

No.102

December 27, 2001

The logo for EAJ Information features the letters 'E', 'A', and 'J' in a bold, sans-serif font, each contained within a circular segment. The 'E' is on the left, 'A' in the middle, and 'J' on the right, all overlapping. To the right of this graphic, the word 'Information' is written in a large, elegant, italicized serif font.

EAJ *Information*

講 演

2001年11月2日(金)・第127回談話サロン (東京・弘済会館)

講師・演題

加藤 勉：「建築物の構造設計について」

社団法人
日本工学アカデミー
THE ENGINEERING ACADEMY OF JAPAN

日本工学アカデミーの使命

社団法人日本工学アカデミーは、広く学界、産業界及び国の機関等において、工学及び科学技術並びにこれらと密接に関連する分野に関し、顕著な貢献をなし、広範な識見を有する指導的人材によって構成されており、工学及び科学技術全般の進歩及びこれらと社会との関係の維持向上を図るため、下記の諸活動を通じて、我が国ひいては世界の発展に資することを目的とする。

記

- 1) 国内外の工学・科学技術政策、教育等に関する調査研究、提言活動を積極的に行う。
- 2) 国内外における学際・業際及び新技術領域の活動を推進することに資する調査研究等の諸活動を積極的に行う。
- 3) 国内外の工学、科学技術の健全な進歩発展に寄与するための教育活動、及び一般に対する普及、啓発活動を推進する。
- 4) 上記の諸活動を効果的に実施するため、国内外の諸団体、特に海外の工学アカデミーとの連携を強化し、共同事業等を推進する。
- 5) 上記の一環として国際工学アカデミー連合の主要メンバーの一員として、特に近隣諸国における工学アカデミーの設立に対して、良きアドバイザーとしての責務を果たす。

2000年7月19日理事会

「建築物の構造設計について」



加藤 勉 (かとう ベン)

1929年5月生まれ
1958年3月 東京大学大学院数物系研究科修了 工学博士
東京大学工学部講師・助教授を経て、
1968年7月 東京大学工学部教授
1990年4月 東京大学名誉教授、東洋大学工学部教授
2000年4月 (財)熔接研究所理事長
原子力安全委員会委員、建築技術審査委員、高層建築物構造評定委員会委員長。
日本鋼構造協会副会長、日本材料強度学会評議員等。
日本建築学会賞、科学技術庁長官賞等受賞。

司 会(青山博之副会長) 私、日本工学アカデミーの副会長の一人をさせていただいております青山と申します。本日の講師は加藤勉会員でございます。

加藤先生を講師ということでお願いをしたその張本人の武田寿一会員が、本日、どうしても都合がつかないということで、私が代わりに司会をさせていただくことになりました。加藤先生に今回の講師をお願いするのに、どういういきさつがあったのかはあまりよく存じておりません。

簡単に加藤先生をご紹介いたします。

先生は、昭和4年のお生まれで、東京大学を昭和28年にご卒業になりました。その数年後の私のような新製の者から見ますと、先生は、旧制の高校、大学という、本物の高等教育をお受けになった最後の学年ということになるわけでございます。

昭和33年に工学博士を受けられまして、東京大学講師、助教授、昭和43年には、まだ三十代でいらしたわけですが、教授に昇任され、平成2年まで東大にお勤めになりました。

その後、東洋大学の建築学科に教授になられ、平成12年にそちらもご退官になって、現在は、財団法人熔接研究所の理事長をしていらっしゃいます。

ご専門は、鉄骨の建築構造、それから熔接工学です。たくさん業績がございます。官公庁関係もい

ろいろな省庁にわたっております。特に建設省との関連では、高層の建築、我々のほうの定義ですと、60メートルを超えたものを高層と言うわけですが、高層建築物の評定委員会の委員長を、日本建築センターで長年しておられます。

