

革新的構造材料による新構造システム建築物の開発

建築新技術研究官

向井 昭義

革新的構造材料による新構造システム建築物の開発

建築研究部 建築新技術研究官 向井昭義

1. はじめに

2004年度から5年間で「新構造システム建築物研究開発」が府省連携プロジェクトとして進められた。新構造システム建築物は、近年開発された高強度鋼等の特性を活用することによって大規模大地震等に対しても高度に機能を維持できるような建築物である。本資料は、このような建築物の研究開発にあたり、主に2005年度～2008年度に国土技術政策総合研究所で行った性能検証法等の開発の検討内容・成果について報告するものである。

2. 府省連携プロジェクト

本プロジェクトは、総合科学技術会議ナノテクノロジー・材料研究開発推進プロジェクトチーム（NTPT）において重要課題として取り上げられ、経済産業省、国土交通省等の関連府省が一体となって進める府省「連携プロジェクト」として推進すべきことが謳われ（「ナノテクノロジー・材料分野の産業発掘の推進について」府省「連携プロジェクト」等による推進（平成15年7月23日 総合科学技術会議））、2004年度から5年間で研究開発が進められた。

図1にプロジェクトの推進体制図を示す。5府省の他、国土技術政策総合研究所、(社)日本鉄鋼連盟、(社)日本鋼構造協会、(社)新都市ハウジング協会等が研究開発を担当するとともに、推進連絡会、研究開発合同委員会が設置され、研究開発の調整等が行われた。

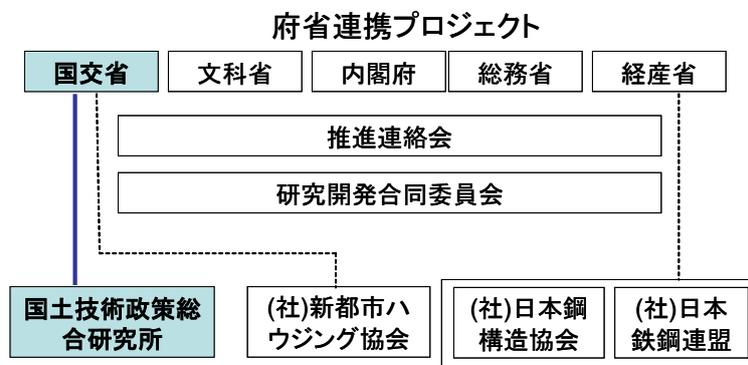


図1 府省連携プロジェクト推進体制図

3. 革新的構造材料（高強度鋼）

新たに開発された高強度鋼材は、降伏点または0.2%耐力が700～900 (N/mm²)、引張強さが780～1000 (N/mm²)である。図2に応力-歪み関係の例を示す。通常の強度の鋼材に比べれば伸び等の値はそれほど大きくはないが、基本的に弾性範囲内で使用することを前提にしている。これまでの同程度の高強度の鋼材は、合金元素を添加した上で熱処理を行っていたが、本鋼材は、合金添加量の低減と熱処理の工程の簡略化（熱加工制御）によって経済合理性が追求されたものである。¹⁾

高強度鋼材は、単に強度が高いだけではなく、弾性変形（歪み）が大きいことも特徴であり、エネルギー吸収部材等とうまく組み合わせることによって効率的に使用できる。

また鋼材は、乾式接合用と溶接接合用の2種類開発された。ただし、溶接材料についてはとりあえず従来材料を用いることになっており、その耐力等の値は、新鋼材の耐力等より若干小さい値である。

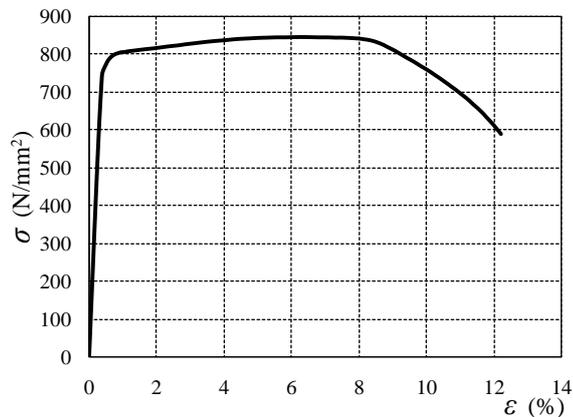


図2 高強度鋼材の応力-歪み関係の例

4. 新構造建築物の性能に関するニーズ等の調査

2005年度に、一般住民を対象にしたこれからの「都市」や「建築」に関わる社会的価値やニーズを把握するための調査と、建設業もしくはそれに関連する中間ユーザーを対象に新構造建築物の市場ニーズを把握するための調査を行った。その結果、新構造建築物の性能に関するニーズとして、「安全性」、「市場性」、「可変性」、「持続性」を重視した住宅・都市づくり」が抽出・整理された。

