

建物の耐震設計と耐震実験

B

1995年1月17日の「兵庫県南部地震」(マグニチュード7.2)では、神戸市を中心とした周辺地域が大震災を経験することとなり、もっとも激しい揺れを起した地域では「震度階」(下表¹⁾)がⅦに達するという有史に残る「阪神・淡路大震災」となった。耐震設計を行っていたはずの建物が数多く倒壊したため、現行の耐震設計法に疑問が投げかけられているのも事実である。

耐震設計法は、建築基準法に定められており、一定規模以上の建築物の場合には、この法規定にしたがって設計しなければならない。しかし、次章で概説するように、数多くの震災の経験と膨大な研究の成果を取り込みながら、法規定そのものが逐次改訂されてきているが、いまだ完成されたものではない。建物の建設費とのバランスで耐震設計をしなければならないかぎり、今後も同様の経過をたどりながら改訂され続けて行くものと考えられる。

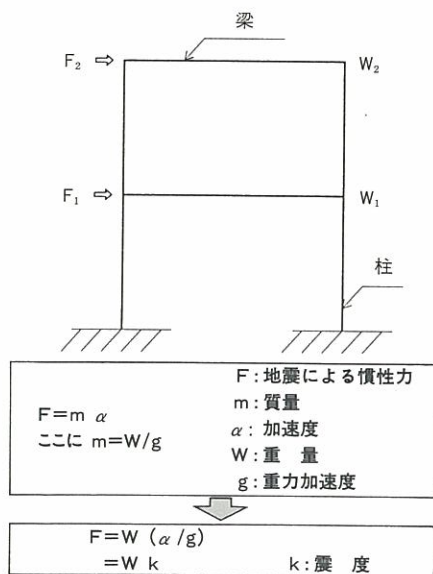
ここでは、建築物の耐震設計の歴史をふりかえりつつ、現行の耐震設計法および耐震実験法の概要を記述するので、この分野の現況を知る一助にいただければ幸いである。

気象庁 震度階

| 震度階 | 地震による揺れの程度 | 地動の加速度(gal) |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 0 | 無感(No Feeling) 人体に感じないで地震計に記録される程度 | 0.8以下 |
| I | 微震(Slight) 静止している人や、特に地震に注意深い人だけに感じる程度の地震 | 0.8~2.5 |
| II | 軽震(Weak) 大ぜいの人に感じる程度のもので、戸および障子がわずかに動くのがわかるくらいの地震 | 2.5~8.0 |
| III | 弱震(Rather Strong) 家屋が揺れ、戸および障子がガタガタと鳴動し、電灯のようなつり下げ物は相当揺れ、器内の水面の動くのがわかる程度の地震 | 8.0~25 |
| IV | 中震(Strong) 家屋の動揺が激しく、すわりの悪い花瓶などは倒れ、器内の水はあふれ出る。また歩いている人にも感じられ、多くの人々は戸外に飛び出す程度の地震 | 25~80 |
| V | 強震(Very Strong) 壁に割れ目のはいり、墓石および石どうろうが倒れたり、煙突および石垣などが破損する程度の地震 | 80~250 |
| VI | 烈震(Disastrous) 家屋の倒壊は30%以下で山くずれが起き、地割れを生じ、多くの人々はすわっていることができない程度の地震 | 250~400 |
| VII | 激震(Very Disastrous) 家屋の倒壊が30%以上におよび、山くずれ、地割れ、断層などを生じる | 400以上 |

建築耐震設計法の歴史

B-1



第1図 震度法による耐震設計

静的耐震設計法の実用化

明治政府は、中部地方を襲った濃尾地震(マグニチュード7.9、明治24年)の震災を経験した後、翌年に震災予防調査会(文部省)を発足させ、耐震構造について学術的に取組む姿勢を打ち出した。この取組みのなかで大正4年に佐野教授(東大)が「震度」*1(気象庁が発表する震度階とは違う)という概念により、地震時に建築物が受ける水平慣性力を簡便にあらわす手法を発表した。その後、関東大震災(マグニチュード7.8、大正12年)をへて、「市街地建築物法関係法令」がようやく改正され、耐震規定(設計震度0.1、材料安全率3.0、建物高さ100尺=約31m以下)が導入された。佐野震度による静力学的耐震設計手法(第1図)が実用化されることになった。

