

## 違いはあるか？

結論から言うと原則は何も変わらないと考える。

「設計」とは、要求された機能を持ち、安全性や耐久性等と経済性が合理的に両立するような構造物を実現する行為である。「耐震設計」は、許容し得るリスクの範囲内で、構造物の使用期間中に発生が予想される地震作用に対し、所要の安全性および使用性等を満足する構造物を経済的に作り出すことにあるといえることができる。こうした耐震設計の原則においては、土木構造物と建築構造物において違いがあるとは思えない。

もちろん、土木構造物と建築構造物ではその使用目的や機能が異なるのは当然であり、それに伴って構造特性が異なるとともに、その目的や機能に応じたそれぞれの耐震性能の確保が必要となるのはいうまでもない。一言で土木構造物といっても、その中には道路・鉄道施設や河川施設、ライフライン施設、港湾・海岸施設とさまざまな構造物があり、それぞれに対しても必要とされる目的や機能は建築構造物以上に異なるものもある。また、土木構造物は公共サービスのための構造物があるが、建築構造物は居住用や産業用など私有の構造物が多い。さらに、土木構造物には線状でネットワークとして機能し、一部の被害がシステム全体に影響を及ぼす構造物があるが、建築構造物は一般に点状構造物である。構造特性に関しても橋梁などの土木構造物は不静定次数は高くないが、建築構造物は一般にフレーム構造で高次の不静定構造が多い。このように、それぞれの構造物の機能やこれに基づく構造特性の違いが当然ながら耐震設計法に反映されるべきものであるが、これが土木と建築の耐震設計の根本的な違いというべきではないと考える。

構造物の用途と機能に応じた必要な耐震性能の確保を目的とする耐震設計においては、一般に外的作用としての「地震動条件」、構造物の地震時の挙動を評価する「耐震構造解析」、必要な性能を満足しているかどうかを検証する「性能照査」の3つがポイントとなる。

表-1は、これらのポイントについて土木構造物と建築構造物について比較してみたものである。土木構造物と建築構造物に関連する耐震基準には非常に多くのものが存在するが、ここでは筆者にとって身近な例として道路橋示方書<sup>1)</sup>と建築基準法<sup>2)</sup>を対象に比較してみた。

## 耐震性能

道路橋および建築物とともに、1980年から2段階設計法が導入されており、要求する耐震性能は基本的に同一である。すなわち、遭遇する可能性の高い中程度の地震に対しては損傷を生じないこと、きわめて希に起こる大規模な地震に対しては、構造物が倒壊・崩壊しないこととされている。なお、道路橋では、道路の役割・重要度に応じてさらに地震後の使用性を考慮したもう1段階上の耐震性能が設定されている。

## 設計地震動

耐震設計で考慮する地震動としては、構造物の建設地点においてその使用期間中に起こり得る可能性のある地震動を考慮するのが基本と考える。しかしながら、任意の建設地点において起こり得る地震動を高い精度で推定するのは現状では困難な場合が多い。このため、設計地震動としては、一般に、地域の地震環境を考慮したうえで、既往の最大地震動、過去の地震統計データ・強震観測データに基づく地震動、断層モデルなど震源過程を考慮して求められる地震動などが用いられる。

1995(平成7)年兵庫県南部地震以降、土木構造物の耐震設計では、きわめて希に起こる地震動として兵庫県南部地震で観測された地震動記録を基本に設計地震動が設定されている。弾性加速度応答スペクトルとしては実際の観測記録に近い最大2.0gとなる。これは、兵庫県南部地震クラスの非常に強い地震動に対しても構造物として崩壊・倒壊などの致命的な被害は防ぐべきであるという考えに基づいている。また、耐震設計で考慮する「地震動条件」をできるだけ明確に表現するという考えが背景にある。

一方、通常の建築物では、最大級の地震力を考慮し、標準層せん断力係数1.0以上を考慮すること、あるいはこれに相当する地震力として、工学的基盤位置に設定された加速度応答スペクトルを表層地盤の増幅等の補正を行って求めた地震力を考慮することとしている。層せん断力係数を1.0以上としていることについては、地表面で観測された強震記録よりも建築物に作用する実効入力地震動が小さくなること、兵庫県南部地震において建築物で観測された強震記録が300~350gal程度であったこと、計算上考慮していない部材が力を負担すること、一般に不静定次数が高く、一部の部材の破壊が構造物全

