

# 建 築

大 沢 胖\*

## 1. ま え が き

建築物の耐震設計も、現在のところ橋梁・ダムなどの土木構造物と同様、いわゆる震度法にもとづいて行なわれている。ただ近く実現されようとしている「超高層建築」を対象として、動的設計法というか、地震動に対する建築物の動的応答を考慮して設計する方法が研究されつつあり、この方面の関心が研究者・技術者の間に急激にたかまってきている。

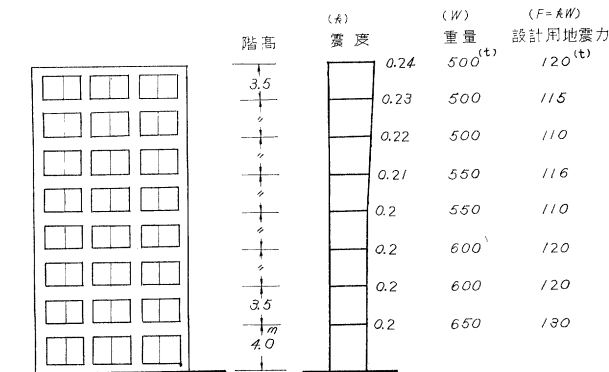
ここでは、はじめに現行の耐震設計法の概略についてその背景となるところもふくめて簡単に紹介し、日本における最近の耐震研究の動向からさらに「超高層建築」の耐震設計の問題にまでふれてみたいと思う。

## 2. 現行設計法

### (1) 耐 震 規 定

建築のほうで震度にもとづく耐震規定がはじめて制定されたのは、遠く関東大震災直後（1924年）にさかのぼ

図一 設計用地震力の計算例（8階建）



る。この規定は佐野博士がはじめて考えられた震度の概念によったものであるが、その後、多少の改訂増補を経て1950年（昭和25年）の建築基準法にとり入れられ、現行の耐震規定となって今日におよんでいる。その規定の概要はつぎのようになっている。

### 設計用地震力

建物各部に加わる設計用の地震力  $F$  は、

$$F = kW$$

により求める。ここに  $k$  は震度で水平方向のもののみ考え、 $W$  は重量でふつう建物各階の床位置に集中するものとして扱う。図一に8階建ビルの場合の地震力の計算例を示す。

### 震 度

具体的につぎの値をとる。

(1) 標準値 0.2以上とする。

(2) 高層の割増し 高さ16mをこえる建物に対して、16m以上の部分について高さ4m以内を増すごとに0.01を加えた値をとる（図一参照）。

(3) 地域による低減 図二のように全国を甲、乙、丙3地区に分け、

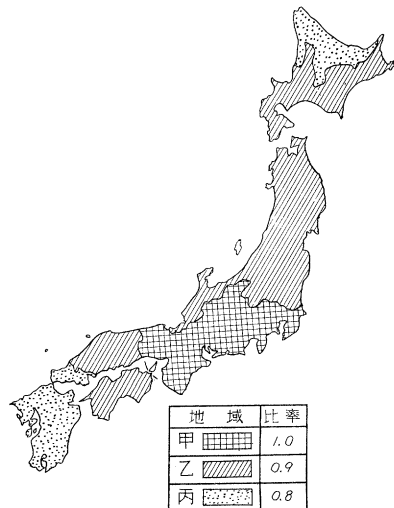
甲地区	1.0
乙 "	0.9
丙 "	0.8

のように低減することができる。

(4) 地盤による増減 地盤の良好なところでは、建物の構造種別に応じて、表一のように震度を低減することができる。また地盤がいちじるしく軟弱な区域の木造建物は0.3をとる。

