

# 近年の構造研究グループにおける研究の取り組み

## — 研究概要と長周期地震動関連の研究 —

構造研究グループ 主席研究監 大川 出、グループ長 飯場 正紀

### 目 次

- I まえがき
- II 構造分野における近年の状況
- III 第2期中期計画と構造分野における研究課題
  - 1) 第2期中期計画の概要
  - 2) 中期計画に基づく構造分野の重点研究課題
  - 3) 建築基準法の技術資料の蓄積を目指した重点研究課題
- IV 各研究課題の概要
  - 1) 耐震化率向上を目指した普及型耐震改修技術の開発
  - 2) 建築構造物の災害後の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発
  - 3) 非構造部材の地震・強風被害防止技術の開発
  - 4) 伝統的木造建築物の保全に資する対策技術の開発
  - 5) 一般建築物の構造計算に関わる技術的判断基準の明確化
- V 長周期地震動関連課題—長周期地震動と建物応答性状に関する検討
  - 1) 設計用長周期地震動の現状と課題
  - 2) 長周期地震動の評価の現状
  - 3) 時刻歴特性も踏まえた長周期地震動の評価の試み
  - 4) 建築物の応答
  - 5) まとめ
- VI 今後の研究に向けて
- VII おわりに
  - 謝辞
  - 参考文献

### I まえがき

世の中で、「安全・安心」が叫ばれているが、食品の安全性も問題もあるが、その言葉が使われることになった要因の1つに建築物の耐震偽装事件がある。近年では、建築構造の地震時安全性（耐震性の確保）のみでなく、回転扉・エスカレータや防犯対策等の日常的な安全性も重要な課題となっている。建築基準法における

構造関係の規定は、長期間にわたり建築物の鉛直荷重を安全に支えるとともに、大地震時や暴風時には、建築物の倒壊を防止し、人命を確保することを原則として作成されている。

建築物の耐震改修が叫ばれてある期間が経過するが、十分には耐震改修が進んでいないことも事実である。地震中の安全や地震後の安心（避難者数の低減と復旧作業の迅速化）には、建築物の

耐震性を確保することが大切である。近年、事業関係者においては、地震後の機能の早期回復を目指した事業継続計画(BCP, Business Continuity Plan)等への対応も検討されている。平成11年6月に交付された、住宅の品質確保の促進等に関する法律(以下「品確法」)では、耐震等級を導入し、建築構造の耐震性を向上させこととしている。建築基準法で求められる条件に比べて、地震時の構造躯体の被害を低減させ、地震後の機能維持・確保を目指そうとしたものである。平成20年12月に公布された「長期優良住宅の普及の促進に関する法律」における長期優良住宅の認定基準にも、その考え方が活かされている。

ここでは、独立行政法人建築研究所(以下、「建研」)の第2期中期計画(平成18～22年度)<sup>1)</sup>で実施された(または実施中の)構造研究グループの研究課題の概要を紹介する。特に、現在注目を集めている「長周期地震動」に関連した内容については、別に章を設け、詳しく説明する。最後に、今後検討が必要な研究内容について、現在考えていることを紹介する。

## II 構造分野における近年の状況

### a) 地震被害軽減を目指した政府の戦略

内閣府に組織された中央防災会議では、防災基本計画の作成や防災に関する重要事項の審議等を行っている。平成16年7月に示された、「平成17年度の防災対策」の項目に、以下の内容が示されている<sup>2)</sup>。

- i) 地域の防災拠点となる公共施設及び住宅等の耐震化
- ii) 地域や企業の防災力の向上及び国際防災協力の推進

上記i)については、建築物の耐震化を進める項目であり、住宅性能表示制度の積極的活用の内容も示されている。ii)には、地域住民や企業等が日常的に参画する「防災まちづくり」、企業の業務継続計画の普及促進等、民間と市場の力を活かした防災力向上のための施策が示されている。これを受けて、平成17年3月の中央防災会議では、「地震防災戦略の策定」を行っており、巨大地震(東海地震、東南海・南海地震)対策において、平成17年からの10年間で、死者数及び経済被害額を半減することを目標に、建築物の耐震改修を推進し、住宅耐震化率90%とすることを定めている<sup>2)</sup>。

### b) 地震時及び強風時被害への対応

- i) 中程度の風荷重や地震動における非構造部材の被害

平成16年には10個の台風が上陸し、各地で建築物や工作物の強風被害が発生した。とくに鋼板製屋根の被害は、周辺の建築物等には目立った強風被害がない中で発生したものが多かった(写



写真1 平成16年台風23号による鋼板製屋根の被害(西村宏昭氏提供)



写真2 平成17年宮城県沖の地震における天井の被害

真1)。一方、過去の中規模地震のたびに屋内大規模空間の天井脱落被害が報告されており、平成17年宮城県沖の地震では、竣工間もない屋内温水プールの天井がほぼ全面脱落し利用者が重傷を負った(写真2)。このように周辺の建築物等に目立った被害が少ない中で、その非構造部材だけに破損・脱落等の被害が顕在化している。中小規模の地震や風を想定した荷重に対する被害の防止に資する技術開発を行う必要がある。

- ii) 長周期地震動による既存超高層建築物の応答性状の把握

平成15年十勝沖地震における苫小牧での石油タンク火災を契機として、近い将来における長周期地震動による種々の構造物への影響が懸念されている。そのため、日本建築学会、土木学会や内閣府は、発生する可能性が高いとされる東南海地震等の大規模地震が発生した場合の、地震動予測や各種構造物の地震時挙動について、損傷・被害の程度や、今後の課題等について検討し、その結果を公表している。それによると、これらの大規模地震に対して最新の手法により各地点の地震動予測が行われている。予測

地震動は地点により既存超高層建築物の設計時に想定した検討用地震動を上回る場合があるが、十分な塑性変形能力が確保されている最新の耐震技術によって設計されたものは、大きな問題が発生する可能性は小さいものの、塑性変形能力が乏しいものや大きな入力予想される周期帯と同程度の固有周期を有する建築物については、損傷を生ずる可能性がある、とされている。

#### c) 建築物の耐震偽装事件と建築基準法改正

平成 17 年 11 月に明らかになった構造計算書の偽装問題（いわゆる耐震偽装事件）は、建築確認・検査制度及び建築士制度等への国民の信頼を大きく損なう結果となった。この大事件に対応するため、「建築物の安全性の確保を図るための建築基準法等の一部を改正する法律」が平成 18 年 6 月に公布された。この改正法においては、制度面では、建築確認・検査の厳格化（一定の建築物に対する構造計算適合性判定の義務付け、一定の共同住宅に対する中間検査の義務付け、建築確認審査等の指針の新設等）、指定確認検査機関の業務の適正化（指定要件の強化、特定行政庁に立入検査権限を付与等）、建築士等に対する罰則の大幅な強化等の措置が、また基準関係では、構造関係規定の再編と構造計算方法の明確化等の措置が図られた。これらの関連する政省令・告示が、平成 19 年 6 月に施行された。

耐震偽装事件後、国土交通省は、階数が 10 程度の RC 構造で設計条件が相対的に厳しい 103 件の構造計算書を抽出し、これらの構造計算図書について、学識経験者・構造実務者・国土交通省等の専門家からなる構造計算調査支援委員会（（財）日本建築防災協会・耐震改修支援センターに設置）において、調査・検討が行われた<sup>3)</sup>。その結果、33%で、構造計算書の問題点が見つかった。世の中では、耐震偽装事件は一人の構造設計者による事件として捉えられていたが、構造規定の観点からは、「根拠がなく実状に合わないモデル化」等の不適切な判断に基づく設計が、他の設計者の構造計算書においても少なからず見られ、経済設計を優先するあまり、基準解説書は法令ではないので従う必要はないとして、その代わりに採用した方法の妥当性を検証することなく、実務を行っている設計者がいることも判明した。このような背景により、構造計算方法の基本原則について新たに告示等に規定されることとなった。特に、この度の事件で問題となった建築物や抽出された構造計算書に関する問題の多くが RC 構造に関するものであったため、RC 構造関係規定の改正や新設が多く行われた。それらの検討に当たっては、学識経験者、実務者、行政関係者等、多くの関係者の協力を得て、まず問題点の整理を行い、それに対する規定の考え方や明確化について数多くの検討が行われた。こ

の検討の結果を踏まえた法文の解説や解釈が、通称、黄色本と呼ばれる構造関係技術基準解説書<sup>4)</sup>にとりまとめられた。

本改正では規定の明確化が求められたが、明確化に答えるにバックデータが十分でなく、実務における「最適な判断」のための情報の蓄積がさらに必要であることが明らかとなった<sup>5)</sup>。

#### d) 建築基準整備促進補助金事業

建築基準整備促進補助金事業は、建築基準法、省エネ法、品確法等に係る技術基準整備のための検討について、民間の能力を積極的に活用して、基準の整備、見直しを図ることを目的としている。国土交通省（住宅局建築指導課、住宅生産課及び国土技術政策総合研究所）が建築基準の整備を促進する上で必要となる事項（表 1 参照）について提示し、公募により選ばれた民間事業者、国立大学法人等が、基礎的なデータ・技術的知見を収集し、技術基準の原案の基礎資料を作成することを国が支援する事業であり、平成 20 年度から始められている。本事業は、原則として独立行政法人建築研究所との共同研究により進められることになっている。成果がまとまった段階で、順次、建築基準法関連規定（政令、告示等）改正の検討が行われることになっている。

表 1 建築基準整備促進補助金事業における調査事項（平成 21 年度実施分）

番号	調査事項
1	超高層建築物等の安全対策に関する検討
2	基礎及び敷地に関する基準の整備に資する検討
3	非構造部材に関する基準の整備に資する検討
4	木造建築物の基準の整備に資する検討
5	鉄骨造建築物の基準の整備に資する検討
6	鉄筋コンクリート造の各種柱より接合部の耐力評価に関する実験
7	鉄筋コンクリート造の変断面部材の構造特性評価に関する実験
8	開口の数や位置を考慮した鉄筋コンクリート造の耐力壁の強度・剛性評価方法に関する実験・解析
9	鉄筋コンクリート造の耐力壁周辺架構の条件設定に関する実験
10	地震力の入力と応答に関する基準の合理化に関する検討
11	風圧力、耐風設計等に関する基準の合理化に資する検討
12	免震建築物の基準の整備に資する検討
13	あと施工アンカーの長期許容応力度に関する検討調査
14	特定畜舎等建築物の合理的な構造計算基準の整備に資する検討
15	防火・避難対策等に関する実験的検討
16	避難性能検証等の見直しに関する検討
17	アスベスト対策に資する検討
18	耐震診断法の高度化に関する検討
19	建築物の性能の表示に関する検討
20	建築の質の向上に関する検討
21	基準整備に関するニーズ・シーズ把握に関する検討

2 2	業務用建築物の省エネルギー基準に関する検討
2 3	住宅の省エネルギー基準に関する検討
2 4	遮音規定の合理化に関する検討

e) 建築物の機能維持・早期回復

建築物の構造設計において、災害時における人命の安全は最も重要な目標であり、建築基準法にもそのために遵守すべき規定が設けられている。しかしながら、近年における地震災害において、居住や活動の場である建築物の機能が損なわれるような重大な損傷が見られたり、構造躯体の損傷が激しくその修復費用が極めて高額であったことから、結局は取り壊され新しく建て直されるというケースが見られている（写真3）。このことから、設計においては「建築物の機能を如何に維持するか」、もしくは、「低下した機能を如何に迅速に回復させるか」という観点を、安全性の観点に加える必要があることが認識されるようになってきた。

近年、事業関係者においては、地震時の被害・損失低減を目指し、事業継続計画への対応も検討されている。そのためには、建築物の構造部材、非構造部材及び設備等における地震時の被害や



a) 柱のせん断破壊や損傷      b) 梁や柱梁接合部の損傷

写真3 平成7年兵庫県南部地震で大きな損傷を受けた新耐震設計の建築物

修復に対する資料・データの蓄積が必要となる。

f) 伝統工法の継承

我が国には木造建築物に対する伝統技術の蓄積があり、地域文化の継承や木材に対する愛着などから、住宅を中心とする伝統的木造建築物の改修や伝統構法による建て替えには根強い需要がある。また、木材の炭素固定効果による地球温暖化防止の点からも木材の利用促進が叫ばれており、長寿命であることや省エネルギー・省CO<sub>2</sub>効果も含めて、地域に根ざした伝統構法は、地球環境問題の観点から推奨されるべき構法と考えられている。

こうした伝統的木造建築物の構造性能や防火性能は、近年、研究が急速に進められている分野であるが、未だ不明な点も多く、実務に利用できる資料や設計指針類も不十分である。構造性能に関しては、近年の地震で多くの被害が報告されているように、そのままでは耐震性能の不十分なものも多く、工学的な観点からの構造性能評価法や適切な構造設計法の開発が必要である。また、防火性能に関しても、伝統的防火対策技術は工学的評価が十分になされておらず、建物個々の適切な評価及び町屋などにおける類焼・延焼などに対する防火性能を把握し、倒壊防止や避難安全を含めた総合的な火災安全性能評価法の開発を行う必要がある。

### Ⅲ 第2期中期計画と構造分野における研究課題

#### 1) 第2期中期計画の概要

独立行政法人建築研究所法（平成11年法律第206号）第3条に定められた目的を達成するため、科学技術基本計画、国土交通省技術基本計画等の科学技術に関する計画を踏まえるとともに、建築・都市計画技術に対する社会的要請や国民のニーズを的確に受けとめ研究開発等を行い、優れた成果の創出により社会への還元を果たすことを目指している。

そのために、社会的要請の高い課題への重点的・集中的な対応を行うこととし、以下の各項に示す目標に対応する研究開発を重点的研究開発として位置付けることとしている。また、中期目標期間中に、社会的要請の変化等により、新たに重点的かつ集中的に対応する必要があると認められる課題が発生した場合には、当該課題に対応する研究開発を機動的に実施することとなっている<sup>1)</sup>。

ア) 安全・安心で質の高い社会と生活の実現

地震や台風等の自然災害、犯罪の増加、有害化学物質による汚染等の問題に対処し、安全で安心感のある質の高い社会と国民生活を実現するために必要な研究開発を行うこと。

イ) 持続的発展が可能な社会と生活の実現

建築・都市分野における環境負荷の増大等に対応し、省エネルギー、省資源、廃棄物再利用等、持続的発展が可能な社会と生活を実現するために必要な研究開発を行うこと。

ウ) 社会の構造変化等に対応する建築・都市の再構築

人口減少社会の到来や少子高齢化の進展、環境との共生が重視される社会の到来などの社会構造変化等に対応し、建築・都市の再構築のために必要な研究開発を行うこと。

エ) 情報化技術・ツールの活用による建築生産の合理化と消費者選択の支援

建築生産の合理化と消費者保護の一層の推進のため、高度情報化技術を活用した情報提供のためのシステムに関する研究開発を行うこと。

上記ア)～エ)の各目標に対応した「技術的な課題認識」を踏まえ、「技術的課題領域と研究開発目標」を選定し、国・民間との役割分担を考慮しつつ、構造分野においては、下記の「重点的研究開発課題」を設定した。

