家庭での役割、社会における役割分担を考える土壌とすることができる。

### 3) 建築構造物

#### 建築物の包括的応答予測と損傷低減対策

提言1 地震動の構造物への荷重効果を的確にとらえるためには、既往の応答スペクトル（加速度スペクトル、速度スペクトル、変位スペクトル）に加えて、エネルギースペクトルを用いることが有効である。

従来、簡便に建物の地震応答の目安をつける方法として応答スペクトルが用いられてきた。

一方、建物への入力エネルギー $E$ は構造骨組が吸収するエネルギー（運動エネルギーと弾性歪エネルギーの和である振動エネルギー $W_e$ 、減衰エネルギー $W_h$ 、塑性歪エネルギー $W_p$ の総和）と等しい量であり、その速度換算値（ $V_E = \sqrt{2E/M}$ ）と建物周期 $T$ の関係をエネルギースペクトルと定義している。建物の固有周期に相当する応答スペクトル値から建物の最大応答値が、エネルギースペクトル値からは建物への入力エネルギーすなわち建物が吸収するエネルギーが推定できる。

この速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを用いて超高層建物の耐震設計に用いられてきた標準波（以下標準地震波という）との比較で東海・東南海・南海地震における東京・横浜、名古屋、大阪の大都市圏において想定された長周期地震動の特徴を明らかにする。標準波は減衰定数 $h=5\%$ の速度応答スペクトル $S_V$ で概ね100cm/s、 $h=10\%$ のエネルギースペクトル $V_E$ で概ね150cm/sのレベルを確保している。一方、長周期地震動は特定の周期帯で大きなピークが現れるが、それ以外の周期帯では $S_V$ は標準波とほぼ同じ値を示し、 $V_E$ はそれをかなり上回った値を示す。従って、長周期地震動による建物の最大応答値は標準波と大きくは違わないが、累積値である建物への入力エネルギー量は格段に大きくなるのが予想される。標準波における速度応答スペクトル $S_V$ とエネルギースペクトル $V_E$ の対応を基準にして比較すると、入力エネルギーが標準波の2～4倍（ $V_E$ で1.5～2倍）程度に大きくなるのが長周期地震動の特徴であり、これまでの応答スペクトル $S_V$ に加えて、エネルギースペクトル $V_E$ による評価が構造物の損傷評価にとって有効になる。

提言2 地震時に構造物を崩壊に至らしめる要因として地震時の構造物の水平変位と自重がもたらす $P$ -効果の評価はかかすことができない。耐震設計における $P$ -効果の影響は建築規模に関わらず解明されなければならない。

建物自重（質量）の水平移動は同時に鉛直方向の移動を伴う。質量が鉛直下方に移動すると移動量に比例した重力による位置エネルギーが解放され、解放された位置エネルギーは構造物に入力する。これがエネルギーの釣合から見た $P$ -効果である。 $P$ -効果は、

振動解析モデルにおいて建物剛性に負剛性ばねを付加することによって考慮される。

弾性水平剛性が低い構造物では弾性応答においても  $P - \Delta$  効果による水平剛性の低下は無視できないが、我が国の建築物では通常弾性水平剛性に及ぼす影響は数%程度であり無視することによる誤差は小さい。

降伏耐力に達した層では降伏後の剛性は弾性剛性に比べて極めて小さくなるので、 $P - \Delta$  効果の影響を無視することが出来ない。塑性変形の進行に伴い一部の部材の劣化が生じると層の塑性剛性が低下し、これに  $P - \Delta$  効果による負剛性が加わると、全体として層の復元力特性の塑性勾配が負になる。層の復元力特性の勾配が負になると、応答変位が一方向に偏る傾向が現れる。応答変位が偏ると、同一の地震エネルギー入力に対して変位が増大し、これにより解放された位置エネルギーが構造物に投入し構造物の損傷を促進する。部材の損傷により復元力が低下すると更に応答変位の増加を導き、進行性崩壊に至る可能性がある。

超高層建築では、部材の劣化が生じなくても  $P - \Delta$  効果により降伏した層の塑性後の復元力特性の勾配が負になる可能性がある。この場合十分な塑性変形能力を有する部材で構成された骨組であっても、吸収可能なエネルギー量が  $P - \Delta$  効果により限界付けられ、このエネルギー量を上回るような地震のエネルギー入力に耐えることが出来ない。

崩壊に至らない骨組においても  $P - \Delta$  効果は応答変位に影響を及ぼす。 $P - \Delta$  効果を考慮した解析では、僅かな解析条件の違いにより応答変位が大きく変動する場合があるので、数値解析による検討と併せて包括的応答予測による検討を行う必要がある。

弾性挙動する柔要素と弾塑性挙動する剛要素とから成る構造形式（柔剛混合構造）の場合、柔要素の弾性剛性により  $P - \Delta$  効果による負剛性が打ち消されるので、 $P - \Delta$  効果を考慮する必要がない。ただし、柔要素が塑性化する領域に至ると非柔剛混合構造となり、 $P - \Delta$  効果を考慮しなければならない。柔剛混合構造の成立は入力の大さに支配される。

提言 3 地震時における構造物の挙動は、地震が構造物にもたらすエネルギーと構造物の吸収エネルギーの釣合に着目することにより大局的包絡的に把握できる。

熱力学の 2 大法則は宇宙の物理現象を最も包括的にとらえた基本原理である。耐震設計におけるいわゆるエネルギー法はこの基本原理に基づくものである。第 1 法則は、エネルギー不変の法則である。これに相当するものは「地震が構造物に与えるエネルギー（地震入力エネルギー）は構造物が吸収するエネルギーの総量に等しい」と云うエネルギーの釣合である。第 2 法則はエントロピー増大則である。熱力学的には全ての事象は完全に可逆的なものでは有り得ない、このことがエントロピーと云う状態量の増大をもたらす。これに相当するものは「地震により構造物は何らかの損傷を受ける」と云う事である。構造物が完全に弾性体であれば構造物にエネルギーが流入し、時を経て流出するのみで損傷は生じない。しかし、いかなる構造物も完全に弾性ではあり得ず何らかの非線形性を持つ。こ

れが構造物の損傷につながる。非線形の具体的な姿が塑性変形である。弾性変形が可逆性を代表し、塑性変形が非可逆性を代表する。地震動の下での構造物の運動方程式は構造物が受ける力と地震力の釣合式である。この釣合の両辺に構造物の変位増分を乗じて、地震の継続時間で積分すればエネルギーの釣合式が得られる。これは厳密な釣合式であると同時に積分の結果であることから、運動方程式が与える情報量の積分値でもある。更に、地震入力エネルギーの総量（総入力エネルギー）は極めて安定した量であることが、エネルギーの釣合に着目した耐震設計法の有効性を裏付けている。すなわち「地震により建物に投入されるエネルギーの総量は主として建物の総重量と1次固有周期に支配され、その他の設計変数によらない一定値であるとみなせる」。総入力エネルギーは主として構造要素の塑性歪エネルギーの形で吸収される。これは構造物の損傷とも呼ぶことができる。つまり、総損傷は設計法によらない一定値である。しかし、設計法によって損傷の分布形態は様々であり、損傷を一箇所に集中させることも、建物に一樣に分散させることも可能である。従って、耐震設計の本質は、総損傷一定の条件下で損傷分布を的確に予測することであると云える。構造各部の損傷は構造各部の累積塑性変形と直接結びつけることができる。一方、設計で重要なもう一つの量として最大変形ないし最大塑性変形が挙げられる。最大塑性変形と累積塑性変形との関係は構造形式毎に運動方程式に基づく時刻歴応答解析により求めることができる。

時刻歴応答解析手法は現代では十分に普及し、設計支援に大きな役割を果たしている。しかし、入力の誤りや、入力データの不適切等、解析結果は無条件で正しいことが保証されている訳ではない。設計者には解析結果の妥当性を判断する能力が必要とされる。この判断能力を涵養するのがエネルギーの釣合に基づく耐震設計法の体系である。この体系と時刻歴解析結果が与える特殊解を合せ用いることによって、設計を客観的なものとすることができる。