5. 環境負荷の観点からの新構造システムの検討

新構造システムが大規模大地震に対しても損傷しない耐震性を有していれば、部材は損傷を受けないのでそのまま使用できるかまたは再利用が可能である。このようなことによって長期間供用の可能性が高くなる。

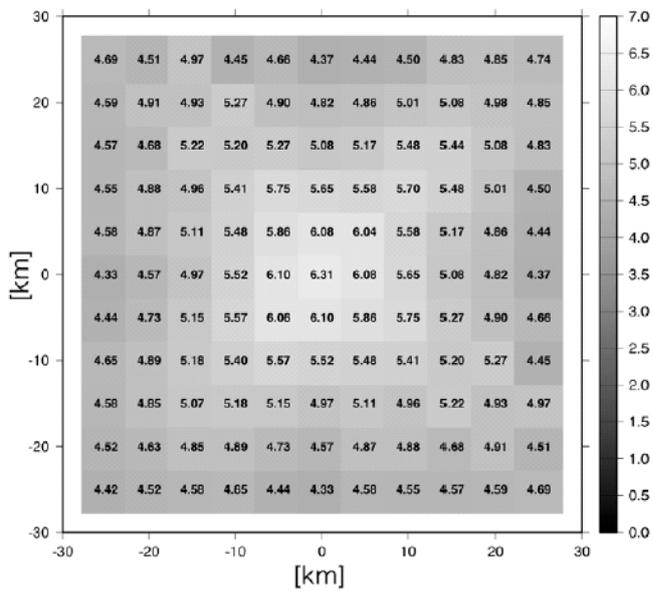
従来型モデル（耐用年数 60～70 年）と新構造モデル（200 年供用、インフィル等は一定期間のうちにリニューアルや間取り可変）について廃棄物発生量等のケーススタディを行った結果、新構造モデルのほうが廃棄物発生量等を抑制できることになった。

6. 評価用地震動の検討

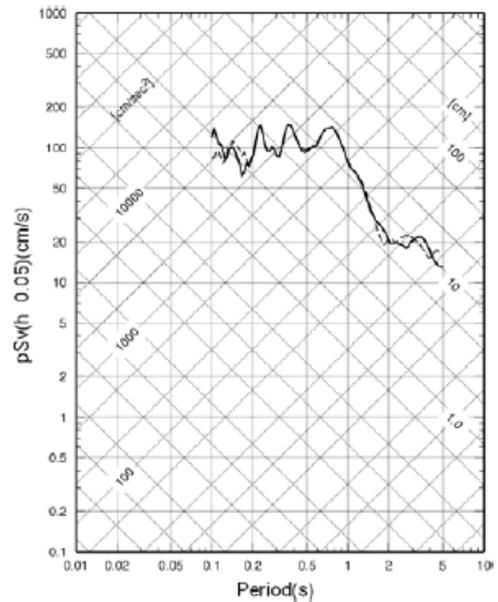
大規模大地震も含む評価用地震動の検討を行った。特に府省連携プロジェクトでは、「震度7クラス・無損傷・弾性構造」が目標とされたため¹⁾、「震度7クラス」地震動に関する検討も行われた。

6. 1 直下地震のシミュレーション

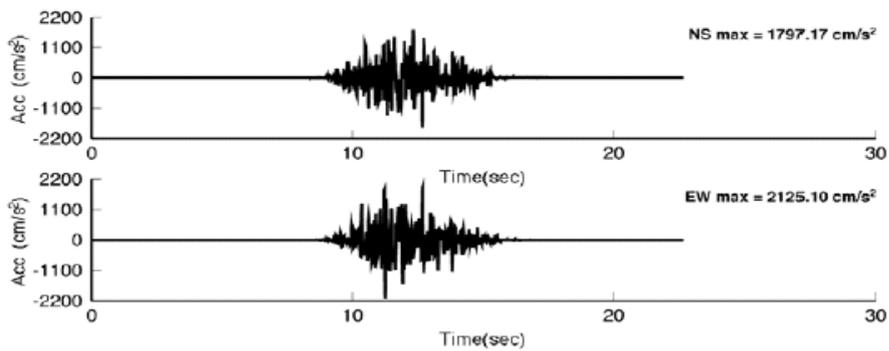
過去の強震動記録を整理するとともに、特定の地点における地盤情報と断層モデルを用いた直下地震のシミュレーションを行うことで、起こりうる地震動の検討を行った。図3にシミュレーションの結果の一部を示す。