## 2) 中期計画に基づく構造分野の重点研究課題

ア) 安全・安心で質の高い社会と生活の実現
1) 大規模地震等の巨大災害に対する防災・減災技術の高度化と、自然災害に強い建築物、都市づくりへの貢献
○耐震化率向上を目指した普及型耐震改修技術の開発(H18～H20年度) 阪神・淡路大震災において住宅・建築物の倒壊等による多大な人的被害が生じ、また将来想定される東海、東南海等の巨大地震に備えるため、既存の住宅・建築物の耐震化を進めることが早急に求められているものの、コスト負担の問題等により、改修が進んでいない。そこで、住宅・建築物の耐震性能向上のための安価で実用性の高い耐震改修技術、居住者の視点に立った耐震補強工法選択システム等の耐震改修を促進するための技術を開発する。
○建築構造物の災害後の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発(H19～H20年度) 現在の建築物の耐震化は、人的被害をなくすことを指向して建物の損傷は許容するものとなっているが、経済社会がますます複雑・高度化するなかで、建築物が大規模化・装置化することにより、地震による建築物の被害が国民生活・経済に長期間にわたって深刻な影響を与えるおそれが高まってきている。このため、建築物の耐震性について被災後の社会的・経済的損失や悪影響を抑制する観点から、修復性を高めるなどにより、機能維持や早期回復を図る新たな建築構造システムを提案するとともに、その評価技術を確立する。
○超高層建築物等の安全対策の高度化に向けた技術と災害後の機能維持・早期回復に関する技術の開発(H21～H22年度) 近年、タワー型マンション等超高層建築物の建設が進み、またこのような大規模な建築物が複数立地する街区が増加してきていることなどから、大規模地震等による建築物の被害が国民生活・経済に長期間にわたって深刻な影響を与えるおそれが高まりつつあり、被災後の社会的・経済的損失や悪影響を抑制することが求められている。そこで、超高層建築物等の安全対策の高度化に向けた耐震設計技術や避難対策技術の開発を行う。また、大規模災害時であっても建築物の最低限の機能維持や早期回復が可能となるよう、建築構造の性能評価を行うシステムを確立するとともに、給排水設備等に関する技術開発を行う。
2) 中小規模の地震や風による建築物への被害の防止
○非構造部材の地震・強風被害防止技術の開発(H18～H20年度) 建築物の躯体レベルでの耐震構造化等の進展の一方で、近年、中小地震による大規模施設の天井脱落や強風による屋根ふき材の破損等の非構造部材の破損により、予想外の被害を招いている事例が多数発生している。そこで、天井や屋根等の非構造部材の安全性向上のため、生産プロセスにおける課題も踏まえた設計・施工技術を開発する。
イ) 持続的発展が可能な社会と生活の実現
1) 廃棄物の再利用、既存建築ストックの再生・活用技術等による省資源・循環型社会の実現
○既存ストックの再生・活用技術の開発(H18～H20) 持続的発展が可能な社会を実現するうえで、建築物の長期間にわたる有効利用への要請が高まっているが、既存建築ストックは、安全性や耐久性とともに機能面でニーズと乖離するなど多くの課題を抱えている。そこで、既存建築ストックを実用的で魅力あるものへと再生・活用するため、豊かな居住空間を確保する計画・設計手法の開発、管理・運営方法の開発及び制度インフラに係る課題の検討を行うとともに、これを支える実用的な診断・改修・更新のための技術を開発する。
ウ) 社会の構造変化等に対応する建築・都市の再構築
地域の伝統建築物の保全、社会構造の変化に対応した建築技術者の育成・技術の継承と建築生産システムの再構築
○伝統的木造建築物の保全に資する対策技術の開発(H18～H20年度) 地域に根ざした文化である伝統構法を用いた木造建築物やその街並みの保全を図るため、伝統建築技術の継承とその技術を用いた改修・改築を促進することが求められている。そこで、保存にあたって安全上課題となる構造・防火性能を適切に評価する手法を開発するとともに、高度な構法手法を用いた伝統構法をベースとした簡易設計法と防火性能向上手法の開発を行う。
エ) 情報化技術・ツールの活用による建築生産の合理化と消費者選択の支援
建築・住宅に関わる性能試験・評価技術の体系化による新材料・新構造等の開発支援
○建築構造物の災害後の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発(H19～H20年度) (再掲)
○超高層建築物等の安全対策の高度化に向けた技術と災害後の機能維持・早期回復に関する技術の開発(H21～22年度) (再掲)

### 3) 建築基準法の技術資料の蓄積を目指した重点研究課題

建築物の構造計算については、平成17年の耐震偽装事件に端を発する構造計算書の抽出調査により“不適切な工学的判断”が数多く見られたことから、計算方法に関する規定化が行われた。一方、それらの規定をサポートする「建築物の構造関係技術基準解説書<sup>4)</sup>」は、技術的知見の不足及び時間的制約の両面から、技術情報の大幅な改訂や追記は見送られた。これには従来の解説書に従った適切な設計が踏襲できることへの配慮もあった。また、他方では、適合性判定制度が導入されたことから、構造計算における工学的判断の技術的な根拠について詳述するよう求める声が増えている。しかしながら、設計の条件は物件ごとに異なるため、一律に判断することは必ずしも適切ではない。さらに、建築構造の多様性や構造設計の自由度を確保（維持）するためには、適切な判断に足る工学的な知見の蓄積が必要となる。このような状況下において現在の解説書の技術情報は、構造設計者が設計のさまざまな場面で遭遇する工学的判断を支える技術情報集としては、まだまだ不足しているといわざるを得ない。これらのことより、不足している知見を収集し、構造計算に資する工学情報として整理し公開することが必要である。このことから、一部、建築基準整備促進補助金事業との共同研究にも対応した研究課題「一般建築物の構造計算に関わる技術的判断基準の明確化(H21～H22年度)」を実施している。

## IV 各研究課題の概要

それぞれの研究課題の概要を示す。超高層建築物等の安全対策の高度化に向けた技術に関する研究については、第V章で詳しく記述する。

### 1) 耐震化率向上を目指した普及型耐震改修技術の開発

本重点課題の目的は、“今後10年間で東海地震や東南海・南海地震等の想定死者数を半減させることを念頭に、住宅・特定建築物の耐震化の目標として3年後(平成20年)に8割、10年後(平成27年)に9割とする”という、耐震化率の向上に関する地震防災推進会議の提言に資する技術開発を行うことである。この提言

は、平成17年に中央防災会議が決定した地震防災戦略にも位置づけられている。ここで、建築物の耐震化が進まない技術的背景や理由は構造種別ごとに異なることから、表2に示すように各々の分野で耐震化率向上に資する成果目標を設定し開発研究を行った。また、耐震改修の普及促進策を検討する組織も設け、分野横断的な検討も合わせて行った。

a) 普及促進:耐震改修の普及の阻害要因の抽出を行うとともに、地域の住民の意識構造に基づいた効果的な耐震改修の普及促進政策の立案に役立てることができる、住民の意識構造の論理的繋がりを表すロジックモデルを構築した(図1)。また、普及促進施策や耐震改修の成功事例に関するアンケート調査、ヒアリング調査、普及促進をテーマとするシンポジウムから得られた情報を取りまとめている。

b) 鉄筋コンクリート造:居ながら施工のように耐震改修における様々な制約条件を克服でき、技術的に有用で広く利用できる情報を「耐震改修技術ショーケース」として取りまとめ公開した。また、改修が困難な店舗併用住宅の1階店舗部分を対象とした改修技術であるソフトランディング免震や、超高強度材料を用いることで、高層集合住宅の補強箇所や補強重量を低減できる耐震改修技術の開発(写真4)を行い、設計施工要領を取りまとめている

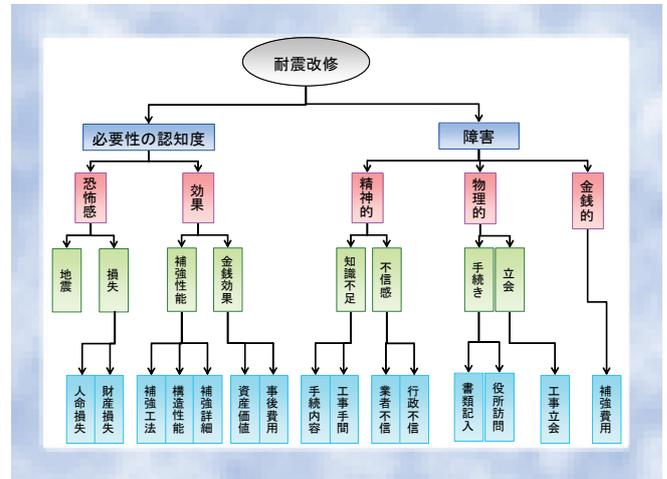


図1 耐震改修に関わるロジック(意識構造)モデル

表2 研究成果の設定

- 1) 耐震改修の普及促進:耐震改修に対する住民の意識構造(ロジック)モデル等、阻害要因を踏まえた普及促進に資する技術資料
- 2) 鉄筋コンクリート造:耐震改修技術ショーケース、ソフトランディング免震及びUFCを用いた耐震補強に関する技術資料(設計施工要領等)
- 3) 鋼構造:外付け鋼材ダンパーの接合部設計施工マニュアル(案)、鋼材ダンパーにより耐震改修された建築物の簡易性能評価法(案)
- 4) 木造:ユーザーの視点に立った木造住宅の改修構法選択システム、各種補強工法に関する情報
- 5) 敷地・基礎:戸建て住宅の敷地・基礎の耐震診断・改修技術指針(案)、宅地防災のユーザーズマニュアル(案)



写真4 超高強度材料による補強の例 (UFC耐震壁)

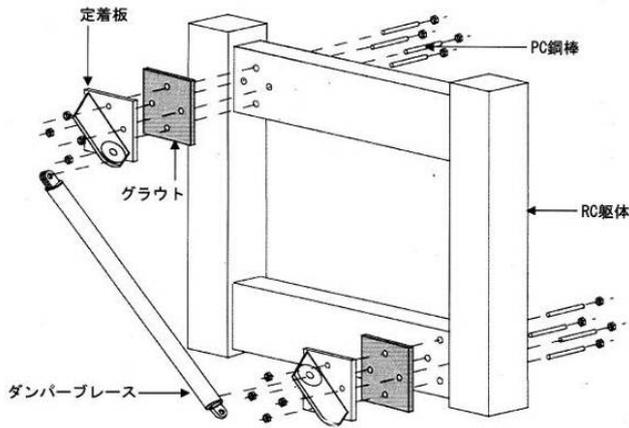


図2 外付けダンパー補強

る。

c)鋼構造：周辺フレームの補強が不要なエネルギー吸収型の鋼材ダンパーを用いた建築物の外側補強を対象に、ダンパーと既存建物梁の接合部の設計法を検討した(図2)。また、耐震性能評価として時刻歴解析よりも簡易なエネルギー法を適用するための検討と換算 $I_s$ 値の計算方法の検討を行ない、その計算事例を示している。

d)木造：合理的な耐震改修構法選択システムについて、これまでに得られた各種耐震補強構法の種類、制約条件、補強効果、改修費用等のデータに基づいて、住宅特性と施主の要望に対して複数の補強構法を提示する補強構法選択システムとして取りまとめた(図3)。また、システム構成に必要な技術的検討として、基礎補強による木造軸組の耐力向上に関する試験を実施した。

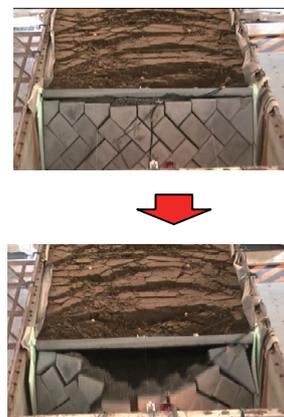
e)敷地・基礎：地震被害調査や実大擁壁の振動台実験(図4)、

及び実態調査などの結果を踏まえ、住宅の敷地(がけや擁壁を含む)及び基礎の耐震診断・改修のために必要な調査と結果の評価、補修・補強に関する設計・施工について「戸建て住宅の敷地・基礎の耐震診断・改修技術指針(案)」として取りまとめた。また、地震時における宅地や擁壁の防災に関する知識や防災意識の啓発を目指した一般向けのユーザーズマニュアル(案)も取りまとめた。

## 2) 建築構造物の災害後の機能維持・早期回復を目指した構造性能評価システムの開発



図3 木造住宅の補強構法選択システム



空積擁壁

練積擁壁

図4 実大擁壁の振動台実験

本研究では、災害に対する安全性の評価だけでなく、地震等の災害発生後の機能維持や早期回復が可能となるような建築物の設計に資するための機能回復性評価指針、評価用データベース、一般者向けの説明支援ツール等を開発することを目的としている。

地震後の建築物内外の状況を予測し(構造骨組のみならず、非構造部材や設備・機器、什器なども対象とする)、そこから、建築物の機能がどの程度阻害され、また、もともと建築物が保有して

いた正常時の機能レベルまで回復させるのに、どのくらいの時間と費用を要するか（機能回復のシナリオ）について、工学的な検討ができるような共通の考え方と工学情報の整理を行い、構造設計者が建物所有者や建物居住者に提供すべき情報の伝達ツールやコンテンツについても検討している。「機能継続／早期回復」評価の枠組みのフローを図5に示す。

a) 「機能回復性」に基づく評価システムの適用例

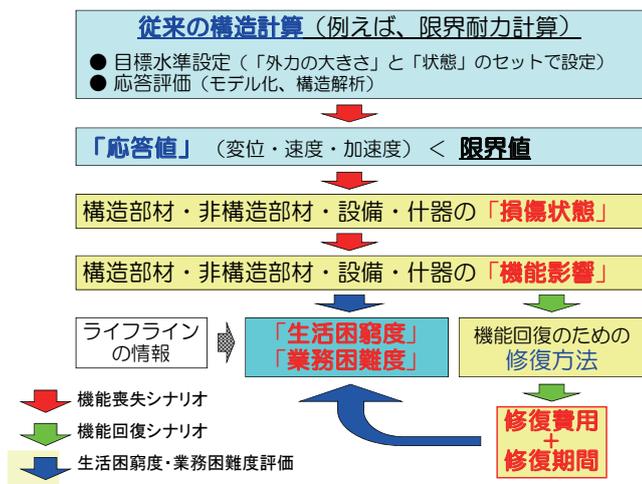


図5 「機能継続／早期回復」評価の枠組み

4棟の建築物（事務所2種、共用住宅、病院）を対象にして、「機能回復性」に関する一連の評価（損傷状態の把握－修復方法の特定－修復費用・修復期間の推定）を実施した。損傷評価に際しては、損傷評価のデータベースや既往の実験結果を参照し、修復費用・修復期間の評価に際しては、「建築改修工事の積算」等の積算資料を参考にして、検討を行った。RC造事務所を対象とし



写真5 実大構造実験による被害の様子

て、入力地震動を1995年神戸地方気象台での観測記録とし、上記の方法で試評価を行った結果、修復費用は初期コストの10.6%であった。

b) 「機能回復性」評価のためのデータベース

構造部材・非構造部材・設備機器・収容物の損傷評価・修復性評価・機能性評価データベースフォーマットを構築し、試設計で必要となる部位の情報について収集している。また構造実験を実施し（写真5）、その結果を用いて、データベースフォーマットの最終確認を行い、併せてここで収集できなかったデータの収集方法の提案と今後必要となる技術について取りまとめている。

c) 地震被害の発生と機能回復の方策

住宅・病院・事務所の3種類の用途の建築物を想定して、地震時に起こりうる被害と機能回復の方策を整理した。住宅における機能回復方策の例を、表3に示す。整理の方法として、被害事象を時間軸でI（地震直後）II（地震から数日以内）III（それ以降）に分け、それぞれの事象が及ぼす機能への影響、ハード的な対策、人が関わるソフト的な対策を整理した。さらにソフト的な対策を、地震被害が発生する前に行う事前対策と地震直後の事後対策に分けている。

3) 非構造部材の地震・強風被害防止技術の開発

表3 住宅の地震被害と機能回復方策の例

フェーズ	被害事象	機能への影響	ハード対策	ソフト対策 (事前)	ソフト対策 (事後)
I	建物倒壊	死傷者発生	耐震性向上	耐震診断	安否確認 救助活動
	ドア開閉困難	避難支障	ドアの耐震化		
	家具転倒	怪我 避難支障	家具固定	安全点検	
...					
I~II	断水	生活不便 (飲料水、トイレなど)		水の備蓄	
	...				
III	避難所生活	精神的 ストレス			精神的 ケア
	...				