表-1 土木構造物（道路橋を例に）と建築構造物の耐震設計のポイントの比較

項目	道路橋示方書（1996（平成8）年）	建築基準法（2000（平成12）年）
要求耐震性能	設計地震動レベルと橋の重要度に応じた3種類の性能 1) 設計地震動1) に対して健全性を損なわないこと、かつ、 2) 設計地震動2) に対しては、 重要度が標準的な橋：致命的な被害を防止すること 特に重要度が高い橋：限定された損傷にとどめること	設計地震動レベルに応じた2段階の性能 1) 設計地震動1) に対して建築物・建築物の構造耐力上主要な部分に損傷を生じないこと 2) 設計地震動2) に対して建築物が倒壊・崩壊しないこと
設計地震動	2段階（3種類）の地震動レベル 1) 橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動（弾性加速度応答0.1～0.3g） 2) 橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動 タイプ 1の地震動（プレート境界型の大規模な地震）（弾性加速度応答0.7～1.0g） タイプ 2の地震動（兵庫県南部地震のような内陸直下型地震）（弾性加速度応答1.5～2.0g） 設計地震動は耐震設計上の地盤面において地盤種別・固有周期ごとに設定し、地域別係数、減衰定数で補正（他の土木構造物の中には、耐震設計上の基盤面で設定し、表層地盤の影響を考慮して設計地震力を求めるものもある）	2段階の地震動レベル 1) 中程度の（希に発生する）地震力（建築物の存在期間中に1回以上遭遇する可能性の高い地震） 震度5強程度を想定（標準層せん断力係数0.2以上（軟弱地盤では0.3以上）またはこれに相当する加速度応答スペクトル） 2) 最大級の（きわめて希に発生する）地震力 ・震度6強～7程度を想定（標準層せん断力係数1.0以上またはこれに相当する加速度応答スペクトル） 地震層せん断力係数は、地域、固有周期、地盤種別を考慮して設定（高さ方向分布も考慮）。また、加速度応答スペクトルは工学的基盤面において設定し、地域、減衰、表層地盤の増幅の影響を考慮して地震力を算定。
性能照査検証法	設計地震動レベルと地震時挙動の複雑度に応じて選定 1) 地震時の挙動が単純な橋 震度法（弾性計算＋許容応力度法） 地震時保有水平耐力法（エネルギー一定則を用いた非線形応答の推定と変形性能照査、残留変位照査） 2) 地震時の挙動が複雑な橋 線形地震応答解析（弾性解析＋許容応力度法） 非線形地震応答解析（非線形解析＋変形性能照査、残留変位照査） 3) 同時に、構造材料、構造部材等に必要な構造細目規定を満足させること	建築物の規模・材料特性に応じて以下のいずれかを選定 1) 小規模建築物 構造方法規定（仕様規定）による構造方法 耐久性等関係規定（仕様規定）に適合し、限界耐力計算（等価線形化法に基づく応答スペクトル解析）またはこれと同等以上として大臣が定めた構造計算による構造方法 耐久性等関係規定（仕様規定）に適合し、時刻歴応答解析等大臣が定める計算方法による構造方法 2) 中規模な建築物 構造方法規定（仕様規定）に適合し、許容応力度等計算（許容応力度および保有水平耐力の照査）またはこれと同等以上として大臣が定めた構造計算による構造方法 上記1)の あるいは の構造方法 3) 超高層建築物（高さ60m超）：上記1)の の構造方法

体の破壊につながる危険性が低いこと等から、1981（昭和56）年以降の耐震基準により設計施工された建築物は兵庫県南部地震においてピロティ建築物等バランスの悪い建築物を除いて大きな被害を受けておらず、したがって従来の最低基準としての建築基準法の地震力レベルはおおむね妥当であったと判断されているためである。

あえて考え方の違いを指摘するとすれば、この点かもしれない。すなわち、実際に設計された構造物が結果として抵抗できる地震動と、設計で実際に考慮している地震動が一致していないと解釈される可能性がある点である。設計に用いる標準層せん断力係数は、構造物に地震動が作用し、構造物と地盤の動的相互作用の結果として

構造物に作用するせん断力を表わす係数であるため、地震動や応答加速度そのものを表わしていない。このため、地震動としては、兵庫県南部地震クラスの地震による地震動を考慮する必要があるのかないのか、どういう建築物は余力があり、またはないのか、兵庫県南部地震よりも大きい地震動が想定された場合はその余力をどう評価して合理的な設計を実現するのかなど、判断しにくい場合も生じ得るのではないと思われる。このため、耐震設計の3つのポイント、「地震動条件」、「耐震構造解析」、「性能照査」については、仮に最終的に設計される構造物は全く同一になるとしても、それぞれできる限り明確に設定する方が理解しやすいと思われる。

