



耐震設計法の改訂によせて

井上 豊*

はじめに

1978年6月の宮城県沖地震によって仙台市内で幾棟かの鉄筋コンクリート造建物が大破した。また、東北大学工学部の建物では最上階の強震計の記録から、重力の加速度1gを上廻る水平加速度が生じたものと考えられるが、建物骨組は全く無事であった。勿論、両者とも同じ耐震設計法に基づいて設計されている。その耐震性の大きな相違には当然種々の要素が作用し合っている訳であるが、一旦震害が生じると多くの場合耐震設計法が槍玉に上げられることになる。

本稿では、昭和55年度から改訂される予定の建築物耐震設計法の紹介を兼ね、現在まで60年以上に亘ってその形を変えることのなかった中低層建物の現行耐震設計法の成立ちをふり返り、新しい設計法の位置づけを考えてみたい。

1. 震度と関東地震

我が国の地震学及び地震工学に関する近代的な研究は、明治の初期、滞日していた西洋の科学者達によって地震観測が始められたことをもってその第1頁と出来る。といっても、当時は未だいわゆる地震計は出現していず、簡単な装置によって地震の発生のみが判る程度のものであった。明治13年(1880)に横浜地震が起り、若干の家屋に被害が生じた程度であったが、これが契機となって日本地震学会(現・地震学会の前身)が発足した。そして地震計を考案・製作し、それによって観測された波形の解釈や震害調査などを進めることになった。ついで明治24年(1891)の濃尾地震(死7千人余、建物全壊14万戸余)の大被害を受けるに及んで文部省に震災予防調査会が設置され、中心となって耐

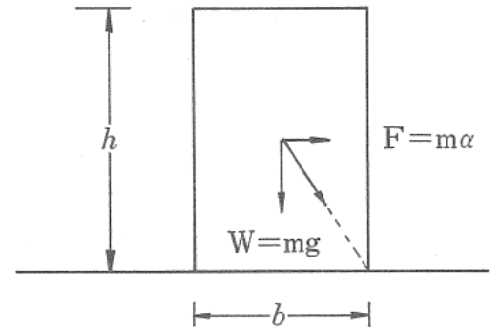


図1

震研究を推進することになった。この濃尾地震では有名な根尾谷断層(岐阜県、最大落差6m、延長数十km)が生じたこと、また西欧風レンガ造建築が大きな被害を受けたことが特筆される。明治39年(1906)に米国サンフランシスコで大地震が起り、我が国の研究者も現地調査を行ったが、その中に東大の佐野利器博士も加っていた。この調査結果から、鉄骨造建物は一般に耐震的であること、鉄筋コンクリート造では剛筋(ラーメン)構造として設計されたものは耐震的であり、かつ耐火性も優れていることが明らかとなり、我が国でもこれらの構造に関する研究が盛んとなって来た。

このような経緯のもとで大正5年(1916)、佐野博士は「家屋耐震構造論」を発表し、地震の作用を表わすのに「震度」の概念を用いた。すなわち、図1のような柱状体を転倒させるのに必要な横力の大きさを重力に対する比率で示したもので、

$$k = \frac{F}{W} = \frac{a}{g} = \frac{b}{h} \quad (1)$$

とし、 k を震度と称した。そして、地震で倒れたものの底と高さの比率を求め、その最大のもので地震の強さを表わすこととしている。また、建物の設計には震度0.1を考慮すべきこと、そうすれば材料安全率3によって震度0.3

*井上 豊 (Yutaka INOUE), 大阪大学, 工学部, 建築工学科, 助教授, 工博, 耐震工学

の地震まで耐え得ること、さらに、過去の大地震における震度は概ね0.5以下と推定出来ることなどを述べている。そして、このような地震力に対する各種構造の耐震計算法及び耐震工法について解説し、置換された静的地震力に抵抗させるためには水平抵抗力の大きい剛な建物を造るよう奨めている。これは国内外を通じて初の耐震構造論であり、実用性から見て巧みな方法で、以来我が国の耐震設計法を今日まで60年に亘って支配し続けて来ている。