本研究では、建築物の非構造部材として大規模空間天井と鋼板製屋根を取り上げ、中小規模の地震や風を想定した荷重に対して非構造部材の被害防止に資する技術開発を行った。

a) 大規模天井の構造安全性

大規模天井の構造安全性について、天井工法の現状調査、大規模試験体による水平方向振動実験、山形断面を有する学校体育館の振動特性調査を行った。天井工法の現状調査は、研究期間中の

地震被害調査、公開資料による天井開発等調査などを行った。大規模試験体による水平方向振動実験は吊り天井の振動特性の把握、損傷・脱落の有無について検討するために、写真6のような鉄骨フレーム（長手方向18m、短手方向6m、高さ方向5m）を用いて、在来工法による天井試験体3体、システム天井試験体3体（グリッドタイプ1体、ラインタイプ2体）を長手方向に、中地震動程度までの体育館の屋根面応答を想定した加振を行った。

大規模試験体による水平方向振動実験では、いずれの天井試験体も脱落につながるような損傷は生じず、均整に施工された天井は中地震動では脱落しないことが想定される。在来工法による天井のクリップを部分的に外して行った三角波加振では、野縁と天井板が一体となって連鎖的に脱落する状況を確認した。長手方向の断面が“／＼”形のシステム天井について長手端部を鉄骨フレームに固定した加振では、勾配部分でバー材の押し上げに伴う変形や天井切替箇所への乗り上げ、クロスTバーとH型鋼の取り合いでの変形、天井板の脱落などを生じた。地震被害と同様の損傷が確認されている。

山形断面を有する学校体育館の振動特性調査は、地震被害を受けた寄棟学校体育館1棟と、山形屋根学校体育館1棟について実測（常時微動測定及び強制加振による測定。後者体育館は地震観測を行った）及び立体骨組みモデルによる解析を行った。

山形断面を有する学校体育館の振動特性調査では、対象建物について振動測定と解析モデルより求めた1次固有振動数はほぼ同じとなり、その範囲において解析モデルの妥当性を確認した。解析モデルも用いて張間方向、桁行方向、上下方向の加振に対する屋根フレームの応答について検討し、張間方向及び桁行方向からの入力地震動に対して屋根フレームの大梁中央部で水平方向、上下方向ともに応答が増幅することが確認された。地震被害を受けた体育館の天井脱落箇所はこれら検討により応答が増幅する箇所に相似している（図6）。また、地震観測から屋根面の上下応答値が増幅されることを定量的に裏付ける結果が得られた。

#### b) 鋼板製屋根の構造安全性

鋼板製屋根の構造安全性については、強風被害事例から鋼板製屋根の熱伸縮に関する問題点の抽出、熱照射実験等による鋼板製屋根の熱伸縮性状の把握、断熱二重折板屋根の固定金物の疲労損傷試験の実施、断熱金具等の評価法と折板屋根の設計法の開発、等を行った。また、鋼板製屋根ふき材の設計・施工に関するプロセスの可視化を目的としてワークフロー分析による検討も行った。

断熱二重折板屋根の固定金物の疲労損傷試験結果を図7に示す。



写真6 天井振動実験の様子

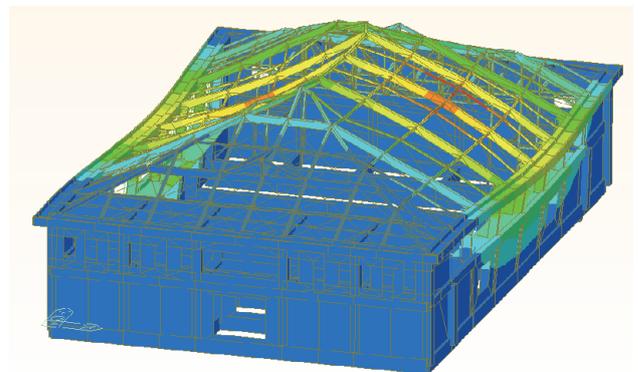
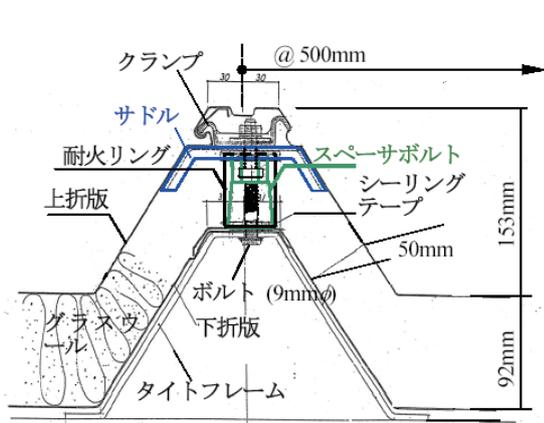


図6 対象体育館の固有モード形状（張間方向並進）

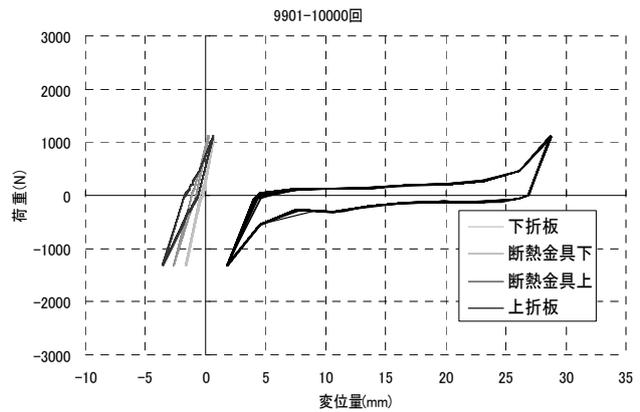
所定の水平方向の変位量により水平方向の繰り返し加力後、鉛直方向の引張試験を実施し、断熱金具等の破断強度を求めた。繰り返し回数については折板の寿命を30年とし1日1回の伸縮があると考えて、 $N=10^4$ （ $\approx 1$ 回/日 $\times 365$ 日 $\times 30$ 年）を標準値とした。試験結果を踏まえて、固定金物の疲労損傷試験をクリアした水平方向の変位量を許容変位量 $\lambda$ とし、以下の設計式(1)を提案した。

$$L_{\max} \leq \frac{2\lambda}{\alpha T} \quad (1)$$

ここに、 $L_{\max}$ は折板の最大流れ寸法（m）、 $\alpha$ は鋼材の線膨張係数（ $1/^\circ\text{C}$ ）： $1.2 \times 10^{-5}$ 、 $T$ は上下折板間の想定温度差（ $^\circ\text{C}$ ）である。実際の二重折板屋根では断熱金具により何らかの拘束を受けるため、折板の伸縮量は拘束のない場合より小さくなると考えられるが、ここでは安全側の設計となるように、拘束のない折板の伸縮量で判断することとした。また、折板は均質で屋根スパンの中央に不動点があり、折板の中央から端部に向かって伸縮する場合を想定し、想定温度差で生じる折板端部での熱伸縮量の最大値



a)断熱二重折板屋根の断面



b)疲労損傷試験結果

図7 断熱二重折板屋根の固定ボルトの疲労

が、断熱金具の水平方向の許容変位量を超えないこととした。これらの開発研究の成果は鋼板製屋根構法標準 (SSR2007) に反映されている。

#### 4) 伝統的木造建築物の保全に資する対策技術の開発

我が国には木造建築物に対する伝統技術の蓄積があり、伝統的構法による改修や建て替えには根強い需要がある。また、木材の炭素固定効果や住宅の長寿命化等、地球環境問題の観点からも伝統的構法への期待が高まっている。一方、その構造性能や防火性能については不明な点も多く、実務者のための資料や指針類が十分ではない。

本研究課題では、主に住宅を対象として伝統的木造建築物の構造性能、防火性能に関して工学的な

評価を可能にするための技術資料の蓄積を行い、大工工務店が利用できる簡易で汎用性のある構造及び防火の性能評価法及び設計法を開発することを目的とする。研究の概要は、図8のようにまとめられる。構造に関する主な内容は、構造性能に関する資料収集、構造性能評価法及び構造設計法の開発、限界耐力計算等の高度な手法を用いた設計法であり、防火関連の内容は、防耐火性能評価手法の開発、延焼防止に関する防火設計手法の開発であり、

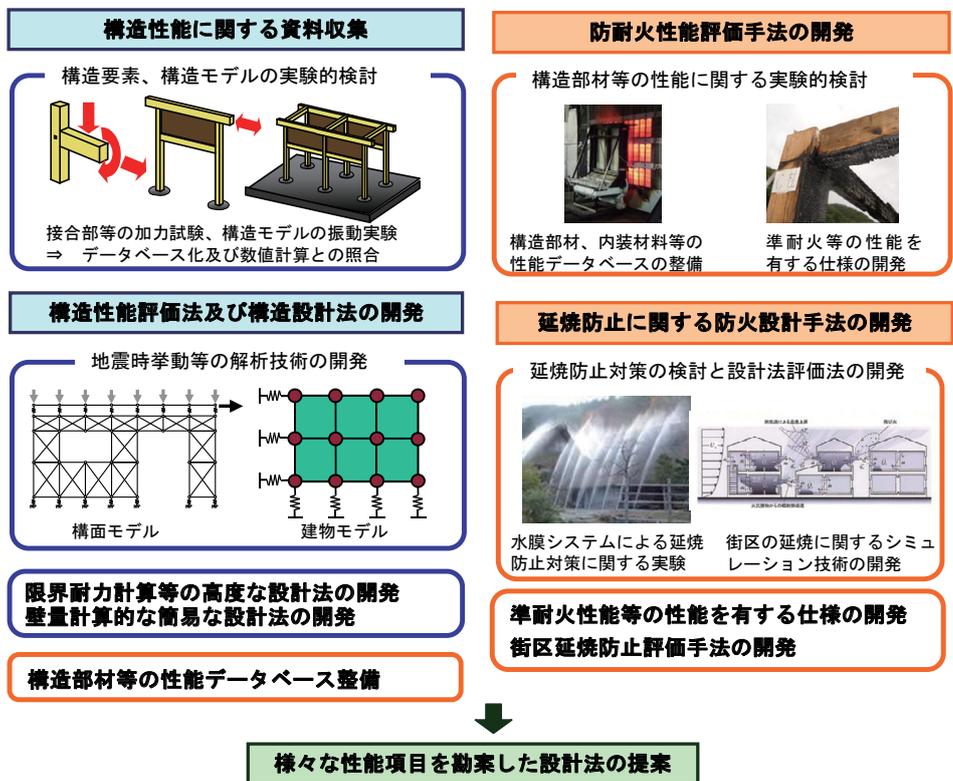


図8 伝統的木造建築物の検討項目

2つをまとめた形で、様々な性能項目を勘案した設計法を取りまとめるとともに、汎用性の高い高度な検証を必要とする構造及び防火の設計のための指針を取りまとめる。得られた成果は以下のようにまとめられる。

#### a)構造性能に関する資料収集

伝統的構法における重要な耐震要素である垂壁を有する構面に

ついて振動台実験を実施し、構面の荷重変形関係や破壊モードに関する計算法の妥当性を検証した(図9)。また、接合部や各種試験データ等を構造設計用データベースとしてまとめた。

b) 構造性能評価法及び構造設計法の開発

限界耐力計算等の高度な構造計算を適用する場合を想定して、水平構面のせん断変形を考慮する場合を含め、構面及び建物全体の構造モデル化手法、地震応答の予測方法、及び小屋組の耐風設計法の開発等を行った。

c) 防耐火性能評価手法の開発

建て替え及び大規模改修時に不可欠な準耐火構造の伝統的木造木舞土塗り真壁造外壁について載荷加熱実験を実施し、45分の準耐火性能を有することを検証した(写真7)。

d) 延焼防止に関する防火設計手法の開発

水幕システムによる外壁等の延焼防止対策について火災実験を実施し、比較的少ない水量でも延焼防止に有効性であることを確かめた。

e) 様々な性能項目を勘案した設計法の提案

大工工務店向けの設計マニュアルとして、構造に関しては、既存の2階建て以下の住宅に適用される壁量計算に類似した方法により、耐震、耐風性能を確保し得る設計法の提案を行った。また、

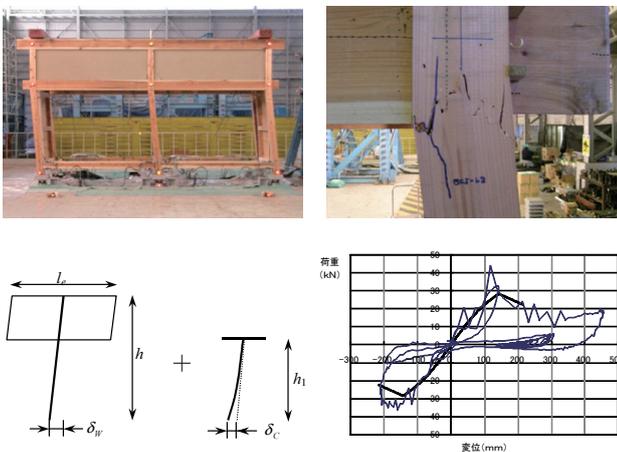


図9 垂れ壁付き構面の振動実験結果と計算結果の比較



写真7 土塗り真壁造外壁準耐火構造仕様の開発

防火に関しては、防火規制を受ける地域において要求される準耐火構造のうち、伝統的木造木舞土塗り真壁造外壁の構造仕様の提案を行った。併せて、汎用性の高い高度な検証を必要とする設計指針として、構造に関しては限界耐力計算を適用する場合の計算指針を取りまとめ、一方、防火に関しては延焼拡大危険度判定と防火対策に関する防火設計・評価法「ガイドライン(案)」をまとめた。