耐震設計における検討項目は次の諸点に要約される。

- 1) 地震入力エネルギーは適切なものであるか。
- 2) 損傷分布は妥当なものであるか。
- 3) 構造各部の累積塑性変形と最大変形との対応は妥当なものであるか。

エネルギーの釣合はその厳密性の故に耐震設計における論理構築を行う際の基本骨格を提供する。時刻歴応答解析の結果、震災経験は、この論理体系を支える事実関係として基本骨格の上に蓄積することができる。

提言4 耐震設計上の構造分類として、耐震構造、免震構造、制振構造は本質的であり、その概念の明確化は耐震設計法の発展につながる。

我国の耐震設計は震度法として1923年の関東大地震直後に発足した。震度法は建物の自重に一定の震度を乗じたものを建物の地震に対する抵抗力とするものである。その後、建

物の地震に対する抵抗力としては力のみならず、変形能力が必要であることが明らかにされた。力に変形を乗じたものはエネルギーであり、地震の建物への荷重効果はエネルギーであることが明らかになったことになる。1981年の建築基準法の改正により、震度法に加えて、新たに変形能力の要求事項を入れた保有耐力設計法が導入された。変形能力は塑性変形能力である。耐震設計の合理化は一方では耐震設計法の複雑化をもたらした。建物の設計にとって基本的な重力や風力に対して建物は原則的に弾性範囲に留まる様な設計がなされる。一方、地震によるエネルギー入力に対して耐える為には建物を弾性範囲に留めることは無理であり、建物の塑性域の挙動の本格的研究がなされたが、建物の塑性変形能力を的確に評価することは容易ではないことも明らかになってきた。こうした状況下で、地震の猛威から根本的に免れる免震構造の追求もなされ続けたが、遂に、積層ゴムアイソレータの開発により1980年以降、我国においても免震構造開発が本格化した。また、免震構造の発展型とも云える、より高性能の耐震設計法の開発が制振構造の名の下に追求されることになった。折しも、1995年に襲来した兵庫県南部地震は発展段階にある我国の耐震設計に貴重な教訓をもたらすことになった。新耐震設計法による建物は、概ね倒壊、崩壊を免れたが、建物内部の損傷が大きく再使用に耐えないものも多く存在した。一方、既に存在していた2棟の免震構造は所期の性能を発揮した。兵庫県南部地震以降、建物の骨組を耐震的にする耐震構造、免震層に地震エネルギーを集中させ上部構造たる建物を地震入力エネルギーから解放する免震構造、建物骨組を弾性に留め付加的なダンパーで地震入力エネルギーを吸収させる制振構造と云った耐震構造の類型化が一般化した。この類型化は今後の耐震設計法の発展にとって重要であり、その類型化の意義を明確にする必要がある。

耐震設計において建築物は一般に常に弾性範囲に留まる柔要素と弾塑性挙動する剛要素からなる混合構造とみなすことができる。剛要素のエネルギー吸収効率を高める為に剛要素の弾性剛性は高い程好ましい。このような混合構造は柔剛混合構造と呼ぶことができる。柔剛混合構造の成立条件は柔要素が発揮する抵抗力が剛要素のそれを上回れば良い。通常の柔要素が存在しない構造は非柔剛混合構造である。弾性体においては損傷集中は起こりにくい。また、地震時の横たわみと重力がもたらす負のバネ効果である $P$ -効果は弾性体の正のバネ効果で相殺され存在しない。また、弾性体では地震が過ぎた後に残留変形が生じない。剛要素は地震入力エネルギーの殆んど全てを吸収する。柔剛混合構造では構造骨組を剛要素としない。従って、構造骨組は損傷を免れる。また、柔要素の存在で $P$ -効果から免れ、残留変形も生ぜず、最大変形も極力抑えられる。柔剛混合構造は損傷分布に関して2種類に分かれる。損傷集中型と損傷分散型である。免震構造は損傷集中型であり、免震層で殆んど全ての地震入力エネルギーが吸収される。積層ゴムアイソレータが柔要素であり、ダンパー類が剛要素である。制振構造は損傷分散型であり、構造骨組が柔要素を構成し、各階に適切に配置されたダンパー要素が剛要素となる。混合構造におけるエネルギー吸収効率の高さは剛要素における累積塑性変形の最大塑性変形の比率で表現することができる。非柔剛混合構造に比べ柔剛混合構造のそれは数倍に達する。以上、耐震構

造の類型化は次のようにまとめられる。

非柔剛混合構造（狭い意味の耐震構造）

柔剛混合構造：損傷集中型（免震構造）、損傷分散型（制振構造）

地震動予測はそのばらつき迄考慮すると極めて難しい。柔要素が塑性化する事態も容易に想像でき、そうなれば、柔剛混合構造も通常の耐震構造に戻る。この意味で耐震構造の究明も本質的に重要である。

提言 5 既存建物の耐震性の向上をはかる上で、耐震構造、免震構造、制振構造は基本的選択肢を提供する。

提言 4 でその概念の明確化を試みた耐震構造、免震構造、制振構造であるが、これらの構造形式が既存建物の補強に有用であることは当然である。

耐震補強は、主として剛要素の付加と考えられ、柱や梁などの断面増大やブレース、耐震壁増設によるものがあげられる。これにより躯体耐力と共に建物剛性も増大することから、建物周期の短周期化の傾向が強くなることを念頭におき、建物への荷重効果であるエネルギー（＝力×変形）のうち、特に力とのバランスを図ることが重要である。このことから一般的には低層建物に適する補強方法といえ、超高層建物はもちろん中高層建物ではその周期変化に着目する必要がある。一方、柱や梁鉄骨部材の幅厚比改善やコンクリート系建物の壁スリットの設置や炭素繊維巻きなどの靱性向上（変形能力改善）も耐震補強ということが多いが、本解説最後に述べるように、それが地震エネルギー消費の視点からどのような効果をもたらし、また当該効果に耐えうる改善ができていのかどうかを今一度明らかにすることが大切である。

損傷分散型の柔剛混合構造という観点から制振補強をみると、柔要素が既存建物に相当し、エネルギー吸収効果を発揮する剛要素が補強付加された制振部材になると考えると理解しやすい。ただし、提言 4 にもあるように、当該柔要素は塑性化するか否かを見極める必要がある。また、この補強を選択するにあたっては一般論として重要な平面上、立面上のバランスと建築的機能との整合をとるということに加え、補強構面に地震力が集中した際の柱軸力増大に対して既存柱が安全かどうか、あるいは補強構面の側柱の鉛直伸縮変形が大きくて制振部材の効きが十分に期待できないようなことがないか等について確認する必要がある。その点、初期の超高層建物においてしばしば採用されていた鉄骨ブレースを座屈拘束ブレースや摩擦ダンパー、粘（弾）性ダンパーなどに交換するなどの補強は、かなり効果的な側面があると認識できる。

損傷集中型の柔剛混合構造である免震化による建物補強は、一般には建物のいずれかの階に免震層を追加することで実現される。元々周期の長い超高層建物を除き、また補強費に比較的余裕があれば、耐震補強や制振補強で行き詰ったときの解決策として免震化が有用になる場合が多いといえる。制振補強と同様に追加部材と既存接続部の構造検討が重要

である。

以上、既存建物に耐震性の向上が必要とされた場合、各種の外的内的建築条件にあわせて耐震構造、免震構造、制振構造は何らかの解答を受けける可能性が高い。重要なことは、中途半端な補強は避け、またエネルギー不変の法則から「何と何をつり合わせるか」を明確に意識した設計を行うことであるといえる。

#### 非線形相互作用

提言6 相互作用が建物応答に与える影響は、中高層建物では、地震動特性・地盤の非線形特性・地盤 - 建物連成系の振動特性が関係し、個々の建物によって影響の現れ方が異なる。超高層建物では、特に深い埋め込み基礎や大規模な群杭基礎を有する場合に、基礎入力動の性状が建物応答に大きな影響を与える。したがって、地盤の非線形挙動を含めた動的特性と、相互作用を適切に考慮して建物の応答解析を行う必要がある。