そのほかに、原子力の関係では、昔の名前で科学技術庁、通産省、原子力安全委員会等の技術顧問とか審査会の委員をつとめていらっしゃいます。

学協会関係も、建築学会、熔接学会をはじめたくさんございますが、省略させていただきます。

また、日本建築学会賞、日本コンクリート工学協会賞、日本鉄鋼協会の浅田賞、科学技術庁長官賞等受賞していらっしゃいます。

それでは、加藤先生よろしく願いいたします。加藤 勉 ご紹介いただきました加藤でございます。

きょうは、いわゆる「ビルもの」と言っております多層建物で、主として事務所とか学校とか病院の建物の骨組構成、荷重・外力のとり方、設計方法の概略をお話しします。

いまどきなせこのような話をするかということ、最近起こりましたニューヨークのワールドトレードセンタービル(以下WTCと略します)の崩壊が念頭にあるからであります。

最初に、骨組の構成をざっとご説明いたします。

図1

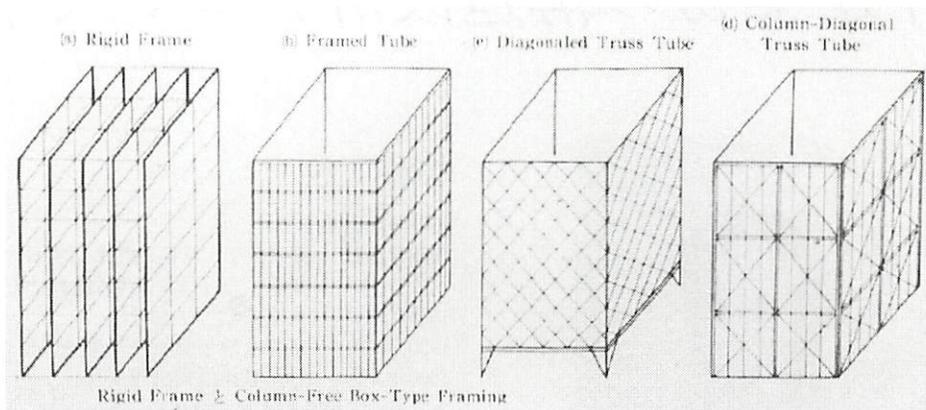


図1が、ビルものの骨組の形です。大別いたしますと、左側が昔からあるラーメン型です。右3つが俗にチューブ型と言われているものですが、主な違いは、ラーメン型というのは、建物のXY両方向を主構面としますと、X構面、Y構面にグリッド状の骨組を、柱と梁を剛接にして構成します。立体的に申しますと、子どもの遊び場にジャングルジムというのがありますが、あのようなものになっています。建物の平面的な特徴は、建物の平面内に柱が出てくることです。

それに対して、右の3つのチューブ型は、煙突とか筆立てのようなものを想像していただければよいと思います。基礎が十分支持され、各面の面内剛性が確保されておれば安定した構造になります。各構面がソリッドな板でできておりますと、光も入りませんし、空気も抜けなから建物にはならない。それで、出来るだけ面内強度、剛性を高めるために構面を、グリッド状に、あるいはダイヤゴナル型につくったり、両方折衷したような、いろいろな組み方があります。平面の特徴としては、チューブの中は何もありません（実際はエレベーターとか階段とか、その他サービス設備を収めるコアが中央にあります）。

いずれにしても、建物の室内に柱が出てこない、比較的大空間が取れますので、今日の事務所のように頻繁に用途変更して、自由に間仕切りをしたいというのには合っているのです、大変好まれております。

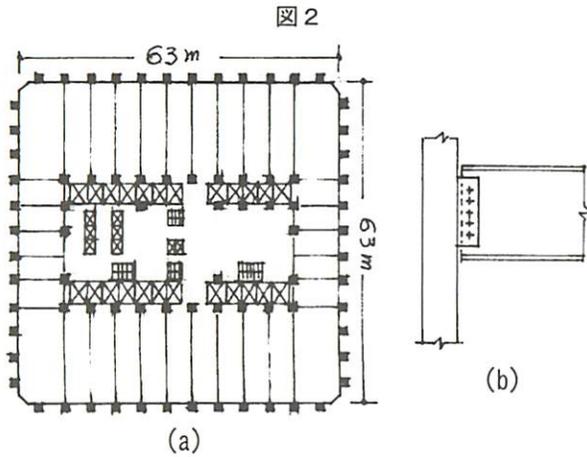
構造的に、この2つの違いを申しますと、昔からのラーメン構造では、地震や風のような水平力が

きたときに、それに抵抗する要素として、それぞれの柱の曲げ抵抗に依存するところが非常に大きいものに対して、チューブ型では、柱の伸び縮み、軸方向力によって抵抗する要素が比率としては比較的多いという特徴があるかと思えます。

次に設計において、建物にどのような外力、荷重を想定しているかを説明します。

地震、台風等建物は水平方向に作用する外力と重力による鉛直方向の荷重に大別されます。外力、荷重の大きさは平常時と非常時に区別します。平常時、非常時というのは日常用語的ですが、術語で言うと使用限界状態設計と終局限界状態設計と言います。

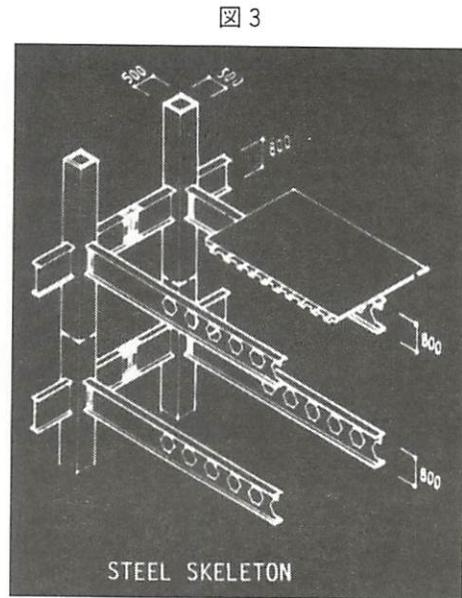
使用限界状態設計では、建物の供用期間を50年くらいに設定して、この期間内に常に加わる、ないしは一回以上加わる外力、荷重を想定します。設計のクライテリアとしてはこの外力、荷重に対しては建物に損傷を生じさせないことが要求されます。終局限界状態設計では、使用期間中に起こる確立は極めて小さいけれども、その発生を否定できない外力、荷重を想定します。このような外力、荷重に対しては建物は弾性を保持できなくて、塑性変形してもやむを得ない、しかし、倒壊したりして人命に損傷を与えてはならないとします。具体的には、例えば地震の場合には、過去に起こった地震の大きさ、建物周辺の活断層の活動度、地帯構造的に考えられる地震動を考慮して各地域でとるべき設計用地震動の大きさが設定されます。日本の場合、使用限界状態に想定する地震動より極めて大きな値となっています。



これに対して鉛直荷重の方は平常時は建物自重と平常時に考えられる人間と積載物の重量が考えられます。終局限界状態用の荷重としては、建物の模様替え等で一時的に荷物のある部屋に置くとか、異常事態に人間がある部屋に集中するといったことを考えますが、平常時荷重に比べて、その差はあまり大きくなりません。このような設計体系のもとで、地域によって骨組にどのような差が生じるかを考えますと、東京とニューヨークを例にとると、台風とハリケーンとではあまり大きな差は無いが、東京の設計地震力はニューヨークのそれに比して格段と大きいので、東京の建物で地震力が卓越する限りにおいては、東京の建物の柱はニューヨークのそれに比して太くなります。しかし、東京でも建物がますます高層化され、設計が風圧力で決まるようになれば、両者間に大きな差は生じなくなります。

