

2001年9月11日 ～WTCはなぜ倒壊したのか？～

川口 淳（工学部 建築学科）

1. はじめに

アメリカ合衆国ニューヨーク市のマンハッタン島南端にあった世界貿易センタービル（以下 WTC と略称）は我々人類の 20 世紀の文明社会の象徴であり、世界中の建築技術者の夢の結晶とも言える建築物であった。その WTC が去る 2001 年 9 月 11 日朝（現地時間）テロリストにハイジャックされた 2 機の旅客機の衝突によって倒壊した。この未曾有の惨劇は、我々にテロリストに対する強い怒りを覚えさせたのと同時に、現代のテクノロジーの脆さをも感じさせた。この災害は、人為的なジェット旅客機の衝突という建築物の設計時には通常想定しない原因によって起こったものではあるが、我が国を含む多数のモニュメンタルな超高層建築を有する国々の人々に大きな不安を与えたことは間違いない。

はたして建築物はこのような事故に対して安全に設計されるべきかという議論はさておき、我々技術者はその技術の安全性について十分理解していなければならず、さらに所有者や利用者に対して安全性に関する説明責任がある。この講演では、FEMA（Federal Emergency Management Agency：米国連邦緊急事態管理庁）および SEI/ASCE（Structural Engineering Institute of American Society of Civil Engineers：米国土木学会構造部会）が 2002 年 5 月にまとめた報告書¹⁾を引用し、WTC 崩壊のメカニズムを解説する。なおこの事故では、超高層建築のハードウェアとしての安全性のみならず、「防災・非難・危機管理」といったソフトウェア安全性の問題も提起されているが、本講演は前者に主眼をおき、技術者として、技術の安全性に関する理解を深め、説明責任を果たす姿勢を喚起しようとするものである。

2. 概要

2.1 WTC 概要

WTC はニューヨーク市南部の西寄り（ハドソン川より）に位置し、敷地面積は約 16 エーカー（64,000m²）、約 5 エーカー（2,000m²）の中庭を囲んで、合計 7 棟のビル群から構成されている。（図 1）このうち、WTC1 と WTC2 が高層のタワーで、今回航空機が 1 機ずつ衝突した建物である。その他、WTC3～WTC7 までの中層から低層の建物もすべて、WTC1 および WTC2 から航空機の衝突時あるいは倒壊時に飛散してきた破片等の間接的な被害を受け、最終的に倒壊するという被害を受けた。また、WTC 西側のワールドフィナンシャルセンター（WFC）や南側の Bunkers Trust ビルも甚大な被害を受けた。2 棟の高層タワー以外は間接的な原因による倒壊であるため、詳細は省略する。