地震時における建物応答は、地盤 - 建物連成による動的地盤ばね効果によって固有周期の長周期化と地下逸散減衰の増大 (Inertial interaction) および、基礎が地盤を拘束することにより自由地盤と異なる地震動が入力する (Kinematic interaction) ことによる影響を受け、超高層建物などの時刻歴応答解析で用いられている基礎固定モデルによる建物応答とは違ったものとなる。さらに、地盤が軟弱な場合には、建物応答は非線形相互作用の影響により複雑となる。そのため、上述の影響に加えて周辺地盤のせん断ひずみの増大や液状化による有効応力の低下にともなう非線形性 (Site nonlinearity) と、地下側壁や杭と近傍地盤との間で生じる局所的な非線形性 (Local nonlinearity) を的確に取り入れる必要がある。

中高層建物では、地震動特性、地盤の非線形特性、地盤 - 建物連成系の振動特性の関係により、相互作用効果の現れ方が個々の建物によって異なる。非線形相互作用を考慮した簡便な解析モデルであるスエイ・ロッキングモデル (SR モデル) を用いた集合住宅の張間方向のように、固有周期が SR モデルによって長くなる場合には地盤との連成効果により減衰も大きくなり、基礎固定モデルに比べて建物応答が大きく変化する。

超高層建物では、非線形相互作用による基礎入力動の変化が建物応答に大きな影響を与える。特に、深い埋め込み基礎や大規模な群杭基礎は地盤震動を拘束する効果が大きく、自由地盤の応答波をそのまま入力する場合に比べ、建物応答は小さくなる傾向を示す。一方、埋め込みが深い場合には入力動の回転成分が励起されるため、回転動入力の影響が無視できない場合もある。

基礎入力動は地盤の非線形特性の影響を大きく受けるため、軟弱な地盤や液状化の可能性のある地盤の応答を精度良く評価することが必要となる。また、このような地盤では杭基礎は地盤から強制変形を受けるため、上部構造の慣性力により杭頭部で大きくなる杭応力に加えて、地中部で地盤の応答変位分布が急変する層境界で発生する杭応力も適切に評



価して、杭基礎の耐震設計に反映する必要がある。

提言 7 大振幅でかつ繰り返し回数が多い長周期地震動が、地盤の非線形応答や、杭および上部構造の応答に与える影響は大きい。巨大地震に対する地盤、建物の応答評価をより精度良く行うためには、繰り返し回数の多い大ひずみ域での土の非線形挙動と、地盤と基礎との接触境界で発生する幾何学的な非線形相互作用（基礎浮上りやすべり等）を取り入れた真の実効入力動の解明が早急に望まれる。

建物応答をより精度良く評価するためには、表層地盤の非線形特性および地盤と基礎との間で生じる非線形相互作用を如何に適切にモデル化するかが重要となる。

大振幅で繰り返し回数の多い地震入力に対しては、液状化を含む強非線形時の土の要素試験データを蓄積し、その構成則の検証が必要となる。また、地震動の位相、継続時間が非線形相互作用に与える影響を把握し、建物の耐震評価を行う必要がある。

非線形相互作用の解析技術を高度化するためには、基礎浮上り、すべり等の基礎と地盤との接触境界で発生する幾何学的な非線形特性を解明する必要がある。最近の地震被害で見られる大加速度入力の割に建物被害が小さいという実状に、このような基礎周辺地盤の局所的な非線形性や、基礎の損傷による建物への実効入力動の低減が影響していることも考えられるため、実験、解析の両面からの研究の推進が必要である。

上記の課題を解決し応答解析モデルの高度化を行うためには、地盤との連成を考慮した実大建物モデルを用いた大振幅入力の振動実験（大型振動台実験、発破振動を利用した実験など）や、自由地盤系・周辺地盤系・近傍地盤 - 基礎 - 上部構造系の高密度な地震観測の着実な実施が必要である。

## 超高層建物

提言 8 長周期地震動により超高層建物に入力するエネルギーは、これまでの設計で想定していたエネルギーを大幅に上回る可能性があり、幾つかの地点においては特定の周期帯で極めて大きな地震入力予測されている。現在の耐震技術に基づき慎重な設計が為された建物については、その固有周期が極めて大きな入力予測される特定の周期帯に属する場合を除いて、耐震安全性が確保されると考えられる。現在の耐震設計で用いられている架構の塑性変形能力を確保するための条件を満足していない建物、および極めて大きな入力予測される特定の周期帯に属する建物については、過大な損傷を生じる可能性がある。

最大級の地震動に対して構造物は塑性エネルギー吸収により抵抗するので、入力地震動の大きさをエネルギー入力の速度換算値  $v_E$  を尺度として評価する。

超高層建物の設計で標準的に用いられている地震波（標準波）の場合、安全性の検討を行うレベル 2 地震波（通常地動の最大速度が 50cm/s となるように観測波を拡大）入力時の  $V_E$  は、周期 3 秒以下で 200cm/s 程度、4 秒以上で 100cm/s 程度である。

一方、現在予測されている長周期地震動の  $V_E$  の大きさは概ね 200cm/s ~ 300cm/s 程度であり、長周期地震動に対する構造物の安全性を検討する際のエネルギー入力  $V_E$  の大きさとして 300cm/s がひとつの目安になる。ただし、幾つかの地点においては、特定の周期帯で 400cm/s 程度またはそれ以上という極めて大きな  $V_E$  となる地震動が予測されている。

構造物に入力するエネルギーは、エネルギーの速度換算値の 2 乗に比例するので、長周期地震動により超高層建物に入力するエネルギーは標準波により入力するエネルギーを大幅に上回る可能性がある。標準波レベル 2 地震動によるエネルギー入力に対する長周期地震動によるエネルギー入力の比（以下、エネルギー入力比）は、周期 3 秒以下で 2、4 秒以上で 4 程度であり、極めて  $V_E$  が大きな値となる特定の周期帯でそれぞれ 4 以上、16 以上である。

エネルギー入力比から判断すると既存超高層建物の耐震安全性は、次のようであると予測される。

#### 1) $V_E$ が 300cm/s 程度の一般的なレベルの長周期地震動が入力する場合

周期 3 秒以下の建物ではエネルギー入力比が 2 程度であるので、現在の耐震技術に基づき設計し十分なエネルギー吸収能力を有する架構であれば耐震安全性が確保できると予測される。

周期 4 秒以上の建物では、標準波の周期特性を考慮し応答に対して十分な余裕を有するように設計せん断力係数を設定し、かつ骨組が十分なエネルギー吸収能力を有するように設計している場合は、周期 3 秒以下の建物と同様に耐震安全性が確保できると予測される。ただし設計時の想定を超える層間変位による外装材の破損等の問題あるいは残留変形が生じる可能性がある。

初期の超高層建築では現在の設計で用いられている架構の変形能力を確保するための条件（鋼構造部材板要素の幅厚比、梁の横補剛、梁端仕口強度の確保等）を満足していない場合があり、これらの建物では過大な損傷が生じる可能性がある。また、周期 4 秒以上の建物で、標準波による応答に対して十分余裕のある設計を行っていない場合も、同様に過大な損傷が生じる可能性がある。

#### 2) 特定の周期帯で $V_E$ が 400cm/s 程度またはそれ以上という極めて大きな地震動が入力する場合

エネルギー入力比が、周期 3 秒以下で 4 以上、4 秒以上で 16 以上である。設計時で想定した量を大幅に上回るエネルギーが入力するため、重大な損傷を生じる可能性がある。極めて大きな地震動入力予測される特定の周期帯に属する建物については、予測される入力の大きさと構造物の保有する耐震性能について特に慎重な検討が必要である。