一方、鉛直荷重は両者で変わりませんから、床および床梁の強さは殆ど同じになります。従って今回のWTCの爆破のように鉛直方向の力が問題となる場合には、同じことが東京で起こった場合、東京の建物は耐震設計で柱が丈夫になっているから、あのような崩壊は起こらないとは必ずしも言えないと思います。このことは後に再びふれます。

因みにWTCの設計に当たっては航空機の衝突が考慮されています。この考慮というのは衝突による水平力によって建物が曲がるとか、転倒するということに対する検討であってボーイング707-30型という旧式の航空機の衝突を考えたものですが707-30機の重量および燃料の量は今回のボーイング767-200機のそれよりそれぞれ15%および4

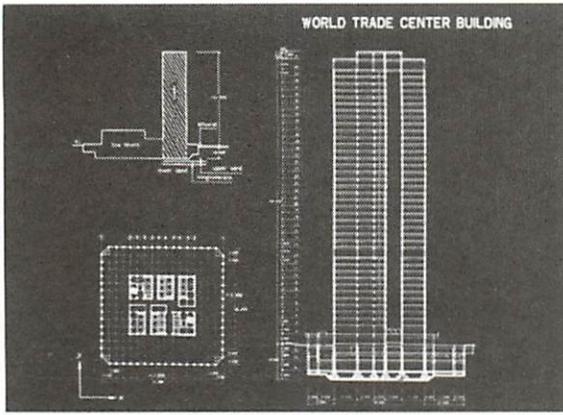


%少ないだけで、この程度の差は設計の安全余裕の範囲に入ります。検討の結果、衝突による水平方向応答効果は設計風圧による水平方向応答効果より小さいということが示されています。

ここでWTCの構造について簡単に紹介します。平面は図2(a)のようになっており典型的なチューブ構造です。床を支えている梁(床梁)のスパンは18m程度で長スパンに属します。床梁と柱の接合は図2(b)のようなピン接合です(WTCでは床梁は図のようなI形断面ではなくトラス梁ですが、材端はピン接合です)。図3は梁、柱、床の構成を示しています。梁の上にコルゲートッド・メタルデッキという厚さ1~2mmの薄鋼板を敷き、梁とは電気抵抗溶接または栓溶接で接合し、その上に軽量コンクリートを打設します。100階にも及ぶ多層建築ですから床の軽量化は重要な設計課題であり、これが普遍的な構法となっています。床スラブに課せられる機能は、風または地震による水平力を有効に柱に伝えるダイアフラムとしての機能と鉛直荷重を支える機能です。水平力を伝達するための床と骨組の接合については詳細な力学的解析を行いますが、鉛直荷重支持については極端な言い方をすれば床を梁の上に乗せておくだけでも機能が果たせるといった面もあって、比較的簡単に設計されます。上方向に突き上げられるというような力は想定されていません。

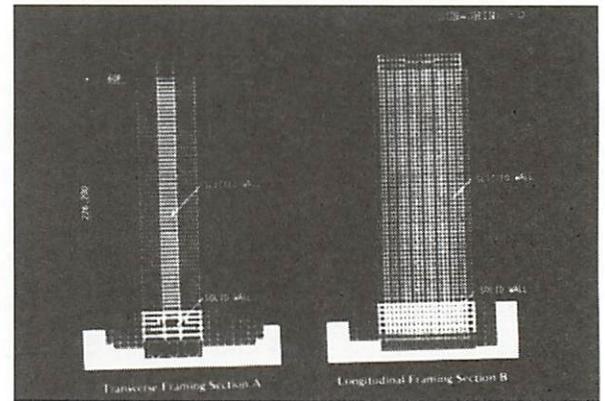
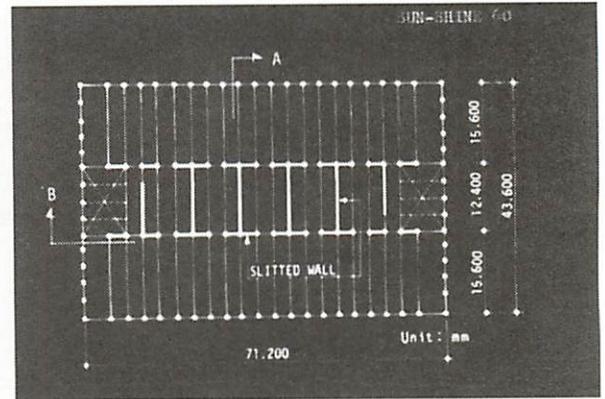
日本の高層建築について見てみます。図4は浜

図 4



松町駅前にある名前も同じ「世界貿易センタービル」でWTCのすぐ後で建設されたものです。規模が小さいだけでWTCと殆ど同じ構造形式です。その後新宿、池袋等に多くの高層ビルが建設されましたが、敷地条件、平面計画上の要求から正方形平面ではなく、長方形、その他の平面形のもので設計されています。図5は池袋のサンシャインビルです。この場合はラーメンとチューブの折衷形になっており、床梁と外周柱は剛接合(曲げモーメントを伝える接合)になっていますが、このような長スパン梁では断面のサイズは鉛直荷重による曲げモーメントで決まりますので、ラーメン効果を考

図 5



えても梁の断面寸法は、ピン接合の場合と殆ど変わりません。ラーメン型、チューブ型というのは構造モデルとしての概念的な区別で、モデル化することにより骨組解析の計算量を減らすことが出来ますが、コンピュータの計算容量が飛躍的に増大した今日では、より複雑な骨組の力学解析が出来るようになったので、この区別はあまり意識されていません。

