

「建築構造物の設計と安全工学」 —20世紀の耐震工学の光と影—

岡田 恒男 (東京大学 名誉教授 / 芝浦工業大学 教授)

ご紹介いただきました岡田でございます。久しぶりに生研にやってまいりました。停年退職して6年目になります。学術講演会のプログラムを見ましたところ、最先端のことをおやりになっている現役の先生方の前に、何故私の名前があるのがよくわからなかったのですが、昨夜、司会の村上先生にお会いしたところ私も設立に関わりました国際災害軽減工学研究センター、INCEDEが設立10年を迎え新しいセンターとして再出発するお祝いの講演会だからのようございまして、まず新しいセンターが誕生することになったことをお祝い申し上げたいと思います。

(スライドー1)

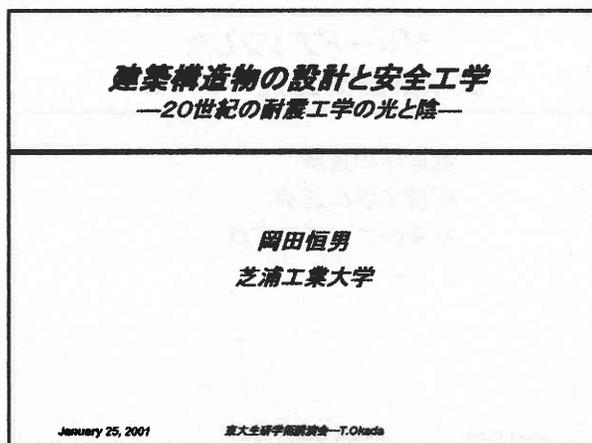
このテーマの「建築構造物の設計と安全工学」はお仕合せのテーマでありまして、考えているうちに何か副題があるなということで、「20世紀の耐震工学の光と陰」と書いたのですが、副題のほうが大きいようございまして、とても45分で私がしゃべれるようなテーマではございせんが、建築物がどう変わってきたか、今我々の住んでいる街がどういう状況にあるかということをお話し申し上げたいと思います。

(スライドー2)

生研を定年になって6年になりますが、もう少し前から振り返ってみますと、日本だけではなくて世界で相当被害のあった地震が生じていることがこの表でわかります。

例えば、1994年1月、これも17日ございまして、ちょうど阪神・淡路大震災の1年前、アメリカでもノースリッジの地震、死者80人と書いてありますが、正確には82人だったのではないかと思います。阪神・淡路では6,432人、それからしばらくちょっと抜けているように見えますが、この間にも小さな地震、小規模の被害の地震がいくつか日本でもありました。96年には鹿児島県の北西部の地震が起こっておりますし、宮城県でも鳴子温泉の奥ですけれども、鬼首の地震が起こっておりますし、99年8月にはトルコ共和国、マルマラ地震、あるいはその震災の一番激しかった県の名前をとってコジャエリ地震とも呼んでおります。

引き続きまして11月にもう一度、これは最初の8月の地震を引き起こした断層の東側(連続した断層ですが)が割れまして、これはドゥジュジェ地震、これも県の名前を付けていますが、ほとんど同じ規模の地震が起こりまして、



スライド1

近年の被害地震	
1994年1月 米国ノースリッジ地震	M: 6.8 死者: 80人
1995年1月 兵庫県南部地震	M: 7.2 死者: 6,432人
1999年8月 トルコ共和国 マルマラ(コジャエリ)地震	M: 7.4
1999年11月 トルコ共和国 ドゥジュジェ地震	M: 7.2 死者: 両地震合計 17,403人
1999年1月 台湾集集地震	M: 7.3 死者: 2,300人

January 25, 2001 東大生研学術講演会—T.Okada 2

スライド2

死者は両方合わせて1万7,000人ぐらいということでございます。その間に挟まれまして台湾でも地震が起こりまして、死者が2,300人とかで、耐震工学も20世紀にいろいろ発展いたしまして、いろいろ光がございましたけれども、依然としてこういう陰を背負ってきている。これを引き継いで今世紀何をするかというのは我々の大きな課題でございます。

つい先だって、年明け早々、初代のINCEDEのセンター長をおやりになっていた片山恒雄先生、今筑波の防災科学研究所の所長でございますが、その先生と神戸大学の室崎益輝先生と一緒に、トルコの政府に新しくできました危機管理省、アメリカのFEMAと同じような組織ですが、そこから招待を受けまして、10日ほど被災地の復興の状況を見まして、今後どうするかというような議論をして帰ってきたばかりでございますが、まだまだ惨状そのままに近いところもたくさん残っている、こんな感じであります。

(スライドー3)