提言 9 建物の構造特性は個別性が強く降伏耐力に達した後の挙動については架構方式による違いが大きいことから、既存超高層建物についてそれぞれの構造特性に適した振動解析モデルを用いて長周期地震動を受ける場合の耐震性能を検討し、耐震性向上が必要と判断される場合は適切な補強を行うことが望ましい。

1960年代より現在に至るまで多数の超高層建築が建設されている。建設年代により、構造形式、部材の構成、設計用入力地震動、解析手法等に特徴が見られるが、同時代の建物でもそれぞれ個性があり、構造性能も多様であると考えられる。

長周期地震動により超高層建物に入力するエネルギーは、これまでの設計で用いている地震動により入力するエネルギーを大幅に上回る可能性があることから、個々の建物について安全性の検討を行うことが望ましい。

基本的に全ての既存超高層建物が検討の対象であるが、過大な損傷を生じる可能性の点から以下の建物について早急な検討が必要である。

- 1) 極めて大きな入力予測される特定の周期帯に属する建物
- 2) 現在の耐震設計で用いられている架構の変形能力を確保するための条件を満足していない建物
- 3) 周期 3.5～4 秒以上の建物で、標準波による応答に対して十分余裕のある設計がなされていない建物

終局耐震性能の検討は、建物に入力するエネルギーと建物が保有するエネルギー吸収能力の比較により行われる。

入力するエネルギーは地震動により定まるが、地震動の予測には不確定な要因が避けられないことから変動幅を考慮しなければならない。

建物が保有するエネルギー吸収能力は動的モデルを用いた検討により評価されるもので、検討においては建物の構造特性に適したモデルを用いなければならない。信頼性の高い検討を行うためには、構造体を構成する各要素の崩壊に至るまでの復元力特性を実験に基づき設定することが望ましい。構造物の限界性能の検討を行う際、部材および接合部の復元力特性と崩壊条件の設定等において不確定な要因が避けられず、評価される終局耐震性についても変動幅を有するものと考えなければならない。

多くの既存建物の長周期地震動に対する耐震性能評価を通して、現行設計レベルの妥当性が検証される。

耐震性向上が必要と判断される建物については、適切な補強を行うことが望ましい。補強方法としては、耐震補強、制振補強、免震化による補強が考えられる。

提言 10 入力地震動は確定的なものではないので、予測される地震動についてその大きさおよびその周期特性について変動幅を考慮しなければならない。建物の崩壊を避けることが第一に重要なことであり、外乱の不確定性の下で建物の安全性を総合的に判断するためには、建物の終局耐震性を明らかにする必要がある。

予測される長周期地震動の大きさおよびその周期特性は、予測手法および種々の条件設定により変動する。予測精度の向上が望まれるが自然現象の予測には限界もある。

現在得られている予測地震波はサンプル波と位置付けられるもので、建設地点で予測されている地震波に対する応答結果に基づき建物の耐震性能を判断することは必ずしも適切でない。

耐震性能の検討に用いる地震動の設定においては、変動を考慮する必要がある。変動幅に関する情報が重要であり、検討用入力地震動は地震動予測精度および構造物の耐震性能評価方法を勘案の上、工学的判断に基づき設定されるべきものである。

エネルギー入力速度換算値  $V_E$  が 400cm/s 程度またはそれ以上になると予測される極めて大きな入力の可能性がある地域および周期帯の設定は極めて重要である。過大な損傷を生じる可能性があるため詳細な検討を必要とする建物の多くは、そのような地域の特定周期帯に属する建物であると考えられるからである。首都圏をはじめ多数の超高層建物が存在する地域にこのような周期帯が存在するか否かは、超高層建物の耐震性の検討に多大な影響を与える。

既存建物の耐震性の検討を行うために、検討用入力地震動についての情報を迅速に整理する必要がある。検討用入力地震動については、理学および工学の進歩に伴い常に見直されるべきものであり、継続的な研究が必要である。

超高層建物に安全上重大な問題が生じた場合の社会的影響が大きいので、建物の倒壊を避けることが最重要課題である。これまでの設計では、想定した外乱に対して許容する変形や塑性率を余裕のある値とすることによって、外乱の不確定性に対して安全性が確保されたと考えられていた。長周期地震動により超高層建物に入力するエネルギーはこれまでの設計で想定されていたエネルギーを大幅に上回る可能性があること、また、予測される地震動に対して変動幅を考慮する必要があることから、建物の安全性を総合的に判断するためには、建物の耐震安全余裕度を知る必要がある。終局耐震性を明らかにすることにより余裕度の評価が可能となる。

提言 11 終局耐震性を明らかにするためには、塑性変形が進行した状態における架構の挙動を評価できる振動解析モデルを用いなければならない。復元力特性は終局状態に至るまでの部材および接合部の挙動に基づき設定し、応答解析において  $P - \delta$  効果を考慮する。

通常の設計で用いられている振動解析モデルにおいては、提言 2 に述べる  $P$  - 効果が考慮されていない。このようなモデルを用いて解析を行うと、崩壊の要因が解析モデルにおいて考慮されていないので、どのように大きなエネルギー入力となる地震動を入力しても崩壊に至ることはない。終局性能を検討する上で、 $P$  - 効果の考慮が不可欠である。

標準波が数回続くような性質の長周期地震動が入力する場合を想定すると、応答最大変位は標準波の場合と同程度となる。従来の設計における耐震性能の判断は主に最大変位と塑性率に基づいている。塑性繰り返しによる部材および接合部の耐力の低下を考慮しないモデルに長周期地震動を入力した解析結果に対して、従来と同様な判断基準を適用すると、耐震性能について危険な判断を下す可能性がある。長周期地震動の下では骨組を構成する部材は数 10 回の塑性繰り返しを受ける場合があるので、解析モデルにおいて塑性繰り返しによる耐力低下を考慮する必要がある。

終局状態を検討するための振動解析モデルとしては、層レベルのモデルあるいは部材レベルのモデルが考えられるが、いずれの場合においても復元力特性は部材挙動に基づき設定されなければならない。復元力特性が根拠に基づくものでなければ、複雑なモデルをつくり解析量を増しても評価精度が向上するわけではない。

提言 1 2 長周期地震動の入力時に骨組を構成する部材は多数回の繰り返し荷重を受けるが、繰り返し数が部材および接合部の終局状態に及ぼす影響については不明な点が多い。多数の繰り返し荷重を受ける部材および接合部が終局状態に至る迄の挙動を解明するための研究が必要である。

振動解析モデルの基礎となるのが部材および接合部の崩壊に至るまでの弾塑性挙動である。部材および接合部の弾塑性挙動については多くの研究が行われており、特定の塑性変形能力を確保するための条件について設計用資料として整理されている。1995 年の阪神大震災の建物被害から、柱や梁などの構造部材に期待されている塑性変形能力を発揮する前に、柱・梁接合部が応力集中により延性破壊や脆性破壊を起こし、構造体の塑性変形能力に大きく影響することが明らかになった。このことから、柱・梁接合部の動的破壊実験が数多く実施され、直下地震による衝撃的な地動に対する塑性変形能力を確保するための対策が提示されている。

一方、地震時に各構造要素が繰り返し荷重を受ける場合においては、繰り返し荷重時の荷重変形関係の骨格曲線と一方向荷重時の荷重変形関係とが概ね対応することを前提として、地震時の部材挙動とエネルギー吸収能力を推定する手法が用いられている。長周期地震動入力時に各構造要素は多数回の塑性繰り返し荷重を受ける可能性があり、このような場合、繰り返し荷重曲線の骨格曲線における崩壊点は塑性繰り返しの影響を受けて低下し、一方向荷重時の荷重変形関係の崩壊点とは対応しない。塑性振幅と繰り返し数が崩壊点に及ぼす影響については現在不明な点が多い。長周期地震動を受ける建物の終局耐震性を明

らかにするためには、塑性繰り返し载荷を受ける部材および接合部の挙動と崩壊条件を定量的に明らかにするための研究が必要である。

既存超高層建物の終局耐震性の検討において信頼性の高い解析モデルを設定するためには、基本的な耐震要素の特性を実験に基づき定めることが望ましい。実験における载荷条件は、長周期地震動入力時に想定される状況に基づき定めなければならない。