このような考え方を受けて早大の内藤多仲博士は大正11年(1922)に「架構建築耐震構造論」を発表し、ラーメン架構への応用を示した。すなわち、重層ラーメン架構に水平力が作用した場合の応力略算法を述べるとともに、建物全体を一体として取扱って水平力が床を通じて建物各部に分散し、その剛度に応じて分担されること、ラーメン架構の中に含まれる壁の水平抵抗力の大きいことを述べた。また、この耐震計算法を実際の建物に適用した設計例を示しているが、これによると大阪高島屋及び大阪商船本社の両建物では $k=1/20$ の震度を、東京の日本興業銀行ビルでは $k=1/15$ としている。この耐震壁の考え方は、彼の米国留学中に経験した旅行トランクの仕切り板がその変形を防ぐのに非常に効果的だったことがヒントとなったと後に述べていることは面白い。

その翌年の大正12年(1923)に関東地震が起り、南関東一帯に大被害が生じたが、特に東京においては地震によって発生した火災によって大惨事となった。この地震による被害は、死者・行方不明14万3千人、建物倒壊12万8千戸、焼失44万7千戸であった。建物被害の状況から、ラーメン架構として設計された鉄骨造、鉄筋コンクリート造建物の耐震性が注目されるとともに、レンガ造は壊滅的被害を被り、以後レンガ造は主要な建物に用いられることが無くなった。木造は一般に筋違入り壁を持つ建物が耐震的であること、また、被害の分布は下町に多く、山手でも台地と台地の間の低地に集中しており、一方、土蔵については山手や特に高台で被害が多く、地盤と震害の関連が注目された。そして最も話題を賑わしたのは、多くの鉄

筋コンクリート造建物が大なり小なり被害を受けた中であって、震度 $k=1/15$ を用いて設計された日本興業銀行ビルが無被害であったことで、建物の耐震設計の重要性が認められ、翌大正13年(1924)には市街地建築物法(現・建築基準法)の施行令に耐震規定が設けられ、建物の設計に当っては震度0.1以上を採用することが義務づけられた。これは世界で初の耐震規定である。

2. 剛柔構造論争

関東大震災の結果、建物の耐震性に関する研究が活潑となり、ラーメン架構の水平力に対する構造解析法や架構振動論の研究が行われるようになった。中でも昭和の初期に論文の応酬が華々しく繰返されたいわゆる「剛柔構造論争」は、単に学会のみならず一般社会にまで大きな関心を引起したものであった。

佐野博士及び後に論陣に加わった武藤清博士は、震度の概念に基づいて設計された日本興業銀行ビルが関東地震の試練を無事パスしたことによって、地震の作用を震度の形で静的水平力に置換えられるとし、これに抵抗する力の大きい建物ほど耐震的であると主張した。当時の振動理論の殆んどは弾性振動の域を出ず、正弦地動の周期と建物の周期が一致した時の共振現象が多く論じられていた。しかし関東地震においてそれらしき現象の報告もなく、したがって地震動は正弦的ではなく極めて不規則なものであって、また、建物も大振幅となると完全な弾性でなくなることから、振動論的扱いには無理があり、略算的ではあるが震度を用いた静力学的扱いで良いとした。そして、なお耐震的にするにはなるべく剛にして周期を短く、地震動との共鳴を避ける方向を採るべきとし、さらに高層建築を剛にすることは甚だ困難であり、建物の高さはなるべく低いものが良いと考えていた。これらの考えは「剛構造論」と呼ばれた。

一方、海軍省の真島健三郎博士は振動学的な立場から地震時の構造物の挙動を採上げ、地震動は非定常な現象ではあるものの波の繰返しによって大変形の生じる可能性のあることを指摘し、これを避けるために架構を柔にして地震動よりも周期の長い構造物とすべきであると主張