最近の耐震工学といいますか地震防災がどんなふうになっているか、この50年ぐらいを振り返ってみますと、いろいろ変わってきているのがわかります。

私がこの道にはいりました頃は、とにかく地震が来ても人の命が損なわれないように、生命の安全が一番の課題でございました。それだけ考えていけば逆によろしい。それもまだ達成できてないから、何とかそれをしようということからスタートいたしました。先のスライドにありましたように、実はこれもまだ達成されてなくて、年間に、世界的に見ると何万というオーダーの方が亡くなっているのですが、実はそれだけではない。社会がだんだん複雑になってまいりますし、高度化してまいりますと、財産を守らなければいけない。生命、財産だけではなくて生活、街の安全を考えなければいけない。地震が起こっても、その都市

の活動をそのまま続けられるようにしなければいけない。だんだん要求が高度化したといってもいいかと思えます。

その次の社会の安全。生活の安全とよく似ておりますけれども、以前ですと、どこかの街に地震が起こって被害を受けたら、災害はたぶんその街の中で完結していたと思えますけれども、今やこれが、場合によっては世界的な影響を及ぼすようになってきている。

例えば神戸がやられる。これは神戸だけの問題、日本だけの問題ではない。例えば東京に阪神と同じような災害が起こったことを考えますと、世界のマーケットにも影響する波及効果の大きな災害が起こるということで、そういうものも防がなければならない。地震に対する安全性の問題というのが狭い意味の昔からの工学の領域を超えたのではないかというのが最近私どもが強く感じることでございます。研究室の中にもって、建物でも土木構造物でもそうですが、骨組みを解析して、力学の問題で解いておけば地震に対する備えができたという時代ではなくなったということをもまず申し上げたいと思います。非常に幅が広がってきた。(スライドー4)

同時に、ここに書いてございますように、そういうことからいろいろな構造物に対する、あるいは街のインフラに対する耐震安全性のレベル、そういうものに要求すべき耐震性のレベルも結果としては上がってきております。それは自然に上がってきたというわけではございませんが、ニーズが上がったと同時に、ここに書いていますような20世紀の、特に後半でございますが、地震学というのがものすごく進歩したからだと申し上げていいかと思えます。

ご承知の、今プレートテクトニクスという、当初は仮説だったわけですが、1968年に提唱されて、地震学界に定着するのに10年以上かかったようでございますけれども、1980年頃になりますと、そういうことをバックグラウン

工学の領域を超えた地震安全性

生命の安全
財産の安全
生活の安全
社会の安全

January 25, 2001 京大生産学振興委員会-T.Okada

スライド3

**グレードアップした
要求耐震安全性のレベル**

地震学の進歩
耐震工学の進歩
社会のニーズの進歩

January 25, 2001 京大生産学振興委員会-T.Okada

スライド4

ドに都市の防災，地震対策が開始されていますし，一方工学の分野も進んできている。それと，先に申しました世の中のニーズがだんだん高くなってきたということで，確かに都市のインフラ，建物，すべて，昔に比べるとよくなっております。これは光の部分であります。にもかかわらず陰を引きずってやってまいっているというところがございます。いろいろな問題が今出てきています。

(スライドー5)

先ほど申しましたように，トルコに行ってきたばかりで，トルコでもずいぶんこんな議論してまいりましたけれども，まず世界の都市，建物，あるいは構造物を見渡したところ，地震防災の面でも南北格差といいますか，格差が非常に大きくなってきております。これは昔からあったはずですが，それが顕在化してきたと言ってよいと思います。近年，情報伝達手段が発達いたしまして，地震学はどこまで進んでいる，耐震工学はどこまで進んできているという情報を世界で共有できるようになりました。そうすると，地震対策として何をしなければいけないということが世界中のレベルでわかるようになりましたから，その次の問題は，それができるかできないかという，これは工学を超えた政治的な問題も，経済的な問題もありますが，やらなければいけないことがわかればわかるほど，やれる国，やれない国，同じ国でもやれる地方，やれない地方というのがだんだん格差がわかってきましたから，非常に大きな新しい問題が出てきているわけです。知らなければ何ともなかったわけです。

例えば地震学の問題で申しますと，トルコに起こった地震は，以前なら多分トルコの地震学者以外はあまり気にしなかった。今や，一旦トルコで地震が起こりますと，インターネットを通じて配信され，数日のうちにその地震のデータが解析されて，座っていても世界中の人間が見ることができる。日本に起こっている地震とトルコに起こっている地震の比較研究も出来ます。地震，あるいは地震動の性質，レベルなどがあまりわかっていない時期には，耐震規定というのは国力に応じてレベルを定めるべきだという議論がありました。例えば，ある国では国力が低いので耐震規定のレベルを，日本や米国の3分の1ぐらいにしておこうかということでスタートした国もたくさんあった。ところが，研究が進んでくると，例えばカリフォルニアも，日本も，トルコも，台湾も，フィリピンも，いったん地震が起これば大体同じぐらいのレベルで地面が揺れるということがわかってくると，いろいろ新しい，難しい問題に私ども今直面しているわけです。