上の震度の標準値0.2は、当初は関東大震災後に材料の安全率をみこんで0.1と定められたものが、その後安

図二 地域による震度低減率



\* 正員 工博 東京大学地震研究所

表-1 良好な地盤における震度低減率

	地 盤	構 造 の 種 別		
		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	地盤が当該建築物の周囲相当の範囲にわたって岩盤、硬質砂れき層その他、主として第3紀以前の地層によって構成されているもの	0.6	0.6	0.8
第2種	地盤が当該建築物の周囲相当の範囲にわたって砂れき層、砂混り硬質粘土層、ローム層その他主として洪積層によって構成されているもの、または厚さがおおむね5m以上の砂利層もしくは砂れき層の沖積層によって構成されているもの	0.8	0.8	0.9

全率を1とするかわりに震度のほうも2倍にとるという終局強度型のより合理的な設計法に移行して0.2となったものである。当初の0.1は、特に数字的に深い根拠の上を立て定められたわけではないが、この値をとって設計した建物がその後の大地震で一応安全であったことからこのような規定となった。

しかしながら、震度0.2で設計された建物が、いかなる地震に対しても無被害であると考えているわけではない。関東大震災の際の部分的な地震記録（残念なことに完全な記録ではなくごく初めのほうだけ）その他からみて1ないし2秒の長周期の波が多く、これに建物が共振しないためには骨組を剛にして周期を短くすべしとする剛構造論が現行設計法の背景になっている。しかし大地震で短周期の波もかなり予想されるところであり、短周期の建物といえども大地震時に無被害とは考えられない。むしろ大地震の際は多少の被害は生ずるが、それによって振動エネルギーを吸収する減衰作用がはたらき大被害をさけるという考えが代表的になっている。したがって現行の規定では、建物が「中程度の地震では無被害、大地震では修復しうる程度の小被害」をねらって設計されていると考えてよからう。

以上(1)の標準震度の値について述べたが、つぎに、高さが高くなると、上部は下部にくらべてゆれ方が大きくなるのが当然考えられる。したがって上部の震度は標準値よりも大きくなるべきで、(2)のような規定となった。アメリカその他の諸国では、この傾向をもっと重視して逆三角型の震度分布をとっているが、これは日本の建物にくらべてもっと高くフレキシブルなものを対象としているためとも考えられる。

(3)の地域による低減は、土木構造物に対して採用されていると同様、震害をうける度合いが地域によってかなり異なっていることから定められたもので、この区分は河角博士の研究結果をもとにしている。

また(4)の地盤による増減は、従来の震害を地盤の硬軟と構造物の剛さの関係について種々検討した結果から

定められた。木造の場合は、明らかに軟かい地盤ほど同じ地震についての被害率が大きい。特に埋立地や斜面を崩して盛土した上に建った木造家屋は、基礎の不同沈下による大被害が目立っている。この点を考慮して軟弱地盤の震度割増しが規定されている。また鉄筋コンクリート造では、微少被害は硬い地盤のほうが多いが中被害以上となるとかならずしもそうでない。設計方針として大地震には多少の被害たとえば壁体の小ひびわれぐらいは許すこととすれば、粘りのある鉄筋コンクリート造や鉄骨鉄筋コンクリート造では、硬地盤のほうは大丈夫でむしろ軟い地盤で不同沈下による被害を警戒すべきであると考えられる。このような考えで、木造の場合ほどではないが鉄筋コンクリート造なども硬地盤の震度を低減してよいことになっている。

許容応力度

建築では、常時加わる荷重による応力「長期応力」に対して、地震や風のように短期間加わる荷重による応力を長期応力に加算したものを「短期応力」とよび、その許容応力度としては長期に対するものより大きい値をとっている。この許容応力度を鉄筋コンクリート造の場合について例示したのが表-2である。

表-2 鉄筋コンクリート造における材料の許容応力度  
(建築学会「鉄筋コンクリート計算規準・同解説」より)

材 料	長 期			短 期
	引 張	圧 縮	せん断	
コンクリート	$1/30 F_c$	$1/3 F_c$	$1/30 F_c$	長期応力に対する値の2倍
鉄 筋	普通鋼材	1400	1400	長期応力に対する値の1.5倍
	SS 39-SSD 39 SRB 39-SRD 39	1600	1600	
	SS 49-SSD 49 SRB 49-SRD 49	2000	2000	

