建築構造の耐震設計と安全の考え方

東京工業大学　和田　章

1．　はじめに

建築雑誌の５月号に兵庫県南部地震に関する特集が組まれ、その座談会の中で山口昭一博士は、日本の耐震構造学の創始者・佐野利器先生は、関東震災後に耐震設計用の水平力を求めるための設計震度を０．１と決めたと同じころ、東京大学工学部１号館を設計されており、この耐震設計はほぼ１Ｇの水平力に対しても壊れないように行われたと紹介している。佐野利器先生は本格的な大地震動に耐えるためには不足であることを分かっていいて、一般の建物の設計には０．１の値が妥当であると判断し、この値を決めたのであろう。このころの建物は窓が小さく、許容応力度が小さく設定されていたので、今の計算法で計れば０．３程度の終局耐力はあったであろうから、特別な建物を３倍強く作ったことになる。このように、構造物に持たせるべき耐震強さのレベルは、物理学等の理論だけでは決められず、深い判断が必要であり、その時代の技術、経済状態によって決められるものであり、簡単な問題ではない。

2．　強さと粘り

設計震度はその後、材料の許容応力度に短期許容応力度が作られ、地震時には高い応力度が認められるようになったとき、０．２に変更され、そのまま現在の設計法の層せん断力係数０．２に受け継がれている。

このように、法規による地震力の値はこの７０年の間それほど大きく変化しているとは言えず、構造物の耐震性が向上してきたのは、構造部材、架構にねばりを与えることによったと言える。この結果、構造物が大きな変形を生じたとき、柱や壁の持っている抵抗力が総合力として合算できるようになり、結果として建物全体の水平抵抗力が増したことによって耐震性が確保できたことになる。その上、構造物にねばりを持たせることは地震時のエネルギー吸収能力を高め、耐震性を向上させることは周知である。

この度、色々な機関から発表されている地震災害報告書の中でも言われているように、特に鉄筋コンクリート構造の被害率が、1971年にせん断設計法が改定され部材の変形能力が設計上問題とされてから、急激に減少していることからも、変形能力の向上が耐震性を高めたことが分かる。新耐震設計法では建物の高さ方向のせん断力の分布、地盤の良否と構造物の固有周期に従って地震力を変えること、鉄筋コンクリート構造だけでなく、鉄骨構造にも変形能力の考え方が持ち込まれたことなど、改良点は多くあり、建築構造物の耐震性は年を追って向上していると言える。

3．　損傷を認めた耐震設計法

現行の耐震設計基準は、建物の使用期間中に何度か受けるであろう中小地震動に対しては建物にはほとんど損傷を与えず、継続使用を可能にし、極めて稀にしか起きない大きさの大地震動に対しては建物は損傷を受けても、崩壊することはなく、人命を保護するという２段階の考え方によって成り立っている。

耐震を正面から最も重要なことと考え、真の耐震構造を設計しようとするなら、原子力発電所の設計で用いられているように現行の３倍の力に対して構造物を弾性設計することになってしまう。合理的な建築構造を設計しようとすると、建築の美的な要素、機能を満たすこと、経済性を考えることになる。これらに重きをおくに従って、建物の耐震性を犠牲にして行くことになり、大地震時には建物に損傷を認めざるを得ないというのが今の技術である。つまり、コンクリートと鋼材を用いる現在の方法で、建物の美的要素、機能、経済を考慮すると、極めて稀にくる大地震動に対しては構造物に大きな損傷があっても仕方ないという考え方が、設計者、建物のオーナーなどに受け入れられたことになる。

三ノ宮地区を襲ったこの度の地震動の大きさは、基準法の２次設計のレベルとほぼ同じか、単周期ではこのレベルを越えていたのではないかと言われている。このレベルの地震動を受けると、この度のように被害を受けることがはっきりしたことになる。

4．　仕様規定型から性能規定型へ

構造耐震性能共同研究・新設計体系研究会は建設省建築研究所と鋼材倶楽部の共同研究として平成４年１１月から平成７年２月の間に行なわれ、現在使われて

いる建築構造設計の体系を仕様規定型から性能規定型へ変革することの可能性に関して、主に鋼構造建築の耐震設計、台風設計に焦点を当て、調査研究が進められた。ここにその一部を紹介させていただく。

戦後の復興期から作られてきた仕様規定型の設計体系は、多くの建築を次々と建設していかなければならなかった時代に必要であったし、機能してきたと言える。これらの構造種別毎に作られた各種の規準類は合本すると数mの厚さになると言われる。各種の建築構造に対応させて構造形式、構造種別を分類し、それぞれについて仕様規定型の構造設計法を作ってきたため、原段階でこれらを見直すと、それぞれの仕様規定とそれが目指している目標性能の関係が不明確になっている。その結果、これらの規準によって設計された建物の構造性能が明示できないだけでなく、各種の荷重や外力に対する構造物の安全性も不明確な状態にある。