以上が高層建物の構造形式、設計方法の概要ですが、ここでWTCが何故あのような崩壊をしたかという問題に少しふれたいと思いますが、建物が崩壊してバラバラになってしまった後では、何処が

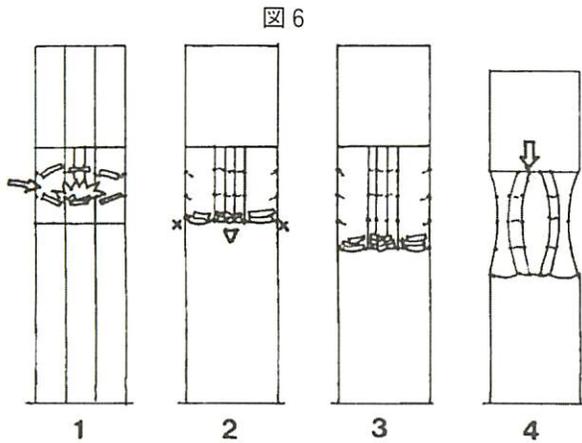


図6

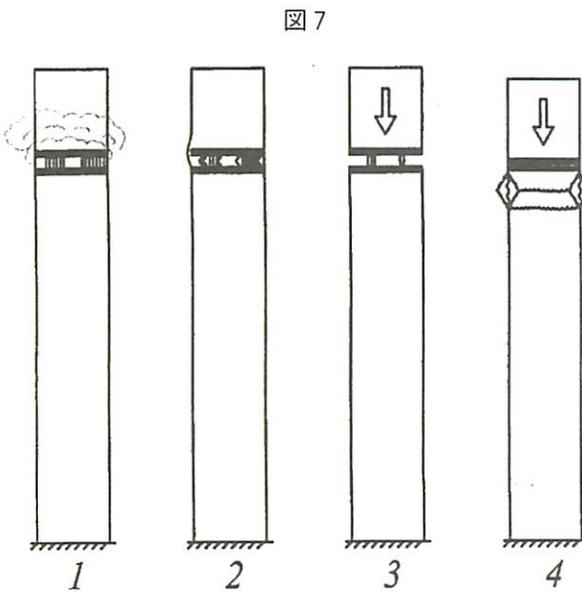


図7

トリガーになって、どのような過程で崩壊に至ったかを推定することは極めて困難です。阪神地震の建物被害調査において痛切に感じました。ましてWTCに関しては未だ殆ど情報が入手されていませんので、“まあこんなこともあり得る”といった域を脱しません。私の考えたハザード・シナリオは先に述べたように床の鉛直荷重に対する設計は比較的簡単に考えられており、非常時荷重といっても、建物の模様替えに際して一時的に多くの荷物を置くとか、臨時に多くの人が集まるといったもので、平常時荷重よりさして大きい設計荷重を採っていないこと、上方向への突き上げ力は設計荷重としては考えていないことに注目したものです。航空機がある階に突入し、多量の燃料とエンジンの高熱によって大爆発を起こすとその暴圧によって当該階および直上階の床が吹き飛ばされると考えます(図6.1)。吹き飛ばされた床が、その下の階に落下

すると(図6.2)、その階は常時荷重の3倍程度の荷重を衝撃効果を伴って受けることになり、梁および床の支持接合部はたとえ常温時と同程度の強度を保持していたとしても耐えきれなくなって、また下に落ちる(図6.3)、といった一種の progressive failure が考えられます。床が崩壊するごとに柱は横方向拘束を失って座屈長さが長くなり、座屈耐力が低下する。そして、ついに被災階より上の建物重量を支えきれなくなって残存建物上に落下し、一気に全体崩壊に至る(図6.4)というのです。もちろん、火災熱による鉄骨強度の低下も要因に含まれると思います。

ごく最近、青山先生から教えていただいた別のハザード・シナリオがあります。これはノースウェスタン大学のバジヤン(Bazānt)教授によるもので、被災階のみの耐力喪失により、被災階より上部の建物部分の落下がトリガーとなる衝撃破壊であるというものです。詳しいことは青山先生からお話しいただけるかと思いますが概略を紹介します。図7をご参照ください。衝突階の火災温度は800℃に達し、鋼材の降伏点、ヤング係数が低下して、被災階より上部の建物重量を支えきれなくなり、被災階の柱が creep buckling を起こして下の階に落下する。この落下は下層階に大きな動的荷重を与えることになり、その大きさはたとえ下層階の骨組が常温であっても、その座屈耐力を超えるものであって、被災階直下の複数階が破壊する。さらにその下方の階は質量および速度を増した荷重をうけることになるので、下方に向かって逐次崩壊が進むというものです。

被災階より上の建物部分の落下による衝撃力が下層階に与える効果は、下層階部分の鉛直方向剛性をバネとする図8のような動的モデルによって説明されます。上層階部分は被災階の階高 h を自由落下するものとしてこのバネ・マス系を解くと、動的荷重は建物上層部分の重量の31倍になる。こ

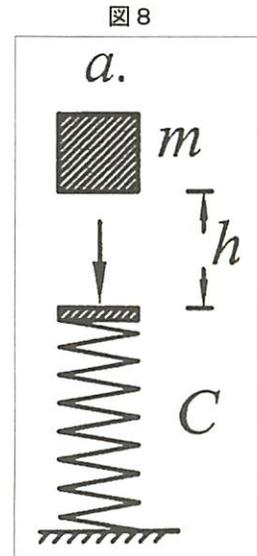


図8

これは極めて単純な計算結果であるが、他の複雑な要素を考えたとしても動的荷重と静的荷重の間には少なくとも one order の差がある。従って鉄骨骨組が余裕をもって設計されていたとしても、このような崩壊は避け難い。