5) 一般建築物の構造計算に関わる技術的判断基準の明確化

構造計算の様々な局面で求められる適切な工学的判断を支援するための技術的な知見を取得し、その課題に関する考え方や評価方法を整理して提示する。その課題は、下記のように分野ごとの5つのサブテーマに分類し、国土交通省の「建築基準整備促進補助金事業」の一環として民間と共同研究を実施する課題等について、工学的な判断基準の明確化に関する検討等を行い、これに資する技術資料の整備を行う。サブテーマと各々の検討課題は下記の通りである。

a) 上部構造の共通課題

床の面内剛性を考慮した水平力分担、偏心率規定の適用方法について検討する。

b) RC 構造建築物

部材種別判定におけるRC柱はり接合部のせん断破壊の扱い、開口付きRC造耐力壁の強度・剛性評価法、脆性部材を有するRC架構の構造性能評価に関する研究、RC構造変断面部材の構造特性評価及びあと施工アンカーの長期許容応力度とその設計法等の検討を行っている。例として、写真8に、開口を有する耐力壁の実験の様子を示すが、任意の開口を有する耐力壁の強度、剛性評価法に関する技術資料を取りまとめるとともに、設計マニュアルを策



写真8 開口を有する耐力壁の実験

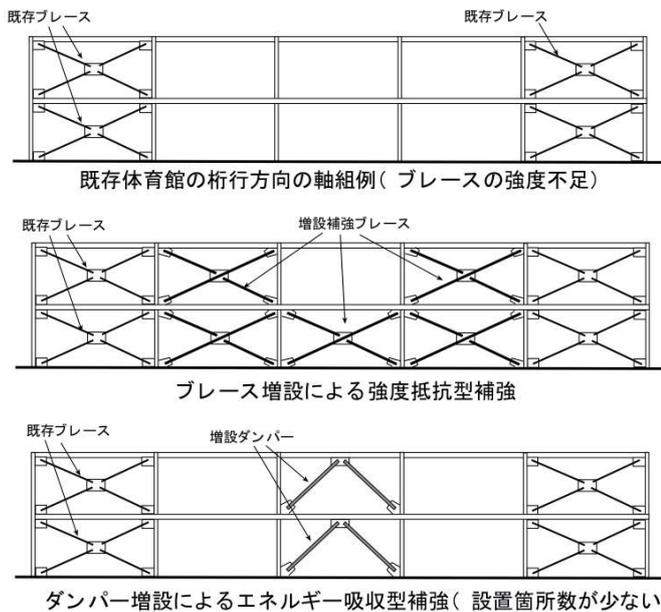


図 10 既存体育館のブレース及びダンパーによる補強



写真 9 クリープ破壊に関する実験

定し、その有効性を試設計や解析等により検証する。

#### c) 鋼構造建築物

冷間成形角形鋼管を柱に用いた鋼構造建築物の補強方法、中規模鉄骨構造建築物の簡易性能評価法及び鉄骨造体育館の耐震設計法について検討する。既存の鉄骨造体育館や工場等の鉄骨ブレース構造を対象に、図 10 に示すように、ブレースを用いた強度型の補強とダンパーを用いたエネルギー吸収型の補強の耐震性能の違いを地震応答解析で明らかにし、これらの補強設計に関する技術資料を策定する。

#### d) 木造建築物

さまざまな樹種・集成材・単板積層材等の長期性能、木材のめりこみが安全性に与える影響、変形能の異なる耐力要素併用時の

設計法及び不整形な木造建築物の性能評価法等の検討を行う。木材の長期性・めりこみについては、写真 9 に示すようなクリープ実験に関するデータの収集を行い、現行基準における荷重時間の調整係数に関する問題点の抽出及び関連技術資料の整理を行う。

#### e) 建築基礎構造

宅地擁壁近傍に建築物を配置した場合の影響の検討、既存杭基礎の支持力、地震時性能の評価法及び建築物に応じた地盤調査法について検討を行う。

## V 長周期地震動関連課題

### 一長周期地震動と建物応答性状に関する検討一

超高層建物や免震建築物のような固有周期の長い建築物の耐震性を検証するための長周期領域での地震動の性質とそれら地震動を受けた場合の当該建築物の地震応答に関する検討を研究課題「長周期建築物の耐震安全対策技術の開発(21-22)」で実施している。本課題では、国土交通省建築基準整備補助金事業課題 1 の「超高層建築物の安全対策に関する検討」の中のサブテーマ「長周期地震動に関する検討」の事業者との共同研究も行っている。ここでは、下記の 2 項目について検討の現状を報告する。

#### a) 検証用の長周期地震動に関する検討

#### b) 超高層建築物、免震建築物の長周期地震動に対する応答特性の評価

平成 7 年十勝沖地震の石油タンク大規模火災以来、巨大地震の長周期地震動による大型構造物の安全性が懸念されている。

わが国では、発生した長周期地震動により構造物が被害を受けた事例は、いまだ石油タンク以外には知られてない。海外では、メキシコ市において、太平洋沿岸に起こる大規模地震時に特殊な地盤条件が起因して、市内の堆積層が厚い地域において長周期成分を多く含む地震動が作用して、市内の特定の階数の建築物が多く損壊、倒壊した例がある。

わが国で超高層建築物が建設されるようになって以降、大きな長周期地震動を発生させる巨大海溝型地震は発生しておらず、実際に起こった場合の大都市域の長周期建築物の挙動についてはよくわかっていない。しかし、近年起こった 2004 年新潟県中越地震の時に、首都圏の超高層建物が大きくゆっくり揺れたり、エレベーターが途中階で止まるなどの事例が相次いだことから、超高層建築物、免震建築物に代表される長周期建築物において、現在設計時に用いられている入力地震動特性が、長周期地震動の特性を考えるとときにその実態を反映しているものであるのかどうか、特に

建築物応答の観点から再検討する必要がある。ここでは現在実施中である長周期地震動とその建物応答への影響に関する検討について紹介する。

### 1) 設計用長周期地震動の現状と課題

わが国では、法令でいう高さ 60 メートルを超える超高層建築物については、地震動時刻歴を用いた動的解析による耐震設計が義務づけられている。

初期においては、米国の強震記録、エルセントロ、タフトに加えて、当時の日本各地（超高層建築物のほとんどは、大都市に建設されたので、東京、大阪、名古屋、仙台など）での地域の代表的な強震記録という位置づけで、特定の記録が設計に用いられていた。当時は観測点も少なく地震記録がまだ乏しい時代であり、小さい振幅レベルの記録を拡張（スケーリング）して用いられていた。

スケーリングは、地震動強さの生起頻度などを勘案し、弾性設計用としては、200 ガル～300 ガル、弾塑性設計用では 300 ガル～500 ガル程度の最大加速度になるようにスケーリングを施し、地震応答解析に利用された。その後、速度振幅レベルの強さが超高層建築物の応答には影響が大きいとして、先行的にいくつかの超高層事例では最大速度振幅で規準化した観測記録が利用されるようになった。さらに、当時の評定実施機関である（財）日本建築センターから、弾性用で 25cm/s、弾塑性用で 50cm/s という、現在でも使われている標準的な速度振幅レベルが示され、その振幅で規準化された観測記録が入力地震動として広く用いられるようになった。（『86.6 ビルディングレター<sup>6)</sup>）さらに、その際に標準的に使われるべき波形（標準波）として、1940 年エルセントロ NS 成分、1952 年タフト EW 成分、及び長周期成分を含むものとして 1968 年十勝沖地震時に運輸省港湾技術研究所（当時）が八戸港湾で観測した強震記録の計 3 波が用いられるようになった。

この後、標準波のような特定の波、特に各建設サイトの表層地盤の影響が考慮されていない波形を設計に用いることの問題点が指摘され、建設省建築研究所（当時）と（財）日本建築センターが、共同研究により地震応答解析に用いる入力地震動の評価手法をとりまとめ、その最終成果が 1994 年に公表された。その中の「設計用入力地震動作成手法技術指針（案）」（以下センター指針<sup>7)</sup>が、超高層建築物や免震建築物の時刻歴解析に用いられるようになり、このセンター指針で例示された工学的基盤（せん断波速度 400m/s 程度の地盤面）上のいわゆるセンター波（BCJ-L2 波）を用いて、それぞれの建設地における工学的基盤以浅の表層地盤による増幅特性を考慮して、入力地震動を設定するようになった。こ

の BCJ-L2 波はしばらく共通波として用いられることとなった。この波形の減衰定数 5% 応答スペクトルは短周期域において加速度レベルがほぼ 1G、長周期域において、速度レベルが 100cm/s の応答スペクトルレベルを有している。

1995 年兵庫県南部地震において神戸等の主要被災地において、超高層建築物には大きな被害は出なかった。そのため、この地震においてはいわゆる長周期パルスの影響が課題になったが、長継続時間を有する長周期地震動が問題にはならなかった。ただ、この長周期パルスの問題は、大阪における上町断層のように、大都市直下の活断層による地震動として今後の大きな課題となっている。

その後、2000 年に建築基準法が改正され、超高層建築物のための時刻歴告示が制定され、超高層建築物及び免震建築物は、告示 1461 号で規定された地震動群による安全性の検証が義務づけられることになった。

この告示 1461 号にて規定された地震動スペクトル（告示スペクトル）は、1981 年に施行されたいわゆる「新耐震設計法」での設計地震力に対応したものである。この場合、対象建築物の固有周期はせいぜい 2.5 秒程度までである。告示スペクトルにおける周期 10 秒までの長周期部分は、速度スペクトル一定として、10 秒まで拡張されたものである。（図 11、図 12）

また、工学的基盤レベルでの減衰定数 5% 速度スペクトルレベルとしては、80cm/s 程度である。このスペクトルに適合する地震動時刻歴を告示波と呼ばれている。

ただし、超高層建築物の構造計算については個別に大臣認定のための審査を受けることになっており、その審査の中で、建設地や対象地震等の検討についての意見が述べられ、審査時点での知見に基づいて採用入力地震動の妥当性についても検討が行われることになっている。

告示スペクトルとは別に、建設地点周辺の地震の発生可能性や、建設地点における地質、地盤条件等を勘案して設定される入力地震動をサイト波と呼ぶ。

サイト波の評価は、審査の対象になるものの、サイト波の評価手法の選定は、基本的に設計者の判断に委ねられている。そのような事情から、サイト波の作成においては、簡便な方法によるものから、かなり高度な知識が必要な手法に至るまでさまざまな方法を用いて強震動予測を行っており、評価手法に非常に大きな選択の幅がある。サイト波については、近年強震動予測手法が急速に発展してきているものの、巨大地震による長周期地震動の予測では、地表面に近い表層地盤だけでなく、震源の大きさや位置、

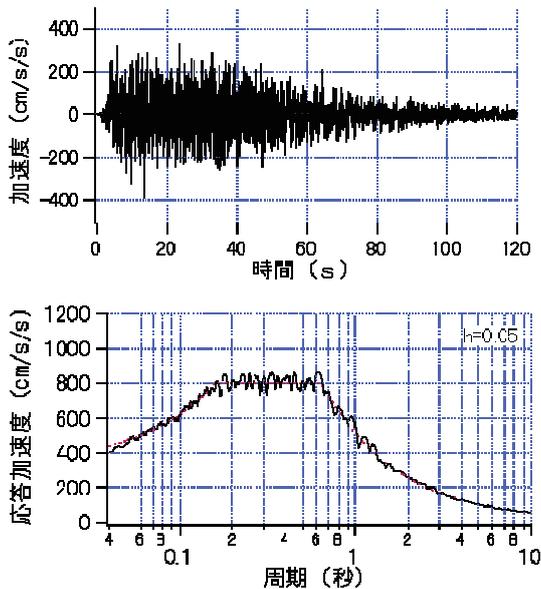


図11 告示波の波形と応答スペクトル

サイト直下の地震基盤以浅の3次元地下構造の影響による地震動の増幅や、地震動継続時間の長大化の影響を考慮する必要があることが指摘され、そのような特性の解明を踏まえた検討用地震動評価手法の確立が、重要な課題となっている。

周期2秒程度以上の長周期地震動については、いままで地震記録が非常に乏しかったこともあり、想定巨大地震の定量的な地震動レベル評価はされなかった。

2003年十勝沖地震における苫小牧での石油タンク火災を契機として、近年、長周期地震動による種々の長周期構造物への影響が懸念されており、超高層建築物や免震建築物等も、最新の知見に基づいた検証用地震動による応答評価が必要とされている。

これらの長周期建築物は、比較的新しいタイプの建物であり、巨大地震による長周期地震動を受けた経験がなく、また入力地震動として考慮すべき観測記録もほとんどない状態であり、過去の中小地震の記録に基づいて推定したシミュレーション波形による検討によらざるを得ない状況にある。

一方で、1995年兵庫県南部地震以降、わが国の大都市圏に大きな影響のある巨大地震の近い将来における発生が確実視され、巨大地震への早急な対策が求められている状況でもある。

このような状況を背景に、本課題では、長周期地震動特性に関する既往の知見や最近の観測データの分析による地震動時刻歴の評価手法、及びそれらの地震動に対する超高層建築物や免震建築物の応答特性を踏まえた、設計用長周期地震動の確立に資する検討を行っている。

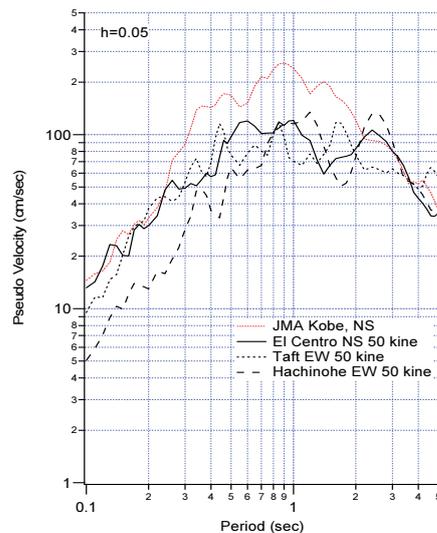


図12 標準波の応答スペクトル

検討での着目点としては、

1. 長周期地震動のレベルが各地震時どの程度になるか。
2. 従来と同様に5%減衰応答スペクトルで与えるべきか。
3. 時刻歴として地震動を与えるときの方法と問題点(地震動レベルと継続時間)