設計段階で最も重要なことは、自然現象である地震や風などの外力に対して挙動する建物の性質・性能を良く考察することであるにもかかわらず、規準に書かれていることを順々に満たしていくことが構造設計であると誤解されていることが問題である。現在の学術ではまだ解明できないことが沢山あるにもかかわらず、基準を守って設計することで安全な建物ができると思われ、一般の人々にも建築構造は安全で、壊れることはないと思われている。われわれは構造物のもっている安全性、性能を一般社会に正しく伝える必要があり、建築構造の設計に際し、構造物には各種のグレードをつけることが可能であり、ある最低の条件はあるとしても、中水順、高水準など、要求に応じて異なったグレードの構造を作ることができる技術を持っていることを社会に示すべきである。

過去数十年の間に築き上げられたこれらの各種の仕様規定は、それぞれその時代の構造材料のもつ力学的性質、耐久性などを基に、その時代の設計技術、計算法、施工技術を反映し、経験を積み上げながら作られてきたといえる。２１世紀に向け、新しい材料が開発され、従来からの材料も強度や靭性、施工性が大きく変化し、向上している、構造技術、施工技術についても大きな変化が起きている。これらの新しい設計を支配する基準体系を、従来からの仕様規定の積み上げのままにしておいては、新しい構造への開発が阻害されてしまう。進んだ設計者による新しい技術への取組の意欲をなくさせてしまうこともあり得る。

画一的な設計法からの脱皮を目指し、構造設計を責任感のある魅力的な仕事にすることにより、構造設計者の地位を向上させるためにも、２１世紀の構造設計の体系は「設計のプロセスを規定しない」、「設計された建物が持つべき性能を規定する」形に変革していくべきと考える。

構造物の設計に確率、統計理論を合理的に利用していくことも望まれている。特に外力の評価はこれらの考え方に基づいて行われることになろう。レベルの低い荷重は発生頻度が高く、レベルの高い荷重は発生頻度が低い。この関係は連続的なものであり、建築構造物が使用される寿命の間で受ける全被害に注目するならば、ある荷重に対する被害の程度と、その荷重の起きる頻度を掛け合わせた値の積分値に注目する方法が考えられる。ただし、実際の設計に当たってこの方法が実用的とは考えられず、ある有限な数のレベルの荷重に対して、構造物の持つ性能を調べる方法が用いられる。使用限界・終局限界、レベル１・レベル２などがその考え方である。米国でも、設計レベルの数についての議論があり、シングルレベルチェック、マルチレベルチェック、ライフサイクルでチェック等の言葉が用いられている。

米国においても性能設計に関する研究が行われ、1995年3月にVision 2000 / Performance Based Seismic Engineering of Buildingsと題した報告書が出版されている。

５．　構造耐震性能共同研究・新設計体系研究会報告書の紹介

本報告書では耐震設計、耐風設計に注目して建築構造物が持つべき性能を整理することに重点を置かれた。興味ある点は、従来の設計は応力度・強度の軸に注目して行われていたことに対し、構造物の性能は変形や振動などの軸で表現されることである。

ここには、耐震設計に当たって建築構造の主要構造に対して提案された要求性能マトリックスを表１に紹介する。

ａ）横軸の名称はMinor（L1）、Moderate（L2）、

Major（L3）、Extra Major（L4）の４段階とする。

b）この段階に応じて異なる再現期間の荷重を考える。

c）縦軸はＡ、Ｂ、Ｃ、Ｄの４グレードに分ける。Ａは高級、Ｂは推薦、Ｃは一般、Ｄは条件付きであり、Ｃの一般を社会的な最低限の要求とする。Ｄの条件付きは、仮設などの特殊な建築物で、倒壊や破損が人命もしくは社会的に影響を与えない合理的な理由のある建物に用いられる。

d）主要構造の概念的クライテリアは、無被害、継続使用可、補修後使用可、非倒壊の４つとする。

e）無被害は、構造体が弾性範囲内に収まり、かつ残留変形はゼロで、文字通り被害のないことを言う。

f）継続使用可は、構造体の本来の機能は損なわれておらず、当面継続して使用することは可能であるが、小規模な修理は必要であることを意味する。

g）補修後使用可は、大規模な修理の後に再使用が可能になることを意味し、構造安全性確保も含まれる。

h）構造の非倒壊、あるいは人命保護とは再使用不可能なほど甚大な損傷を被っても、人命の損傷はもたらさないことを意味する。

この報告書では、非構造部材に対する要求性能マトリックス、風荷重時に関する主要構造の要求性能マトリックス、非構造部材に関する要求性能マトリックス等が提案されているが、ここでは地震時の主要構造に対する要求性能マトリックスを示した。

6．　Vision 2000 の紹介

Vision 2000 は、SEAOC（カリフォルニア構造技術者協会）が1995年4月に発表したレポートであり、これからの耐震設計技術の考え方を示したものである。正式には Performance Based Seismic Engineering of Buildings と呼ばれ、設計、その確認法、施工に関する管理まで耐震建築を作るまでのすべての考え方がまとめられている。