部材および接合部の挙動と限界性能に関する設計資料を整備するためには、実験結果の蓄積が必要である。

## 中・高層建物

提言 13 既存建築物、特に 1981 年以前に建てられた建築物には耐震性が不十分なものが多い。耐震診断およびその結果に基づく耐震補強が急務である。耐震補強にあたっては、鉄筋コンクリート造のせん断補強筋や SRC 造での内蔵鉄骨等の構造詳細が、部材や層のせん断耐力や靱性等に大きく影響しているため、構造特性の評価にはそれらを十分考慮する必要がある。

建築物の耐震設計は、大地震による被害経験をもとに改正が行われ発展してきた。耐震設計法の変遷を眺めてみると、1923 年の関東大震災を契機に震度法と許容応力度計算が導入されている。1950 年の建築基準法の制定時に設計震度はそれまでの 0.1 から 0.2 に引き上げられている。その後、1963 年新潟地震、1968 年十勝沖地震、1978 年宮城県沖地震の被害経験などから幾度か建築基準法は改正されているが、1971 年には、RC 造のせん断補強筋規定の強化が行われている。1981 年には、中地震動（設計用震度 0.2）と大地震動（設計用震度 1.0）の 2 段階の検討を行う、いわゆる新耐震設計法が導入されている。1995 年兵庫県南部地震の被害経験から、1981 年以前に建てられた建築物では、大地震動に対する耐震性能が十分でないことが明らかになった。2000 年には性能規定化に伴い、限界耐力計算が導入されている。このような背景から、被害調査報告の多くが、建築物の耐震性能と設計時に準拠した基規準との間に強い相関があることを指摘している。

鉄筋コンクリート構造（RC 造）柱の帯筋間隔は現在、15cm 以下、柱頭、柱脚付近では 10cm 以下かつ帯筋比 0.2% 以上とされている。このように規定されたのは、先に述べたように 1971 年で、それまでは、帯筋間隔が 30cm 以下とされてきた。現在のものに比べ、柱部材のせん断耐力や靱性が劣っていることになる。また、帯筋のフックは 1971 年当時、90 度フックで良いとされていた。しかし、1981 年には建設省や東京都の設計指導や発注仕様で 135 度フックに改定されている。阪神大震災では、せん断破壊した柱では 90 度フックや、フックの余長が短いものが見られたと報告されている。

鉄骨鉄筋コンクリート造（SRC 造）では、内蔵鉄骨の形式が変化してきており、部材の耐力や靱性が向上してきている。1958 年に建築学会から SRC 規準が出版されたが、そのこ

ろまでの内蔵鉄骨は、柱は格子形、梁はラチス形のもっぱら非充腹形であった。その後、応力の大きな箇所では充腹形が使われるようになってきた。そして、新耐震設計法が導入された 1981 年以降では、ほとんどが充腹形になってきている。

既存の RC 造や SRC 造の部材やそれらを含む層のエネルギー吸収能力や復元力特性については、安易に近年の基規準などを参照せず、それらの構造詳細に基づき、文献などを参考に適切に評価する必要がある。柱の軸力比やスリットなどもエネルギー吸収能力などを左右するので、留意する必要がある。

提言 1 4 ピロティ建物のピロティ階や、中間階で強度や剛性が急変している建物の中間階では、損傷が集中する可能性が高いため、耐震設計や耐震補強設計においては、その点に充分留意する必要がある。

他の階に比して、耐力壁の類が極めて少ない階をピロティ階と呼ぶ。1 階に駐車場や店舗を有する集合住宅で、1 階をピロティ階とする例が多い。1995 年の阪神淡路大震災では、ピロティ階を有する建物が通常の建物に比べ、大破、倒壊に至った比率が、2 倍程度に達した。これは、地震時の地震エネルギーがピロティ階に集中することで、建物の変形がピロティ階に集中したためと考えられている。同様のことは、SRC 柱から RC 柱に変化するなど強度や剛性が急に低下する中間階でも生じた。

このような被害の経験を踏まえ、ピロティ階のように他の階に比して耐力・剛性等が著しく低い構造骨組は、極力さけることが望ましいが、やむを得ない場合にはその階に十分な粘り強さ（エネルギー吸収能力）を与える必要がある。現在もなお特定階の耐力・剛性が低い既存建物が補強されずに残されている可能性があるため、それらに対する早急の対策が必要である。

#### 免震建物

提言 1 5 平均的な特性を有する免震建物は、海溝型の巨大地震時にも免震効果が得られ安全であるが、厚い堆積地盤上で長周期成分の大きな地震動が予想される地域や大規模地震の震源に近い地域で、免震層の変形余裕やダンパー量が少ない場合には、免震層の水平クリアランスを超える応答となる可能性もある。

免震建物は地震動の主要な周期よりも構造システムを長周期化することで、応答加速度を低減させようとする構造である。今までに解析や実験によりその有効性が確認され、実免震建物が多く建設されてきている。これらの免震建物では地震観測が行われているものも多く、1995 年の兵庫県南部地震、さらに 2003 年十勝沖地震を含む最近の大きな地震においても免震効果が実証されている。

ただし、東海・東南海地震、南海地震などの海溝型の巨大地震時における関東、濃尾、大阪などの大規模堆積平野における地震動についての最近の解析的評価結果を基に、代表的な免震建物モデルの地震応答評価を実施した結果によると、免震層の応答変形が過大になる可能性も確認された。それぞれの平野では、固有の地震動増幅特性があり、ある一定の周期成分が長時間励起される場合がある。この周期成分と免震建物の固有周期とが一致すると、数十センチメートル以上の大きな振幅が3～5分間以上の長時間継続する可能性がある。また、大規模地震の震源域付近では、地盤による長周期成分の増幅がそれほど大きくない場合でも、地震動の振幅自体が大きいため、免震建物の最大応答値が大きくなることも考えられる。

免震建物がわが国に実現してから20年以上経つが、この間に、想定する地震動の大きさや設計上の考え方も変化してきている。次第に免震建物が長周期化されるとともに、上部構造の設計用地震力レベルが低くなり、逆に免震層の水平方向クリアランスは大きくなってきた。特に免震層のクリアランスが40～50センチメートル以下で、設置されているダンパー量が少ない場合には、上記の巨大地震時における地震動の周期と免震周期とが一致する場合に、免震層の水平クリアランスを超え、免震層の擁壁に衝突する可能性があり、注意が必要である。

提言16 免震部材については、最大変形能力の評価とともに、実際の設置状況に即した総エネルギー吸収能力も評価すべきである。

免震部材の変形特性の評価は、設計で想定する地震動が入力された場合の免震建物の応答を推定するのに必要であるが、同時に、最大変形能力を評価して極限時挙動を把握しておくことも重要である。さらに、巨大海溝型地震による継続時間の長い長周期成分の卓越した地震動が作用する場合には、免震部材の繰返し変形数が多くなるため、地震応答時間内における特性変化に関する評価をしておくことも必要になる。

特に、運動エネルギーを熱エネルギーに変換するダンパーについては、ダンパー素材の破壊過程や温度上昇に伴う変形特性の変化についても十分に検討しておくべきである。この際、ダンパーにより熱に変換されたものがどのようにダンパー内に蓄えられ、周囲に伝達していくのか、それによりダンパーの特性がどのように変化し、免震建物の応答にどのような影響を及ぼすのかを検討しておく必要がある。即ち、ダンパーおよび周辺の伝熱特性、熱容量、比熱などにに基づき、地震時のダンパーの温度上昇とそれに伴う変形特性を求め、エネルギー吸収能力や建物の応答特性評価を行うことが必要である。

なお、このようなエネルギー吸収能力の評価は実際の設置状況に即したものとすべきであり、試験機にて動的載荷試験を行う場合には試験体周辺の伝熱環境を実際のものと同じにしておく必要がある。実際のダンパー設置面が鉄筋コンクリートであるのに、鋼製試験機に直接鋼製治具を介して固定した状況での試験では意味がないことに注意する必要がある。



