

地震に耐えるための設計と構造

1. はじめに

前回までに、鉄筋コンクリート構造物に力が作用したときに、柱や梁などの部材の内部にどのような応力が生じ、その結果部材がどのように壊れていくのか説明しました。

実際の構造物にはさまざまな力が作用しますが、構造物を設計する際に、わが国において最も考慮しなければならない力は地震による力といえるでしょう。今回はコンクリート構造入門の最終回にあたり、この地震に対する設計の考え方と、免震や制振といった対応技術について説明したいと思います。

2. 耐震設計

地震が起こると構造物は水平方向や垂直方向に揺られるわけですが、設計にあたっては構造物に水平方向の力が作用したものと計算していきます。地震により生じる水平方向の力の大きさを決め、これによって柱や梁に生じる応力を計算し、この応力が材料の強度を超えないように部材の寸法、コンクリートの強度、鉄筋の本数などを決めていくのが許容応力度等計算と呼ばれる設計方法です。許容応力度等計算は耐震設計法の一つですが、基本的には地震に耐えられる頑丈な建物を作ればよいという考え方にたっています。

今まで観測された最大の地震が起こっても、まったく損傷を受けないように設計することも技術的には可能ですが、経済性の観点からは必ずしも最善とはいえません。そこで通常は建物が使用される期間に何度か起こるであろう中程度の地震に対して、建物は損傷を受けないように設計し、建物が使用される期間にまれ

にはおこるかもしれない大地震に対しては多少壊れてもよいとして設計されています。この場合、大地震で多少壊れてもよいといっても、人命にかかわるような崩壊はしないように設計することが大切です。

地震はもともと地面の振動ですから、建物の振動に対する性質に応じて、建物に作用する水平力の大きさも変わってきます。この振動に対する性質として重要なのが固有周期と呼ばれるものです。たとえば大男がいて、高層ビルの一番上を水平に1mほど押してから手を離れた状態を想像してみてください。建物の最上部はもとの位置に戻ろうとし、もとの位置を1mほど行き過ぎて、また逆方向に動きはじめるでしょう。このように建物は何回か行ったり来たりの運動をすることになりますが、1回行って、また帰ってくるまでにかかる時間がその建物の固有周期になります。固有周期は建物の形状、特に高さの影響を大きく受けます。低層の建物では0.1から0.5秒程度ですが、高層になるほど周期が長くなり、200～300mの高層ビルになると固有周期は3～6秒くらいとなります。

地震による地面の揺れは地震計などに記録されています。地震の波形、たとえば阪神淡路大震災のときの波形などをみても、特に一定の周期で揺れているようにはみえません。しかし地震の波形はいろいろな周期の振動が合成されてできていると考えることもできるのです。詳細に分析すると、地震によってある周期の近辺の揺れが強く、ある周期の近辺の揺れが弱いということがわかってきます。一般の地震では1秒以下の周期の短いところの揺れが強く、長い周期の揺れが弱いことが多くなっています。

地震の揺れの周期と建物の固有周期が一致すると、建物は大きく揺れることとなります。長い定規の端を

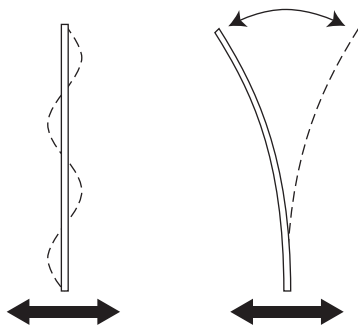


図1 下を持って動かした長い定規の揺れ
左：手をすばやく動かした時
右：手をゆっくり動かした時

持って、できるだけ速く手を前後に動かしても定規はあまり揺れないのに、ゆっくり手を動かすと大きく揺れるようなことを経験することがあります（図1）。これは手の動きの周期と、定規の固有周期があったときに大きく揺れるためにおこる現象で、共振とよばれています。長い周期の成分が弱い地震においては、高層ビルは共振することがなく、結果として建物に作用する水平力があまり大きくなりません。高層ビルの耐震設計は建物を頑丈にして耐えるということではなく、地面の揺れと違う周期で揺れるようにして、建物に大きな力が作用しないようにしているといえます。

3. 免震構造

地面と建物を切り離して、地震によって地面が揺れても、建物を揺れないようにしようというのが免震構造の考え方です。建物が揺れなければ、地震による水平力も作用していないことになり、建物が地震で壊れることはありません。しかしながら地球には重力があり、建物を宙に浮かすことはできませんので、完全に切り離すことは実際には不可能です。

切り離れた状態に近い状態として、滑らかな平面の上に載せて、水平方向に力がかかると滑って動くような状態が考えられます。ステンレスの平滑な板を設置し、建物の下に摩擦の小さいテフロンなどを貼り、板の上に載せるという方法です（図2）。地震が生じたときにこの建物を上空から見ることで見るとすれば、土台のステンレスの板は水平方向に振動しますが、