(スライドー6)

国内でもそうです。日本の国内をとってみても，耐震安全性の格差が顕在化してきています。すでに申し上げましたけれども，地震学とか耐震工学，防災工学，いろいろ進

耐震安全性の格差の顕在化(国際問題)

情報伝達手段の発達により

- ・ 地震学の進歩、耐震工学の進歩が共有できるようになった(グローバル化)
- ・ この進歩を享受できる国、出来ない国に分かれつつある(格差が顕在化)

January 25, 2001

東大生産技術研究委員会-T.Okada

スライド5

耐震安全性の格差の顕在化(国内問題)

- ・ 最新の技術が導入された建物と
- ・ 取り残された建物(既存不適格建物)

January 25, 2001

東大生産技術研究委員会-T.Okada

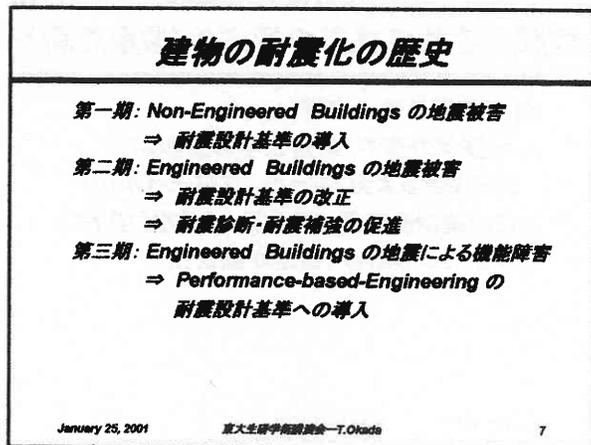
スライド6

みまして，行政も力を入れて，だんだんだんだん建物一つとりましても耐震性のレベルが上がってきております。新しい技術も開発されまして，進歩しましたけれども，そういう最新の技術が導入されてつくられている建物と，そういう技術の進歩の前につくられた建物との間の格差が出てきている。それがだんだんわかってまいりました。この生産技術研究所の建物などは取り残されたほうの建物でございますけれども，そういうのがだんだん顕在化して，そういう中で我々がこれからどうやって住んでいくか，従来の工学ではわからないところになっているのではないかと思います。

(スライドー7)

少し具体的に，例えば建物に限って耐震化の歴史をちょっととどってみます。大まかに3つに分けてみたいと思います。

初期の頃はということをやってきたか。初期の頃というのはいつごろかというところ，世界的に見て1950年ぐらい



スライド7

までの話だとお考えください。Non Engineered Buildingsの地震被害が目立った時期です。これは耐震設計をしていない建物が世界中に建てられた時代でありまして、地震がくると家がつぶれる、橋が壊れる。どうすればいいかということで地震工学とか耐震工学の分野が生まれた時期です。地震に対する備えを一切やってない構造物をどうやって耐震化しようか、そのための耐震設計基準を各国が導入しはじめ、1950年頃までに地震国の大半で耐震規定をつくりました。我が国では1924年につくっておりますし、アメリカのカリフォルニアで1933年、トルコが1950年代ぐらいだったと思います。第2期が非常に大きな問題でございまして、これは陰の部分になるのですが、耐震設計した構造物が壊れ出したというのが1960年ごろから、これは世界的な傾向であります。地震のことを考えていなかったものを耐震化すれば確実に前よりはよくなっていたのですが、よくしたつもりのものが壊れはじめた。大体1960年から1980年ぐらいの時期ですが、我が国でもそういった建物が60年～70年ぐらいにかけて地震で大きな被害が出るようになった。さあどうしようというので、地震学、耐震工学が進んできたわけですが、例えば設計基準の改正をしよう、あるいはこの前のスライドにございました、新しい技術の恩恵を被ってない建物を見つけだして補強しようというようなことが行われるようになったわけでございます。

この第2期が問題だと申し上げましたのは、第1期は、どこの国でも、今までやってなかったのだから、耐震規定を取り入れることによって、前よりは良い構造物ができるようになったのでございますが、これらのなかに耐震的に不十分な建物があるということがわかってきた。第2期には、ここには「Engineered Buildings」と書いてますが、本当はその前にPoorとかあるいはpoorlyを付けなければならないのですが、十分なエンジニアリングのできていない