(a)計測震度（工学的基盤上）の例



(b)応答スペクトルの例

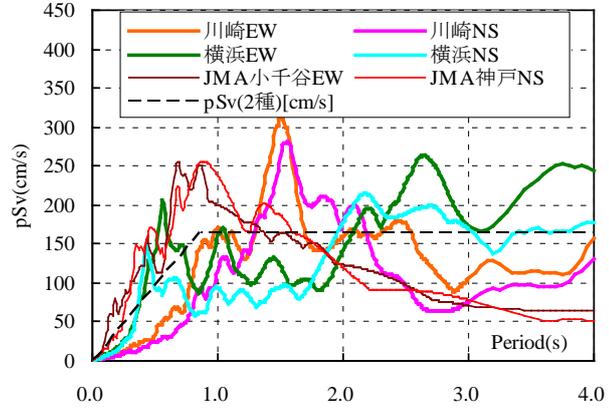
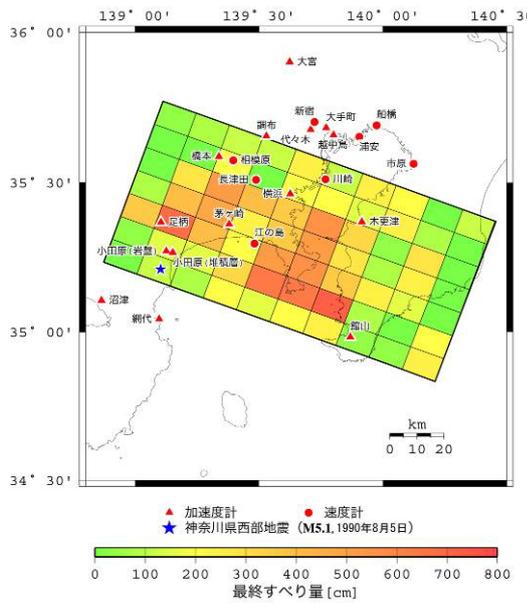


(c)加速度波形の例

図3 直下地震のシミュレーション

6. 2 プレート境界地震のシミュレーション

プレート境界地震として 1923 年関東地震の波形を経験的グリーン関数法により作成した。図4にシミュレーションの結果の一部を示す。



(a) 計算地点と本震断層の最終すべり量分布 (b) 速度応答スペクトル

図4 プレート境界地震のシミュレーション

6. 3 標準的地震動スペクトルのレベルと計測震度との関係

(1) いくつかの具体的な表層地盤を想定した非線形時刻歴応答計算結果等を踏まえ、建築基準法告示に定められる加速度応答スペクトルを有する地震動と計測震度との関係を整理した。