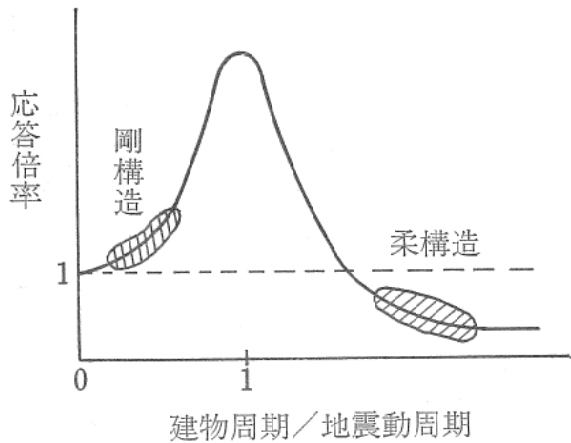


図 2

した。震度の概念に基づく剛構造論が成立するには建物が剛体であり、地盤も剛であって基礎が地盤に完全に固定される必要があるが、弾性材料を用いて作られる構造物において、柱を太く、壁を多くして剛にすべく努めたとしても限度があり、基礎・地盤についても仮定は成立し難く、地震動より短い周期の建物ではかえって地震の作用を増すことになる(図2)として「柔構造」を提唱した。そして、その所論から壁体構造は大体において危い、鉄筋コンクリート造ラーメン構造も必ずしも安心とは云えず、鉄骨造架構ならば理論上地震に耐え得る方法もあるとした。

このような両者の論争は昭和2年(1927)、日本建築学会誌「建築雑誌」上を賑わす形によって始められたが、昭和5年(1930)の北伊豆地震(死250名、全壊2千戸)において、筋違入り壁が多く、土台が基礎に緊結された木造家屋にやや被害が多かったことから、柔構造論が新聞紙上に紹介されるに及んで、それまで圧倒的に支持されていた剛構造論とは全く逆の考え方であるため大きい関心が持たれた。

昭和10年になって東大の妹沢克惟博士、金井清博士は地震時における構造物の振動エネルギーが再び地盤に伝えられ、弾性波として地中に逸散する事によって非常に大きい減衰作用を持つことを数理的に示した。そして、この作用は構造物と地盤の剛度によって異なり、地盤に比して構造物が剛であるほど減衰作用が大きかったが、共振時の振幅は小さくなるとした。これによって地震との共振による建物の崩壊が

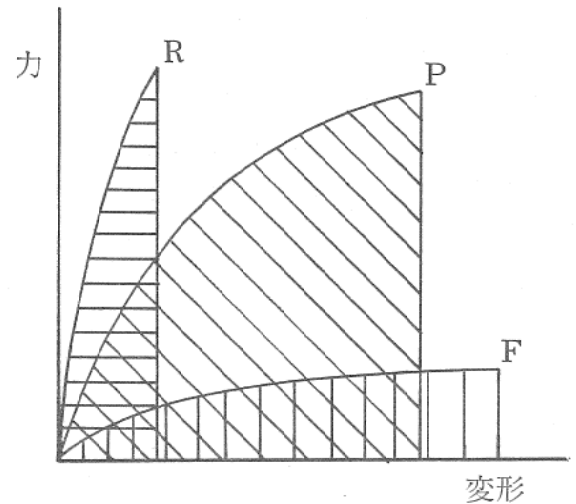


図 3

起らないことが明らかとなり注目を集めた。

同じ年に京大の棚橋諒博士が画期的な耐震構造論を発表した。その骨子は「地震の破壊力はその最大速度の自乗に比例する」、「構造物の耐震力は破壊までに貯え得るポテンシャルエネルギーの量による」と云う2点で、それまでの「地震の破壊力は最大加速度による」、「構造物の耐震力は静的水平力に対する抵抗の大きさによる」とする考え方とは全く異なった観点に立ったもので、非常な反響を呼んだ。極めて剛な建物には地動の加速度に比例する力が作用し、震害は加速度と相関が大きく、逆に非常に柔な場合には地動変位との関連が深い。しかし、地震動と建物の周期はほぼ一致する領域となることは避け難く、地動速度を対象とすべきであるとした。したがって、破壊的な地震力を加速度とその作用時間の積で表わされる衝撃的な力と考え、これに抵抗するには水平力によって構造物が変形し、破壊までに貯え得るポテンシャルエネルギー量が重要となり、耐震力を示すことになる。図3に示すように、Rは剛構造、Fは柔構造で両者同じ面積ならばその耐震力は殆んど等しく、ポテンシャルエネルギーの大きいPが耐震的であって、剛性及び変形性を兼ね備えるべきであるとした。そして、耐震力は構造法のみでなく、構造材料も重要な因子であり、韌性に富む鋼が最も優れると述べた。