また、設計地震動の設定位置は、耐震設計上の地盤面あるいは基盤面において設定される。これも相違があるといえはるが、地震動の設定位置の表現方法の違いであり、また、表層地盤の影響のモデル化の程度の違いといえる。これについては、強震観測データとの整合、基盤位置の設計地震動の考え方や地盤の解析法の精度、設計計算の手間等が考慮されて近似的な方法が用いられる場合が多い。

#### 耐震構造解析

2 つめのポイントの耐震構造解析であるが、これは基本的には力学的現象であり、構造物の挙動特性を十分に表現でき、かつ、実験などにより検証されているモデルを用いるのが基本である。すなわち、静的・動的解析、線形・非線形解析などの構造解析法や、コンクリートや鋼構造、基礎、地盤などに対する部材の履歴モデルについて構造条件に応じた適切な数学モデルを用いることが基本である。こうした耐震構造解析の原則においても、土木構造物と建築構造物において違いはあり得ない。ただし、当然ながら、構造特性を十分に表現できる必要があり、土木構造物と建築構造物の構造特性の違いがモデル化に反映されるべきものである。

道路橋では、地震時の挙動が単純な橋に対しては簡易法としてエネルギー一定則に基づく地震時保有水平耐力法を、地震時の挙動が複雑な橋に対しては動的解析法が適用される。建築物においてもその規模に応じて保有水平耐力の照査や限界耐力計算法、時刻歴応答解析法などが選定される。一見すると土木構造物と建築構造物では耐震解析法が全く違うのではないかと考えられるが、解析法の名称は別にして基本は同じと考える。

従来は、現在ほどコンピュータや解析ソフトが普及しておらず、また、これを使いこなせる技術者が少ないことなどから設計計算はなるべく簡素化するのが基本であった。各種の構造物の耐震設計法において一見見られる相違は、もともとは設計法をできるだけ簡素化しようという点に端を発していると考えられる。本来、地震動の作用を受けた構造物の挙動は、その特性を表現できる力学モデルに基づく振動方程式を積分することにより求まる。しかしながら、こうした作業をなるべく合理的に簡素化しようという努力から構造特性や精度の度合いに応じたさまざまな仮定条件を定めることにより、結果として耐震解析法が異なって見えるという場合が多い。それぞれの簡易計算法が本来真値に近いと考えられる振動方程式の解を必要な精度で近似できていればその見掛け上の違いに意味はないと考える。ただし、ここで重要なのは、構造物の特性によって付与した仮定条件を有する簡

易計算法の適用範囲と精度を明確に示して使うことと考える。

耐震解析法として真値により近いからといってむしろに複雑化するのも望ましい方向とは限らない。これは、設計結果の評価や解析結果の間違ひに対するチェックができなくなるといった事態にも至りかねないためである。標準的な耐震設計法としては、一般的な技術者が間違いなく適用できるようにある程度の単純化を図ることも重要である。一方でさらなる先端的な耐震技術の発展を阻害するものであってはならず、こうしたバランスが非常に重要と考える。

#### 性能照査

3 つめのポイントの性能照査においては、構造物としての必要な性能を満足できる限界状態（損傷モード）とこれに応じた各構成部材の限界状態を設定し、地震時の挙動がこの限界状態を超えていないことを照査することによって、その安全性や使用性等を検証する。こうした性能照査の基本においても、土木構造物と建築構造物において違いはあり得ない。

もちろん、例えば、構造部材の終局状態の算定式についてもさまざまな異なるモデルが存在するが、これも相違があること自体は問題とは思えない。こうしたモデルにおいては、それぞれの材料特性や構造特性を十分に反映すべきことはいうまでもない。例えば、鉄筋コンクリート構造でいえば、荷重の作用特性や部材断面の大きさ、配筋方法などの構造特性を適切に反映したうえで求められたモデルである必要があることはいうまでもない。ここで、重要なのは、それぞれのモデルの適用範囲や精度を明確に示したうえで使うことであり、これは前述の耐震構造解析法と同様である。

構造物の力学モデルや性能評価式については、技術の進歩とともに、さらなる高精度化や適用範囲の拡大が図られるべきものである。各種モデルの相違点を指摘する際には、必ず根拠となるバックデータの条件や範囲に基づく適用範囲、精度を考慮に入れたうえでの指摘が不可欠と考える。

#### 兵庫県南部地震と耐震設計の3つのポイント

1923年の関東地震以後、構造物の耐震設計は0.2～0.3程度の水平震度を用いた震度法を基本に行われてきた。震度法と許容応力度法との組み合わせにより耐震設計した構造物は、終局的な耐力や変形性能を考慮すれば、結果として設計で想定した地震力を超えるような地震力に対しても抵抗できると理解されてきた。しかしながら、