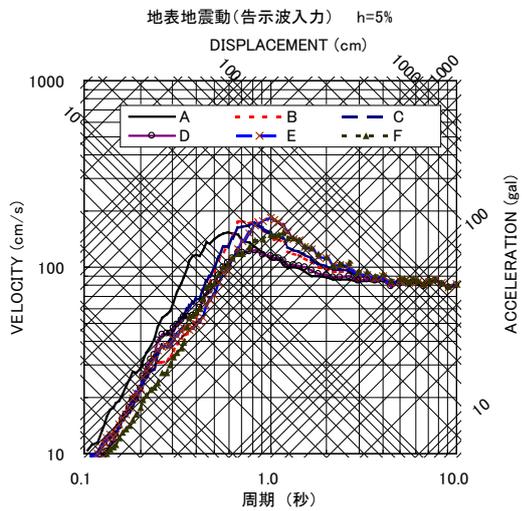


図5 告示極稀基盤波による
地表地震動の応答スペクトル

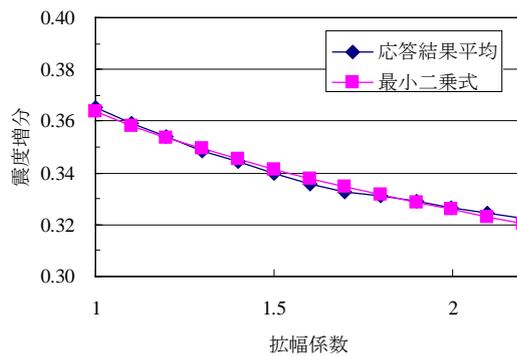


図6 告示スペクトルの拡張係数 α と
表層地盤による震度増分 ΔI の関係

(2) 標準的地震動スペクトルに関連する地震の像

標準的地震動スペクトルを検討する過程で以下のことがわかった。

- ・ 地表震度が7となる地震は、極めて低い確率の現象である。

- ・ 既往の応答スペクトル予測式と比較・検討すると、特に周期の長い範囲において過去の地震の平均的な値よりも大きめの設定となっている。

7. 性能評価手法の検討

7. 1 検討項目と体制

図7に示すように7つのWGで構造躯体等の検討性能手法の検討を行った。

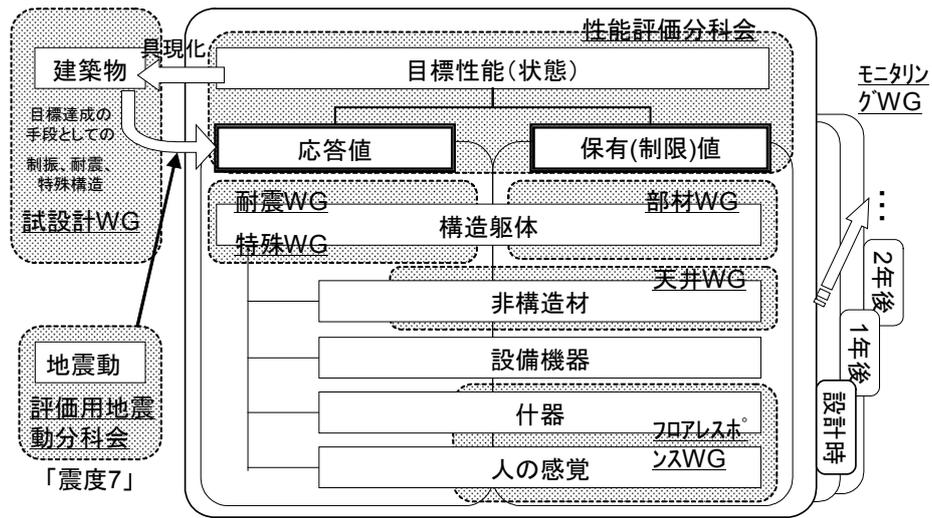


図7 検討項目と体制

7. 2 耐震性能評価手法

主に応答スペクトルによる等価線形化手法の高度化、制振構造の応答評価、ねじれ振動の評価、最大応答と累積応答との併用評価、フロアレスポンスの(簡易)評価を行った。また制振構造の構造解析用モデル化に関する注意点の整理を行った。