注  $F_c$ : コンクリートの4週圧縮強度

この表でみられるように、鉄筋はほぼ降伏点強度いっぱいであり、コンクリートも現場施工であることや強度のばらつきを考慮にいれれば、ほぼ材料の強度そのものをとっていることになる。このような許容応力度の値はさきに述べた震度のとり方に対応するものであって、戦前は震度0.1で地震時応力に対して許容応力度の割増しはなく、長期間の低い値をとっていたのが、材料使用の合理化をはかった戦時規格のなかに現行規定の原形として上の「震度0.2で許容応力度は材料の強度」の考えが取り入れられ、戦後のJIS規格、建築基準法にと引きつがれた。この終局強度型の考えは、早くから武藤博士、棚橋博士が提案されたものであるが、その耐震規定への思いきった採用は、設計法の合理化を世界にさがけて実行したものと高く評価されるべきである。

(2) 構造骨組と耐震設計

ご承知のように建築物の構造体は、8階9階といった高層ビルは鉄骨鉄筋コンクリート造、4、5階程度のビル

なら鉄筋コンクリート造，住宅や店舗には木造というところがふつうである。最近ではコンクリートブロック造とかプレストレストコンクリート造という新顔もぼつぼつ作られているが，一方，古くからあったレンガ造は，濃尾地震のさい被害が大きかったこともあって，その後ほとんどみられなくなった。

これら各種の構造体の耐震設計にあたっては，上に述べた設計用震度から算定した水平力を加えて，そのときの各部材の応力を計算することになる。ふつうのビルに使用する骨組は，柱・はりからなる剛節架構すなわちラーメンで，これに耐震壁が配される場合が多い。耐震壁の地震に対する効果については，すでに関東大震災時の興業銀行(内藤博士設計)をはじめ多くの実績がある。これらラーメンや耐震壁に生ずる応力の計算法は，昭和の初期から多くの研究が行なわれ，現在では静的水平力に対する応力計算はかなり容易にできるまでに進歩している。

鉄骨鉄筋コンクリート造は，耐震・耐火の両性能を必要とする高層建築にとって最も経済的な構法として戦後発達したわが国独得のものである。部材や接合部の設計に関して多くの実験的研究が積み重ねられ，設計規準が確立された。

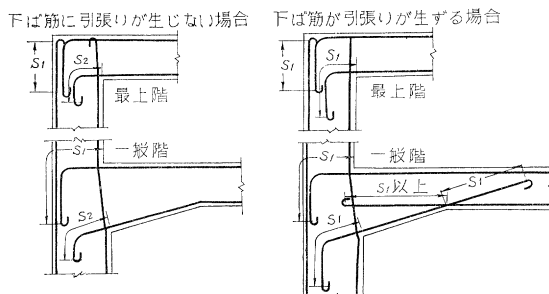
鉄骨鉄筋コンクリート造に限らず，各種の構造に対して，計算上の耐震考慮はもちろんのこと，構法に関係した各部の detail についても十分耐震上の考慮をはらうことになっている。建築基準法施行令，建築学会発行の各種構造計算基準・同解説，日本学術振興会編の「建築物耐震構造要項」等には，古くからの研究成果をもとにした建築の耐震構造法がまとめられている。これらの規準書にもとづいて設計すれば，一応耐震上最低限の安全性を確保することができるものと考えられている。

構造細部の耐震考慮の一例として，鉄筋コンクリート造の定着長さについて図解したものを図-3に示す。これははり端の応力の伝達ということだけでなく，接合部に十分な粘りをもたすことをねらったものである。他に木造における筋かいの柱・はりへのとりつけ方，コンクリートブロック造で水平方向にも補強鉄筋を入れること，などもその例である。このような注意は当然なことともいえるが細部の確実な設計施工が耐震上きわめて重要であることは，これを怠ったため大きな震害をうけた多くの例が証明している。