1) 気象庁: 建築物の耐震設計資料, (1981), 日本建築学会, p.20

*1 地震によって建物に加わる水平慣性力を建物の重量の何%とみなす考え方。例えば設計震度0.1とは、重量の10%の水平力を想定することになる。この考え方は建物を剛強な構造にして地震に耐えさせようとするものである。

昭和の柔剛論争

* 2 建物に振動外力が加わる時、建物の振動応答現象を建物が本来もつ固有の複数の周期(振動数の逆数)のそれぞれの応答値の組合せで表現する。弾性範囲の振動を取扱うには便利な方法である。

2) 日本科学史学会：日本科学技術史大系17(建築技術)，(1964)，第一法規出版社，p.375

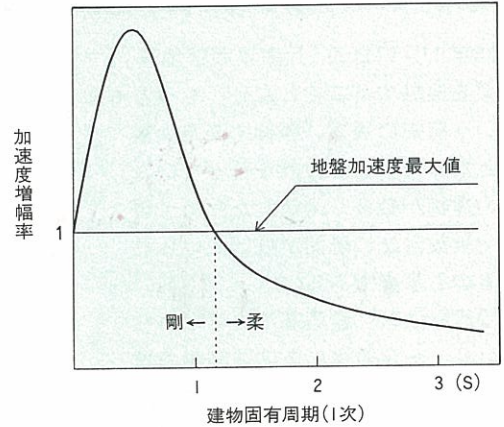
前記の震度法による簡便な耐震設計手法は、実用性という観点からは評価されるが、地震動の実際の現象とはあまり異なる仮定に対し、反論を試みる動きがあらわれてきた。その先鋒になったのが真島博士(海軍省建築局長)であった。真島博士は、当時の震度法が建物および地盤を剛体と仮定したものであり、実際とは異なることを指摘して、建物を弾性体と仮定したモーダルアナリシス法²⁾による耐震設計を行うべきことを主張した。あわせて建物を鉄骨造による柔構造にすることを推奨した。以後、佐野教授を代表とする剛構造派と柔構造派の論争³⁾は昭和10年頃まで続き、勝敗の決着がつくことなく第2次世界大戦のはじまりとともに自然消滅したが、結果的には真島博士が去ることによって剛構造論だけが残った。戦後の建築基準法も、この剛構造の考え方(設計震度0.2、材料安全率1.5、建物高さ31m以下)で固められた。

超高層ビルの出現

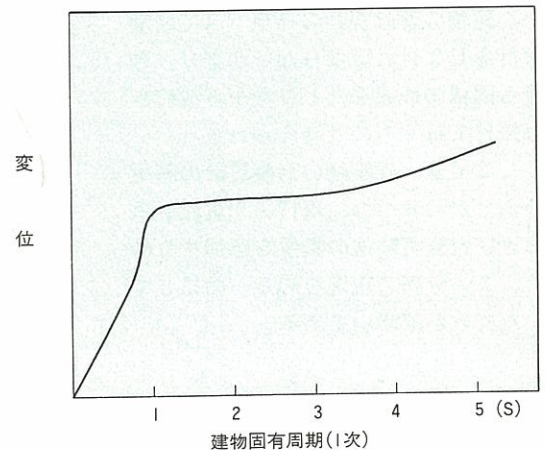
昭和33年わが国最初の超高層ビル「霞ヶ関ビル」(36階建)の計画がはじまったが、超高層ビルを従来の剛構造の考え方で設計した場合、柱および梁などを大断面にする必要があり、現実的な建物になりえないことがわかってきた。当時、すでにコンピューターを用いた建物の地震応答解析研究が発展途上にあり、武藤教授(東大)らにより超高層ビルの地震時の挙動が精力的に研究されていた。結果的に「霞ヶ関ビル」は武藤教授らによって柔構造理論による設計がなされ建設された。その後、昭和40年代には新宿副都心を中心として超高層ビルが数多く建てられたが、すべて柔構造理論による設計であった。