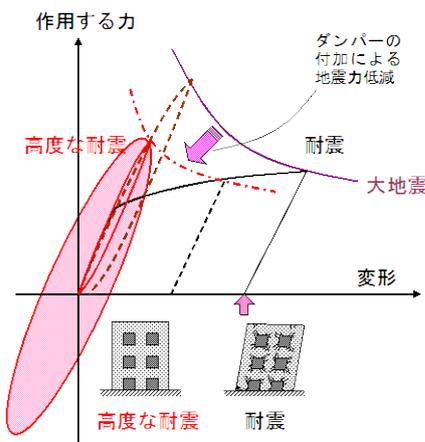


図8 高度な耐震の概念図

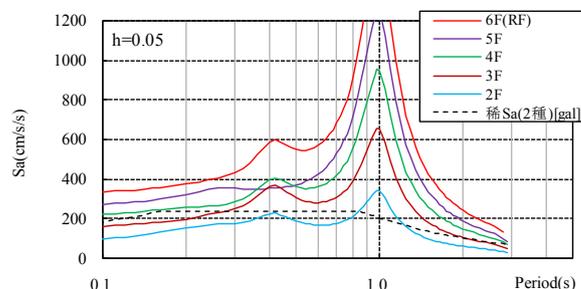


図9 床応答スペクトルの簡易評価の例

7. 3 部材・接合部・架構

高強度鋼柱梁部材と鋼材制振ブレースを組み合わせた制振架構システムを想定した

上で部材および接合部に関する検討を実施した。また幅厚比制限等について特に弾性範囲に着目し、実験結果に基づく検証を実施した。

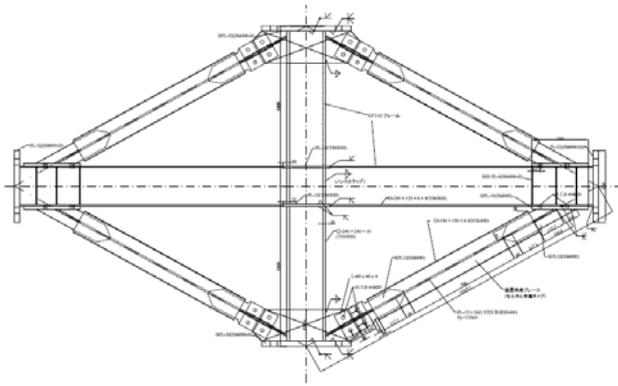


図 10 高強度鋼柱梁と鋼材ダンパーと
組合せた架構試験体の例

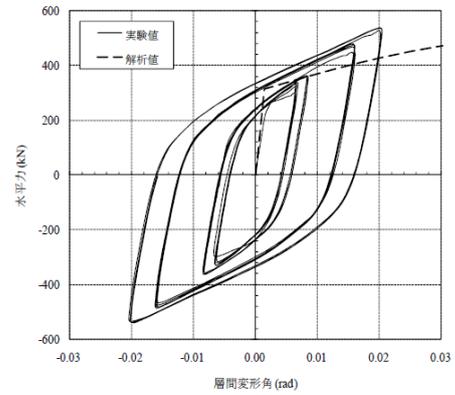


図 11 架構試験体に関する実験結果の例

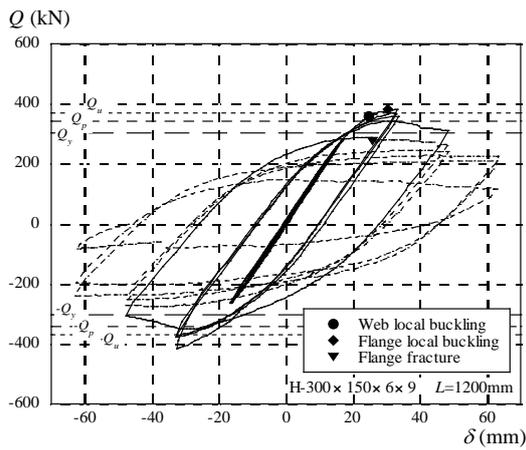


図 12 梁試験体の荷重変形関係の例



写真 1 梁試験体最終変形状態の例

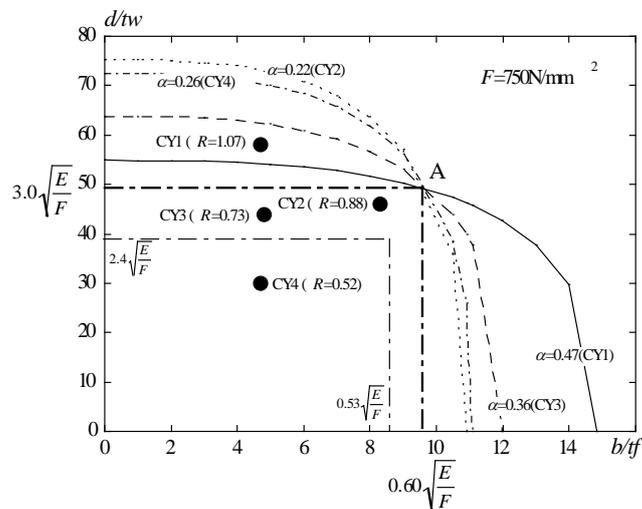


図 13 幅厚比制限値の提案

7. 4 モニタリング、損傷検知

基礎構造も含めた建築構造のモニタリング方法の検討を行った。モニタリング項目としては、1)基礎構造の損傷、2)上部構造(フレーム部分)の損傷、3)履歴ダンパーの累積塑性歪等のダンパーのエネルギー吸収性能に関するもの、等について既存モニタリング手法の調査又は新手法の提案、検討を実施した。