等があげられる。

## 2) 長周期地震動の評価の現状

超高層建築物等の長周期建築物への影響が懸念され、最近では、日本建築学会や土木学会による検討の中で、近い将来にその発生が懸念される巨大地震(東海地震、南海、東南海地震、関東地震など)を対象として、いくつかの地点で推定され、また予測地震動波形が提供されている。

それらの検討によると、建設地点の長周期地震動を決める要素は(1)震源の大きさと震源破壊域(アスペリティ)分布と破壊速度など、(2)震源域と建設地点との距離による地震動の減衰特性、(3)建設地点周辺直下の深い構造(特に3次元構造)に起因する長周期成分の生長である。

このうち、(1)の震源については、地震調査研究推進本部(推本)により、主要な地震については、推奨モデルが公表されている。(2)はいわゆる距離減衰の問題であるが、長周期地震動データの蓄積は近年進んでおり、それらのデータを用いて、統計的な検討による平均的特性を把握する必要がある。(3)は、わが国の地下構造(特に主要都市部)について、現在どの程度のことがわかっているか、あるいは長周期地震動予測の精度を上げるために、今後どのような調査が必要かなどについて、検討が進められてい

るところである。

(1) 石油タンクと設計用長周期地震動

2006年に施行された、新しい総務省告示<sup>9)</sup>では3種類の地域区分(地域1~3)に基づく地震地域補正係数が導入されている。0.5%減衰速度応答スペクトルで1m/sレベルを基本値として、地域1に対しては次の1)~3)の3区分に対して最大で2倍の補正係数が適用される。(図13参照のこと)

1) 苫小牧、酒田、新潟、2) 東京湾岸、3) 函館、秋田、清水、名古屋、四日市、大阪

地域2：予測スペクトルが周期約7秒未満で、1m/sを超える。

地域3：予測スペクトルが、1m/sに満たない。

(2) 建築学会、土木学会と共同研究による検討

わが国の大都市圏における特定の地点を対象として、経験的グリーン関数法、統計的グリーン関数法、有限差分法、それらの組み合わせとしてのハイブリッド法などを用いた検討が行われた。同じ地震であっても地震発生のプロセスや、計算方法の違いで、結果が大きく異なることを示しており、相当量の不確定性、ばらつきを想定して解釈すべきとしている。

(3) 内閣府による長周期地震動に関する検討

内閣府の検討では、各地点の地下構造データと観測波のH/Vスペクトルにより、全国の地盤の固有周期を推定し、分布図を作成して公開している。図14に全国地盤固有周期の分布図を示す。<sup>9)</sup>

(4) 日本建築学会・東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会による設計用長周期地震動の検討

地震動部会(土木学会、日本建築学会合同)の検討による提供波に基づいて、長周期構造物を主たる対象とした、設計用地震動スペクトル形状が提案されている。<sup>10)</sup>

(5) 日本建築学会・高機能社会耐震工学ワーキンググループの検討<sup>11)</sup>

地震動評価に関しては、関東、濃尾、大阪平野を含む南海トラ

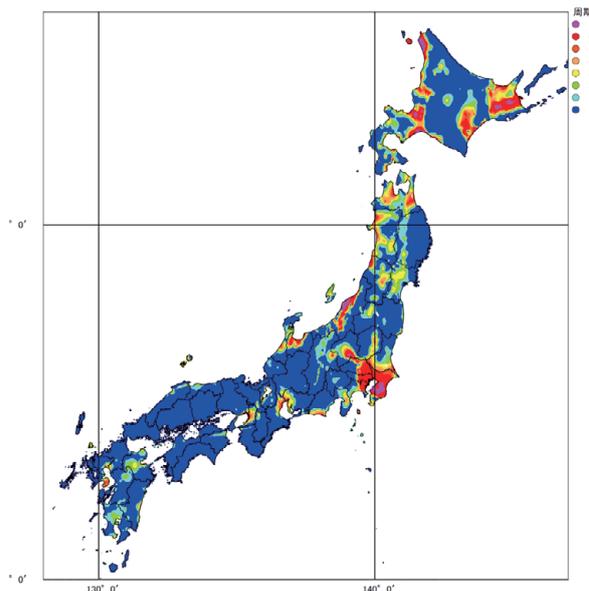


図14 内閣府公表の全国地盤固有周期分布

フ沿い3次元地盤モデル(3次元有限要素モデル)による東海・東南海地震の強震動シミュレーションを行っている。断層破壊の様相の違いによる地震動への影響度(ばらつきの大きさ)について検討し、既往の模擬地震動波形との比較などを行っている。

(6) 地震調査研究推進本部(推本)関係で全国の地下構造の推定に関する調査研究が実施されていて、同時に、近い将来の発生確率の非常に高い主要な海溝型地震(宮城県沖地震、東海・東南海地震、南海地震)に対応した長周期地震動予測地図が平成21年度末に作成される予定となっており、一部は既に長周期地震動予測地図試作版として公開されている。<sup>12)</sup>

(7) その他

関西地震観測研究協議会(関震協)による南海・東南海地震による大阪地域の超高層建築物の応答シミュレーションにより、そ

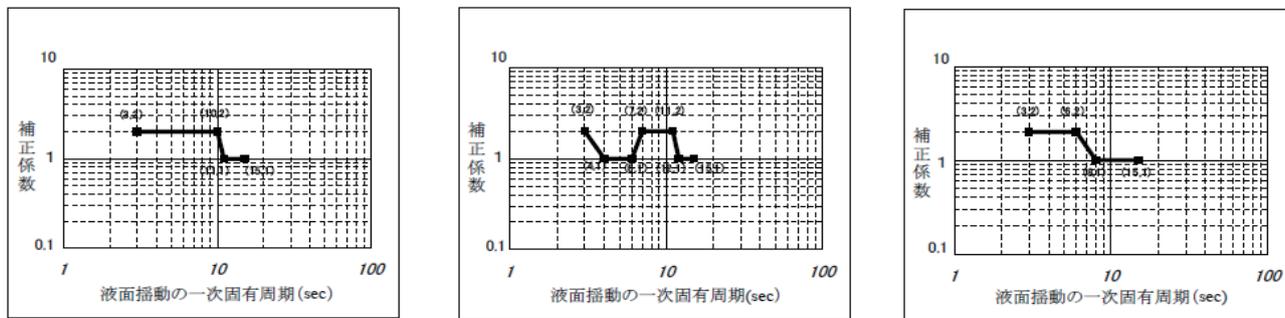


図13 石油タンクのためのスペクトル補正係数

の安全性を検討している。<sup>13)</sup>

その他、個別の検討事例として、佐藤他(1999)<sup>14)</sup>における関東地震による関東地域の地震動予測事例や、より汎用的な利用をめざした片岡他(2008)<sup>15)</sup>による、全国強震観測データを用いた長周期域を対象とした地震動特性の距離減衰式の提案などがある。

### 3) 時刻歴特性も踏まえた長周期地震動の評価の試み(平均的特性の検討)

長周期地震動を対象に、三次元有限差分法などの理論的手法に基づく地震動の再現や予測に関する研究が精力的に行われている。一方、経験的手法に基づく長周期地震動の予測については、応答スペクトルの距離減衰式に関する片岡・他(2008)<sup>15)</sup>の研究があるが、時刻歴波形までの予測を目指した研究はほとんどない。しかし、強震記録の蓄積と経験的手法の簡便性を考えると、経験的手法による長周期地震動の予測は工学的に有用であると考えられる。また、経験的手法による予測波は理論的手法による予測波のリファレンスとしても役立つものと考えられる。

ここでは、全国の多数の強震記録を用いて、長周期を含む周期0.1~10秒の広帯域地震動の回帰式(経験式)を求め、これに基づき想定地震による時刻歴波形を作成する方法について検討した。<sup>16)</sup>、<sup>17)</sup>、<sup>18)</sup>

(1) 減衰定数5%と1%の加速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの距離減衰式の推定結果を示す。回帰式作成に用いたデータは、2007年7月までに気象庁87型、K-NET、KiK-net観測点で観測された加速度記録から、以下の条件で選択したものである。震源については図15に示す。

○  $M_j \geq 6.5$ 、震源距離  $\leq 400$  km の海溝型地震

○  $M_j \geq 6.0$ 、震源距離  $\leq 350$  km の地殻内地震

○ 震源深さ  $\leq 60$  km

ここに、 $M_j$ は気象庁マグニチュードを表す。

固有周期 $T$ の関数である減衰定数1%、5%の加速度応答スペクトル $S_A$ とエネルギースペクトルを $Y(T)$ とし、 $Y(T)$ を $M_w$ (モーメントマグニチュード)と断層最短距離 $R$ をパラメータとして、

$$\begin{aligned} \log Y(T) = & a(T)M_w + b(T)R \\ & - \log(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) \\ & + c(T) + c_j(T) \end{aligned}$$

ここで、 $a(T)$ 、 $b(T)$ 、 $d(T)$ 、 $p(T)$ 、 $c(T)$ 、 $c_j(T)$ は回帰係数である。 $c(T)$ は周期1秒以上において地盤増幅がなく、地震基盤相当と考えられるKiK-netのFKSH19(都路)のサイト

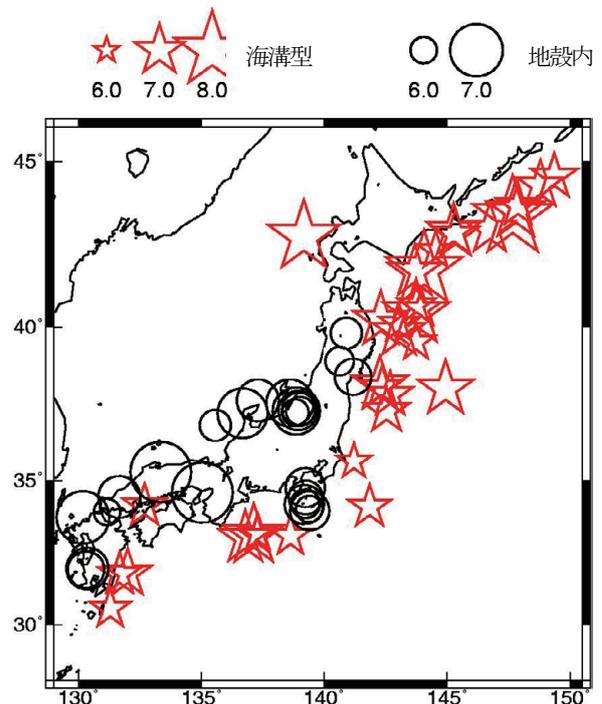


図15 検討に用いた地震とその震央位置

係数である。回帰分析は、海溝型地震と地殻内地震それぞれのデータセットに対して行ったが、 $c_j(T)$ は観測されている地震数で重み付け平均をして求めた。本研究と片岡・他(2008)<sup>15)</sup>の海溝型地震に対する $S_A$ の距離減衰式を比較したが、片岡・他(2008)<sup>15)</sup>では、水平2成分の応答値のベクトル合成値を用いているため、佐藤・他(2002)<sup>19)</sup>に基づき本研究の距離減衰式を1.4倍したものと比較した場合、距離の定義も異なるため厳密な比較ではないが、両者はほぼ整合している。

図16には、大阪湾岸の此花観測点(OSKH02)と名古屋観測点(AIC004)と津島観測点(AIC003)での減衰定数5%の $S_A$ (水平成分)の地盤増幅率を示す。此花では周期6秒で地震基盤に対して20倍近い増幅がある。濃尾平野内でも増幅率が異なっている。さらに、図17には、減衰定数5%の $S_A$ (水平成分)の周期5秒での地盤増幅率マップを示す。関東平野、大阪平野、濃尾平野、新潟平野、酒田平野、石狩・勇払平野、十勝平野など、堆積層が厚い地域での増幅率が大きいことが分かる。

(2) (1)で記述したデータセットを用いて、周波数 $f$ 依存の狭帯域毎の群遅延時間の平均値 $\mu_{\text{gr}}(f)$ と分散 $\sigma_{\text{gr}}^2(f)$ の回帰式(経験式)を作成した。 $\mu_{\text{gr}}(f)$ は波群の重心の伝播時間、標準偏差 $\sigma_{\text{gr}}(f)$

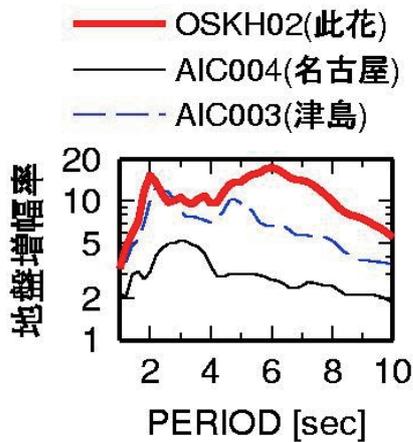


図16 観測サイトの地盤増幅率

は継続時間を特徴づける波群の広がりという意味する(和泉・勝倉、1985)<sup>20)</sup>。また、群遅延時間は位相スペクトルの1回微分であり、初期位相を設定すれば、狭帯域の $\mu_{\text{tgr}}(f)$ と $\sigma_{\text{tgr}}(f)$ から正規分布を仮定して位相スペクトルが計算できる。この手法には、表面波の分散性などの非定常性が表現できる特徴がある。なお、発震時が0秒となるように $\mu_{\text{tgr}}(f)$ を補正した。図18に、2004年伊半島沖地震(MJ7.4)の大阪平野内の此花での観測加速度波形(EW成分)と非定常スペクトル及び $\mu_{\text{tgr}}$ と $\mu_{\text{tgr}} \pm \sigma_{\text{tgr}}$ を示す。

$\mu_{\text{tgr}}(f)$ 、 $\sigma_{\text{tgr}}^2(f)$ とも、震源特性、伝播特性、サイト特性の和として表現できる(澤田・他、1998)<sup>21)</sup>ことから、 $\mu_{\text{tgr}}(f)$ と $\sigma_{\text{tgr}}^2(f)$ (ともに、水平2成分の平均と上下成分)を $Y(f)$ とし、 $Y(f)$ を地震モーメント $M_0$ (dyne-cm)と震源距離 $X$ (km)(破壊開始点と建設地点の距離)をパラメータとする次式で表現する。

$$Y(f) = a(f)M_0^{1/3} + b(f)X + c_j(f)$$

ここで、 $a(f)$ 、 $b(f)$ 、 $c_j(f)$ は回帰係数であり、 $c_j(f)$ はサイトの継続時間を特徴づけるサイト係数である。なお、地震モーメント $M_0$ とモーメントマグニチュード $M_w$ には、 $\log M_0 = 1.5M_w + 16.1$ の関係がある。図19には、此花と名古屋と津島での $\mu_{\text{tgr}}$ と $\sigma_{\text{tgr}}$ のサイト係数(水平成分)を示す。周期が長いほど、 $\mu_{\text{tgr}}$ と $\sigma_{\text{tgr}}$ が大きい傾向がある。濃尾平野内にある名古屋と津島でのサイト係数にも、明らかな違いがみられる。津島では特に $\sigma_{\text{tgr}}$ が大きく、長周期地震動の継続時間が長くなる。