る。場合によっては伝熱解析なども援用して評価する工夫も考えられる。

提言 17 長周期地震動に対して、免震層の変形余裕あるいはエネルギー吸収能力の余裕が少ない場合には、ダンパーを増設することにより免震効果を大きく減じずにエネルギー吸収能力を高めることが可能である。

長周期地震動（巨大海溝型地震による継続時間の長い長周期成分の卓越した地震動）に対して、既存の免震建物の水平方向クリアランスが小さい場合、あるいはダンパーのエネルギー吸収能力が十分でない場合などには、一般には免震層にダンパーを増設することが有効である。ダンパーを増設することにより、免震層の応答変形を低減することが可能であり、免震層のクリアランス以下の変形に抑えることができる。また、これによりダンパー全体としてのエネルギー吸収能力が高められ、上部構造の応答せん断力も低減できる可能性がある。ただし、粘性系のダンパーと鋼材などを用いた履歴系ダンパーとでは、応答抑制効果の周期特性が異なる。免震層の変形低減には両者ともに効果があるが、履歴系ダンパーの場合には、地震動の周期特性によっては上部構造の応答加速度がダンパー増設前に比べてやや大きくなる場合もあり得る。

#### 大型石油タンク

提言 18 合理的根拠に基づき地震動を想定し、スロッシング時の浮屋根の強度を検討する事が望ましい。また、大型石油タンクは主として軸対称構造であるため、水平 2 方向の地震入力がある場合、最も不利な方向の現象が必ず発生する。従って設計において、この効果を考慮する事が望ましい。

2003 年 9 月 26 日発生の上勝沖地震は、震源より遠く離れた地域においても、石油タンクのスロッシングにより巨大地震、長周期地震動が多大な被害を及ぼす事を印象付けた。またスロッシングに対する十分な対策がなされていなかったとの反省もなされた。こうした被害は 1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震でも見られ、スロッシング現象の予測技術も整備されつつあったが、近年の状況の特徴として、強震観測体制の整備により精度の良い記録が各地で得られるようになった事があげられる。

自治省告示では、石油タンクのスロッシング波高算定のため全国一律に約 100kine の速度応答スペクトルを用いる事が定められていたが、浮屋根の強度を検討するための規定は含まれていなかった。2005 年度より告示が改定され、地域・周期帯によっては最大約 200kine の速度応答スペクトルが規定されるとともに、シングルデッキ形式の浮屋根に関して浮屋根に発生する応力を算定する方法も略算式として示された。従来より格段に安全性が向上するものの、告示にも最低限の必要水準である事が明記されている。本提言では現時点で

標準的な設計用地震動を推奨できないが、0.1%～1%の減衰定数を考えた場合上記の約100kine～200kineの速度応答スペクトルを大きく超える地震動が多数提唱されるようになった。設計者の判断により適切な地震動を選択する事が望まれる。

また、通常の建物で水平2方向同時入力の地震応答解析があまり行われていないのは、最も不利な応答を発生させる方向と構面が常に一致する訳ではないとの判断にもよると思われる。しかしながら軸対称構造では上記提言のように、最も不利な方向の現象が必ず発生する。従って第一には、2方向同時入力の応答解析結果から応力等を評価する事が望ましい。一方向の地震動や応答スペクトルを用いて設計する場合にも、等価的あるいは安全側に2方向入力の効果を考慮し得る手法が採用されるべきである。

提言19 スロッシング振動の減衰定数は極めて小さい値であり、屋根構造形式ごとに異なる。今後とも、実機の強震観測や模型実験によるデータの蓄積が必要である。

自由液面のスロッシングの減衰定数に関しては、最近では実機の観測例や模型実験の結果がある程度蓄積され、極めて小さい値とする事に関する異論は少ないと考えられる。これまでの研究結果においても、実機の結果や年代の新しい模型実験の結果は提言と整合している。また専門家や実験関係者の間では、例えば大型のタンク模型の振動台実験において、一旦スロッシングさせてしまうとなかなか収まらず次の実験ができない、等の事実も知られるようになった。

浮屋根がある場合の減衰定数に関しては、やはりある程度のデータが蓄積されつつあるものの、データ毎の差異がありまた実機において減衰定数推定の基準とする地震波の記録がタンクと多少離れた地点のものである等、不確定な面も多い。しかしながら、暫定値ではあっても設計や応答解析に用いる減衰定数の目安が与えられる事に価値があると考え、スロッシングの1次振動の減衰定数として、固定屋根（自由液面）の場合には0.1%以下、シングルデッキ形式の浮屋根では0.5%、同ダブルデッキ形式では1%の値を提案する。今後、より一層のデータの蓄積や分析が進んだ時点で、必要に応じ見直されるべきものである。

またこれまでに得られたデータには、複数種の石油や水の結果が混在しているが、現時点では、流体の種別によりそれぞれ別の減衰定数を提案する状況にないと言える。模型実験はすべて水を用いて実施され、実機では石油に関する結果が多い。

提言20 浮屋根としては、シングルデッキよりもダブルデッキ形式の方が構造的な安定性、マージンが大きく、この面で長所を有する。

2003年9月26日発生の十勝沖地震では苫小牧周辺において、大型石油タンクの半数以上が何らかの被害を受け、石油タンクの構造的被害に伴う火災も発生した。これらの苫小牧

地区で被害甚大な事例はシングルデッキ形式の浮屋根を有するタンクに集中し、ダブルデッキ形式の浮屋根では重大な損傷が見られなかった。

シングルデッキ形式の浮屋根は建設数が多く実績のある形式であるが、構造的な損傷で浮力を失い浮屋根としての機能を維持できなくなる可能性に対して、またそもそも構造的損傷を受ける可能性に対して、耐震安全上のマージンの点でダブルデッキ形式の方に長所が多い。

シングルデッキと比較し費用が増大する面があるが、スロッシング現象を励起させる長周期地震動が遠くまで伝わり易く、従ってある地点における超過確率も大きくとる必要のある事を考慮すれば、また 2 次被害による損失等も考えれば、この費用が経済的に引き合うと判断される場合が多いと思われる。

長周期地震動の予測に関しては未解決の部分が多く、再現期間や年超過確率、すなわちどのレベルの地震まで考えて設計すべきかと言う議論に到達し難い面がある。その際、設計マージンのとり方による対処は一つの見識と言え、この点でもダブルデッキ化の意義が大きい。

## 避難計画

提言 2 1 現状の建築基準法で要求されている階段だけでは、高層建物から短時間に全館一斉避難することは難しい。短時間に全館避難を可能とするため、階段廊下等の数・幅および適切な耐火性能等を早期に規定する。また、地震発生時には避難形態を即座に的確に判断し在館者に安心情報および避難誘導情報を逐次提供するシステムを導入し、パニック的行動の発生を防ぐことが重要である。

高層建物からの避難計画において、現状では対象としている災害は主に火災である。避難計画の前提条件として防火区画や防災設備系統は正常に機能し他階へ延焼しないこととし、火災の発生した階およびその上下複数階にいる人が火災の影響が及ばない場所へ適切な時間内に避難するため、階段までの歩行距離・階段数・階段幅員等の基準が設けられている。そのため全館の滞在者が一斉に避難する状況は設定しておらず、高層建物のように階数が増え全館の収容人数が増えても階段数や階段幅員が増える仕組みとはなっていないため、高層建物から短時間に全館避難することは難しい。巨大地震の発生に伴い、当該建物において倒壊の危険性や建物内での同時多発火災の発生、さらに非構造部材の落下・家財什器の転倒散乱等により多くの死傷者が発生または発生の危険性が懸念される場合、短時間での全館避難が必要となることが想定されるため、それに対処できるべく避難経路・避難階段等の耐震・耐火基準および幅員・設置数等の収容量基準が見直される必要がある。