構造物を世界中につくってしまったという現実がございまして。それに気がついて、耐震基準、あるいは技術指針みたいなものを変えて技術者を養成して、いいものをつくり出すという、第3期のこの辺の手立てをいつごろやったかということによって、今世界の都市を見渡してみますと、地震の危険性というのが非常にそれにデピンドしていることに気がつくわけです。

自慢するわけではないですが、この辺にいち早く取り組んだのが日本だと申し上げていいと思います。1981年にほぼ今の姿の基準に改正いたしまして第3期に入りましたので、5年前に阪神にあれだけの地震を受けても、81年以降につくられた建物の被害はそんなになかった。被害の大半は、その前につくった、つまり第1期と第2期につくった建物なんです。

ところが、あとでデータをお見せしますが、トルコの状況を見ますとどうなっているか。耐震基準の改定が1998年に行われている。地震の1年前に行われているわけですから、建っている建物の大半は第2期の、耐震化しようとしてエンジニアリングを導入してつくった建物。つまり工学が進歩したからつくった建物でありまして、広い意味でいうと、人間がつくった耐震的に不十分な建物が壊れて人が死ぬという状況が出てきたわけです。この辺が、今我々が一番反省をしなければいけない点になっているわけでございます。日本語でいいますと、「大きな地震が来て何千人の方が亡くなった」と大変やわらかく言いますが、英語でいいますと「キルド」、地震に殺されたという非常に直截的な表現をいたしますが、地震が殺したのではなくて、地震に武器を与えてしまった。平屋でつくっておけばよかったものを、不十分なエンジニアリングで10階建てを建てて、それが全部つぶれて何百人も一挙に亡くなる。殺されてしまう。20世紀というのは、大きな反省をすれば、不十分なエンジニアリングを導入することによってかえって災害が増えてくるといような実態が出てきた。台湾もそうでございます。1997年に基準の改訂をしておりますし、アメリカの場合は1988年です。

以上は陰の部分ですが、一方、どんどん進んでいる光の部分もございまして、すでに第3期に入りつつあるというのが世界の地震工学の現実でございますが、一番最初に申しましたように、第2期の後半の耐震基準の改正というのは、先ほどの安全のなかの、まだまだ生命の安全ということだけを第一義に考えて、財産の安全までは考える余裕がなかった。21世紀に世界の国がめざしているものは、我々のつくったEngineered Buildingsが、地震を受けても生命の安全、財産の安全は勿論のこと、機能障害も起こさないようにという高度なところへもっていかうという段階です。そのために今盛んに議論されているのが性能設計、あるいは性能工学、Performance-based-Engineeringを耐震設計に

取り入れていこうということです。この動きが始まったばかりでございまして、日本の場合は、2000年に施行されました新しい建築基準法は、方向としては Performance-based-Engineering を取り入れていこうということに踏み切ったわけでありまして、実際に法律の世界まで持ち込んだのは、たぶん日本がこれまた一番早いのだろーと思ひます。

ですから、こうやってこれから第3期を世界に向けて日本が突っ走って先頭を切ると同時に、1期、2期につくってしまった古い構造物をどうやって世界的に少なくしていくかが今世紀の課題です。大体50年か100年待てば自然に新しい建物になるわけでございますが、先ほどの表でご覧いただけますように、世界的な規模で見ますと、毎年どこかで災害を繰り返しておりますから、世界中の地震活動が50年も100年も待ってくれるなんてことはありませんので、坂内所長のお話のように国際的なことを考えてまいりますと、その辺が非常に大きな問題としてまだ残っていると申し上げたいと思ひます。どこが光でどこが陰だとは申し上げませんけれども、それぞれお感じとりいただければと思ひます。

(スライドー8)

学術講演会ですから、1つぐらひはデータをとって1つだけデータを持ってきましたが、1期、2期、3期とだんだん建物がよくなっているのかというデータを1つだけお見せします。

6年前の阪神・淡路大震災のときに被災した学校の建物を800棟ぐらひ、日本建築学会のグループで調査いたしました。そのうちの100棟ぐらひを取り出しまして、被災した建物を鉄筋コンクリートの学校校舎がどのぐらひの地震に対する安全性をもっていたかというのを解析してみました。

(スライドー9)