耐震設計の考え方

剛構造と柔構造の違いは何か、といってもその間にはっきりとした線が引けるわけではない。第2図は、地震波の大きさをあらわす単位の一つである加速度により、地盤の加速度波が建物に入った場合に、どの程度増幅されるかということを図式的にあらわしたもの(加速度応答スペクトラム)である。建物の固有周期(横軸)に応じて縦軸の増幅率(建物の加速度/地盤の加速度)が異なることがわかる。概略的には、増幅率が1を超えるものを剛構造、1以下のものを柔構造と考えてよい³⁾。この図から柔構造の方が増幅率が小さい(地震に



第2図 加速度応答スペクトラム



第3図 変位応答スペクトラム

よる慣性力が小さくなる)ので、通常の中・低層(固有周期が短い)建物も柔構造(超高層ビルのように固有周期を長くする)にした方がよいのではないか、という疑問がわいてくる。その答えは、第3図の変位応答スペクトラムにある。図より地震波の変位応答(揺れの状態)は、加速度応答とは逆に建物の固有周期が長くなる(柔構造)と大きくなる、すなわち建物の各部位のたわみが大きくなったり、各階の間のずれが大きくなり居住性が悪くなったり、破壊するという事態が起る。

したがって、現行の建物の耐震設計思想は、中・低層の建物ではがっしりとした構造(剛構造)にして揺れ(変位)を小さくし、逆に超高層ビルでは柔構造にして地震による慣性力を小さくし、揺れが大きくても背が高いことから相対的に影響を小さくするという考え方である。

3) 石田繁之介：超高層ビル，(1968)，中央公論社 p.49

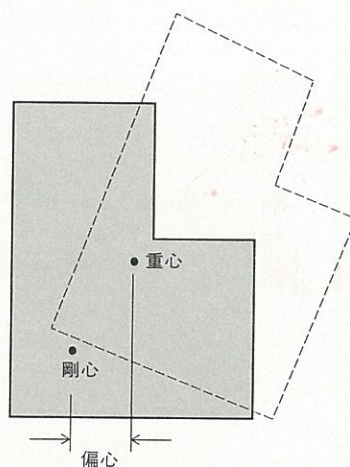
中・低層の通常の建物については、戦後、震度法(剛構造)によって設計された多くの建物が十勝沖地震(昭和43年)、大分県中部地震(昭和50年)および宮城県沖地震(昭和53年)などにおいて被害を受けた。その結果、改めて既存建物の耐震診断ならびに新しい耐震設計法の必要性が強く認識され、昭和55年に建築基準法・施行令の改正が行われた。

改正された建築基準法では、耐震設計のための地震力の大きさとして2段階のものを考えている。すなわち耐用年限中に数度は遭遇する程度の中地震に対しては、建築物の機能を保持することとし、その地震力としては気象庁震度階の震度V程度を考える。また、建築物の耐用年限中に一度遭遇するかもしれない程度の大地震に対し、建築物の架構に部分的なひび割れなどが生じて、最終的に崩壊から人命の保護をはかることを狙いとし、その地震力としては震度VI~VII程度を考える⁴⁾。

他方、耐震設計法の改訂の概要は下記のとおりである。

- ①建物の高さ制限を明治以来の31m以下から60m以下に変更した。
- ②建物に加わる地震慣性力を建物固有の振動特性(固有周期など)を考慮して算定するようになった。
- ③詳細計算をする場合には、材料の弾性範囲を対