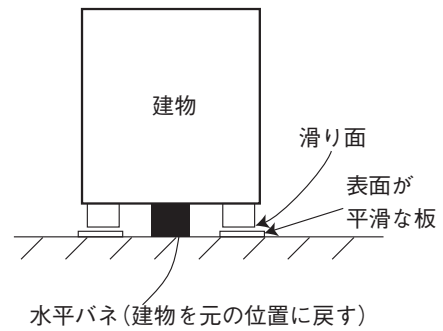


図2 滑り摩擦支承による免震

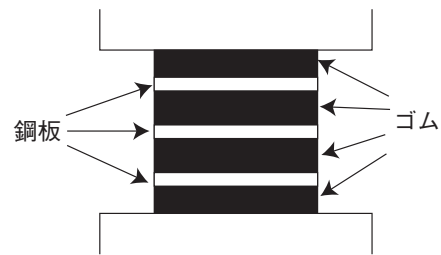


図3 積層ゴム支承

上に載った建物は動かずにいることが観察できるはずです。

このような免震装置は滑り摩擦支承と呼ばれ、実際に使われているものですが、この支承だけでは風が吹いても建物が移動したり、地震の際に建物が大移動をしたりと不都合なことが起こる可能性があります。そこで滑り摩擦支承に加えて、建物が移動したときに元に戻す働きをする工夫が加えられています。その工夫としては水平方向のばねとなるゴムを設置したり、平滑な板を下に湾曲させて重力でもとの位置に戻るようにする方法があります。

滑り摩擦支承とは別に、よく使われる免震装置として積層ゴム支承があります。これは薄いゴムの板と鋼板を交互に重ね合わせて作ったものです（図3）。建物と地面を切り離して揺れを伝えないようにすることでは、単に軟らかいゴムの上に建物を載せることでもできそうに感じられますが、ゴムだけでは建物の重さでつぶれてしまってもうまく働かなくなります。そこで鉛直方向には硬く、水平方向には軟らかい積層ゴムが開発されたのです。

積層ゴムの中心部に円筒状の鉛を配した鉛プラグ入り積層ゴムというものもあります。鉛が変形することで地震のエネルギーを吸収し、免震効果を高めるよう

にした支承です。消費されるエネルギーの大きさは、力の大きさにその力によって動いた距離を掛け合わせた値となります。動かすために大きな力を要し、動いても壊れない大きな変形能力を持ったものが優れたエネルギー吸収効果を示すことができます。さらに、通常使われる天然ゴムに代わってエネルギー吸収能力の高いゴムを用いた高減衰型積層ゴム支承というものも開発されています。

免震支承は建物の最下部に設置されるのが普通ですが、必ずしも最下部でなければならぬわけではなく、中間階に設置された例もあります。また建物の一部や、大事な装置だけを免震するということも可能です。美術館で貴重な作品のコーナーだけが免震構造になっていることもあります。

免震構造は新築の建物はもちろんですが、既存の建物に組み込むことも可能です。使い勝手の面から壁を増設して耐震性を高めることが現実的でないような建物でも、免震装置を入れることで建物全体の地震に対する安全性を確保することができるわけです。

このように免震構造といってもさまざまなものが開発、実用化されています。開発の歴史は古いのですが、普及が進んだのは阪神淡路大震災のあとからです。免震装置の費用が普及のネックだったのですが、コストパフォーマンスのよい装置の開発と、地震対策の必要性に関する認識の高まりが呼応して、多くの建物に採用されるようになってきました。

ここで説明した積層ゴム支承や滑り摩擦支承などの免震装置は、地面と建物を完全に切り離しているわけではありませんが、建物の固有周期を大きくする効果をもっています。高層ビルの耐震で説明したように、免震構造でも建物の固有周期を大きくすることで、短い周期に強い揺れのある地震に対して安全な構造体になっているというようにみることができます。

4. 制振構造

高層ビルなどでは建物の固有周期が長く、地震の周期とずれていることで大きな力が作用しないということをお話しました。しかし地震に長い周期の成分が

まったくないわけではなく、実際に高層ビルの上層部では大きな揺れが観測されるという報告もあります。揺れても壊れるわけではありませんが、中の家具が倒れたり、船酔いのようになって気分が悪くなるようなことは好ましいことではありません。このようなことから揺れようとする建物の揺れを小さくする技術も開発されてきました。これを一般に制振技術と呼んでおり、地震による揺れを抑えるということから制震という字があてられることもあります。

いろいろな制振装置が開発されていますが、代表的なものに、錘（おもり）を建物上部に配置し、それを動かすことによって建物の揺れを抑える方法があります。錘の大きさは建物の質量の1%程度とされることが多いようです。建物の揺れを感じるとコンピューターが計算し、揺れを抑える運動を錘に与える方式をアクティブ制振と呼んでいます。

錘の動きを振動にあわせて制御するのではなく、錘にばねなどをつけて建物の揺れが生じると、その揺れによって錘が動き、この錘の運動が建物の揺れを小さくするということもできます。このような方法をパッシブ制振と呼んでいます。パッシブ制振には錘として液体の入ったタンクを利用したものもあります。建物の揺れによって動く液体の運動が、建物の揺れを抑えることとなります。

錘を使わない制振装置として、ダンパーと呼ばれるエネルギー吸収装置を間柱やブレースに組み込む方法もあります。ダンパーにはピストンが粘性の高い油の中を動くようにしたオイルダンパーや、免震装置のところにでてきた鉛ダンパーなどがあります。

5. 最後に

構造入門ということで、数式などは極力使わずに、構造に関する考え方や最近の話題を説明してきました。分かりやすくということを一にしましたので、構造が専門の方から見ると正確性や厳密性の面で問題を感じられたかもしれません。読んでくださった皆様に少しでも構造を身近に感じ、普段の業務や生活に少しでもお役に立つことになれば幸いです。