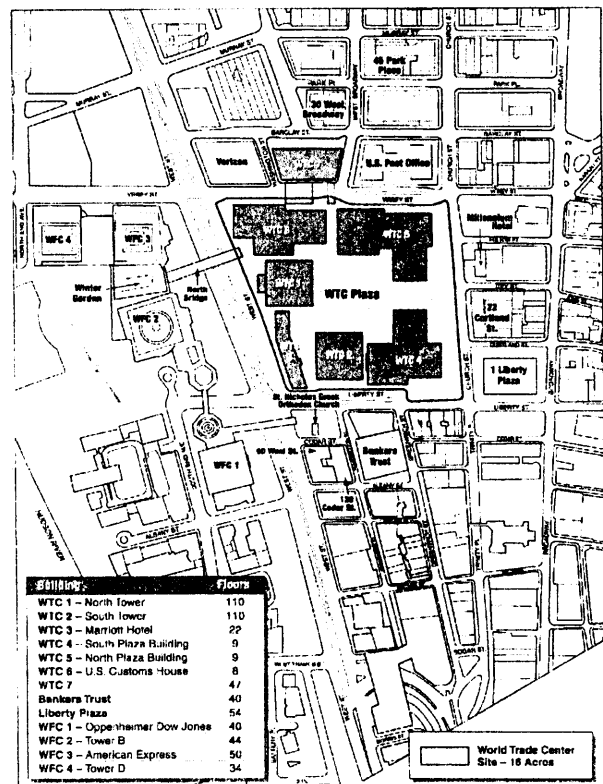


図 1 WTC 周辺地図

2.2 事故概要

2001年9月11日朝、2機のハイジャックされた民間航空機がWTCの2棟に衝突した。最初の機はアメリカン航空11便、ボストンローガン国際空港午前7:59発（米国東部夏時間）で、マンハッタン島中心部から南部に向け飛行し、WTC1（北棟）の北面に午前8:14に衝突した。一方2機目は、ユナイテッド航空175便、同じくボストン8:14発で、マンハッタン島南部より飛行し、午前9:03分WTC2（南棟）の南面に衝突した。両機ともボーイング767-200ER型で、ロスアンゼルス行であったため、アメリカ大陸横断に十分な燃料を積載していた。事故発生時の正確な時間の流れは、事故現場より北に34km離れた場所に設置されたコロンビア大Lamont-Doherty Earth Observatoryの地震観測記録より知ることができる。（表1）

表1 事故時の主要な出来事の時刻歴

開始時刻 EDT *	継続時間	規模（マグニチュード） （Richter Scale）	出来事
8:46:26	12 sec.	0.9	WTC1にAA11便が衝突
9:02:54	6 sec.	0.7	WTC2にUA175便が衝突
9:59:04	2.1 sec.	2.1	WTC2倒壊開始
10:28:31	8 sec.	2.3	WTC1倒壊開始
17:20:33	18 sec.	0.6	WTC7倒壊開始

* EDT: Eastern Daylight-savings Time

2.3 設計

米国における建築物の設計は、設計規準に準拠して行なわれている。規準では、耐力の他に耐火性能や避難時間など人命の安全に関わる規定を定めている。設計規準における想定外力には通常1) 重力、2) 風力および3) 地震力が想定されているのみで、戦争やテロリズムによる衝撃荷重は考慮されていない。というのは通常の場合、ほとんどの建物にはこれらを考慮する必要はないためである。しかしながら、オーナーによっては、その建物の重要度に応じてより高いレベルの外力を想定するケースもある。（例えば、大使館、銀行、軍関係施設など）

WTC1,2は軍関係施設を除いて世界で最初に

その設計外力にジェット旅客機（ボーイング707）の衝撃荷重を考慮した建物である。1945年7月28日、同じニューヨークのエンパイア・ステートビルディングにB-25が視界不良のため衝突した事故の教訓をふまえ、航空機が霧などの視界不良で近隣の空港を探している状況を想定し、着陸速度（180mph = 260km/h）でかつ搭載燃料の少ないジェット機（総重量263,000lb = 120ton）の衝突荷重として設計に考慮されたものである。しかしながら、今回WTC1,2に衝突したB767-200ERは推定衝突速度470～590mph（750～950km/h）で、総重量274,000lb（125ton）であった。航空機の衝突荷重を設計に考慮するには、衝突速度、重量、衝突角度および高さなどの諸条件が必要になる。つまり航空機の衝突で建物が倒壊しない可能性は、航空機のサイズが大きく速度が速いほど小さくなる。ちなみに、2006年に就航予定のAirbus社のA380は、今回のB767-200ERと比較しておよそ3倍の重量である。航空機の衝突を建物の設計に考慮するには、現在の建物の設計規準を大きく考え直さねばならないことは明白である。加えて、設計の信頼性を上げるためには、現在就航している最大の航空機を想定する必要があるが、これは将来を考えたとき、ほとんど無意味である。

2.4 耐火

WTCの様に、主構造の素材がsteelである限り、耐火性能は非常に重要な設計項目となる。米国における設計規準においても、部材の耐火性能の確認は、ASTM（American Society for Testing and Materials：米国材料・試験協会）が定める標準試験によって確認することになっている。しかしながら、WTCの設計時に適用されたASTM E119の規定による耐火試験では、部材は実際の構造物の中と同条件の荷重やその他の拘束力を受けているわけではないので、現実には実験のような耐火力、および耐荷力を発揮できるかどうかは疑問である。その後の30年にわたる米国および世界的な建物火災