(3) (1)で作成した減衰定数5%の加速度応答スペクトルの距離減衰式と、(2)で作成した群遅延時間の平均値と標準偏差の回帰式を用いて、想定巨大海溝型地震に対する予測波を作成した。そして、長周期部分を三次元有限差分法などの理論的方法で計算している

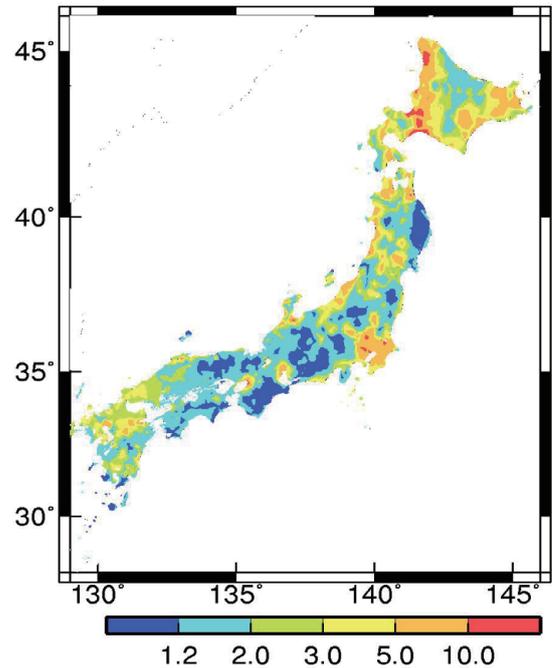


図17 全国の地盤増幅率マップ(周期5秒)  
(地震基盤→地表)

既往の予測波との比較から、本手法の適用性と今後の課題を整理した。

はじめに、群遅延時間の平均値と標準偏差の回帰式を用い、初期位相を乱数で与えることによりフーリエ位相スペクトルを求める。そして、この位相スペクトルを用いて、回帰式に基づく減衰定数5%の加速度応答スペクトルにフィッティングするように、

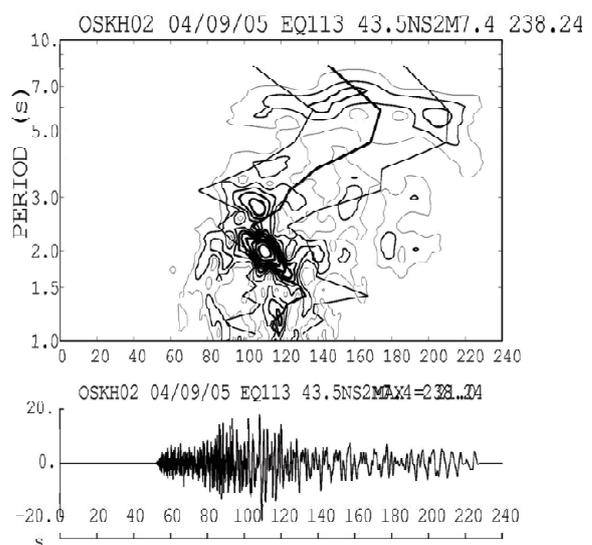


図18 2004年伊半島沖地震の此花での観測加速度波形と非定常スペクトル

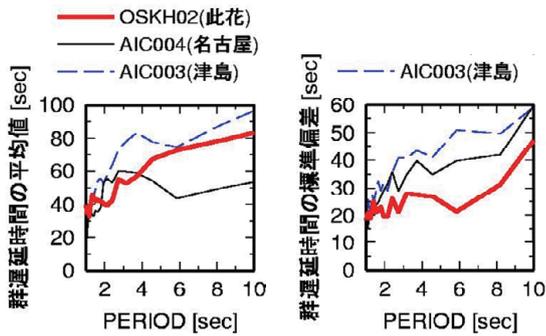


図19 海溝型地震の  $\mu_{\text{tgr}}$  と  $\sigma_{\text{tgr}}$  のサイト係数(水平成分)

フーリエスペクトルを繰り返し修正して時刻歴波形を作成する(大崎、2004)<sup>22)</sup>。

予測波の作成対象は、想定南海地震(Mw8.5)のOSKH02と、想定東海・東南海地震(Mw8.3)のAIC004とAIC003である。図20(a)に、鶴来・他(2005)<sup>23)</sup>に基づき矩形に設定した想定南海地震の巨視的断層面と破壊開始点及び予測地点の位置を示す。

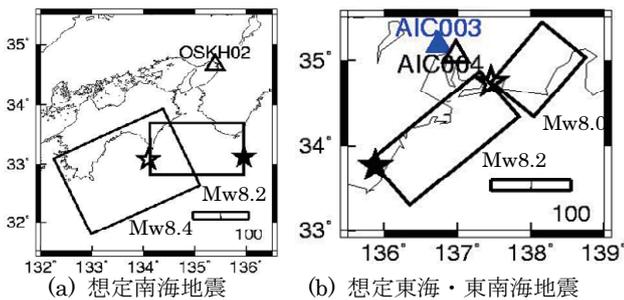


図20 想定地震の断層面と第1破壊開始点★、第2破壊開始点☆の位置(鶴来・他2005、佐藤・他2006)

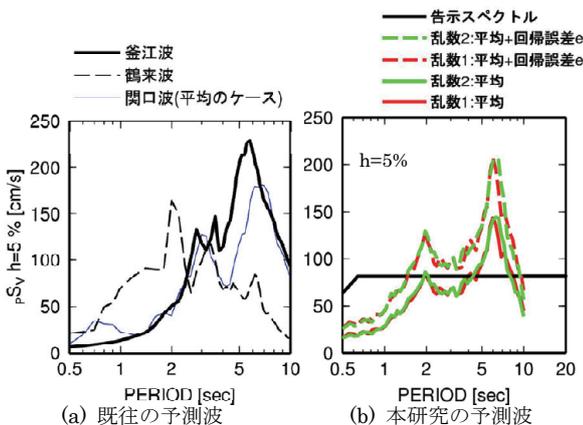


図21 想定南海地震によるOSKH02での予測波の擬似速度応答スペクトルの比較

図20(b)には、佐藤・他(2006)<sup>24)</sup>に基づく想定東海・東南海地震の巨視的断層面と破壊開始点及び予測地点の位置を示す。2つの断層面に対して作成した予測波を、破壊開始点の破壊時間差を考慮して足し合わせることで、最終的な予測波が作成される。

はじめに、2004年伊半島沖地震(Mw7.4)のシミュレーションにより、手法の検証を実施した。その結果、回帰式の平均値を用いた速度波形の継続時間は、OSKH02、AIC004ではやや過少評価、AIC003ではやや過大評価であった。しかし、回帰式の平均値±標準偏差を考慮すれば観測波形がほぼ表現できることが確認できた。

図21には、想定南海地震に対するOSKH02での既往の予測波(既往波)と本研究の予測波の擬似速度応答スペクトルの比較を、工学的基盤での告示スペクトル(安全限界)とともに示す。鶴来波(鶴来・他、2005)<sup>23)</sup>と関口波(関口・他、2006)<sup>25)</sup>には短周期の波も含まれているが、釜江波(釜江・川辺、2005)<sup>26)</sup>は周期2.5秒以上のみが有効である。

本研究の応答スペクトルは、周期2秒と6秒付近が卓越しているが、これは主に地震基盤からの地盤増幅によるものであり、周期6秒のピークは告示スペクトルを上回っている。関口波の応答スペクトルは、本研究の平均値と平均値+標準偏差の間にあり、+回帰誤差 $\sigma$ を考慮すると釜江波の周期6秒程度のピークもほぼ説明できる。図22には既往波の速度波形を、図23には本研究の回帰式の平均値を用いた速度波形と加速度波形を示す。本研究の速度波形の継続時間は既往波と同程度であり、波形の形状も関口波や鶴来波と類似している。本研究の予測波の最大速度は関口波や鶴来波とほぼ合っている。また、本研究の加速度波形と速度波形の比較から、予測波に非正常性が表現されていることがわかる。

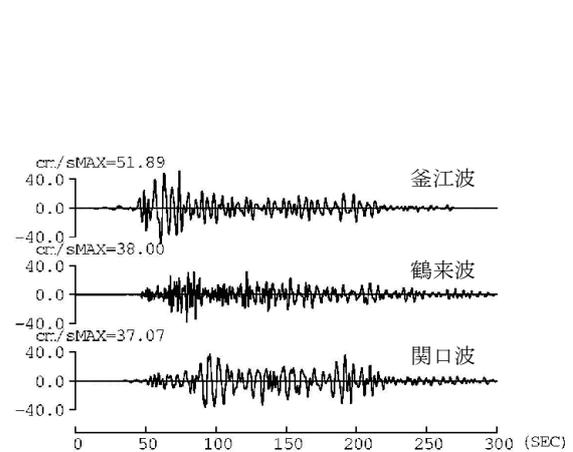


図22 想定南海地震によるOSKH02での既往の予測波(NS成分)の速度波形

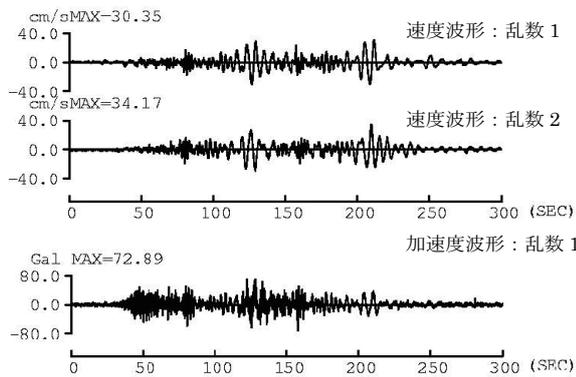
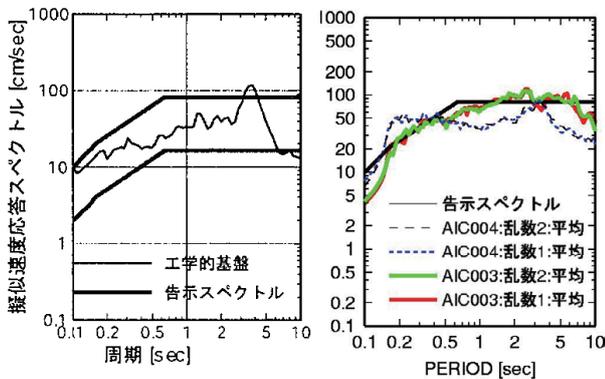


図23 想定南海地震によるOSKH02での本検討の予測波の速度波形(上、中段)と加速度波形(下段)



(a) 既往の予測波(佐藤・他,2006) (b) 本研究の予測波(告示スペクトルは太線)

図24 想定東海・東南海地震による名古屋中心部での既往予測波と本検討の予測波の比較

さらに、図24にはハイブリッド法に基づく名古屋市中心部NSTの工学的基盤における佐藤・他(2006)<sup>24)</sup>の予測波と、本研究のAIC003とAIC004での予測波の擬似速度応答スペクトルの比較を示す。1次固有周期(福和・他、2002)<sup>27)</sup>は、AIC004≒NST<AIC003の関係がある。長周期領域では、AIC004とNSTでの予測波のレベルがほぼ同じとなっている。図25には、既往波と本研究のAIC004での予測波を示す。本研究の予測波は、回帰式の平均値を用いた場合と、群遅延時間の $\mu_{tgr}$ と標準偏差 $\sigma_{tgr}$ の回帰式の平均値-回帰誤差 $e$ を用いた場合である。回帰誤差 $e$ を考慮した場合の本研究の予測波の継続時間は既往波とほぼ整合している。

本手法によれば、地震モーメント、巨視的断層面、破壊開始点、破壊の時間差、予測地点を与えることにより、周期0.1~10秒の時刻歴波形が作成できる。この手法では、回帰式作成用の波形の

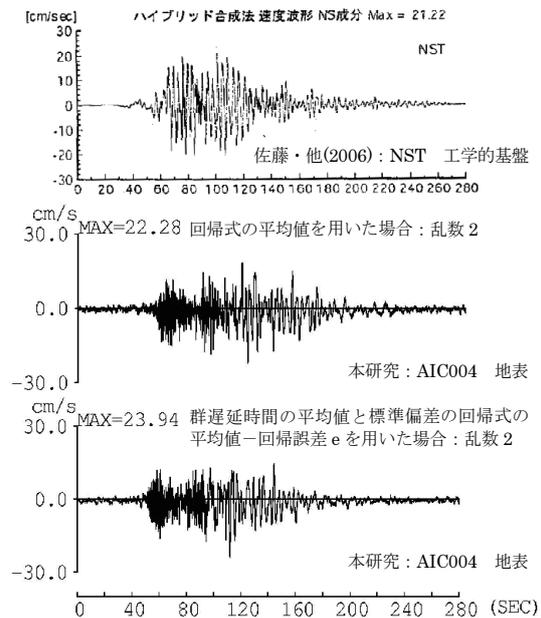


図25 想定東海・東南海地震による予測波(佐藤、上段)と本検討の速度波形の比較(中下段)

記録時間が十分長いことが重要であり、現在、記録時間の長いデータを補充して改良を行っている。また、観測点以外での適用のために、サイト係数の面的補間についても検討を行う予定である。

回帰分析の結果、減衰定数5%と1%の加速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの地盤増幅率、群遅延時間の平均値と標準偏差とも、関東平野、大阪平野など、堆積層が厚い地域で大きいことがわかった。特に地盤増幅率、群遅延時間の平均値には、基盤深さとの相関性がみられた。また、加速度応答スペクトルの回帰式(距離減衰式)については、類似の既往の研究(片岡・他、2008)<sup>10)</sup>とほぼ対応する結果となっている。

長周期地震動に対する群遅延時間の平均値と標準偏差の回帰式は、これまで全国レベルの検討例はなく、本検討で算出した新しい回帰式は、時刻歴波形形成のために有用であると考えられる。応答スペクトルや波形の継続時間について、いずれの予測波も既往波とほぼよい対応がみられた。ただし、一部の観測地点については、回帰分析に用いた海溝型地震の記録が一つのみで、かつ観測データの記録時間が不十分であるという状況にあり、他の2点と比較し地震動時間長に関する対応が良くないのは、この点に起因するものではないかと考えられる。

今後さまざまな機関で蓄積されている強震記録から、このような検討目的に適した地震動記録を収集、選別し、拡充させることが重要な課題の一つである。

海溝型地震に対する加速度応答スペクトル(減衰定数1%と5%)と群遅延時間の平均値と標準偏差の回帰式を用いて、2004年紀伊半島沖地震の此花(OSKH02)と津島(AIC003)での観測波形のシミュレーションを行い、回帰式の妥当性を確認した。さらに、想定南海地震の此花(OSKH02)、想定東海・東南海地震の津島(AIC003)、想定東海地震の新宿(TKY007)での予測波形を計算した。応答スペクトルについては、いずれの予測波についても、既往の予測波(既往波)のばらつきを考慮すると既往波とほぼよい対応がみられた。継続時間については、此花(OSKH02)、津島(AIC003)では、本検討の予測波は既往波と同程度であったが、K-NET 新宿(TKY007)については、本検討の予測波は既往波より継続時間が短かった。これは、回帰式作成のデータセットに含まれる、新宿(TKY007)での海溝型地震の記録は1996年銚子付近の地震と2005年宮城県沖地震のみであり、これらの観測波形の長周期の継続時間が短いためと考えられる。