象とした従来の許容応力度設計ではなく、建物の柱および梁などの極限耐力(保有耐力と定義)および変形性能にもとづいて設計できるステップを導入した。



第4図 建物の平面上の偏心

④複雑な形状の

建物の場合、ねじれ振動を避けるため偏心^{*3}(第4図)を定量的に確認するステップを導入した。

上記改正の背景となったものは、①経済的な理由から高層建物の需要が増してきたこと、②その後の耐震研究の結果などから、震度法による地震慣性力の算定値が実際の地震時の建物の挙動とかなり異なっていることがわかってきたこと ③膨大な耐震実験の成果より建物部材の極限耐力がかなりわかってきたこと、④従来、設計者の技能に任されていた部分を定量的に評価して設計の際に考慮できるようにしたこと、などである。

* 3 建物の重心(地震による慣性外力の作用点)と剛心(建物反力の合力の作用点)とのずれ。

4) 日本建築センター：建築物の構造規定,(1994), 日本建築センター, p.15

建物の耐震実験

耐震実験は、大別すると①建物部材(柱、梁など)の強度試験、②平面骨組(柱・梁などの組合せ)の強度試験または振動試験、③立体骨組の振動試験に分けることができる。

部材試験

地震時に水平慣性力が建物に加わったときの、建物に発生する典型的な外力曲げモーメントの分布を第5図に示す。図中の柱または梁、柱-梁の結合部(仕口部という)などを局部的に取り出して、上記曲げモーメント分布によく似たモーメントをあたえて、実験しようとするものである。その際、地震による慣性力は振動による繰返し力であることから、あたえる静的な力の向きを交互に変えて疑似的な動的実験を行う場合が多い。当社で行った実施例を写真1に示す。

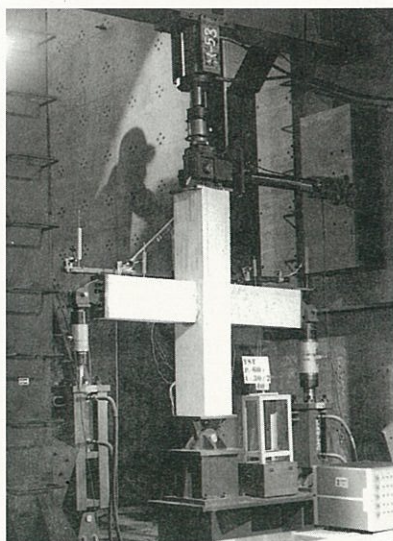
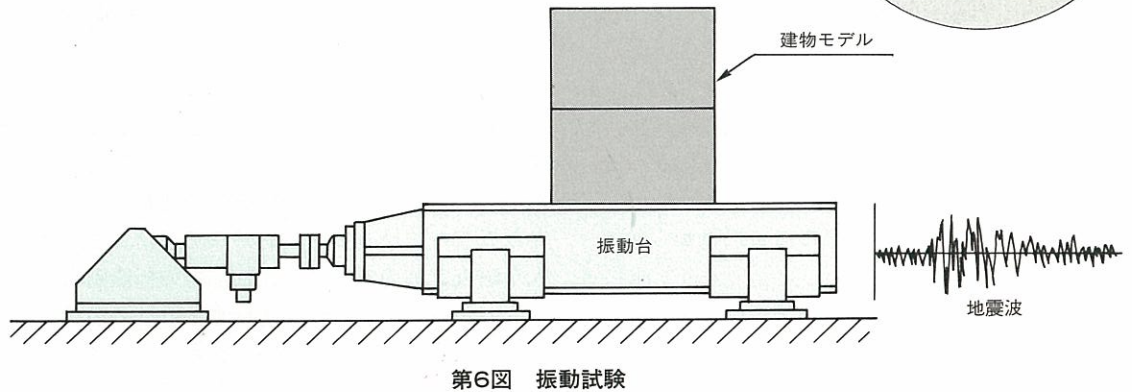
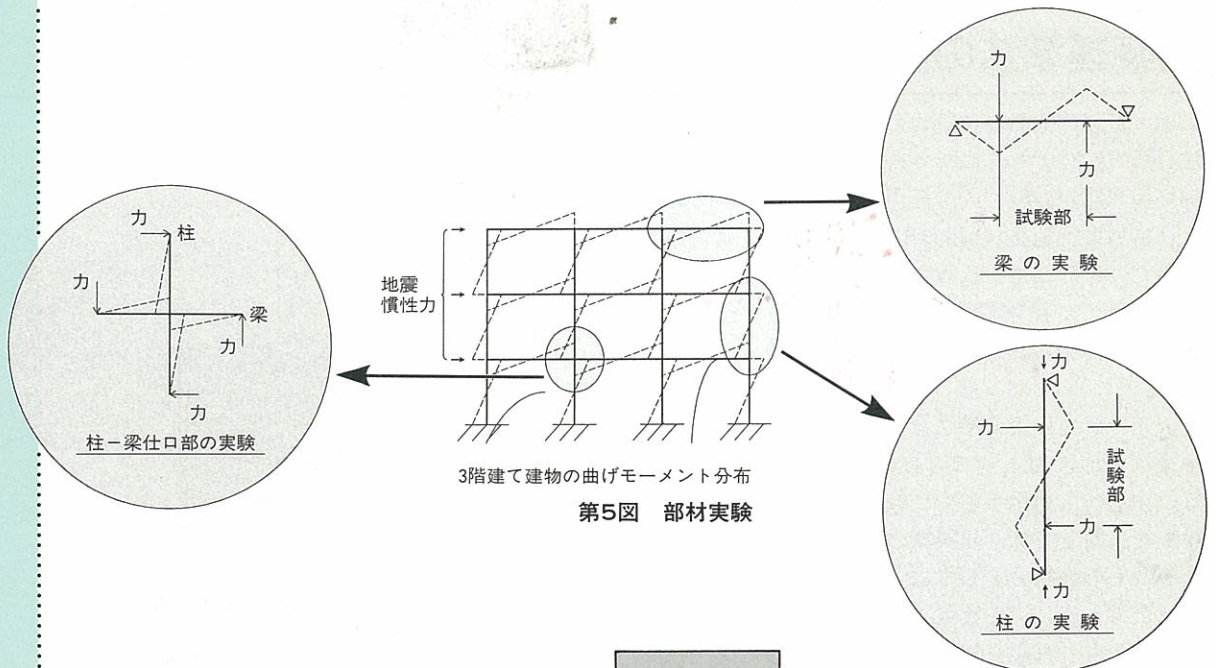