これに対して剛構造、柔構造それぞれの立場から討論が挑まれたが、その主張する所があま

りにも先見的であったために当時の研究者の受入れるところとならず、2, 30年後の昭和30年代になって初めてその正当性が認識されることになった。

以上の他にも多くの論文が発表され、活潑な議論がたたかわされたが、大地震の経験等それぞれの理論を実証する機会もないまま、学界・官界に影響力の強い東大を中心とする剛構造論の推進がはかられた。その成果を具体化して構造計画及び構造法について述べた「建築物耐震構造要項」が昭和18年（1943）に発刊された。

また、並行して静的水平力に対する構造解析法について興味を中心が移って行き、やがて、戦時体制下の我が国にあっては理論的研究は次第に下火となって行った。

3. 現在の耐震設計法

以上のような耐震構造論争の賑やかな頃には鳴りをひそめていた大地震であった（昭和8年に三陸津波地震が起きた）が、太平洋戦争の激化から終戦へかけて研究が困難を極めた時期に、皮肉にも多く発生した。各地震とも死者が千名を超えているが、昭和18年（1943）に鳥取地震（全壊7千5百戸）、19年東南海地震（同2万6千戸）、20年三河地震（同5千5百戸）、21年南海地震（同1万5千戸）と続いた。しかし、いずれの地震についても本格的な震害調査を行える様な社会情勢にはなかった。そして昭和23年（1948）に福井地震（死者3千8百名、全壊3万6千戸）が発生し、その被害は局所的に集中し、極めて激しいものであった。この頃になると社会もようやく落ち着きを取戻しつつあった段階で、大学関係を中心に被害調査が実施され、特に、戦災で一度焼けた8階建の鉄筋コンクリート造百貨店が、今度は大きく破壊し、その震害解析を契機に動的耐震理論復活のきざしが見え始めた。

一方、昭和25年に制定された建築基準法において、佐野博士の提唱以来30年以上を経て定着して来た静的設計法として、震度を用いた耐震計算法が定められた。構造材料の許容応力度の定め方の変更に伴い、震度 $k=0.2$ とし、建物の高さ16m以上の部分については4m毎に震度を0.01増すこととされた。その後、地震学の方

表1

	木造	鉄骨造	鉄筋コンクリート造 鉄骨鉄筋コンクリート造
第1種地盤 (岩盤)	0.6	0.6	0.8
第2種地盤 (洪積層)	0.8	0.8	0.9
第3種地盤 (沖積層)	1.0	1.0	1.0
第4種地盤 (埋立地)	1.5	1.0	1.0

から地域あるいは地盤による地震動の強弱や震害の程度などが統計的に調査され、昭和27年にその成果を採入れて、やや細かく設計震度の値が加減出来るようになった。地域については全国を3つに分け、設計震度の値を20, 10, 0%減らすことが出来るとし、また地盤については構造種別毎に表1のように震度0.2に乗ずべき値が定められた。こうして現在実施されている我が国の建築物に対する耐震現定の形が整えられたのである。

さて、福井地震を契機に動的な立場からの建物の耐震性解析が再び注目されることになり、昭和27年に京大の棚橋博士、小堀鐸二博士の「スカイスクレーパーの振動」が発表され、非定常振動解析の端緒がつけられるとともに、建物周期が長くなるにつれて建物の単位重量当りの地震力が小さくなることが明らかとなり、約10年後に出現し始める高層建築への基礎が与えられた。さらに、激震時における構造物の弾塑性挙動を対象とする非線形応答解析へと研究は急速に進展して行った。