他にも種々異なったハザード・シナリオがあるかと思いますが、耐震設計という水平方向の耐荷機能と鉛直方向の耐荷機能は基本的には直交していますから、日本では耐震設計が十分行われているから、WTCのような崩壊は起こらないとは、今の所どうも言えないような気がします。以上でございます。

司会 加藤先生どうもありがとうございました。伺っていると、寒くなるような結論を最後に言われてしまったのですが、この後、皆様方と質疑応答をさせていただきたいと思います。

河田幸三 いまお伺いしまして、日本ではあまり起こりそうもない。あるいは起こるとおっしゃったのですか。

加藤 日本に同じような飛行機が落ちてきたら、日本の建物は耐震設計がしてあるから、もっと丈夫だから、あんなふうには壊れないだろうというふうに思いたいし、思う方もおられると思うのですが、いまのようなことから考えると、同じようなことが起こるのであれば、日本の建物も同じような被害を受けるのではないかと思います。

河田 池袋もそうですか。

加藤 池袋のサンシャインビルですか。このビルは多少ラーメン的要素が入っていますが、チューブ型とかラーメン型というのは概念的というか構造形式的な区別ですので、鉛直方向の耐荷機能には大差ないと思います。

河田 浜松町のビルはどうでしょう。

加藤 浜松町の世界貿易センタービルは、殆どWTCと同じ構造形式で、ただ建物の高さが低いので地震で柱の断面が決まっていますが、お話ししたような崩壊メカニズムを考えると、同じことが起こると思います。

河田 耐震の設計をしてあるから大丈夫というのは俗説になりますか。

加藤 俗説とは申せませんが、どうも、多少骨が太いという差はありますが、それでカバーできる

というようなオーダーではないと思います。

河田 浜松町に、全く同じように飛行機が突っ込んだらというのは、これは非常に理解しやすいですね。それから池袋も半分危ないというのも、これも理解します。

ほかの、例えば、図1の一番左側の、あれはいかがですか。

加藤 これはラーメン型で平面内に多数の柱がありますが、それぞれの柱は構造計算上必要な断面寸法になっていますから、余分の強さを持っているわけではありません。ただ、設計が地震で決まっている場合には、日本では地震力が非常に大きいので、断面が大きくなり、鉛直荷重支持能力が大きくなると思います。

井形直弘 高温になって1時間くらいして落ちてきたということで、材料的に見ますと、クリープした。そうすると、何度くらい、どのくらいの時間熱せられたかということは問題だと思いますが、この建物の中に可燃性の材料がかなり多く使われていたのかどうか、あるいは燃焼しにくい材料でつくられていたのか。この辺ご存じでしたら。

加藤 詳細は存じませんが、高層建物の設計では出来るだけ可燃物を使わないように心掛けています。バジヤン先生は航空機の燃料に注目しておられ、800℃という数字を推定されたそうです。衝突してからどのくらいの時間で800℃に達するかが、ハザード・シナリオの妥当性を検証する要素になるように思います。

桜井 宏 いまの井形先生のご質問の関連で、最近、ビルの鉄骨にアスベストを吹き付けるのが何年か前から禁止されて、ロックウールみたいなので代用しているから、多分性能が悪くなっていると思うので、ああいう事件が起こったときに、持ちこたえる年数や時間数が、ロックウールのものとアスベストのものとどれくらい違うかというようなシミュレーション実験みたいなものはなされているのでしょうか。

加藤 全然専門が違ってお答えできませんが、そのくらいのことはしているのではないかと思いますけれども。

下郷太郎 アスベストとロックウールはあまり変わらないという話を聞いたことがありますけれども。

これも全く私の専門外でございますけれども、いまの世界貿易センターの耐火被覆材料は、ロックウールというようなものではなくて、パーミキュライトの入ったモルタル状のものを柱に吹き付けて耐火していたという話でございます。

私は機械屋でございますけれども、床梁のスパンが非常に大きい、従って柱と梁の接合部が剛接であっても大差ないというふうに言っておられました。確かにそうかもしれませんが、こういう、鉛直方向の衝撃に対して、柱とスラブとの間のジョイントをもうちょっと強くすることによって、この被害が小さくできたのかということについて伺いたいのですが。

加藤 柱と床梁を剛接にするには梁のフランジを柱に溶接することになります。そうすると梁のフランジ断面が鉛直方向のせん断力に効きますから床梁の切断に対しては抵抗力が大きくなります。従って被害を小さくする可能性はあると思います。下郷 結局、建築の立場でお考えになって、今度の事件は、飛行機が大きければどんなものにしてもそうですけれども、少なくともこういう問題を抑止しようという改築にしても、補強を、設計を見直して考えるとしたらどういうふうなところを、仮に先生がテロにも大丈夫な貿易センタービルを設計してくれと言われたら、どこを改良されますか。

加藤 航空機が衝突しても大丈夫なように設計することを法律(建築基準法)で義務づけることは今の日本では不可能かと思いますが、平常使用時にガス爆発くらいは起こる可能性はあると思います。考えられるガス爆発に対して床がとんだり、床梁が切れないようにすることは可能かと思います。それからバジヤン教授は、やはり事故として考え得るガス爆発に対して、それぞれの階の少数の柱や柱と床梁の接合部を取り除いても上階からの落下物が少なくなるよう予備材を設けておくことを提案されています。