の研究ではこの点を重視し、火災が建物に与える影響として、1) 温度の時間変化、2) 換気状況、3) 火災の区画、4) 壁、床および天井等の熱に対する性能、5) 燃料による燃焼特性の違い等について研究が進み、より現実的な建物の火災時挙動の予測が可能になってきている。しかし残念ながら、1960年代の設計のWTCではこれらの成果は盛り込まれていない。WTCの場合はさらに、航空機の激突による建物の損傷が発生した後に火災が生じていることから、設計時点で想定した火災に対する抵抗力はほとんど無意味であったといえる。

3. WTC1 と WTC2

3.1 建物概要

3.1.1 概要

WTC1,2の建物概要は以下の通りである。

建築主：The Port Authority of New York and New

Jersey（ニューヨーク・ニュージャージー州港湾局）

設計：Minoru Yamasaki & Associates, Emery Roth &

Sons

構造設計：Skilling, Helle, Christiansen, Robertson

機械設計：Jaros, Baum & Bolles

電気設計：Joseph W. Loring & Associates

階数：地上100階、地下7階（WTC1&2）

高さ：

WTC1：1,368ft. (417m) + 電波塔 360ft. (110m)

WTC2：1,362ft. (415m)

各階床形状：207ft. 2in. (63.14m) x 207ft. 2in. 四隅に 6ft.

11in. (2.11m) の面取

各階床面積：1 acre (3,978.3 m²)

コア部形状：87ft. (26.5m) x 137 ft. (41.8m)

基準階高：12ft. (3.66m)

構造種別：鉄骨造

竣工：WTC1 1970.12, WTC2 1972.1

3.1.2 構造概要

WTC1,2は酷似した形状をしているが、完全に同じものではない。その違いは、WTC1はWTC2より6ft. 高く、さらに屋上に360ft. の電波塔を持っていること、長方形の平面形のサー

ビスコア（エレベータシャフト、パイプシャフト等の設備や避難階段等が収められている区画）がWTC1では東西方向に、WTC2では南北方向に配置されていることなどである。これらの違いによって、それぞれのタワーの風圧力に対する抵抗機構も異なり、それぞれのタワーで異なる横方向力に対する設計が行われた。

(1) 構造計画

基本的な平面形状は、図2に示す通り正方形で、サービスコア部分は長方形である。主な水平方向荷重は風荷重で、外周部に約1m間隔で配置されたボックス柱約240本と鋼板製のスパンドレル梁でチューブ架構を形成し、水平力に抵抗する。一方サービスコア部分は、低層階では、扁平なボックス形、上層階ではH形の断面形状の柱47本で、鉛直荷重のみを支持する設計となっている。また、床スラブは、鋼製デッキプレートに、軽量コンクリートを打設し、外周柱及びサービスコア部分をピン接合された鉄骨トラス梁で支持している。

(2) 外周架構

外周架構は鋼板4枚で構成されたボックス柱で、全層に渡り外形寸法は同一である。鋼材は、日本から輸入されたWel ten 鋼である。以下に構成部材の諸元を示す。

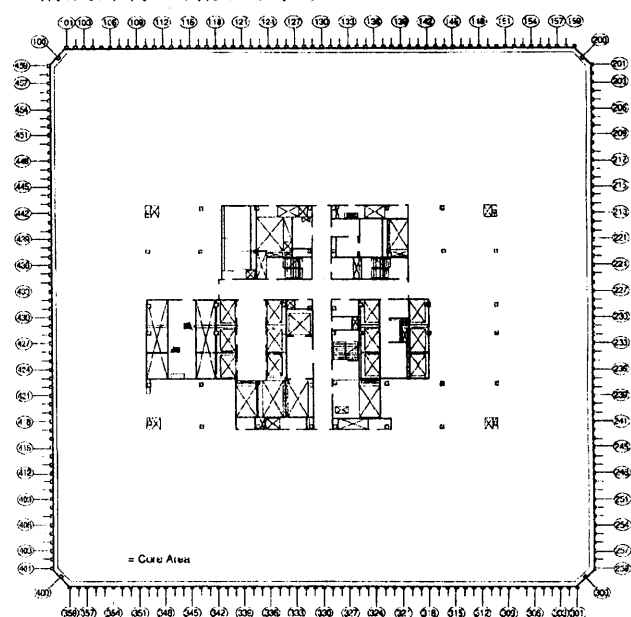


Figure 2-1 Representative floor plan (based on floor plan for 94th and 92nd floors of WTC 1)