写真1 柱-梁仕口部の実験



平面骨組試験

前項の部材試験ではわからない骨組としての崩壊形態を知りたい場合に行う。力のあたえ方は静的または動的の二つのケースがある。実験装置が大がかりになるため、特殊なケースといえる。

立体骨組の振動試験

建物各部位の地震時における動的な応答性状を知るため、多くの場合、振動台の上に建物のモデルを置いて、振動台を特定の振動波(地震波、正弦波など)で揺する方法である(第6図)。この方法は実際の地震時の挙動をもっともよく再現できる方法であるが、振動台の大きさにはかぎりがあり、実大の建物をその上に置くには無理な場合も多い。したがって縮小モデルにより行わなければならないという短所もある。

今回の「兵庫県南部地震」では、水平方向の揺れもさることながら鉛直方向の揺れの激しさがとくに指摘された。これまでの耐震規定では、鉛直方向の揺れの大きさを水平方向の50%くらいと大ざっぱに想定して、耐震設計を行っていたのが実情であり、地盤の特性による局地的な揺れの問題も含めて今後の課題になるものと考えられる。

他方、ここ数年の新しい方向として、耐震とは別に制震(免震を含む)という新しい概念が打ち出され、制震装置も実用化されはじめている。これは地震に耐えるのではなく、地震を制するまたは免れるというものであり、地震による慣性力を建物にできるだけ伝えないようにしようとするものである。今後、経済性ととのバランスがとれれば発展して行く可能性の高いものである。

前章の各種耐震実験は、いずれも当社において実施できる態勢にあり、これまでも数多くの実験を行ってきた。今後とも、新しい関連技術を取りこみながら技術力を高めて行きたい。

〔尼崎事業所 強度技術室 島本 明〕