これら建物の地震応答解析のために破壊的な地震動記録の収集が急務とされ、米国について我が国でも強震計の開発・強震観測が進められた。そして、昭和31年に東京で震度Ⅳの記録を得たのを手始めに、徐々にその蓄積も数を増しつつある。実地震波を用いた建物の非定常非線形応答解析は、昭和30年代のアナログ型、またはデジタル型計算機の発達・普及によって急速な進歩を見、構造物を質点系モデルに置換しての弾塑性地震応答解析法が定着した。そして、地上24階建新東京駅改築計画を中心として

昭和34年発足の適正設計震度に関する研究において、高層建築の耐震設計への模索が行われた。昭和37年に得られたその研究成果では、構造技術的には問題点を残すものの、地上25階程度の建築の実現は充分可能性があると結論され耐震構造の発展の上で大きな意味を持った。

翌昭和38年には建築基準法が改訂され、地上31m以下（特定地域では45m以下）に抑えられていた建築物の高さの制限が撤廃され、高層建築物の出現が可能となった。一般の中低層建築については在来の震度法による耐震計算法が適用されるのに対し、地上45m以上の高層建築に対しては拠り所が全くないために、未だ経験のない高層建築の耐震設計方針に関して、日本建築学会がその時点までの研究成果を反映して、昭和39年に「高層建築技術指針」を公表した。これはその主旨から、高層建築の耐震設計における基本的な事項に関し、考え方がある程度まとまって来たものについて示している。

まず高層建築の構造計画については、単純な形状の建物、力学的に明快な構造、堅固な支持地盤が望ましいとされ、また地震時の挙動を念頭において、骨組は強度とともに靱性を持ち、水平力に対して捩れ変形が生じないように計画すべきことが指摘されている。耐震計算については、その手順が次のように示されている。設計地震力は層せん断力係数（建物のある層における層せん断力をその層から上の全重量で除した値）の形で扱われ、建物の基本周期に応じた建物基部の設計用せん断力係数（設計用ベースシャー係数）をもとに、各層の設計用層せん断力係数を定め、これによって構造詳細の設計を行った後、変形および降伏後の性状を調べることにしている。その結果に基づいて、これを動的解析のためのモデルとして表わし、地震動に対する応答計算を行いながら、耐震安全性が確かめられるまで必要な設計の修正をくり返すことを述べている。この手順の中で示されている具体的な数値としては、ベースシャー係数 C_B についての参考資料として、建物の基本周期との関係を

$$C_B = \frac{0.15}{T} \sim \frac{0.30}{T}, C_B \geq 0.05 \quad (2)$$

としている程度であり、構造設計の内容は審査機関のチェックを受ける必要はあるが、耐震性検討の詳細を設計者が自由に扱うことが出来る形になっている。

4. 耐震設計法の改訂

以上のようにして我が国における建物の耐震設計は、① 高さ45m未満の中低層建築について、地震力を震度0.2とする静的水平力として想定し、剛な建物として設計しようとする場合と、② 高さ45m以上の高層建築について、振動特性あるいは地震応答性状を求めながら設計する場合とに分けられている。しかしながら、高さの比較的高い中層建築については、震度の考え方をういて剛に設計しようとするには無理な場合も多く、動的な性質を反映させた耐震設計を行う方が合理的である。一方、高層建築の中でも高さのあまり高くない建物は、比較的数量も多く、また応答解析例も非常に多く蓄積されて来ており、さらに新たに個々の建物についての応答解析を行う必要も少ないと考えられる。そこで、現在全く別の扱いになっている両者を連続させ、特に中低層建築について動的性