図2 基準階平面図（WTC1 94階）

外周柱：鋼製組立ボックス柱（図3）

外形寸法：1'-2" x 1'-1 1/2" (356 x 343mm)

板厚：1/4" ~ 3" (6.4 ~ 76.2mm) どの場所でも軸方向応力度を一定にするため、場所によって板厚を調節している。

柱間距離（芯々）：3'-4" (1,016mm) ただし下層部6層は柱3本を1本に絞り間隔を10' (3,048mm) としている。

鋼材の降伏応力度：50 ~ 100ksi (340 ~ 690N/mm²)

柱継手：エンドプレート部で高力ボルト接合

エンドプレート：1'-3/8" (35mm) (89F ~)

高力ボルト：7/8" A325 4 ~ 6本。ただし基礎付近では溶接を併用。

外周梁：鋼板スバンドレル梁

梁せい：4'-4" (1,320mm)

板厚：3/8" ~ 1'-1/2" (9.5 ~ 38.1mm)

梁の接合：高力ボルト接合

建方：

3層3スパンを1ユニットとし、柱継手が同一レベルにならないよう千鳥配置としている。なお、同一レベルとなる場合は、溶接を併用。

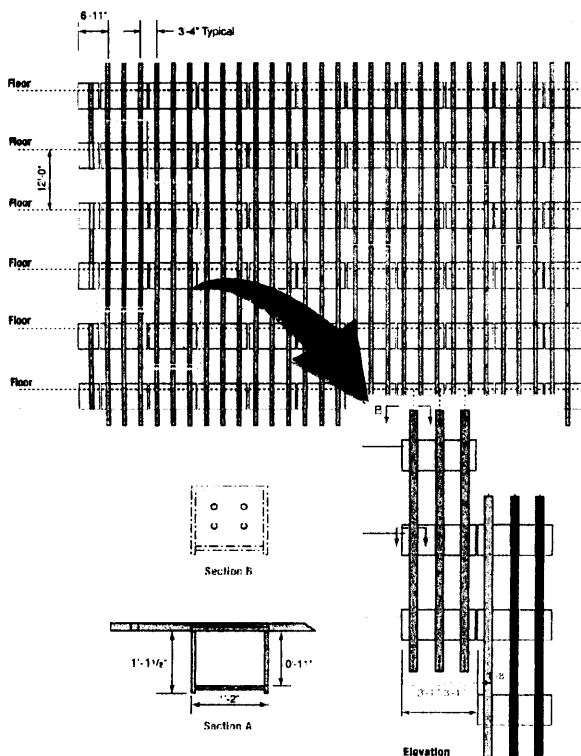


Figure 2-3 Partial elevation of exterior bearing wall frame showing exterior wall and structural lines

図3 外周架構の構成と柱断面

(3) サービスコア架構

コア柱：

外形寸法

低層階：3'x1'-2" ~ 1'-4" (914x366 ~ 406mm) のボックス柱

隅部のコア柱最大寸法：4'-5"x2' (1,346x610mm)

82階以上：2'シリーズの極厚 RH か BH

板厚：3/4" ~ 4" (19 ~ 102mm)

降伏応力度：36ksi (245N/mm²)

柱継手：溶接接合の部分あり、詳細不明。

(4) 床構造

床スラブ：両端ピン接合の鉄骨トラス梁に支持されたデッキプレートに軽量コンクリートを打設したもの。（図4）

デッキプレート：1'-1/2" (38mm) 主トラスに平行に配置

軽量コンクリート：厚さ 4" (101.6mm)

主トラス梁：山形鋼の上下弦材に棒鋼の斜材を配したトラス梁2つで1本の梁を構成。（図6）

梁せい：2'-5" (737mm)

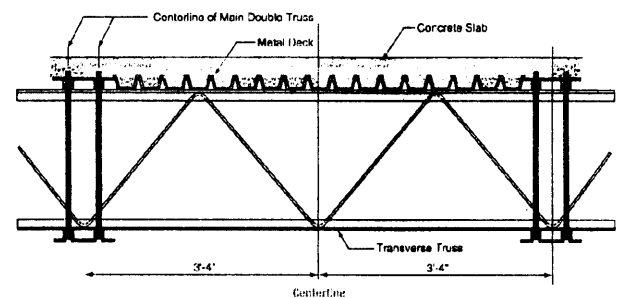


Figure 2-9 Cross-section through main double trusses, showing transverse truss.