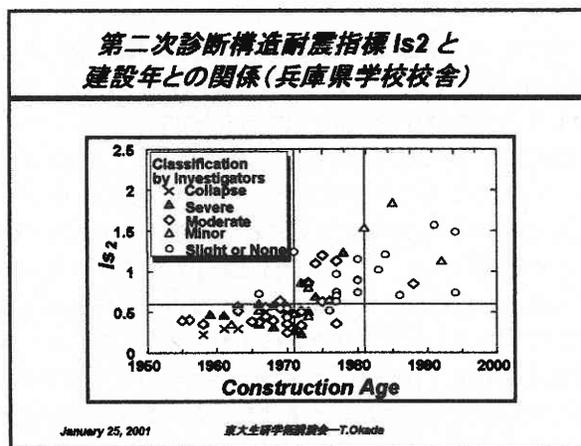
私が生研におりましたころです。1970年の半ばでございまして、建物の「耐震診断法」というものを開発いたしました。もう25年ぐらひになりますけれども、今もかなりの数と申しますか、日本中のエンジニアに使っていただいている方法がございまして、トルコ版とかメキシコ版も出てきておりますけれども、そういう方法で、これは100棟ぐらひの建物を診断して見て、その診断の結果を縦軸に(数字が大きくなるほど建物が安全だと思ひてください)、横軸にその学校がいつごろつくられたか、1950年~2000年という軸が書いてございまして、これを見ると右肩上がりで、着実に全体的には(ものによっていろいろありますが)よくなっていることもわかります。横の赤い線は、私どもが、まあこのぐらひはないと危ないということをお知らせしてきた線でございますが、壊れ方が、×はつぶれてしまったもの、色がついているのが被害が大きかったもの、この辺になるとほとんど被害のない建物であります。

学校建物の被害—兵庫県南部地震
日本建築学会学校建築委員会(現:文教施設委員会)

- **被災度調査**
1995兵庫県南部地震で被災した
学校建物800棟
- **耐震診断**
1995兵庫県南部地震で被災した
鉄筋コンクリート学校校舎105棟

January 25, 2001 京大生研学術講演会—T.Okado

スライド8



スライド9

これは日本では71年と、81年に耐震基準の改定をしまして、学校の建物につきましても、1970年あたりからよくなっている。よその国の悪口を言うわけでは決してありませんが、どういふわけか最近起こった大きな地震では、台湾もトルコも、日本で言えば、ちょうどこの辺(1970年)の時期に当たります。ですから、つくったものがみんな、たぶんこっちのゾーン(危険なゾーン)に入っている建物のはずです。だから地震のほうが、あと30年ぐらひ待っていてくれていると、耐震基準改定の効果も出てきているでしょうから助かるものもだいぶあったのではないかという気がいたします。

(スライドー10)

もう少し具体的に日本の耐震基準の変遷をたどってみますと、1891年に濃尾地震がございまして、この辺から耐震工学の研究が始まった。ほぼ100年ちょっと前ですが、いろいろ研究は進んでおりましたけれども、なかなか痛い

日本の耐震基準の変遷(1)

- 1891 (濃尾地震)
- 1923 (関東大震災)
- 1924 $K=0.1$ 設計用水平震度 (第一期)
 - 許容応力度法
 - (許容応力度 = 材料強度の約 1/2)
 - 建物を剛にする
- 1950 $K=0.2$ 設計用水平震度 (第二期)
 - 許容応力度法
 - (許容応力度 = ほぼ、材料強度)
- 1964 (新潟地震)
- 1968 (十勝沖地震)
 - (性能基準の必要性が認識され始めた)
- 1971 建築基準法施行令改正 (帯筋間隔規定強化—靱性考慮)

January 25, 2001 意大生研学術委員会—T.Okada

スライド 10

日本の耐震基準の変遷(2)

- 1977 既存鉄筋コンクリート造建築物 耐震診断基準・改修設計指針
- 1978 (宮城原沖地震)
- 1981 建築基準法・施行令改正(新耐震設計法) (第三期)
 - (終局強度・靱性設計)
 - $C_b = C_o \times D_s$
 - C_b : 保有水平耐力(せん断力係数)
 - C_o : 設計用せん断力係数スペクトラム (ピーク値 1.0 以上)
 - D_s : 靱性による低減係数 (RC 0.3以上、S 0.25以上)
- 1995 (兵庫県南部地震)
- 1995 耐震改修の促進に関する法律(既存不適格建物)
- 1998 建築基準法・施行令改正(性能設計) (第四期)

January 25, 2001 意大生研学術委員会—T.Okada

スライド 11

目に遇わないと建造物の耐震化が進まず、1923年の関東震災を機に耐震規定を取り入れようという動きが出てまいりました。これが日本の第1期であります。

1950年に少し改訂いたしましたけれども、世界的に1950年ぐらいに第1期が終わって、やれ一安心、それが第2期の60年から70年ぐらいに被害が起こり始めた。耐震工学の先進国ほど、そういう建造物をたくさんつくりましたから、早く耐震規定を取り入れたところに被害がはじまっている。日本とかアメリカのほうが。その時期トルコあたりはまだ在来工法の小さな建物が主でありましたから、地震が来て被害は出ておりますけれども、世界的に注目されるような状況ではなかった。