全館避難の必要性を在館者が認識した場合、避難誘導がなされなくても自発的に全館避難が発生する可能性がある。また、在館者は高層階に閉塞される恐怖心が強く、災害時に

は他者に追従したパニック的一斉行動をとる場合がある。このような在館者による意図しない全館避難の発生および混乱を防止するための手段として、緊急地震速報や館内モニタリングによりできるだけ早期の事態把握に努め、安心情報と共に館内同報するシステムを導入することが有効である。加えて、地震発生を前提とした実効性のある避難誘導マニュアルを、建物ごとに被災シナリオを検討しそれに基づき事前に準備することが肝要である。

提言 2 2 長周期成分を含む地震波を実高層建物に入力した解析の結果、応答変形は凡そこれまで設計で想定された範囲にあるが、特定の周期帯に属する建物の場合にはこれを大幅に上回る場合もあり、構造体に生じると想定される実質的な変形応答をふまえた非構造部材ならびに設備機器の耐震性のさらなる検討が必要である。

避難・防災施設 WG において日本建築センターで 30 余年の期間に評価を受けた高層建物を対象に分析を行った。加速度評価による 86 件、速度評価による 400 件について分析を行い、最大応答層間変形角は概ね 1/100 以下になっていることを確認した。一方、建築構造物小委員会の超高層建物 WG が、本特別調査委員会で提案された長周期成分を含む地震波を用いて実高層建物を対象に解析を行った。これらの結果を比較すると、長周期成分を含む地震波による解析によって得られた結果は、最大層間変形は概ねこれまでの高層建物の設計で想定されてきた範囲にあるが、その変形がこれまでの数倍から 10 倍もの長い時間繰り返されることが確認された。さらに、作用する地震波に対して特定の周期帯に属する建物では、現状で一般的に想定されている最大応答層間変形角を大きく超える応答変形を生ずることもあり得ることが明らかになった。従って、構造体のせん断変形による層間変形角や構造体各部での変形状態の違いなどを踏まえて、非構造部材や設備機器が最大変形を上回る変形を受けた場合や、それらに最大層間変形に近い強制変形が繰り返し加わることに對する影響についてさらに検討することが必要となる。

提言 2 3 超高層建物に居住・執務している人などに対する地震後の避難生活を考慮して、ライフラインの確保を含め設備機器の機能維持を積極的に盛り込んだ耐震性能の向上への取り組みが必要である。

建築の避難、防災等の設備における耐震対策は、建築設備耐震設計、施工指針（初版は 1982 年、現在は 2005 年版）により耐震措置が講じられており、設備機器固定や配管類の支持は有効に対応され、耐震上の強化は向上されている。しかしながら、設備機器の固定や配管類の支持に対する対策に留まり、設備機器の機能維持については未対策である。

超高層建物(地上 60m 高さを超えるもの)に対して、地震後の避難生活の確保のために、防災等設備の機能を含めた耐震性能の向上の取り組みが必要であると提言した。

これまで、設備設計者は、構造体の地震応答解析結果を基として、耐震設備の耐震クラ

スと各階の設備耐震設計用震度を設定してきた。耐震性能の向上をめざして、超高層建物の設備耐震設計として、耐震クラスのレベルのアップと標準設備耐震設計用震度の設定が必要である。

機能確保の計画には、自立性と補給体制の両面が必要である。大地震後に、超高層建物に居住、執務している人などが留居して避難生活を強いられることが想定される。留居した人などの避難生活を考慮して、ライフラインの確保を含め、エレベータを稼働させるなどのライフラインが復旧するまでの期間について最小限自立可能な設備機器、設備システムを含めた機能維持を積極的に盛り込み、設備耐震性能の向上への取り組みが必要である。

ライフライン系では、電力、ガス、上下水と通信が中心であるが、必要とする設備の種類と供給量等の計画と設定を行い、避難生活に効果のある機能確保の対策を取る必要がある。

提言 2 4 超高層建物のエレベータは、耐震性を有するように設計しているが、地震時には使用しないこととしている。現状では、地震時のエレベータ内への人の閉じ込め、地震後の利用再開の難しさ、耐震性を向上させ大地震後にも利用可能なエレベータがないこと、既存エレベータの耐震改修の未実施、などが問題点として挙げられる。今後は、災害時に安全に利用できるエレベータ（「スーパー耐震エレベータ」）の開発も考えるべきである。これらを解決すべく、建築主・設計者・エレベータ業界が一体となって問題に取り組む必要がある。

超高層建物のエレベータの耐震性については、現状では中小地震（レベル1）の床応答加速度と層間変形を対象に許容応力度設計されており、大地震に対しての検討は十分には行われていない。また、地震時にはエレベータを使用しないこととしており、地震時あるいは地震後の利用についての検討は不十分である。

過去の地震についても、低層建物を中心に多くの被害例が報告されており、最近では遠地地震による長周期振動を受けた超高層建物での被害、管制運転による中小地震時のエレベータ停止・エレベータ内への閉じ込めなどが問題となっている。

なお、今回の巨大地震による超高層建物の応答に対して、既存超高層建物のエレベータの検討を行ったところ、機器やレールの支持部材はおおむね許容範囲内に納まっていた。余力などにより、巨大地震に対しても一応の安全性を有していると考えられる。

しかし、地震後の避難や建物内での居住継続を考えると、（1）耐震性が高く地震後も利用可能なエレベータを開発する、（2）地震時の管制運転を見直してエレベータ内への閉じ込めを少なくする、（3）自動復帰などの手法により地震後のエレベータ利用の可能性を検討する、（4）既存エレベータの耐震性を見直して必要に応じて耐震改修を行う、などの対策をとる必要がある。これらの対策とともに、さらに一歩進んだ地震後も早期に利用可能な以下の機能（想定される地震動でレール・かご枠・巻上げ機・制御盤など主要装置が

壊れないこと / かがやつり合おもりがガイドレールから外れないこと / ロープ・ケーブル類の昇降路内機器への引っ掛かりがないこと / 建物に固定される入り口装置は、層間変位に追従可能であること)を有するエレベータ(「スーパー耐震エレベータ」)の早期開発が必要である。

今までは、エレベータの耐震性はエレベータ業界の問題であるとして、建築界全体として取り上げられることは少なかった。今後は、エレベータがどのような耐震性を有すべきかを、建物に必要とされる耐震性能の議論を踏まえて、建築主・設計者・エレベータ業界が一体となってエレベータの耐震問題に取り組む必要がある。

・巨大地震対応共同研究連絡会関係委員会

地震動部会

主 査	入 倉 孝次郎												
副 主 査	岩 田 知 孝	川 瀬 博	杉 戸 真										
委 員	青 井 真	市 村 強	大 川 出	香 川 敬 生									
	片 岡 正次郎	久 野 通 也	纈 纈 一 起	佐 藤 俊 明									
	関 口 春 子	武 村 雅 之	年 纈 縄 巧 郎	野 津 厚 人									
	畑 山 健 明	増 田 徹	翠 川 三 郎	源 栄 正									
	山 中 浩 明												

土木構造物部会

主 査	西 村 昭 彦												
幹 事	山 谷 充 良	足 立 幸 郎	有 賀 義 明	井 上 陽 介									
委 員	秋 山 凉 介	上 半 文 昭 康	渦 岡 林 康 介 淳 夫	大 岡 島 充 典									
	井 上 恒 雄	大 嶽 倉 裕 千 宏 拓 哉 司 和 作 弘 雄 章 堅 夫 晋 治 洋 和 夫 隆 博	日 井 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	大 岡 村 未 周 武 嗣 一 彦 哉 志 仁 久 雄 晴 雄 葵 明 一 郎 裕 宏 利 幹	小 河 木 小 阪 濱 井 間 野 坂 中 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	川 口 武 精 康 理 紘 和 信 幹 智 幸 葵 明 一 郎 裕 宏 利 幹	小 河 木 小 阪 濱 井 間 野 坂 中 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	北 河 村 精 康 理 紘 和 信 幹 智 幸 葵 明 一 郎 裕 宏 利 幹	小 河 木 小 阪 濱 井 間 野 坂 中 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	小 酒 井 藤 本 木 内 葉 藤 村 田 秀 尚 一 郎 裕 宏 利 幹	小 酒 座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	佐 島 鈴 竹 千 内 中 西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	島 鈴 竹 千 内 中 西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	鈴 竹 千 内 中 西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	竹 千 内 中 西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	千 内 中 西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	内 中 西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	中 西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	西 林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	林 平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	平 松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	松 宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	宮 山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									
	山	座 菅 砂 田 趙 長 中 西 羽 平 溝 室 吉	川 村 佳 礼 圭 信 藤 俊 晃 千 太 郎 朋 正 也 政 博 一 明 宏 明 政	菅 野 保 嶋 幸 将 隆 郎 一 光 裕 均 広 能 強 勝 一 郎 敏 也 範 峰 雁									