図4 床スラブ構造ディテール

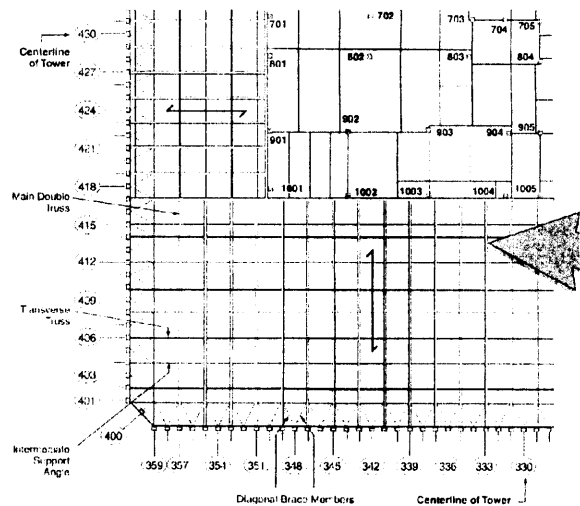


Figure 2-2 Representative structural framing plan, upper floors.

図5 構造システム

間隔：6'-8" (2,032mm) 外周柱 1 本おきで、中間柱から上弦材に水平ブレース (1-1/2"x1/2", 38x13mm) を設置。(図 5)

鋼材：A36

スパン：短手方向 35ft. (10.7m)、長手方向 60ft. (18.3m)

外周柱との接合法：ガセットプレートを上弦材にすみ肉溶接し、スパンドレル梁に突合わせ溶接。また、スパンドレル梁に溶接された山形鋼に長穴をあけ、上弦材端部を 5/8" (16mm) ボルトで接合。下弦材と外周柱の間には風荷重時の振動抑制のために粘性ダンパーを配置。(総数約 10,000 個)。

内部コア柱との接合法：内部コア柱の側面に渡した溝形鋼の梁材にブラケットを溶接し、5/8" (16mm) ボルトで接合。

直交トラス梁：山形鋼の上下弦材と棒鋼の斜材からなるトラス梁。

間隔：13'-4" (4,064mm) で主トラス梁に直交して配置。

3.1.3 防火対策

(1) Passive 防火対策

WTC1 は 39 階までアスベスト含有の吹きつけ耐火被覆を用いていたが、アスベストの健康への影響が指摘され、使用が禁止されたことを受け、ノンアスベストのミネラルファイバー系の吹きつけ耐火被覆に取り換えられている。WTC2 は全て当初よりミネラルファイバーの耐火被覆が使用されている。被覆の厚さは、当初 3/4" (20mm) であったが、1990 年代中ごろ耐火性能向上のため被覆を 1-1/2" (46mm) に増厚することが決定された。増厚工事はそれぞれの階が空きになった時点で順次進められ、

2001 年 9 月時点で、合計 31 床分の増厚が完了していた。なお、WTC1 の衝突階 (94-98) 全て増厚済みであったが、WTC2 (78-84) のそれは、78 階が完了していたのみであった。

(2) 消火設備

WTC1,2 は建設当初、スプリンクラを用いた自動消火設備を有していなかった。しかし、1990 年代に行なわれた改修工事ではほぼ 100% のスプリンクラの設置が行なわれ、それに伴う消火用給水設備も完備された。

防煙区画は FDNY (ニューヨーク市消防局) の指導により、当初から計画され、火災時に発生する煙の排煙あるいは、煙がサービスコアを通じて他階などに流出しないよう設計されていた。

(3) 消火態勢

1993 年に発生した、爆弾テロ事件以降、FCC (火災コマンドセンター) が地下 1 階の集中管理センターに設置され、WTC 全区画を無線通信でつなぎ、FDNY の緊急連絡網と接続されている。その他、WTC は独自の消防隊を保有しており、FDNY と連携して迅速な消火活動が行える体制を持っていた。