(スライド—11)

71年に耐震規定を暫定的に改訂いたしましたして、同時に、先ほど申しました既存の、つくってしまった Engineered Buildings を徹底的調べようという動きがこの辺から起こってきている。81年に第3期に我が国は突入した。アメリカが88年ぐらい。くどいようですが、台湾が97年、トルコが98年、まだ実は第1期、あるいは第2期に到達してない国もまだまだたくさんあります。この辺でどんどん格差が広がってきている。けれども、残念ながら我が国でも第1期、第2期の建物の対策というのがあまり進んでいなかった。兵庫県南部地震でその辺が大量に証明されたということで、そういう建物の耐震改修、耐震補強の促進に関する法律もできた。専門でない方はオヤツと思われるかもしれませんが、我が国の法律用語では既存不適格建物という、第3期の基準には適格ではないのだけれども、建っているからしょうがない。そのまま住んでもよろしいと。この建物もまさにそれでございます。

(スライド—12)

ということで、いろいろ地震工学の国際化が進みまして、

日本 1981, 米国 UBC 1988, トルコ 1998 耐震規準の比較

Base Shear = Design Spectrum x 1/ Ductility				
	JPN:	$C_b = (C_o \times R_t)$	\times	D_s
	UBC:	$V/W = A$	\times	$1/R_w$
	TR:	$V_t/W = A(T_r)$	\times	$1/R_e$
		JPN	UBC	Turkey
Peak Design Spectrum		1.0	1.1	1.0
Ductility	RC	$1/D_s=3.3$	$R_w=8-12$	$R_e=4-8$
	S	$1/D_s=4$	$R_w=8-12$	$R_e=3-8$
	RM	$1/D_s=1.8-2$	$R_w=6-8$	$R_e=?$

January 25, 2001 意大生研学術委員会—T.Okada

スライド 12

第3期の基準を比べると、例えば日本の81年とカルフォルニアの88年、トルコの98年と耐震基準は比較するとどうなっているか。基本の考え方は、建物に要求する強さをどうするか。そこの地域に想定される地震の強さを周波数解析して加速度応答スペクトルの形で与えたものを、建物の粘り強さに応じて低減していくという、非常に単純な考え方です。そういうコンセプトが今世界の第3期の耐震基準の共通になってまいりました。そのレベルはどのくらいか、どのくらいの地震動を考えなければいけないかということ調べてみると、それぞれの国でも地震の危険度に応じてゾーニングというのをやっておりますが、普通に地震国と言われているような国で、一番地震の危険度の高いといわれているところに要求されている地震動のレベルは、あるいは耐震性を要求されているレベルはほとんどそろってきました。日本、米国、トルコと並べたのですが、建物に要求している加速度スペクトルのレベルはそろってき

た。だから第3期には、これはメキシコなんかもそうですし、カナダもそうですが、ディーテールになりますと少し変わってきておりますが、この辺の考え方は国際的にみんなが同じ考え方に到達してきたというのが20世紀の成果ではなかったかと思えます。

(スライド—13)

ここにそれを書いておりましたが、そろってきたレベルで考えると、そういう建物がいちばん大量に地震を体験したのは、阪神・淡路大震災が世界で初めてでありますし、アメリカの場合、一番最初のスライドでお見せしたノースリッジの94年の地震もそうですが、まだ新しい基準でつくられた建物の数が少なかったということですが、それでチェックをしてみますと、建物の崩壊を防ぐ、つまり人の命を防ぐという観点からはかなり機能するらしい。ただ被害の程度が、ほとんど無被害からつぶれる寸前という、相当幅が広いわけですから、生命の安全を守れても財産の安全とか生活の安全とか社会の安全は守れない。そういうことから第3期以降の将来の耐震基準というのは、崩壊というものを防ぐことだけで本当によいのだろうかという疑問が提示された。これはこの後提示されたのではなくて、実は議論は1970年ぐらいから、例えば生研なんかでもいろいろしていた話であります、それがやっとなんかできるようになってきた。

(スライド—14)