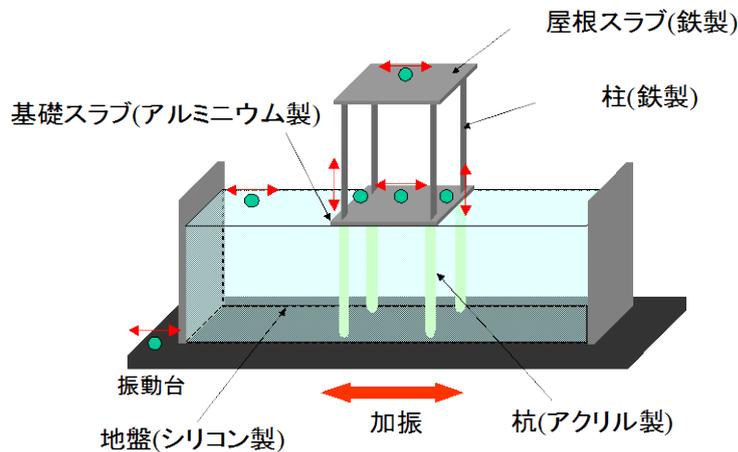


図 14 杭の損傷同定実験 概要図

7. 5 什器応答、行動難度

地震時の什器の応答や、人間の行動難度に関する検討を行った。



写真 2 什器等の応答を検討したモデル

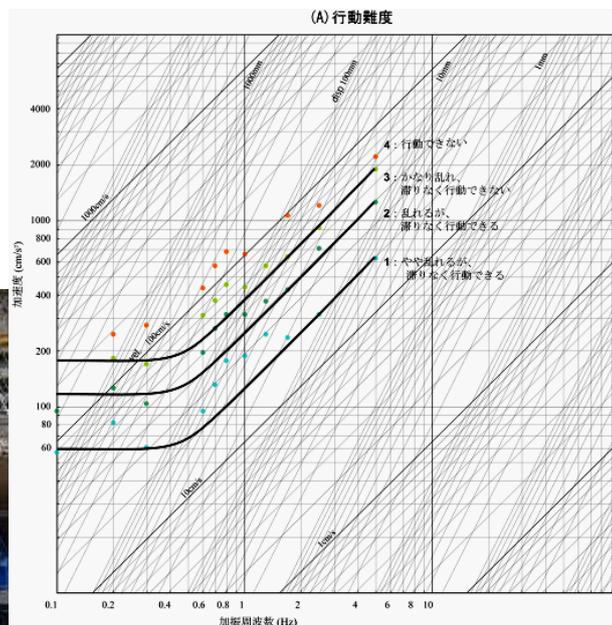


図 15 人間の行動難度の検討

7. 6 非構造材

近年の地震による被害が多い軽量鉄骨下地の在来工法天井を対象として、設計を意識した指針等のとりまとめやフェールセーフ的な対策の検討を実施した。



写真 3 振動実験試験体



写真 4 振動実験試験体

7. 7 試設計

本プロジェクトで対象としている鋼材を用いて試設計等を行っている。

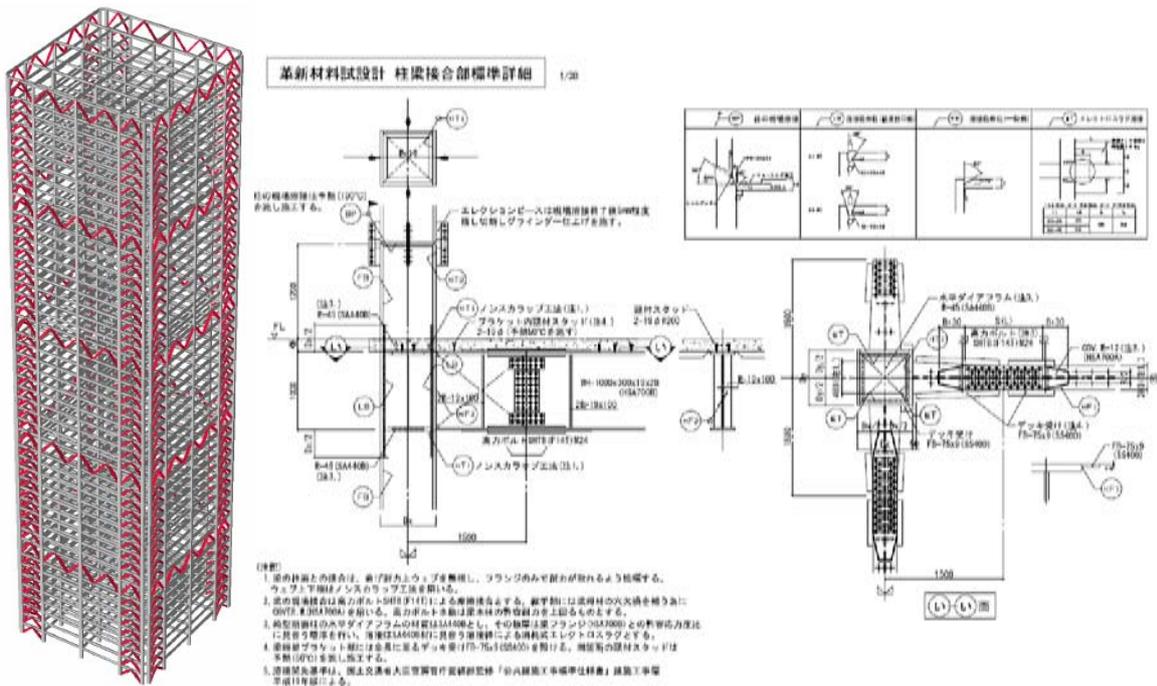


図 16 高層建築物の試設計例

8. 耐震性能評価指針(案)

6. 評価用地震動の検討、7. 性能評価手法等の検討をもとに作成した、耐震性能評価指針(案)(平成21年3月現在)のうち、解説や付録等を除いた本文に相当する部分を以下に示す。

8. 1 はじめに

8. 1. 1 指針の位置付け

本指針(案)は、高強度鋼等を用いた新構造建築物を対象として、現行基準を上回るような地震動も想定した耐震性能評価手法の案を示すものである。

8. 1. 2 対象建築物

本指針(案)で対象とする高強度鋼等を用いた新構造建築物は、現行基準で規定されている稀に発生する地震(L1)、ごく稀に発生する地震(L2)だけではなく巨大地震(L3)に対しても柱梁など主要な部材が弾性に留まり、かつ、建築物としての機能を高度に維持することのできるものである。具体的には、柱梁などを高強度鋼(HSA700)とし、ダンパーを組み込んだ多層制振構造が主として想定される。