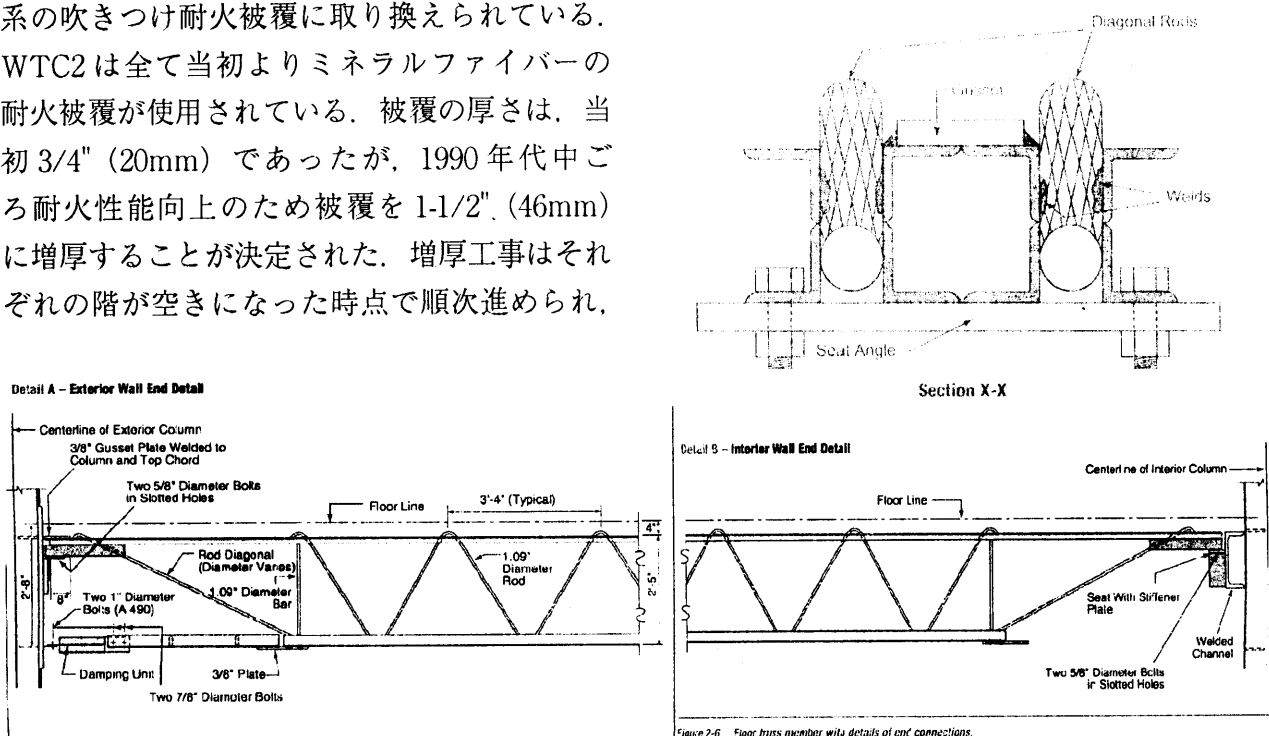


図 6 床トラスのディテール (左：外周柱側、右：サービスコア柱側、右上：外周柱側上弦材断面)

3.2 被害状況と倒壊へのシナリオ

3.2.1 航空機衝突時点の被害

図7に航空機の衝突面と建物配置を示す。また、図8に衝突面の柱の損傷状況を示す。WTC1では94～98階の5ユニット程度で柱31～36本程度、WTC2では78～84階の6ユニット程度で柱27～32本程度が損傷を受けた。外周柱の損傷に加えて、サービスコア部分も相当の被害を受けたものと考えられる。図9はWTC1の91階（衝突階の3階下）で働いていた人のインタビューをもとに描いた破片の飛散位置である。また、幾つかの飛散物（ライフ

ジャケット、航空機のシート、ランディングギアなど）が建物の南側で発見されていることから、ある程度の航空機のパーツが建物を貫通しており、その際、フロアシステムやサービスコアの構造にダメージを与えていることが想像できる。

WTCの構造システムは、これらの初期被害の大きさを考えると十分に余力があったことを示しており、衝突時点での即時倒壊を免れた。衝突によって外周柱によって支えられていた圧縮荷重は、その他のルートに再分配された。（図10）衝突によって失われた外周柱の鉛直荷重