ここでは、設計地震動のレベルを表２に示すように４段階に考え、地震時の性能のレベルは Fully Operational、Operational、Life Safe、Near Collapse、Collapse の５段階を考えている。建物を３種類に分けて、地震動のレベルと、性能のレベルからできるマトリックスの中にプロットすることによって推奨する建物の性能を示している。表３にこのマトリックスを示す。

表 1　　地震時の主要構造に対する要求性能マトリックス

荷重レベル		Ｌ１	Ｌ２	Ｌ３	Ｌ４
再現期間		20年	100年	500年	1000年
50年間の超過確率		92％	39％	9.5％	4.9％
主要構造のグレード	A	**無被害** 変形制限*1	**無被害** 変形制限*1	**継続使用可** 常時荷重支持部材弾性残留変形制限	**補修後使用可** 残留変形制限
	B	**無被害** 変形制限*1	**継続使用可** 常時荷重支持部材弾性残留変形制限	**補修後使用可** 残留変形制限	**非倒壊** 人命保護
	C	**継続使用可** 常時荷重支持部材弾性変形制限*1	**補修後使用可** 残留変形制限	**非倒壊** 人命保護	
	D	**補修後使用可** 残留変形制限	**非倒壊** 人命保護		

*1：非構造部材との関連に於て決定されるクライテリアであり画一的に制限値を与えるものではない

5．　おわりに

新耐震設計法が施行されて１５年目になる。昨年の兵庫県南部地震を受ける前から建設省は新構造体系の研究をはじめようとしていた。このプロジェクトはこの地震を受けたこともあり、昨年から本格的に動きだしている。ここで紹介した報告書はこのプロジェクトそのものの準備ではないが一つの方向性を示すものと言える。このレポートがこれからの耐震設計を考えていく一つの参考になれば幸いである。

最後になるが、これから作ろうとしている新しい建物は問題が少ないと思う。神戸に行った日とは誰でも感じることだが、自分の住んでいる町の建物でも、同じように壊れてしまいそうな建物がたくさんある。耐震診断、耐震補強が緊急の仕事である。

6．　引用文献

建設省建築研究所、社団法人鋼材倶楽部：新設計体系研究会報告書、１９９５年２月

California Office of Emergency Services、Structural Engineers Association of California：VISION 2000 Performance Baced Seismic Engineering of Buildings、１９９５年４月

表 2　　Earthquake Design Levels

Earthquake Design Level	Recurrence Interval	Probability of Exceedance
Prequent	43 years	50% in 30 years
Occaional	72 years	50% in 50 years
Rare	475years	10% in 50 years
Very Rare	970years[1 2]	10% in 100 years[1 2]
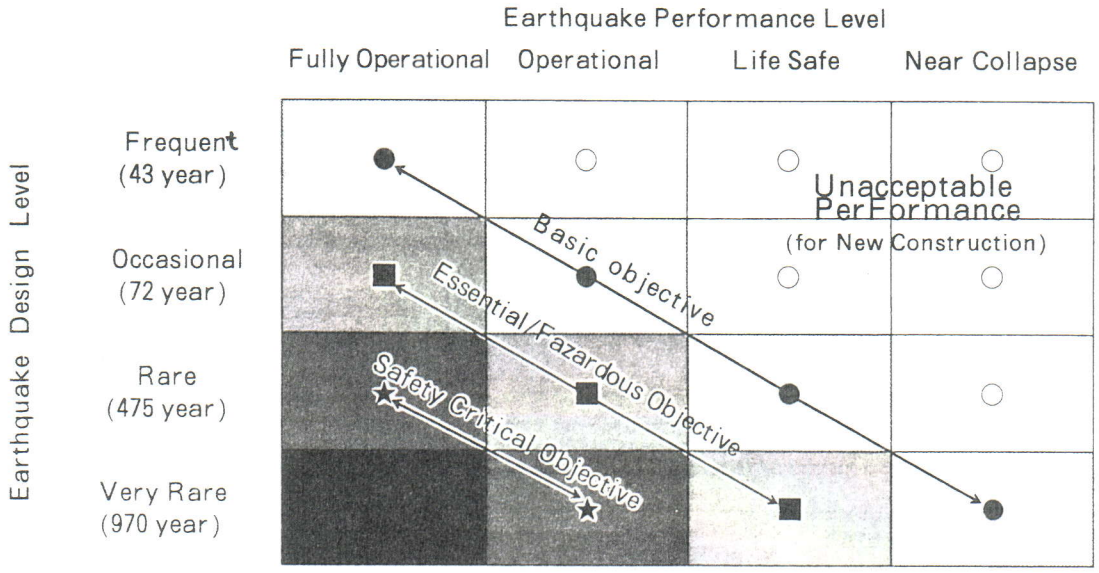
表 3　　Recommended Performance Objectives for Buildings