若林雅樹 渡辺和明 渡邊弘行  
戸沢冬樹 野津 厚  
協力者 大峯秀一

建築構造物部会

主査 西川孝夫  
幹事 北村春幸 久保哲夫  
委員 大井謙一 大越俊男 岡田恒  
可児長英 壁谷澤寿海 川瀬博  
篠崎祐三 竹中康雄 田村和夫  
中島正愛 中埜良昭 林康裕  
福和伸夫 松井伸夫 宮本裕司  
尾之内厚志  
斉藤大樹  
内藤幸雄  
土方勝一郎  
山崎真司



## . 土木学会関係委員会

### 巨大地震災害への対応検討特別委員会

顧問 御 巫 清 泰  
委員長 濱 田 政 則  
副委員長 後 藤 洋 三  
幹事長 小長井 一 男  
副幹事長 堀 宗 朗  
幹事 市 村 強 室 野 剛 隆  
委員 浅 田 育 男 安 斎 尚 志 和 泉 公比古 今 村 文 彦  
入 倉 孝次郎 岩 田 孝 仁 上 谷 宏 二 川 島 一 彦  
清 野 純 史 国 崎 信 江 佐 藤 忠 信 清 水 信 行  
菅 野 高 弘 杉 戸 真 太 杉 村 俊 治 祖父江 隆 弘  
常 田 賢 一 西 川 孝 夫 西 村 昭 彦 藤 塚 仁  
古 木 守 靖 松 尾 修 目 黒 公 郎 六 郷 恵 哲  
佐 藤 清 隆

### 地震動部会

巨大地震対応共同研究連絡会 / 地震動部会に同じ

### 耐震診断および耐震対策部会

巨大地震対応共同研究連絡会 / 土木構造物部会に同じ

### 地震防災分野の研究開発の基本的方向性に関する提言部会

主 査 堀 宗 朗  
委員 井 合 進 五十嵐 晃 池 田 浩 敬 片 岡 俊 一  
壁谷澤 寿 海 清 野 純 史 小 林 寛 菅 野 高 弘  
高 橋 良 和 竹 脇 出 田 中 聡 田 村 修 次  
中 島 正 愛 西 山 峰 広 久 田 嘉 章 福 和 伸 夫  
目 黒 公 郎 森 伸 一 郎

### 災害情報の共有化に関する技術的基盤検討部会

主 査 後 藤 洋 三  
委員 岩 田 孝 仁 浦 山 利 博 大 澤 裕 大 野 春 雄  
小 川 雄 二 郎 日 下 部 毅 明 小 松 淳 沢 田 俊 明  
島 崎 忠 司 花 村 信 廣 川 聡 美 福 和 伸 夫

安 田 進 山 口 直 也 山 下 倫 範 吉 川 耕 司

地震防災教育を通じた人材育成部会

主 査 清 野 純 史

委 員 赤 星 武 洸 浅 田 育 男 安 斎 尚 志 一 井 康 二  
国 崎 信 江 瀧 本 浩 一 只 野 誠 志 田 爪 宏 二  
中 嶋 雄 一 船 入 公 孝 松 尾 知 純 目 黒 公 郎

大都市圏の地震防災性向上の方策の提言部会

主 査 目 黒 公 郎

委 員 大 島 弘 義 小 檜 山 雅 之 佐 伯 光 昭 庄 司 学  
吉 村 美 保 秦 康 範

## 日本建築学会関係委員会

### 東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会

委員長 秋山 宏  
幹事 上谷 宏二 西川 孝夫  
委員 大越 俊男 金谷 輝範 川瀬 博 木内 俊明  
北村 春幸 久保 哲夫 斎藤 賢吉 春原 匡利  
寺本 隆幸 西村 昭彦 濱田 政則 翠川 三郎  
室崎 益輝 山内 泰之 和田 章

### 地震動小委員会

主査 川瀬 博  
幹事 佐藤 俊明 翠川 三郎  
委員 岩田 知孝 大川 出 釜江 克宏 斎藤 幸雄  
高山 峯夫 武村 雅之 西川 孝夫 畑山 健  
前野 敏元 源 栄正 山中 浩明

### 建築構造物小委員会

巨大地震対応共同研究連絡会 / 建築構造物部会に同じ

### 非線形相互作用ワーキンググループ

主査 篠崎 祐三  
幹事 福和 伸夫 宮本 裕司  
委員 飯場 正紀 北田 義夫 北村 春幸 栗本 修  
田守 伸一郎 藤堂 正喜 永野 正行 林 康裕  
土方 勝一郎 吉澤 睦博

### 超高層建物ワーキンググループ

主査 大井 謙一 (2004.4~2005.9)  
山崎 真司 (2005.9~2006.3)  
幹事 斉藤 大樹  
委員 石川 裕次 伊藤 優 岩田 善裕 大井 謙一  
大越 俊男 岡田 恒 壁谷 澤寿海 亀井 功  
川瀬 博 北村 春幸 木村 正人 久保 哲夫  
竹中 康雄 藤堂 正喜 鴛田 隆 鳥井 信吾  
中川 佳久 中 埜 良昭 見波 進 森田 高市

山崎真司

中・高層建物ワーキンググループ

主査	岡田恒												
委員	伊藤優	岩田善裕	大越俊男	尾之内厚志									
	壁谷澤寿海	川瀬博	北村春幸	北山和宏									
	久保哲夫	溜正俊	鴫田隆	都祭弘幸									
	鳥井信吾	中埜良昭	野田豊	福山洋									
	松井伸夫	山崎真司											

免震建物ワーキンググループ

主査	田村和夫												
幹事	菊地優	竹中康雄											
委員	小豆畑達哉	飯場正紀	打越瑞昌	可児長英									
	川瀬博	神原浩	北村春幸	公塚正行									
	久保哲夫	佐野剛志	関松太郎	高山峯夫									
	長島一郎	中島正愛	古橋剛	嶺脇重雄									
	山本裕	吉川和秀											

容器構造ワーキンググループ

主査	内藤幸雄												
幹事	土方勝一郎												
委員	大越俊男	小林信之	坂井藤一	酒井理哉									
	座間信作	西口英夫	樋口俊一	廣瀬仁志									
	松井徹哉	箕輪親宏	山田大彦	吉川和秀									
	吉田長行												

避難計画小委員会

主査	寺本隆幸												
幹事	木内俊明												
委員	伊藤弘	岡田成幸	清家剛	建部謙治									
	平山昌宏	宮田毅	宮野道雄										

避難・防災施設ワーキンググループ

主査	伊藤弘												
幹事	清家剛												

委員 大宮喜文 古賀純子 名取 発 脇山善夫

避難・防災等設備ワーキンググループ

主査 木内俊明

幹事 平山昌宏

委員 井出克則 鈴木真吾 鈴木俊之 鈴木俊之  
千葉隆文 本多勝美 村上三千博 米田千磋夫

エレベーターワーキンググループ

主査 寺本隆幸

幹事 宮田 毅

委員 碓井安秋 大森満春 木内俊明 福井 潔  
松岡秀佳

避難情報ワーキンググループ

主査 岡田成幸

幹事 建部謙治 宮野道雄

委員 大野晋 金子美香 萩原一郎 北後明彦  
吉村英祐