三浦 登 車の車体の設計をしております。機械屋ですが、このモデルでいきますと、飛行機がぶつかったのが、上にかなり階層があるところぶつかっていますが、それを狙っていると考えてよろしいでしょうか。

加藤 あんなに上手に壊れるとは、やったほうも思わなかったと思います。

三浦 あれだけ上手に壊れると、このテロを行った人は知っていたのではないかと、そんな気がしたのですが。

それから、先ほどのお話ですと、床が受けるのは、外周側とコアと、全く同じ荷重がかかると単純に考えますと、コアのほうが周長は短いですから、かかる軸荷重が単位長さ当りについては、外周平面図の長さ当りでは増えるわけですね。ですから、そのときに柱の太さを、コアの部分と外周部分で変えてあるものかどうか。

それからもう1つ、水平力を考えますと、水平力はほとんど外周で受けています。コアはあまり寄与していない。としますと、柱の設計の支配要因が、コアはほとんど垂直荷重である。外周は曲げも含めたもの。そうしますと、安全率の取り方ですけれども、垂直荷重だけ増えていると考えますと、コアが先に壊れるのではないかと考えるのですが。コアのほうが、垂直荷重に対して厳しい設計になっているのではないかと思ったのですが。

加藤 第一のご質問ですが、かなり精密な構造計算がしてあり、柱に生ずる応力に応じて柱の断面は変えてあります。また建物の高さ方向にも断面は変わっています。第二の点ですがご指摘の通り、水平力による曲げに対しては外周骨組の負率はコアのそれより大きい。従って常時においては外周柱の方が軸力に対する余裕度が高い。今回の事故は鉛直力の付加によって起こったものとする確かにコア柱のほうが厳しい条件に置かれたと思います。しかし、これは設計では想定しなかった荷重条件です。

三浦 その場合、外周の柱が、圧縮荷重について設計するか、水平荷重に対して曲げによる軸荷重の増加分を考えるのか、その比率はどれくらいでしょうか。

加藤 WTCでは、終局限界状態の荷重としてハリケーンによる風圧力と常時鉛直荷重の組合せを考えていると思います。風下側は曲げによる圧縮力と常時鉛直荷重による圧縮力の和となり、風上側は曲げによる引張力と鉛直荷重による圧縮力の和になります。WTCの場合その量的な値はわ

かりませんが、日本の高層ビルの場合には風上側の柱は引張り状態になることはよくあります。

司会 初めのほうで、あのモデルについてちょっとおっしゃいましたので、僭越ですけれども、補足的なことを話させていただきます。

図8の m が大きければ壊れやすいだろうというのはまさにそのとおりでございまして、ご承知のように、WTCは2棟建っていて、ノースタワーというのに最初の飛行機が90階近くでぶつかりまして、つまりあれは110階のビルですから、20階分ぐらいさらに上にあったわけです。

2番目にぶつかったのはサウスタワーで、これが70階前後ですから、上が40階分くらいと、ちょうど倍ぐらいあった。崩壊したのはサウスタワーが最初で、ぶつかってから大体45分後であった。ノースタワーのほうは1時間半ぐらいたってから崩壊した。その違いが、その20階分の重量と40階分の重量ということに対応するのだらうというふうに言われております。

それから、先ほど加藤先生のおっしゃったことは、仮に1階分の階高、3.7mを被災階上部の建物質量が自由落下したらという話は、私も実はこのバジヤン先生の論文を読むまでわからなかったのですが、簡単なこととございまして、ちょっと考えてみますと、3.7m物が自由落下しますと、そのときの速度はほぼ秒速8mぐらいになります。秒速8mというのは、私どもが耐震設計などをやるときの、カインというセンチメートルの量ですが、それで申しますと800カインということになりまして、通常我々が耐震設計をやっているときの地震動の最大速度を、普通、大きく見ても50カインとか、そんなことを言っておりますから、800カインの速度で上から物が落ちてくるというのは、通常の設計の感覚から言うと、想像を絶する速度であるわけです。

そういうこともあって、先ほど加藤先生がおっしゃったように、スタティックな力に比べて31倍という評価が出ているわけですが、本当に、自由落下というのはあまり、いままでの建築の設計では考えたことがなかったというのが正直なところかと思えます。

安藤良夫 元東大の原子力の安藤でございます。

私も建築のほうは素人でございますので、あの棟が崩壊するとき、テレビを見ておまして、図8でいきますと m と書いてあるのがスーッと自由落下みたいにして、その後、建物が砂でつくったみたいに各方向にバラバラに壊れて、それで下までなくなってしまうというのでびっくりしたのですが。それで、その落下したのが、いまだ片付けられないほど、1ヵ月半もかかってもまだ積んであるというようなことで、落ちたときに横のほうに、砂のように壊れるというのはどんな力でこうなっているのでしょうか。

加藤 詳しいことはわかりませんが、被災階、上部の建物部分の落下衝撃力によって下層部分の骨組が逐次座屈崩壊してゆく過程で、建物の内外装材、耐火被覆材、スラブコンクリート等が飛び散ったというようなことが考えられます。