0.2～0.3程度の水平震度を用いた震度法による耐震設計の考え方では、どのような大地震に対して構造物のどこに損傷が生じ、最終的に構造物に対してどのようなパフォーマンスを期待しているのかが明確ではない。また、大地震時でも構造物は弾性挙動を示すという錯覚をまねき、どのような構造にすれば耐震性を向上させることができるかといった工夫の必要が求められない。実際の地震時に想定される構造物の挙動を把握することによって初めて耐震性の高い構造物の設計が可能になると考えられる。例えば、地震時には構造物のこの部材に損傷が生じるのでここは靱性に配慮したねばり強い配筋細目しておく必要がある等、具体的な対処が可能になる。

このため、耐震設計の3つのポイント、「地震動条件」、「耐震構造解析」、「性能照査」をそれぞれできるだけ独立かつ明確に設定した耐震設計法の構築が重要と考え

る。もちろん、これらの評価において未解明の部分が残されている点も多々あり、また、構造物の耐震安全性はこれらを総合的に評価した上で判断されることになるが、それぞれが明確な考えに基づいて定められていれば、新たな知見や技術開発がなされるたびに全ての耐震設計法を再構築し直さなくても、新たな知見のみを追加していけばそのまま適用可能な汎用的な耐震設計法と成り得ると考える。

こうした考え方は耐震設計においてあたり前のこととなっているが、筆者は兵庫県南部地震による甚大な被害によって再認識した重要な教訓の一つと理解している。

#### 参考文献

- 1 - 日本道路協会：道路橋示方書 耐震設計編，1996
- 2 - 国土交通省：2001年版建築物の構造関係技術基準解説書，2001

## 3-2. 耐震設計

### 建築と土木の棲み分けと連携

中島正愛 NAKASHIMA Masayoshi

京都大学教授 防災研究所

#### はじめに

建築と土木の耐震設計を比べてみなさいとの編集部からのご指示だけでも、それではあまりにも広すぎるようだ。「建築」がリーダーシップを発揮する対象も、木造住宅から高層建築物まで多岐にわたり、「土木」でも、道路橋、鉄道構造物、ダム、港湾施設、下水道施設などその対象は千差万別で、それぞれを比べることすら難しい。そこで、比較的近いとおぼしい、鉄筋コンクリートや鋼で造られる一般的な建築物と道路橋を、それぞれ「建築」と「土木」の代表と想像して以下の記述を試みる。また一般的な建築物の耐震設計といっても、その設計法は構造形式に応じて異なる。特別な審査を経る必要がある高層建築物などでは、地域特性を考慮した地震動の設定や多次元入力による弾塑性地震応答解析など、最新技術を駆使した設計が展開される。それに対して中小規模建築物では、適度な安全率を付与したより簡便な設計法が適用される。以下の記述では主として後者の耐震設計を意識した。

建設とはいっても建築と土木は違うはずで、だからこそこの建設の両輪は、大学教育から実践現場に至るまで長年棲み分けてきた。民需が大半を占める建築と、官需が大半を占める土木、建築士という法で決めら

れた資格が必要な建築と、技術者資格が必ずしも明確ではない土木、設計技術者層が底辺にまで広く分布している建築と、官に支援される技術者がもっぱら関与する土木、また「構造物」に限っても、設計が地震力にはほぼ支配される建築と、移動荷重など他の荷重条件により重要な設計要件となることも多い土木、剛な接合部が多く不静定次数が相対的に高い建築、比較的小さな部材（断面）を使う建築と、大きな部材（断面）が要求される土木、構造躯体が非構造部材その他で囲まれている建築と、どちらかと言えば構造体がそのまま剥き出しになっている土木などなど、その違いを挙げればきりが無い。「だからどうした」、それらがなぜ建築と土木を分かつ正当な理由になるのかという反論もあろうけれども、建設が壮大な経済行為であって、建設に関わる多くの局面（材料供給、設計、施工、管理もろもろ）ごとに膨大な産業が存立していることを考えれば、両者が分かれる理由は十分過ぎるほどある。元をただせばさほど変わらなくても、個別的になるほどその違いは際立ち、また産業が膨大であるだけに、その違いをもって特化した業種が確立され、そこでは、私はもっぱら建築に関わっております、私は土木事業に参加していませんと、色分けが進んでゆく。またこれは日本に限ったことではなく、建築技術も土木技術も合わせて土木工学科で