8. 2 材料、部材、接合部等

8. 2. 1 高強度鋼の特性

本指針(案)でいう高強度鋼とは、(社)日本鉄鋼連盟で定める規格 HSA700 に適合する鋼材とする。

8. 2. 2 高強度鋼部材の幅厚比制限

柱梁など主要な高強度鋼部材は弾性範囲で使用し、その幅厚比制限値はいわゆる部材種別 FC に相当する値以下とする。ここで、幅厚比制限の算定に用いる基準強度の値は 700N/mm^2 とする。ただし、応力状態、幅厚比等を考慮して局部座屈を生じるおそれのない場合はこの限りではない。

8. 2. 3 許容応力度

(高強度鋼)

高強度鋼の許容応力度の基準強度の値 $F1$ は、 $F1 = \min(0.7TS', YS') = 550\text{N/mm}^2$ (注)とする。ただし、巨大地震(L3)に対する耐震性能評価手法に用いる基準強度の値 $F2$ は、降伏応力度の規格下限値とする。

TS' : 引張強さ規格下限値

YS' : 降伏応力度規格下限値

(高強度鋼の溶接部)

高強度鋼の溶接は適切な溶接材料を用いて適切な溶接条件のもとで行う。なお溶接部の降伏応力度の下限値 wYS' が高強度鋼の基準強度 $F2$ よりも小さい値に設定される場合には以下のように溶接部の基準強度を設定する。

高強度鋼の溶接部の基準強度 $wF1 = F1 = 550\text{N/mm}^2$ (注)、(ただし、 $F1 \leq wYS'$ でなければならない。)

ただし、巨大地震(L3)に対する耐震性能評価手法に用いる基準強度は $wF2 = \min(F2,$

wYS')とする。

(その他)

高強度鋼以外の許容応力度又は材料強度は現行基準に従う。柱梁など主要な部材以外で、塑性化を許容する部材・材料の場合は材料強度を用いてよい。

注) 平成21年3月時点での暫定値である。

8. 3 荷重・外力

8. 3. 1 評価用地震動

評価用地震動は、解放工学的基盤位置における地動加速度により定め、適用する地震応答評価手法に応じて時刻歴波形又はその応答スペクトルにより規定する。

8. 3. 1. 1 解放工学的基盤における地震動の設定

評価用地震動は、下記(1)の2種の種別の何れかにより、(2)の3つのレベル種別の地震動として設定する。

(1) 地震動の種別

- ① 当該建築物の建設地点に固有に定められる地震動(以下、建設地点に固有な地震動とし、S(サイトスペシフィック)種地震動と略記)
- ② 建設地点に拠らずに全国一律に定められる地震動(以下、標準的地震動とし、G種地震動と略記)

(2) 発生頻度による地震動のレベル種別

評価用地震動は、現行の建築基準法に定められる「稀に発生する地震動」(以下、L1地震動)及び「極めて稀に発生する地震動」(以下、L2地震動)の二つに加え、当該建築物の建設地点周辺の地震環境に基づき想定される最大級の地震動(以下、L3地震動)を考慮する。

ここで、L3地震動は、原則としてはS種地震動により定める。但し、S種地震動による地震動で定められない場合には、G種地震動に基づいて定めることができる。

8. 3. 1. 2 表層地盤の増幅

建築物の評価用地震動は、8. 3. 1. 1で設定された解放工学的基盤位置における地動加速度の時刻歴波形又は応答スペクトルに対して、表層地盤による増幅を適切に考慮して定める。

8. 3. 1. 3 建築物への入力

建築物基礎の地震動(入力地震動)が、自由地盤の地震動と異なることがある。この現象が明らかであれば、違いを考慮して評価用地震動を設定することができる。

8. 3. 2 その他の荷重・外力

評価用地震動以外の荷重・外力については現行基準によることとし、極めて稀に発生する積雪荷重・暴風に対しても安全上支障がないことを確認する。

8. 4 性能評価

8. 4. 1 性能評価項目とランク

性能評価を行う項目は、柱梁等の構造躯体（ダンパーを含む。）のほか、非構造部材（外壁、内装材、ドア、等）、設備（設備機器、給排水管、等）、什器の滑動・転倒、及び避難行動難度とする。

(1) 構造躯体（ダンパーを含む。）

高強度鋼による柱梁等の構造躯体は、弾性範囲で使用する。
ダンパー類は当該部材の性能に応じて、許容される変形・耐力・エネルギー吸収能力の範囲内で使用するほか、ダンパー類の接合部について十分な剛性・耐力を確保する。

(2) 非構造材

非構造材のランクは次のとおりとする。ランク3となることが予想される場合には、脱落・崩落を生じないようにフェールセーフ等の措置を講じることとする。

ランク	1（無損傷）	2（機能維持）	3（要修復）
状態	損傷せず、美観やその他の機能（遮音・吸音、遮風、、断熱等）を維持する。	一部の部品等に軽微な変形やすべり等が生じるが、美観やその他の機能をほぼ維持する。	部品等に変形やすべり等が生じ、美観やその他の機能が損なわれ、修復を要する。