司会 和田先生、何かご発言はないですか。和田先生は東工大ですが、以前、実際の建物の設計をおやりになっておられたから、何かちょっとお話がありませんか。

和田 章 柱と柱の継手のディテイルが、日本に比べてシンプルなような気がするのですけれども。加藤 日本建築学会の鋼構造設計規準にも「継手位置で断面に引張応力を生ずるおそれがなく、接合部の端面を削り仕上げなどにより密着させることの出来る構造とした場合は、圧縮力および曲げモーメントのおのおのの1/4は接触面より直接伝達するものとみなしてよい」という規定があり、アメリカのAISC規準にも同様の規定がありますのでそれに従って設計されたものと思います。建物が想定荷重の範囲内で挙動するときはこれで問題は生じないと思いますが、柱が想定外の大きな圧縮力をうけて座屈した後では、柱は大きな曲げモーメントをうけますから接合部は早期に破壊すると思います。しかしこれはポストバックリングの挙動で、トリガーではありませんから、仮に継手がなく、連続した柱であったとして、座屈後柱に生じたプラスチックヒンジが、無限大の塑性回転能力を持っていたとしても、1つの柱の塑性回転角の総和は 2π 以上にはなりませんから、それによる塑性仕事の量は上部質量 m の落下のエネルギーに比して極めて小さいようです。

下郷 どこに飛行機をぶつければ一番工学的にいいかというのは非常に興味深いのです。戦争中に、日本の特攻隊の飛行機が、どこにぶつければ一番効果的かということはかなり研究されていたのです。そういうことを応用力学の先生から聞いたのですが、それは、佐藤常郎先生からいろいろな話を伺いましたが、こういう棒状の建物に対して、これは上から落ちてくる荷重の問題です。非常に複雑かもしれませんが、興味深い問題です。感想ですけれども。

嶋津孝之 久しぶりに先生のお話を伺いまして、大変感銘を受けました。

1つ伺いたいのは、鉄は非常に熱伝導率が高いのです。コンクリートも柔らかくなりますけれども、熱伝導率の関係で、もしコンクリート構造でやるとすれば、どういう感じかということについてご意見いただければと思います。

加藤 私はコンクリート専門ではないので、青山先生にお聞きしたいと思いますが、バジヤン先生は、むしろコンクリートならもっと悪いとコメントしておられますが、どうなんでしょうね。

司会 私もよくわかりませんが、少なくとも、構造システムとして、先ほどお話しチューブ構造のようなものは、最近、コンクリートでも使われるようになってきましたが、鉄骨のチューブほど本格的なチューブはまだコンクリートではなくて、どちらかという、先ほどの、ジャングルジムのようなラーメン構造のほうが、コンクリートでは主体になっておりますので、その意味では、チューブ構造の鉄骨よりは、こういった崩壊はしにくいだろうという気はいたします。

いま加藤先生がおっしゃった、ノースウエスタン大学のバジヤン教授が、コンクリートは駄目だろうとおっしゃっていたのは、主として、高強度コンクリートが熱を受けたときにはじめて割れやすいという、そういう爆裂を起こしやすいということについておっしゃっていたことだと思います。つまり、高い建物をコンクリートでつくろうとすれば、高強度のコンクリートを使わざるを得ないわけですが、高強度のコンクリートは、いまいろいろ対策を講じている最中ですが、通常は熱に対して、普通の強度のコンクリートより弱い。

したがって、もしもこういう激しい火災に遭えば、柱のコンクリートが爆裂して、1つの層の柱がなくなってしまうような現象が起りやすいのではないだろうかということをおっしゃっていたのです。

ほかにご発言ございますでしょうか。

河田 今回の建物の崩壊という話とは全く別の話ですが、建物の崩壊ではあります。

数年前の阪神淡路大震災、あのとき私は、建築の専門ではないものですから横目で眺めておりましたが、非常に難しい問題があったようです。

それで考えてみたのですが、朝日新聞の写真で見たことがあるのですが、ある建物の鋼鉄製の柱で、地面から1階、2階とございまして、2階の天井からちょっと下がったところでスパッときれいに切れた写真が出ていました。

あれなんかは、どうやってなったのか。阪神淡路の震災の災害関係の検討委員会等も一生懸命おやりになって、ことに関西中心でおやりになっているのですが、あれはまさに衝撃破壊そのものではないかと思うのです。地震が下から、直下型で、第一波が引き下げるのです。その建物に対して引っ張っていくのです。そして天井へ行きます、天井で下向きに反射していきます。こういう重複反射が起こりますと柱には相当大きな力が作用します。

そういう計算もできるわけですが、これは、その辺のことをちょっと突っ込んでいただく必要があるのではないかという感じがいたします。

それから、耐震建築の構造基準ですね。そのときに、引っ張り速度というか、それが速いのが、直下型の場合に来る場合があります。あのときに、関西の方がいろいろデータをおつくりになっていまして、阪大の先生でしたか、見せてくださったのがございまして、相当高い値になるのです。だから、ああいうことは、そういう波動のほうの関係も、将来、場合によっては、こういう計算方法も必要ではないか。常にそうとは限りませんが、直下型地震で、引っ張るといことがあり得るのではないかと思います。

ご意見を伺いたいと思います。

加藤 私はその建物の被害を見ておりませんの

で直接のお答えはできませんが、兵庫県南部地震で被災した鉄骨建物の多くは、柱と柱・梁接合パネルの溶接が不十分であったので、切れるとしたらそこで切れるのではないかと思います。それから地震による建物の歪応答速度はそれ程大きくないというのが耐震工学分野の一般的認識かと思いますが、建築の分野にも先生ご指摘の衝撃波の問題を研究しておられる方もありますので、研究の進展を期待したいと思います。

河田 もう1つ伺いたいのは、高速道路で、T字型のもので、かなりの区間にわたって倒れたのがありましたね。あれは、これこれでこうなったという解決がついているのですか。

加藤 高速道路を支持する鉄筋コンクリート造りのものかと思いますが、あれはドイツから技術導入したピルツ構造(ピルツはきのこ)といい、ドイツ直輸入ですから、耐震設計がしてなかったから倒れたのではないかと思います。