それから、最近の建物、あるいはインフラ構造物の耐震設計が進んできた一つの例を申し上げたいと思います。

構造物にかかる地震入力のお考え方というが、時代とともに変わってきている。どういうふうに変わってきたか。ご承知のように地下の深いところで地震が起こって（浅いものもありますが）それが地面を伝わって構造物に入ってくる。ですから、今の解析技術というか、ごく最新の技術でもってすれば、例えば断層を動かしておいて、そこから出てくる地震の波が構造物まで媒体を通じてどう伝わってきて、それが構造物に入って、構造物がどう揺れるかというのを計算機でシミュレーションしようと思ったらできます。本来、地震というのはそういうものだから、そうやって設計すべきものなんです、歴史をたどると非常に面白いことに下のほうの様子なんてまったくわからないから、設計のやり方は上の方からスタートしているのです。日本で言えば1924年、つまり第1期の耐震設計、建物の重さの何割かを（2割）横に掛けて大丈夫かどうかをチェックしようとしています。本当は下からやるべきなのに上からやりはじめたのはどうしてかなというのは、考えていると非常に面白いことなんです、それが段々下がってまいりまして、第2期回りになりますと、構造物の周波数特性に基づく加速度入力を建物の粘りに応じて低減する考えが導入されるようになりました。このような考えを耐震基準に取り入れ

1981年耐震基準(第三期)の評価

- 1981 耐震基準は「崩壊を防ぐ」という観点からは機能した
- しかし、被害の程度は、無被害から崩壊寸前まで幅が広がった
- 問題点:
耐震基準は「崩壊を防ぐ」ことだけで良いのか？との疑問が提示された

January 25, 2001 東大生研学術講演会—T.Okada 13

スライド13

入力地震動の考え方

① 静的設計震度 (K)	1924
② 必要保有水平耐力	1981
= 標準せん断力係数 (C ₀)	
× 震動特性係数 (R _t) (相対座席応答スペクトル)	
× 構造特性係数 (D _s)	
③ 基礎入力地震動	超高層
(応答スペクトル表示)	
地盤・建物相互作用 (B)	
増幅率 (G _s)	
④ 工学的基礎入力地震動	2000
(応答スペクトル表示)	

January 25, 2001 東大生研学術講演会—T.Okada

スライド14

たのが、第3期の日本でいうと1981年の基準。トルコでは去年からやりだしたばかりと申し上げていい。

ところが超高層なんかをつくることになると、これは何年というのは限定しにくいのですが、日本でいうと1968年が初めての超高層ビル震が関ビルが完成した年ですから、まあ70年代ぐらいからと言ってよいと思いますが一般の構造物とは別の動きをしていました。この基礎のところを揺らしてみても、上がどう揺れるかというのを解析しながら設計してました。今の日本の建築基準法でやりだしたばかりの第4期になってくると、これがまたさらに下りてまいりました。建物の下、構造物の下、地盤のわりあい浅いところは沖積層がたまっているとか、あるいは岩盤が出ているとか、この辺の様子はずいぶん違いますので、それによって構造物に入ってくる地震力がずいぶん大きい影響を受ける。どこかで地震が起こったときに、その地域であまり差が出ないように、少し固い基礎を探して、その基礎（工学的基礎と呼んでいます）にどのくらいの

29

レベルの地震がくるかというのを耐震基準の中に取り込んで、あとはそれぞれの構造物が建てられている地盤の状態を考へて構造物への入力を決めていこうということです。1期、2期、3期を経てやっとここまで下がってきた。将来は、もしかしたら木造の住宅一軒建ててるのでも、どこかの断層を動かしてみても、木造の住宅をどのくらい揺れるかを確して建てられるようになるかもしれない。今でも研究室でやろうと思えばできます。ただその答えがどのくらい正しいかはわかりません。そのとおりに柱の太さを決めるといふと、こわくてできない。なぜかといふと、本当に断層がどんな速度で、どのくらいの範囲割れるかというのが的確にわからないから。そこから発信された波が地盤をどう伝わって、この間は、弾性の一様な媒体としか考えられないから、それがちょっと狂っていたら、ここにどういふ顔をした地震が来るのかわからない。今の地表で測っている地震の記録だけを分析してみますと、例えば断層からの距離で観測点での加速度の分布をとってみると、ある対数式の経験式は出ますが、その平均値に対してだいたい倍、半分の違いがある。倍と半分では4倍違いがありますから。今の我々の推定式でいうとそのくらいの差がまだあるから、こわくてそれは使えない。それをにらみながら、この辺でユニフォームに考へて、このくらいのところにいくかと。このくらいで考へるとくかといふ地震力の一つの目安を決めて、それに対して構造物をつくっている。ですからそれが狂っていたら、あるいはもっとも大きな地震動があるということがわかれば、本当はまた変えなければいけないのですが、その辺については、さっきも申しました第3期に入りだしたところのいろいろな国で今考へている地震動のレベルが大体そろってききましたので、それは世界中での地震観測の結果、あるいは地震学のいろいろな解析の結果を踏まえたものでありますから、地震入力の考へ方についてはだいたいいい線まできているのかなと考へています。