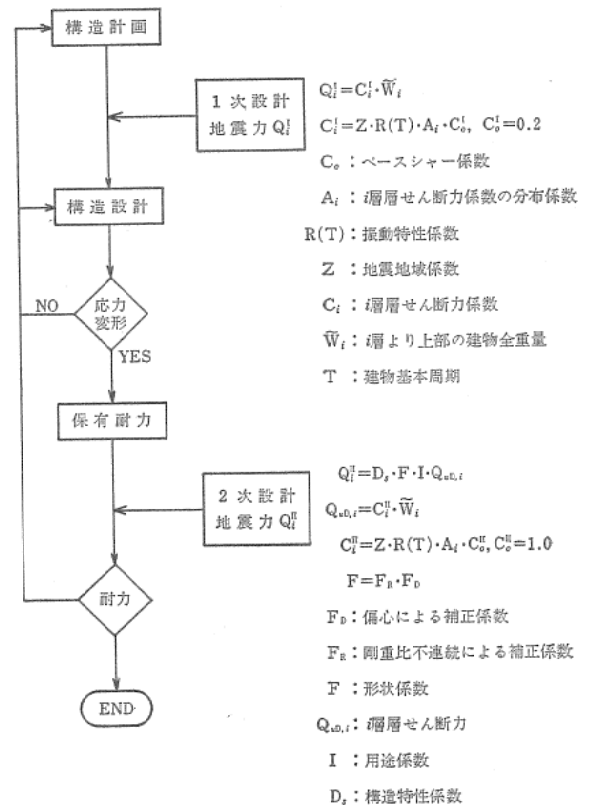


図 4

質を反映させた合理的耐震設計を行うことを目的として、新しい耐震設計法についての検討が進められて来た。そして、その結果をまとめて、建築基準法施行令の改訂として実施に移す作業が行われている。この改訂案はどのような考え方によるものであるかについて、少し解説して見よう。

この新しい耐震設計の流れについて図4に示している。基本的な考え方としては、中低層建築について現在行われていると同様に、静的水平力を用いた耐震設計であるが、地震力を表わすこの静的水平力を求める際に、建物の基本周期を考慮に入れることがまず挙げられる。つぎに、水平力の高さ方向の分布が異り頂部を可成り大きくすることとしている。これらはいずれも地震応答性状に基づくものである。そして、高層建築の地震応答解析時に採られている1次、2次設計方法が用いられている。すなわち、1次設計では、比較的頻度の高い中震・強震程度の地震力に対して、建物各部の応力を許容応力度内に収める弾性設計を、2次設計では、極めて稀な激震程度の地震力に対して、建物全体の保有耐力を求め終局状態の検討を行うこととしている。2次設計用の地震力は1次設計における値の5倍としているが、構造の靱性に応じてこの値を低減出来るとしている。また、1次設計において建物の変形量に制限値を設けていること、2次設計において、建物の高

さ方向の動力学特性の不連続さを表わす剛重比変化率、あるいは捩れ変形の生じ易さを表す偏心率に関する係数が導入され、また、建物の重要度による割増係数も考慮されている。この改訂案に含まれる具体的数式や数値については、必ずしもすべて妥当なものとは云えないが、その骨組としては、現行の震度による耐震設計を改善する方向にあると考えられる。したがって、具体的数式や数値について、研究の進展に応じて変更出来る形としておくことが望ましい。

文 献

- 1) 佐野利器：家屋耐震構造論上篇・下篇，震災予防調査会報告，No.83，甲・乙，1916，1917.
- 2) 内藤多仲：架構建築耐震構造論，建築雑誌，第36・37巻，第436～441号，1922，1923.
- 3) 真島健三郎：耐震構造問題に就て，建築雑誌，第41巻，491号，1927.
- 4) 佐野利器：耐震構造上の諸説，建築雑誌，第41巻，第491号，1927.
- 5) 武藤 清：家屋の耐震設計方針に就て，建築雑誌，第43巻，第528号，1929.
- 6) Sezawa, K. and Kanai, K. : Decay in Seismic Vibrations of a Simple or Tall Structure by Dissipation of their Energy into the Ground, 東大地震研究所彙報，第8巻，第3冊，1935.
- 7) 棚橋 諒：地震の破壊力と建築物の耐震力に関する私見，建築雑誌，第49巻，第599号，1935.
- 8) 棚橋 諒，小堀鐸二：スカイスクレーパーの振動，日本建築学会研究報告，第18号，1952.