<外壁、内装材>

ランク	1（無損傷）	2（機能維持）	3（要修復）
接合部等	許容耐力以内	一部で許容耐力を超える	—
変形角	限界変形角*1以内の75%以内	限界変形角*1以内	—

*1 種類（プレキャスト、ALC版、等）や支持方法（固定、ロックング、等）に応じて設定

<天井>

ランク	1（無損傷）	2（機能維持）	3（要修復）
振れ止め	許容応力度以内		—
すべり	許容耐力以内	—	—

<ドア>

ランク	1（無損傷）	2（機能維持）	3（要修復）
変形角	許容変形角以内	一部で許容変形角を超える*1	—

*1 避難経路や日常的に開閉するものを除く。

(3) 設備

設備のランクは次のとおりとする。ランク3となることが予想される場合には、脱落・崩落を生じないようにフェールセーフ等の措置を講じることとする。

ランク	1（無損傷）	2（機能維持）	3（要修復）
状態	損傷せず、給排水等の機能を維持する。	一部の部品等に軽微な変形等が生じるが、機能をほぼ維持する。	部品等に変形等が生じ、機能が損なわれ、修復を要する。

<設備機器および取り付け部>

ランク	1（無損傷）	2（機能維持）	3（要修復）
設備機器	許容振動範囲以内	一部で許容範囲を超える*1	—
取り付け部	許容耐力以内	一部で許容耐力を超える*1	—

*1 避難等に関わる設備、重要な設備を除く。

<配管等>

ランク	1（無損傷）	2（機能維持）	3（要修復）
配管	変位抑制（耐震支持）	一部で変位が大きくなる	—
立て配管	許容変形角以内	許容変形角以内	—

(4) 什器

什器の滑動・転倒・落下のランクは次のとおりとする。ランク3以上となる場合には、居住者の安全性を確保するための対策を施すこととする。

ランク	1 (無損傷)	2 (機能維持)	3 (要修復)
状態	ほとんど全ての什器が、滑動・転倒・落下しない。	一部の什器が、滑動・転倒・落下する。	多くの什器が、滑動・転倒・落下する。

(5) 避難行動難度

避難行動難度のランクは次のとおりとする。ランク3以上となる場合には、居住者の安全性を確保するための対策を施すこととする。

ランク	1 (安全)	2 (やや危険)	3 (危険)
状態	やや乱れるが滞りなく行動できる。	乱れるが滞りなく行動できる。	かなり乱れ滞りなく行動できない。

8. 4. 2 地震応答評価手法

性能評価項目に対応した地震時における応答量（変形、加速度、等）を評価する。地震応答評価手法は、
時刻歴による手法（精算手法）
応答スペクトルによる手法（簡易手法）
の2種とする。

8. 4. 2. 1 適切な解析モデルの設定

対象建築物を構成する架構及びダンパーを適切にモデル化する。ここで、ダンパー設置のためのガセットプレート等により柱や梁の可撓長さが短くなることで、応力状態等が変化する場合があることに留意する。

8. 4. 2. 2 時刻歴による手法

(1) 適用範囲

全ての建築物に適用可能とする。

(2) 応答評価

解析条件を適切に設定し、入力地震動に対する応答を時刻歴応答解析により求める。構造躯体については最大応力、最大・累積変形、吸収エネルギー等を確認する。また、非構造材、什器、避難行動難度の評価のため、床応答加速度を算定する。

8. 4. 2. 3 応答スペクトルによる手法

(1) 適用範囲

高さが 60m 以下の建築物とする。

(2) 応答評価

Pushover 解析を援用した 1 自由度系への縮約と応答スペクトルによる評価は基本的に限界耐力計算と同じとし、高次モードの影響を考慮する。

また、非構造材、什器、避難行動難度の評価のため、床応答加速度（最大値又はスペクトル）を算定する。

8. 4. 3 性能の表示

4. 2 による地震応答評価の結果から性能評価項目ごとに状態やランクを表示する。

8. 4. 4 性能の検査・確認

建築構造物が設計時に想定した性能を発揮できるものとなるよう中間検査と完了検査及び溶接接合部の品質検査等鉄骨架構の製造に係る各種品質検査を適切に実施するほか、建築物にモニタリングのためのセンサーを必要に応じて設置し、これらセンサーによる計測データ等を活用することにより、施工時、竣工時及び供用時の各段階において、建築構造の状態を検査、確認する。

8. 5 維持管理

建築物の構造に対しては、想定した性能が発揮されるよう適切な維持管理を行うこととし、維持管理計画に基づく点検により想定した性能が発揮されないと判断された部位等については速やかに交換を行う。

[参考文献]

- 1) 「新構造システム建築物研究開発プロジェクト 成果報告書」2009.03 (社)新都市ハウジング協会、(社)日本鉄鋼連盟、(社)日本鋼構造協会