また基礎構造については最近特に注目されており，震害が基礎の不同沈下によって生ずる例の多いことから軟弱地盤ではとりわけ基礎の構法に注意が払われている。

以上現行の耐震設計法は，従来の震害の経験をもとにして，これを種々の角度から検討して作られたもので，耐震規定としてはきわめて単純なようにみえるが，構造

図-3 鉄筋コンクリート造における定着長さの規定  
(建築学会「鉄筋コンクリート計算規準・同解説」より)



全許容力伝達	$F_c$	$S_1$ (引張鉄筋)			$S_2$ (圧縮鉄筋)		
		135 (50 d)	180 (37 d)	225 (30 d)	135 (42 d)	180 (34 d)	225 (30 d)
	19	95	70	57	80	65	57
	22	110	81	66	92	75	66
	25	125	93	75	105	85	75

慣	使用場所	$F_c = 180 \text{ kg/cm}^2$ 未満			$F_c = 180 \text{ kg/cm}^2$ 以上		
		引張 (50 d)	圧縮 (40 d)	継手 (25 d)	定着	継手 (25 d)	定着
用	19	95	76	47	76	57	47
	22	110	88	55	88	66	55
	25	125	100	63	100	75	63

細部にまでわたって考えれば，いろいろ動的な考慮も入っており，また構造物のねばり強さがなるべく発揮されるようにしてある点，かなり複雑な内容をもつものとなっている。

### 3. 最近の耐震研究

建築の耐震方面の研究は濃尾地震後に始まるが，特に関東大震災後に目ざましい発展をとげ，ラーメンの耐震解析や振動理論の研究，各種構造物の実験的研究がさかに行なわれ，現行の耐震計算法・耐震構法が確立されるに至ったことは前にも述べたとおりである。

このような発展にもかかわらず，耐震構造を考えるうえできわめて重要な基礎資料がかけていた。それは大地震の際の建物や地盤の振動の記録である。これについては土木構造物においても同様と思うが，耐震研究を単に定性的なものではなく定量的に進めるうえには，破壊的大地震時の地面や建物各部のゆれ方を知ることがぜひ必要であるのにこの資料が全くないとあっては，前に述べた大地震の地動の周期と建物周期の共振問題に対して明快な結論を導くに至らなかったのも無理がない。幸いにして最近各方面の尽力で大地震の動き専門の地震計「強震計」の設置が進み，中地震程度の記録がとれだしているが，このような記録が集積され解析研究が進むことにより，耐震構法が一大進歩をとげるものと期待されている。

上のような事情もあって，戦前は振動理論その他の動的な研究よりもむしろ静的なラーメン解析の研究がはる

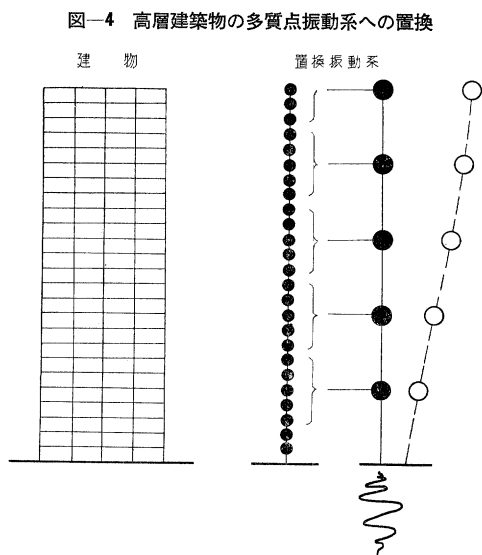
かにさかんであって、これら研究の成果である耐震設計法も、すくなくとも表面上は動的設計法というようなものになっていないわけである。