そのため十分な継続時間を有する予測波作成のため、新宿の工学院大学の記録、気象庁1倍計の記録など、十分な継続時間が観測されている地点での記録を補充してサイト係数の評価を行ない、より実態を反映した予測波を作成している。

#### 4) 建築物の応答

本検討の成果は、設計用地震動の設定という限定された分野で使われることを前提としており、作成した地震動に対する建築物の応答特性やそのばらつきなども勘案して、応答値が当該建築物の性能として許容できるものであるかどうかを総合的に判断しなければならない。この時点では、強震動予測関連事項のみならず、建築物の応答特性等の知見に照らして、設計上の高度な判断が必要であり、このような検討を並行して行なう必要があるものと考えられる。

検討の初期においては、長周期地震動の予測という部分に重点がおかれて検討が実施されたが、作成地震動による建築物の地震応答性状を詳細に検討する必要があり、最終的には、それらがフィードバックされた上で、最終的に適切な設計用地震動が設定されることになる。想定巨大地震に対する長周期地震動の評価に関する検討に引き続いて、長周期建築物の応答特性の検討を行っている。

以下は、予備的解析として実施したものである。

告示1461号で与えられるスペクトルに適合する告示波と既往の観測波(50kine)に対して、骨組の最大層間変形角1/100未滿、塑性率2未滿のクライテリアを満足するように設定した3種類の耐力を持つ表1に示す超高層建築物解析モデルのうち中間的な耐力

表4 超高層解析モデルの諸元

層数	モデル名称	固有周期(秒)	第1折れ点での層せん断力係数( $r\alpha_{11}$ )	第2折れ点での層せん断力係数( $r\alpha_{21}$ )	Rt	第1折れ点での $D_n$
30	30-H	3.08	0.125	0.169	0.312	0.40
	30-M	3.26	0.112	0.151	0.294	0.38
	30-L	3.38	0.104	0.141	0.284	0.37
40	40-H	4.32	0.084	0.114	0.222	0.38
	40-M	4.54	0.076	0.103	0.211	0.36
	40-L	4.79	0.068	0.092	0.200	0.34
50	50-H	5.39	0.067	0.091	0.178	0.38
	50-M	5.63	0.062	0.083	0.171	0.36
	50-L	5.98	0.055	0.074	0.161	0.34

表5 長周期地震動の最大加速度と継続時間

入力地震動		Max. Acc. (cm/s/s)	Max. Vel. (cm/s)	継続時間(秒)
N-OSKH02	av	70.9	33.8	625.36
	sd	105.2	46.9	625.36
T-TN-AIC003	av	221.1	31.0	645.36
	sd	322.2	48.4	654.38
T-TN-AIC004	av	323.0	20.6	645.36
	sd	682.3	37.6	645.36

を持つ鉄骨造超高層建築物の30層、40層、50層モデルを対象として、前述の方法で求めた長周期地震動(OSKH02は、想定南海地震、AIC003及びAIC004は東海-東南海連動型とした)を用いた質点系の地震応答解析を行ない、既往の観測波(EL CENTRO NS、HACHINOHE EW、TAFT EW)50kine、告示波(八戸位相、東北学位相、JMA 神戸位相)、BCJ-L2波による応答結果と比較した。この場合、地震応答解析における減衰は2%剛性比例型を用いた。

応答解析結果の一部として各層の層間変形角について図26に示す。左側は30階モデルに対するAIC004の波形による結果、中央は40階モデルに対するAIC003の波形による結果、右側は50階モデルに対するOSKH02の波形による結果である。それぞれの波は各サイト固有の増幅特性を反映しており、地盤の卓越周期に近い固有周期を有する建築物で応答が大きくなっていることがわかる。

本検討による波形は平均的な特性を持つもの(av)と、平均値まわりのばらつきも考慮したもの(sd)の2種類の波形について検討を行っている。表5に示す各地震波の最大振幅や、図26の応答値分布などから、この2つのレベル差は相当に大きいものと理解できる。また各モデルともに地震波によっては1/100を超えるレベルの層間変形角を示していることが分かる。ここでばらつきとして与えているものはデータ全体から求まるいわゆる帰帰誤差と呼ばれるものであるが、地震動の適切なレベル設定のためには、このばらつきを生み出している要因を分析することが必要である。

このほか、建物応答特性については、超高層建築物だけでなく免震建築物についても実在する建築物に近いモデルを用いて、作成した地震動による応答解析を日本建築構造技術者協会(JSCA)

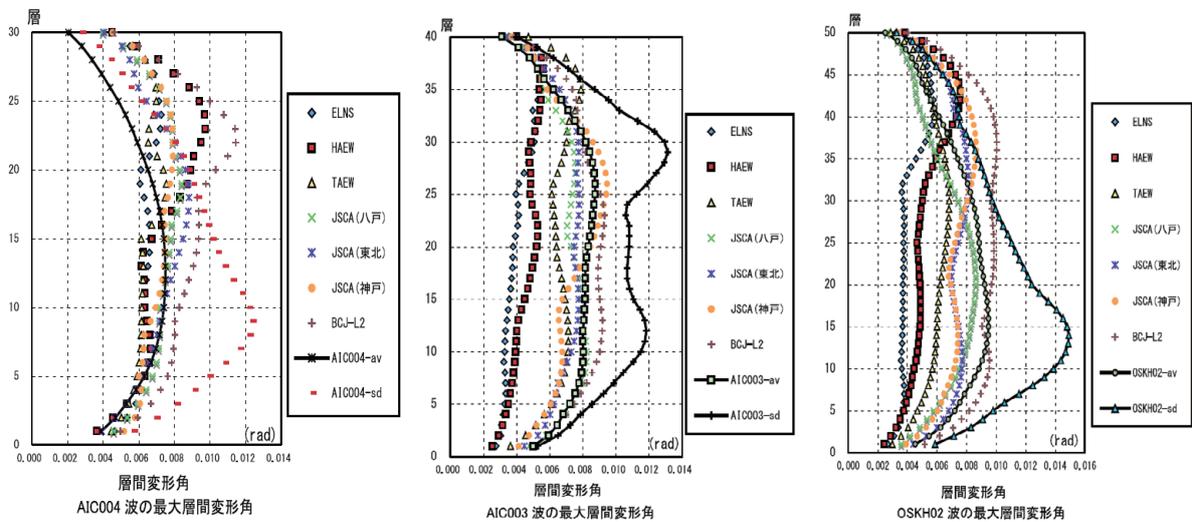


図 26 各モデルの応答解析による層間変形角の比較

及び日本免震構造協会（JSSI）との共同研究で実施している。この場合、超高層建築物については、S造とRC造、高さ、モデル化の違いなどによる応答値の違いについて検討している。また、免震建築物については、建設年代、高さ、免震材料等の条件毎にモデル建物を選定して応答解析を実施している。成果は今年度末にまとまる予定である。

**5) まとめ**

長周期地震動については、近年断層モデルによる理論的な検討が精力的に行われている。

しかしながら、近年の充実した地震観測網をもってしても想定地震のシミュレーション結果の妥当性を検証する海溝型大規模地震の観測データはいまだなく、また同様の理由で、同種地震動の平均的な特性を検討するにも、規模の一ランク小さい地震による観測データによる検討結果を外挿せざるを得ないのが現状である。

このようなことから、現状では両方の手法のもつ利点で互いを補いながら進めて行くことが賢明であろう。

今後設計用という観点から、検討をすべき点としては以下のことが挙げられる。

**地震動評価に関する事項**

1) 地震動のばらつきの評価

地震パラメータの設定値や、ランダム波形として作成される地震動波形のばらつき、特に同一モデル波形間での応答のばらつきを明確にする。

2) 既往の公開作成波形との比較

中央防災会議や地震調査研究推進本部が公表する長周期地震動

予測波形及びその評価方法との照合を行う必要がある。

3) 良質な観測データの拡充

短期的には難しいが、長周期成分を忠実にとらえた記録時間の長いデータの拡充を進める必要がある。

4) 構造設計への適用

構造設計への適用を意識し、応答値に直接関与する地震動パラメータと応答指標を抽出し、相互の関係及びそのばらつきなどを明確にする必要がある。

設計における位置づけを明確にするともに、検証用地震動として利用されるための、算定手法や手順、適用範囲の明確化と算定に要する各種情報とその信頼性の収集・整備及び提示など。特に長周期領域においては図27に示すような設計用のサイト増幅率のイメージが成り立つであろう。

図27では、基準を地震基盤としている。フラットな領域と、卓

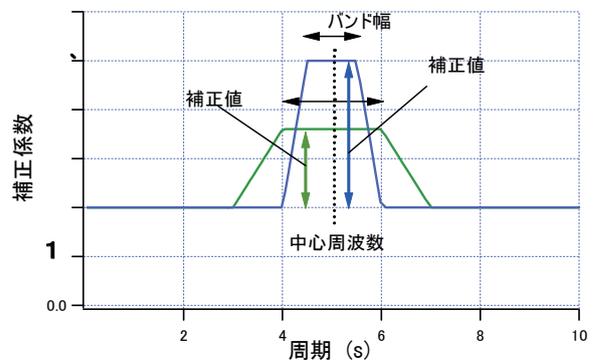


図 27 地震基盤から工学的基盤までの地盤増幅率（増幅サイト係数）のイメージ

越周期を中心とするピークの高さやすそ野の広さをどのように地域区分するかなどが検討対象である。

### 建築物の応答特性の検討に関する事項

#### a) 長周期地震動に対する超高層建築物の安全余裕度の検証

##### ① 設計安全クライテリアを超える応答に対する超高層建築物の安全余裕度

これまでの検討で、巨大地震に伴う長周期地震動によって、超高層建築物の応答が設計安全クライテリアである層間変形角1/100を超える場合があることが明確になってきた。設計安全クライテリアを超えても、建物が直ちに倒壊や崩壊にいたるわけではないが、将来、発生が懸念される巨大地震に備えるには、設計安全クライテリアを超える応答に対する超高層建築物の安全余裕度を明らかにする必要がある。

② 高さや構造種別を変えた超高層建築物の骨組モデルの詳細解析  
そのためには、既存の超高層建築物の大変形時における応答性状を、個々の部材の塑性化の進展や架構の安定性などを追跡できる骨組レベルの精緻な解析が必要である。また、長周期地震動は特定の周期帯の成分が強いことから、その周期帯で共振しやすい建物を含むように高さや構造種別を変えた複数の建物モデルを設計すること、実在する既存の超高層建築物の特性を適切に表現することが重要である。

#### b) 長周期地震動に対する構造応答クライテリアの検討

長周期地震動に対する構造応答クライテリアを明らかにするためには、以下の項目に関する情報収集・整理が必要である。

##### ① 繰り返し载荷を受ける部材の損傷評価クライテリアの検討

##### ② 繰り返し载荷を受ける架構の損傷評価クライテリアの検討

上記の検討に基づき、長周期地震動に対する構造応答クライテリアについて明らかにする必要がある。

## VI 今後の研究に向けて

ここでは、構造分野において、現在研究されている課題も含め、今後5年程度の期間において、取り扱う必要のある研究課題について整理する。

#### a) 地震動の設定と建築物の地震時挙動の解明

M8級の巨大地震の発生については、今後30年間に東海地震の発生する確率は87%、東南海・南海地震の発生確率は60%とされている。これらの地震により、関東、東海及び関西の平野地域では、長周期・長時間継続の地震動は発生することが予測されている。

現在、長周期地震動については、国土交通省の建築基準整備促

進補助金事業と共同研究を実施し、大都市地域（大規模平野）で発生する地震動の評価と設計に向けた地震動の設定について検討を行っている。地震動の設定には、ある範囲のばらつきを考慮する必要があり、どの程度ばらつきを設定するかも大きな課題となっている。また、長周期地震動が作用した場合の超高層建築物や免震建築物等の長周期建築物の地震応答の評価も行われているが、長周期建築物の地震応答は地震動の大きさに依存しており、上部構造の層間変形角が大きくなる場合には構造性能の把握等が必要となり、長周期で長時間繰り返す荷重に対する構造部材の特性を実験により明らかにし、必要であれば、制震部材を追加し、建築物の応答の低減を計らなければならない。

さらに、M8級の巨大地震の発生については、長周期地震動のみでなく、震源域近傍の地域では、最大速度が大きくなる地震動も想定され、中低層も含めたすべての建築物の耐震対策を考えていく必要がある。

一方、首都圏、大阪府などの地域では、直下型地震の発生に対する対策も必要となる。近年の活断層調査によってわが国の活断層の所在を示す都市圏活断層地図などが整備されつつあるが、再現期間が長い場合も多く、建築物の構造設計での活断層の取り扱いについては十分に議論されていない。

建築物に大きな被害をもたらした、平成7年兵庫県南部地震や平成16年新潟県中越地震は、いずれも内陸の断層を震源とする直下型地震によるものである。断層の直上近傍に位置する地域では、長時間継続する地震動ではなく、パルス的な波動が2回程度繰り返される地震動であり、耐力の小さい建築物では倒壊する可能性も大きい。また上部構造の有する減衰性能を十分に発揮できない場合も想定され、地震動の大きさの設定や建築物応答の評価については、未解明な点が多く、一般建築物や都市機能も含めた総合的な取り組みが不可欠である。

#### b) 既存建築物の構造リニューアル手法の検討

民間での技術競争もあり、一般建築物や戸建て住宅への耐震改修における改修技術については、多くの提案がなされ、実用化されている。防災上の機能継続が必要な建築物（自治体関連、学校、病院等）については、段階的に改修が進められているが、高齢者が居住する住宅等では、改修費用などの要因により、改修がなされていない現状がある。改修において増設される構造部材（強度抵抗型やエネルギー吸収型等）の性能については、実験等によりその有効性が確認されているが、それらの部材が取り付いた建築物全体での耐震性能になると、改修部材と本体との取り付け部分での変形が大きくなり、改修部材が想定した変形を示さないことが

原因で、改修部材の効果が十分に発揮できない場合が生じており、注意が必要である。

建築物の耐震改修をもう少し広くとらえ、主要構造体の変更を目指した構造リニューアルの手法がある。たとえば、低層壁式RC造住宅における、梁せい低減、壁や床への開口の新設等が挙げられるが、現在では、大幅な改修に対する技術検討や中高層RC造住宅に対する適用可能性については十分検討されていない。