(スライド15)

時間がなくなりましたので、少しはしよらせていただきます。

この辺のところ、将来に向けて、性能設計に向けてどういふことをやればいいのかという研究開発も、この5年ぐらいいでだいい進みまして、目標の性能としては安全性、修復性、仮に損傷が起こってもすぐ直せるかどうか。直せるだけの余裕がある程度の被害ですむのかそうではないのか。あるいは構造物の機能性がどうであるかということ考へて設計する方法の開発がずいぶん行われました。そういうものを今後は使い分けて、構造物によっては、安全性が担保されれば、地震は毎日来るわけではないですから、50年とか100年に1回ぐらいい大きなのが来る地域もありますし、500年に1ぺんぐらいいしか来ないところもあります。そ

性能設計へ向けて Toward Performance-Based Design

- 建設省総合開発プロジェクト
「新構造体系の開発」発足 (1995-1998)
- 建築審議会「性能規定化」を答申 (1997)
- 建設省、建築基準法改正に着手 (1996)
- 建築基準法改正 (1998)
- 建築基準法一部施行 (1999)
- 建築基準法施行令制定 (2000)

January 25, 2001

東大生産学振興委員会-T.Okada

スライド15

うということも考へて、その構造物の使用目的とか、ほかの要因を考へて生命の安全性だけを担保すればいい構造物であるか、あるいはすぐ直せばよろしい。1週間、10日使えなくてもよろしいという構造物にするのか。そのまま続けて住めなければいけないのか。住むだけではなくて、ちゃんと機能を維持しなければいけないのかというふうに、構造物をつくる前から要求性能をはっきり分けて、少なくとも3段階ぐらいいに分けていって、それに合わせた設計の仕方、あるいは考へるべき地震動のレベルを決めていく。法律の世界というのは建築基準法などで決まっているのは、私有財産に対する制限・規制でありますから、最低限このくらいにしようといふところを決めているわけです。

ということで、大変複雑な仕掛けがいっぱい出てまいりましたけれども、そういうふうな耐震設計に対するレベルを変えた設計にこれからもいこうといふことで、まだまだ基礎的な研究をしなければいけない部分、それを実際の現場に移すための応用的な研究をしなければいけない部分、まだたくさん残っております。ぜひ新しいセンターにご活躍を期待するところであります。

(スライド16)

一方、取り残された格差のついた、世界の格差、国内の格差、この対策を、これはあまりアカデミックでない部分がたくさんありますけれども、これをどうやってやっつくかというのが非常に大きな問題であろうと思います。

ただ、前身の、INCEDEもそうでありますし、生研の中の耐震工学研究グループ(ERS)も続いていると思いますけれども、そういうところから発信して、今日本だけではなくて世界的にもいろいろな分野の研究者、技術者が集まって、地震防災の問題を一緒に考へようといふ動きが非常に強くなりました。

(スライド17)

そういうこともございまして、最後は宣伝でございます

既存建築物の耐震診断・耐震補強

- 1971 建築基準法施行令改正
(帯筋間隔規定強化・靱性考慮)
- 1977 鉄筋コンクリート
耐震診断基準・改修設計指針
- 1978 宮城県沖地震
- 1981 建築基準法施行令改正
新耐震設計法(終局強度・靱性設計)

January 25, 2001

東大生産学報読者会—T.Okada

スライド16

日本地震工学会設立のお知らせ

- 目的 : 地震工学、地震防災事業の
進歩・発展に寄与
- 設立 : 2001年1月1日
- 分野 : 建築、土木、地震、
機械、地盤工学ほか
- 申し込み :
<http://www.jaee.gr.jp>

January 25, 2001

東大生産学報読者会—T.Okada

スライド17

が、いろいろな分野で協力してやっていかなければうまくいかないということの認識が高まりまして、遅れ馳せながら今年の1月1日に「日本地震工学会」という学会が誕生いたしました。この誕生のときに、生研のERSが全国版になったのかなというような感想を持ったのですが、ERSの現役の先生方、あるいはOBの方々が、今ここで活躍しております。私今、ご紹介いただきましたように建築学会の会長をやっておりますが、5月で任期が切れます。それをどなたかが聞きつけて、6月1日からは会長やれということで再びこの日本地震工学会、ちっほけな会でございますがお引き受けすることにしました。まだ会員1,200人ぐらいしか集まっておりませんが、日本の中でまず結集して、海外にも発信したいというようなことでやっております。ひとつ、新しいセンターの方々も、ご協力よろしくお願ひしたいと思います。

(了)