戦後になって間もなく、おもに当時の新構法であるコンクリートブロック造や壁式鉄筋コンクリート造の耐震性能を明確にする目的で、全国的な規模で多くの研究者たちが集まり耐震試験委員会 (TSI) を組織して、多くの実験・理論研究を行なった。これは主として動的な研究であって大型起振機による実物実験、振動台による模型実験などによって多くの成果をあげた。

さらに 1951 年アメリカにおける建物周期によって設計震度をかえる動的考慮加味の new 設計法が紹介され、国内の強震計設置と相まって、わが国の耐震研究に対する大きな刺激となった。

こういった動きにつづく現在の耐震研究は、全く動的な面がさかんになっている。すなわち「地震動に対する建物の動的応答の研究」である。これは建物を多質点の振動系におきかえ、これに地震動 (実際に記録されたものまたは理想化したもの) を加えたときの建物の動きを計算し、具体的に各部の変形や応力を知ろうとするものである (図-4 参照)。この計算はきわめて複雑であり、特にあとで述べるような建物の一部破壊後の塑性振動まで計算することは大変めんどろである。これら計算の原方程式自体は以前から考えられていたのだが具体的計算は不可能とみられていた。それがこのところ、どんどん計算され結果の検討まで行なわれるようになってきているが、これはひとえに最近のコンピューター技術の発達のおかげである。

この種地震応答の研究は各方面で行なわれているが、そのうち東京大学を中心とする強震応答解析委員会や京



都大学における耐震研究者グループでは、主としてアナログコンピューターを用いて研究を進め、すでに相当の成果をあげている。

こういった研究の途上で、建築として特に問題になっているのは、変形についてである。前にも述べたように、耐震設計の趣旨は、建築物が大地震で全く無被害というのではなく、ある程度の被害は覚悟するということにあるが、あまりに大きな変形、特にひとつの階での天井と床の間の相対的な変形が過大になると (たとえば 2 cm, 角度にして約 1/200 という数字がよく引合いに出される), かりに構造体が崩壊しなくてもそれ以外の間仕切壁とか窓・扉の類が大被害をうける。構造体が部分的に降伏して塑性域に入ってもよいが、その入る程度が問題となる。このことから、研究は、どうしても弾性の範囲をこえて、塑性振動 nonlinear vibration の問題を扱わなければならないわけで、目下この方面の研究が着々開拓されつつある。また、この塑性振動を考えるうえに重要な、構造骨組の復元力特性の研究も、鉄筋コンクリートや鉄骨鉄筋コンクリートの部材・骨組・接合部などのくり返し加力実験という形で行なわれている。これら実験によって構造体のくり返し力に対する粘りの度合いも明らかになってきている。

このように設計上の判断としてたわみがあまり大きくならないように考慮する変形制限の立場は、建築の耐震設計におけるひとつの特徴であると思う。

#### 4. 超高層建築の耐震設計上の問題点

最近、市街地中心部の土地使用状況が極端にきゅうくつとなり、土地の高度利用の必要にせまられてきたところから、従来 31 m (9 階建くらい) におさえられていた建築物の高さ制限をこえてもっと高い建物 (20 階建とか 30 階建) をたてようという気運がたかまっていたが、この 7 月建築基準法の改正法案が国会を通過して、早ければ今年末にはその施行にうつるといふ運びになった。

このいわゆる超高層建築の設計にあたって、耐震上の問題をどうするかということについては、直接関係者はもちろんのこと、一般の方々もかなり深い関心をもってようである。建築界では、建築学会を中心として昨年来この問題を取りあげ熱心な討議をつづけてきているが、ここではいまのところ特に問題になっている点をいくつかあげて読者の参考に供したいと思う。

まず第一に、まえがきにも述べた動的設計法、すなわち地震動に対する建物の動的応答を考慮して設計することである。建物全体を 1 質点の振動系におきかえ、実際測定された強震動記録に対するその動的応答を解析したこれまでの研究結果では、少なくとも周期 1 秒以上のところでは、周期が長くなるほど加速度が小さく