既存建築ストックの再生・活用手法の観点からは、もっと積極的に、低層住宅・中高層住宅において、用途変更も含めた大幅なリニューアル改修方法を提案していく必要がある。具体的には、構造部材の撤去・取替え、抵抗機構の変更、新たな抵抗機構の設置等に関わる個々の技術を検討し、改修技術とその性能に関する知見を蓄積する必要がある。

#### c) 建築基準法の構造設計における技術的支援

##### i) 構造計算に関わる技術的判断基準の明確化

第2期中期計画における研究課題「一般建築物の構造計算に関わる技術的判断基準の明確化」では、判断基準が明確でない事項のうち柱梁接合部、変断面部材、開口付き耐力壁、耐力壁周辺架構、あと施工アンカーに関する判断基準の明確化を検討している。接合に対する定着の解析モデルの影響、ピロティ構造の配筋設計、増分解析を用いた保有水平耐力計算法、部材のせん断割り増し、限界耐力計算における設計者判断の影響、コンクリート系各種構造の詳細設計に関する知見等、多くの項目の情報が不足しており、引き続き検討が必要である。

本検討は、現行法規において技術的な判断基準が不足している事項への知見の蓄積を目指すものであるため、建築研究所独自に行うことには時間的・予算的制約もあり、現在実施されている、国土交通省の建築基準整備促進補助金事業を活用し、大学や民間等と共同研究として実施するとともに、日本建築行政会議、(社)日本建築士事務所協会連合会、(社)日本建築構造技術者協会、(社)建築業協会等の関係団体と協調して検討を進める必要がある。

##### ii) 建築物の構造設計における計算精度の向上

構造設計には、いろいろな計算仮定のもとで、モデル化や計算方法が提案されている。たとえば、剛床仮定が成立しない建築物では、面内の変形の影響や偏心率の計算等、新たな評価法を提案する必要がある。建築物の構造設計の実態として、使用する構造計算プログラムや動的解析プログラムにより、計算仮定やモデル化が異なるため、結果として、建築物の構造性能が大きくばらつくことが指摘されている。このことから、建築物の構造設計の計

算精度の向上を図ることを目的として、構造設計において使用される構造計算プログラムや動的解析プログラムの計算仮定や解析手法について問題点の抽出を行い、建築物の地震時挙動を的確に評価するために必要な技術情報を検討し、標準的な手法の提示を行うことが必要である。

##### iii) 基礎構造の2次設計

現在、一般の構造設計では、基礎の2次設計（大地震での基礎構造の安全性の検証）における確認の方法は示されていない。1次設計では、基礎構造部材（フーチング、杭）の応力や地盤支持力が、短期の許容応力（支持力）度以下であることを確認することとなっている。大地震時には上部構造の倒壊を防止することが、建築物の2次設計に求められる条件であるため、基礎構造の損傷が人命に関係するかどうかの議論は難しい。1964年の新潟地震では、地盤の液状化により、建築物の鉛直支持力が無くなり、建築物が大きく傾斜した被害が見られたが、幸いにもこれらの建物では死者はでなかった。しかし、地震後には上部構造には顕著な被害がないものの、建物は解体されたようである。

大地震時に、上部構造や基礎構造がどのように揺れるか、また上部構造と基礎構造のどちらで建築物の安全性が決まるか等、構造設計者には説明責任が必要であると思われる。品確法においては、地盤及び基礎構造については、それぞれの性能を評価・表示するようにはなっていない。品確法の各評価基準は、建築基準法の規定に基づいているため、建築基準法で規定されていない内容を含めるまでには至っていない。

地盤や基礎構造の終局状態の検討や地盤・基礎構造に作用する地震力などの検討は行われているが、その成果が世の中に広まることが少なくなっている。また近年では、建築分野において、地盤・基礎構造分野を専門とする大学の研究室も激減し、地盤や基礎構造に興味を持つ学生が少なくなっている。建築物の構造設計における基礎構造・地盤支持力の重要性を再認識させる必要がある。

##### iv) 地盤調査データの共有化

近年、地盤データベース（地盤調査資料）が公表され、一般に利用される機会が多くなっている。公表する機関としては、国土交通省、(独)土木研究所、自治体等があり、公共建築物の建設の際に、実施した地盤調査資料に基づいている。また地盤工学会では、各支部で地盤情報のデータベースを構築している。さらに、(独)防災科学技術研究所では、(独)産業技術総合研究所、(独)土木研究所、(社)地盤工学会などとの連携により、散在している地下構造データの統合化が試みられており、データの公開に向け

た準備が行われている。このような地盤情報の公表は建築物の構造設計者にとっても有益であり、地域における地盤特性の把握や構造設計における地盤状態の確認など利用価値は大きい。

既存データの範囲をもっと広げてみると、建築構造設計においては、常に地盤調査が実施されており、数多くの結果が蓄積されている。これらの地盤調査資料は、所有者（発注者）に属する情報であるため、秘守義務があり、公開されることは少ない。上記に示した国や自治体の地盤情報は、高速道路などが建設されている地域に集中しており、建築物が数多く建設されている地域の公表資料は少ない。民間建築物で調査された地盤情報が利用できるようなれば、地域でより詳細な地盤情報データベースが構築できるようになり、建築構造設計への利便性にも大いに役立つことが期待される。

#### d) 建築物における地震後の機能維持

中央防災会議におけるBCPの必要性が叫ばれ、地震後も機能維持が継続する試みがなされている。また2009年日本建築学会大会において、「高機能社会に求められる建築構造と構造委員会が果たすべき役割」と題する構造部門研究協議会では、大地震の直後にも「生活の質の保証」が強く求められることから、そのために我が国の建築構造学、耐震工学に関わる産官学がスクラムを組むことの必要性が指摘された。さらに、「地震リスク評価とリスクコミュニケーション」と題するパネルディスカッションでは、地震PML（予想最大損失額）は共通の評価法がないことが大きな問題点として挙げられた。

これらのことから、地震後の建築物の機能継続性評価における指針等の作成が必要となり、機能継続性評価手法は、構造設計者が使用しやすい形とし、民間や研究者がより耐震性の高い部材・製品を開発する際に利用できるような枠組みを有すること、さらに、ユーザにとって関心の高い項目（例えば地震後の生活困窮度や業務困難度など）を表示すること等が含まれる必要がある。

地震後の建築物の機能継続性評価指針をまとめるためには、損傷評価・修復性評価・機能性評価データベースの充実と利用マニュアルの構築も重要である。品確法の改善も視野に入れ、建築物の総合的な損傷防止を目指し、地震後も早期に地震前の状態に戻る条件を明らかにする必要がある。

#### e) 低炭素社会に向けた木材資源の有効活用

木材資源の有効活用や循環型社会、低炭素社会の実現という目標に向けて、建築物における木材の利用拡大がその一方策として

注目されている。戸建住宅のみならず、集合住宅や学校、事務所などの中層建築物にも木材の利用拡大を図ることは、その有効な手段であるが、地震時挙動など構造に関する技術的課題も少なくない。防火に関しては、基準法改正により木材を用いた耐火建築物が可能となっており実施例もあって実現性は高い。

木造または他構造との併用構造による中層建築物の構造性能評価法、設計法を提案することで、構造設計が容易になり、建築物の建設が促進されると考えられる。地震時挙動の評価、構造のモデル化の検討、構造要素に関するデータの蓄積等により、4～5階建て程度の木造また併用構造の中層建築物の建設を推進していくことを考えている。

#### f) 屋根ふき材等の耐風性能の確保と向上

2007年に建築基準法が改正され、建築確認時に屋根ふき材等の構造計算書を提出することが義務付けられたが、屋根ふき材等の構造計算を行うために必要な「屋根ふき材等に作用する風荷重」や「屋根ふき材等の耐風性能評価法」に関して検討を進める必要がある。近年、竜巻の発生も多く、突風による被害も報告されている。被害の中には、飛来物の衝突による外装材の被害も見られる。突風における被害状況の把握や被害の発生メカニズムに関する研究により、竜巻に対する建築物の耐風設計の考え方や被害軽減策を検討することを考えている。

#### g) 強震観測による構造特性・損傷状態の把握

建築研究所の強震観測は50年以上の歴史があり、多くの観測地点では長期間に渡る観測が行われている。観測建築物数が70強と小規模ではあるが、全国の主な都市に配置され、日本列島を網羅するよう配慮されている（図28）。各観測地点の地震発生頻度や期待される地震動強さの差異を考えると、同一の地点で長期的に観測を継続することはベンチマークとしての役割を果たすだけでなく、建築物の振動特性の経時変化を観察するためにも重要である。

近年、(独)防災科学技術研究所、気象庁や自治体の観測網で震度5強以上に達する地震動が数多く得られているが、その観測地点周辺の建築物の被害の様相は、震度や最大加速度の大きさと整合していないことが指摘されている。建築物への入力地震動が地表の地震動と異なることがその一因であると考えられる。建築物への入力地震動は、建物規模や形状、基礎形式や地盤条件などの影響を受けて極めて複雑であり、入力地震動の定量的評価は建物の耐震設計の合理化のために重要な課題である。

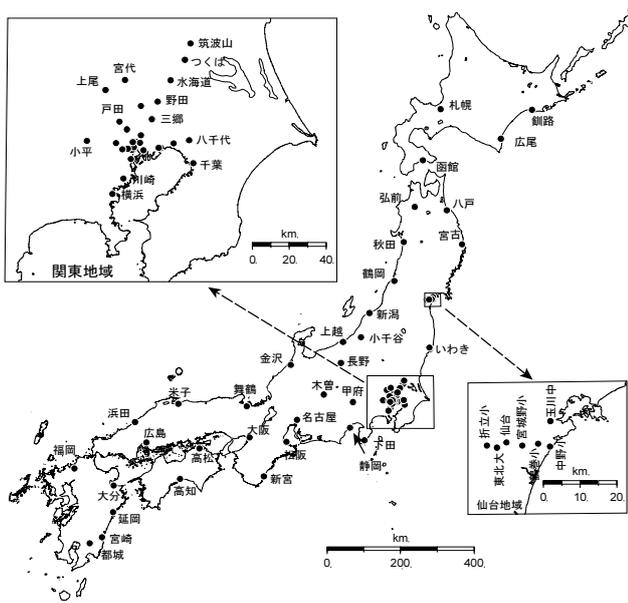


図 28 建築研究所の強震観測地点

建築物の強震観測においても、地震防災に資する情報を提供することが必要となる。気象庁の震度計や地方自治体の震度情報ネットワーク、防災科学技術研究所の K-NET は地震後即座に、震度などの情報を提供しており、地震後の状況把握に大いに役立っている。建築物に設置された地震計から得られた揺れの情報から、建築物の揺れの様子、損傷状況が判断できる情報が提供できれば、地震防災の一役を担うことができる。そのためにも、どのような観測（地震計の設置位置と数）を行い、観測記録をどのように処理すれば建築物の損傷を検知できるなどの研究も必要になる。

## Ⅶ おわりに

建研の第2期中期計画に基づく構造グループの研究課題の概要を紹介した。特に、現在注目を集めている「長周期地震動」に関連した内容については、詳しく説明した。

今後の研究として、地震動の設定と建築物の地震時挙動の解明、既存建築物の構造リニューアル手法の検討、建築基準法の構造設計における技術的支援、建築物における地震後の機能維持、低炭素社会に向けた木材資源の有効活用、非構造部材の耐風性能及び強震観測結果の活用などが挙げられる。

## 謝辞

原稿作成に当たり、情報提供いただきました、構造研究グループ、生産研究グループ、防火研究グループ及び国際地震工学センターの各研究員に感謝いたします。また、本検討の一部は、国土

交通省基準整備補助金事業の中において事業者との共同研究として行われているもので、関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 内閣府中央防災会議ホームページ  
(<http://www.bousai.go.jp/chubou/chubou.html>)
- 2) 国土交通省ホームページ  
(<http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/index.html>)
- 3) 国土交通省住宅局記者発表資料、2006年5月12日
- 4) 国土交通省住宅局建築指導課、国土交通省国土技術政策総合研究所、(独)建築研究所、日本建築行政会議監修、建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会編集、(財)日本建築防災協会、(財)日本建築センター編集協力：2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書、全国官報販売協同組合、2007.8
- 5) 福山洋：建築基準法のRC構造関係規定の改正の背景と趣旨、コンクリート工学、Vol. 47、No. 7、pp. 19-25、2009. 7
- 6) 日本建築センター、ビルディングレター、1986.6、
- 7) 建築研究所・(財)日本建築センター、「設計用入力地震動作成手法技術指針」、1992、BCJ
- 8) 座間信作 「石油タンクのスロッシングに関わるやや長周期地震動の設計用スペクトル」、12JSEE
- 9) 内閣府中央防災会議、東南海・南海地震等に関する専門調査会 参考資料 平成20年12月
- 10) 日本建築学会、「長周期地震動と建築物の耐震性」、東海地震等巨大災害への対応特別委員会、2007. 12
- 11) 日本建築学会・高機能社会耐震工学WG、「長周期地震動対策に関する公開研究集会」、平成21年3月
- 12) 地震調査研究推本部、長周期地震動予測地図2009年試作版、平成21年9月17日
- 13) 林康裕、「東南海・南海地震時に想定される大阪平野およびその周辺域における長周期構造物の応答評価ワーキンググループ(長周期応答WG)の活動について」、2006
- 14) 佐藤俊明他、愛知県設計用入力地震動研究協議会による想定新東海地震に対する強震動予測、海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測2ーシンポジウム論文集、2006
- 15) 片岡正次郎他、「やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正倍率」、土木学会論文集A、2008. 11
- 16) 大川出他、長周期を含む広帯域地震動の回帰式に基づく想定地震の予測波形の作成、その1：応答スペクトルの距離減衰

式・増幅率マップ, 学会大会2009.8

- 17) 佐藤智美他, 同題, その2: 位相特性の回帰式・継続時間マップ, 学会大会, 2009.8
- 18) 西川孝夫他, 同題, その3: 想定巨大海溝型地震に対する時刻歴波形, 学会大会, 2009.8
- 19) 佐藤智美他, 第11回日本地震工学シンポジウム, 2002
- 20) 和泉正哲他, 地震動の位相情報に関する基礎的研究, 日本建築学会論文報告集, 第327号, 1983.5
- 21) 澤田純男他, 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路特性とサイトの分離, 10JEES, 1998.12
- 22) 大崎順彦, 新・地震動のスペクトル解析入門, 2004
- 23) 鶴来雅人他, 東南海・南海地震による大阪での強震動予測事例ー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集, 2005
- 24) 佐藤俊明他, 海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測2ーシンポジウム論文集, 2006
- 25) 関口春子他, 海溝型巨大地震の広帯域地震動予測のためのマルチスケール不均質モデルと南海地震への適用, 海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測2ーシンポジウム論文集, 2006
- 26) 釜江克宏他, 南海地震における近畿圏の強震動予測, 第34回地盤震動シンポジウム, 2006.11
- 27) 福和伸夫他, 濃尾平野の地盤調査とそのモデル化, 月刊地球号外, No. 37, 2002