山根 孟 私は、いま先生のおっしゃったピルツ構造に直接関係はいたしておりませんが、これは基礎の問題、基礎のファウンデーションの問題が主たる原因で、頭でっかちですから、先生がおっしゃる理屈はそのとおりです。

2つお伺いしたい点があります。ワールドトレードセンタービルの問題で。

一様にスーッと落ちた。通常の場合ですと、イレギュラーに壊れるというのが常識だと思いますけれども、非常に整然と落ちたからびっくりしました。いまの先生のお話で、荷重が、何倍もの力がかかって、しかも一応周囲の鉄骨、鉄の部分の温度が高温になって、脆くなるというか、あるいは多少外側に膨れたかもしれないですが、非常に荷重が大きかったためにああいうようになって、横に行くようなそういう力はなかったと理解したほうがいいのか。壊れ方があまりにストンと落ちていきますので。それが1つです。

もう1つは、周りの建物が、同じような壊れ方をしたのもあれば、多少横に倒れたようなものがある。私も大変不勉強で、どの建物がどういように倒れたかということをお勉強しておりませんが、もし、周りの建物でもかなり高い建物が、同じような壊れ方をしたようなものもありますし、

そうでもないような壊れ方をしたようにもテレビで見ていたのですが、もしご存知でしたら、例えば、そのビルの一番下はかなり地下の空間を取っていましたですね。その地中壁が多少内側に壊れて周りの建物が崩壊したのか、これもかなりの、相当広い範囲にわたって壊れておりますので、熱のためなのか、地盤の形状と申しますか、そちらのほうのことなのか、その辺のところを、もしご存知であればお教えいただきたいと思います。

加藤 第一のご質問についてはその通りだと思います。正方形断面の煙突のようなものが直立していたとして、高さが417m、一辺の幅が63mですから、アスペクト比で6.6程度ですから割合ずんぐりしたものです。横力が作用していませんから曲るということはなく、正方形薄肉断面の柱の局部座屈現象のようなものだと思います。

第二のご質問ですが、私もあの建物および周辺構造についての知識はありませんので、単なる推量でしかお答えするとは出来ませんが、あの建物は地下4階で、地下で周辺の建物につながっております。あの建物の床および柱の崩壊は地下部分にまで達したと思われまますから、先生のお考えのように、床ダイアフラムの喪失により地下側壁が倒壊し、それが周辺建物に影響したと考えます。バジヤン先生はWTCの崩壊に際し、建物の内外装材が飛散して周辺建物に衝撃と熱を与えた結果だと言っておられます。

得田与和 極めて素人的な質問をさせていただきたいと思います。テレビで見ますと、本当に、羊かんを切ったみたいに飛行機が入って行きますね。爆発で長時間高熱で燃えて、上が落ちてきてガラガラと壊れた。これで納得がいきましたのですが、設計のときに、飛行機が衝突することも想定して、一応計算されたということをお聞きしました。ですから、あれが単に、ぶつかってもああはならない。もし爆発するとか、燃料がなければ、こういうことなのですが、したがって、数年前にWTCの地下で何か爆発したことがあるけれども、あれきでは崩壊しないと、そういうことでしょうか。

加藤 そうです。

得田 もう1つは、昨日もやっていたけれども、今度はエッフェル塔を狙うとか、東京タワー

を狙うとか言っておりますが、エッフェル塔、東京タワー程度では、物体がぶつかる程度で燃えたり爆発はしませんので、ああいうことにはならないと思ってよろしいでしょうか。

加藤 お話したハザード・シナリオが成り立つとすれば、そういうことになります。塔が曲がる程度かと思えます。

司会 ほかにご発言ございますか。

三浦 鉄骨というのは、上に行くほど細くなっているのですか。

加藤 上層にゆくに従って鉛直荷重も曲げモーメントも小さくなるので細くできます。ただ建て方、施工上の理由から、各階毎に断面を変えるということはしません。

西原 巧 初めにお聞きしたいのは、いまおっしゃったように、ボーイング707が当たってもいいように設計してあるということは事実でございますか。

加藤 事実です。ただし、衝突による建物の転倒効果は、風圧による転倒効果より小さいということが示してあるだけで、お話したようなハザード・シナリオに対する検討をしたわけではありません。

西原 もう1つ、1000人ぐらい乗れるようなスーパージャンボのような、もっと大きい飛行機が計画されていたら、建物のあの狭い範囲に入る

というのは問題があるのではないか。だから、どこかに制限をかける。

たまたま、今回はうまく壊れたからいいけれども、壊れ方によっては、周りがえらい被害を受けるから、そういう最大値制限ですね。それから周辺が空き地とか、そういうことも考えて計画を進めるのではないかという気がするのですが、いかがでしょうか。

加藤 そういうふうに言うためには、飛行機がぶつかってくるということを前提にしないといけませんね。そういうことを日本の国で言えるかどうかという問題だと思うのです。

司会 きょうは、加藤先生から、大変話しにくいテーマについてお話しいただいたわけですが、皆様方からたくさんのご質問をいただくことができて、よろしかったかと思えます。

先生ありがとうございました。(拍手)

注) American Society of Civil Engineers(ASCE)とStructural Engineering Institute(SEI)は、WTCとPentagonの被害調査および分析を行うために、それぞれに対する調査チームを組織した。調査情報に関しては、www.asce.org にWTC、Pentagon及び他の被災建物の図面についてはwww.seaony.org にアクセスできる。

2001年12月27日

編集発行

(社)日本工学アカデミー

〒100-0005 東京都千代田区丸の内1-5-1

新丸ビル4-007

T E L : (03) 3211-2441~2

F A X : (03) 3211-2443

e-mail: academy@twics.com

URL: <http://www.eaj.or.jp/>