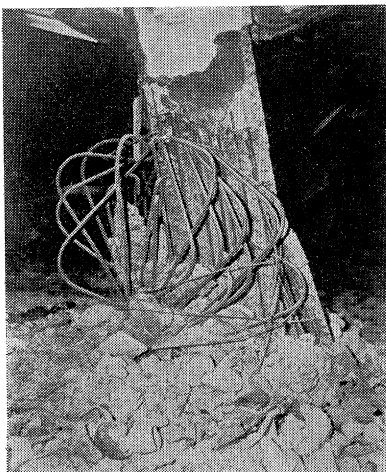
したがって建物に入ってくる力が小さくなることを示している。20階・30階の建物は、まず固有周期（1次）が2秒とか3秒ぐらいになるので、この点は低い建物より有利だといえる。しかし高い建物は2次振動、3次振動の影響が大きくなる傾向もあり、どうしても建物を多質点の振動系におきかえて動的応答計算を行なって検討する必要がある。動的応答を求める計算自体は電子計算機などを用いて行なうことになるが、入力としての地震動をどう選ぶかという大きな問題があり、また計算された結果の解釈にもいろいろと工学的判断を必要とすることになる。なお建物を振動体として考えるのに、理くつの上ではどんな形でもよいはずであるが、さしあたりはなるべく単純な形で振動系におきかえやすく、力学的にも明快な骨組のものを対象とするということが考えられている。

上部構造で特に問題となるのは変形のことであって、大地震であまり大きな変形をおこして窓ガラスを割ったりしては危険であるし、また強風時に不快なゆれがおこっても困る。このへんの限度は構造強度だけできまる問題ではないので具体的な数字を出しにくい、目下種々

写真-1 福井地震で大被害をうけた大和ビル  
(鉄筋コンクリート造)



写真-2 同上的大和ビルの柱の破壊状況



の尻地から検討が進められている。

構造骨組としては、鉄骨造(耐火被覆)あるいは鉄骨鉄筋コンクリート造が考えられているが、どのような材料を使うにしても骨組として十分な粘り、すなわちエネルギー

吸収能力をもつことが要求される。そのため骨組の一部について、くり返し加力による実大実験がぜひ必要であるとも考えられている。

また基礎構造については、一般には特に堅固な地盤に建てるのが前提条件とされているが、場所によっては地下部分を横にひろげて安定をはかろうという考えもあり、なお検討を要する問題である。

以上超高層の耐震設計の問題点について述べたが、超高層建築それ自体としては、火災の問題や、設計計画、設備、材料施工などにそれぞれ問題点があり、耐震もこれらの部門と密接な関係をもっているため、その関連のもとに一段の研究努力が必要とされているわけである。

なおここでは、研究面における個々の具体的な成果については述べなかったが、動的研究や超高層の研究に興味をもたれる方は、参考文献(6)、(7)にある関係論文をご覧いただきたい。

#### 参考文献

- 1) 建設省住宅局編：建築基準法関係法令集，日本建築学会
- 2) 日本建築学会：各種構造計算基準・同解説，(木構造・鉄筋コンクリート造・特殊コンクリート造・鉄骨造・鉄骨鉄筋コンクリート造などの構造別になっている)
- 3) 日本学術振興会編：建築物耐震構造要項，岩波書店，昭和18年
- 4) 竹山謙三郎：荷重と外力・木構造，共立全書，昭和26年
- 5) 武藤 清：構造設計法，建築学大系 第14巻，彰国社，昭和29年
- 6) 日本建築学会論文報告集のなかの関係諸論文
- 7) "Proceedings of Japan National Symposium on Earthquake Engineering" (1962) のなかの関係諸論文

写真-3 関東大震災で大被害をうけた工業クラブ

(写真はいずれも東京大学建築学教室所蔵)