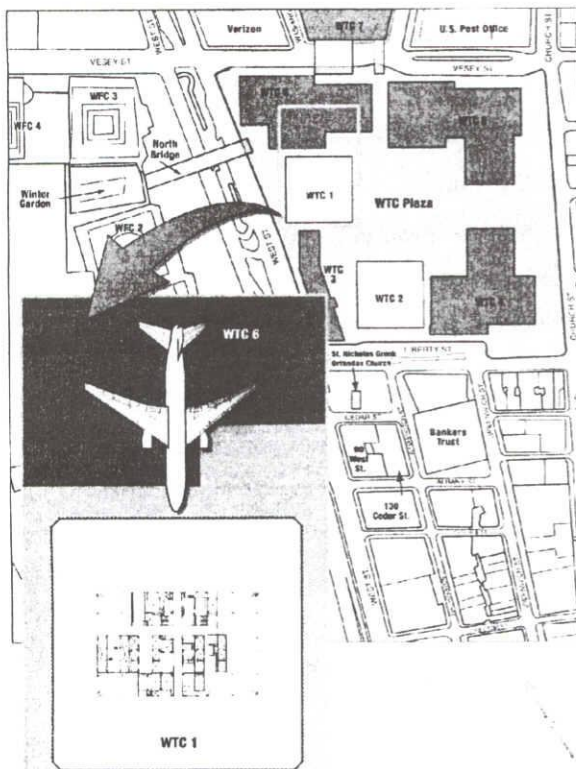


Figure 2-14: Approximate zone of impact of aircraft on the north face of WTC 1.

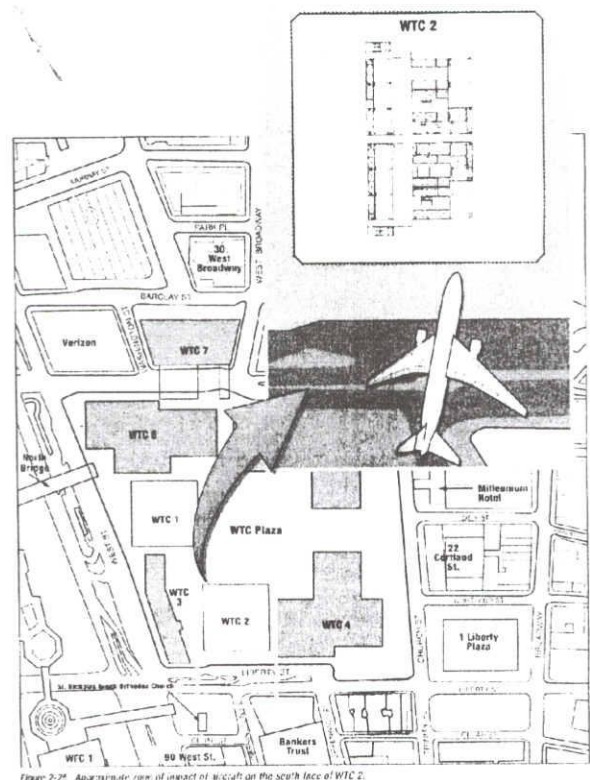


Figure 2-25: Approximate zone of impact of aircraft on the south face of WTC 2.

図7 航空機の衝突面と建物配置の関係（左：WTC1, 右：WTC2）

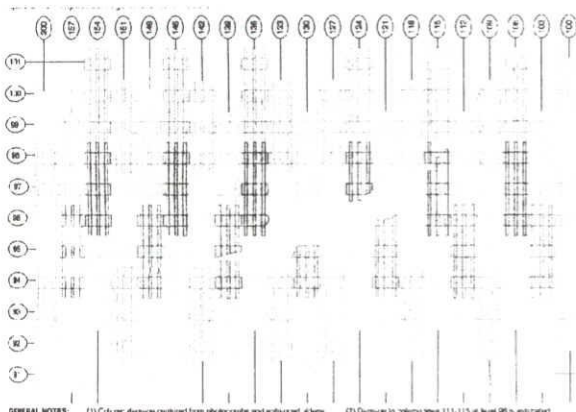


Figure 2-16: Impact damage to exterior columns on the north face of WTC 1.

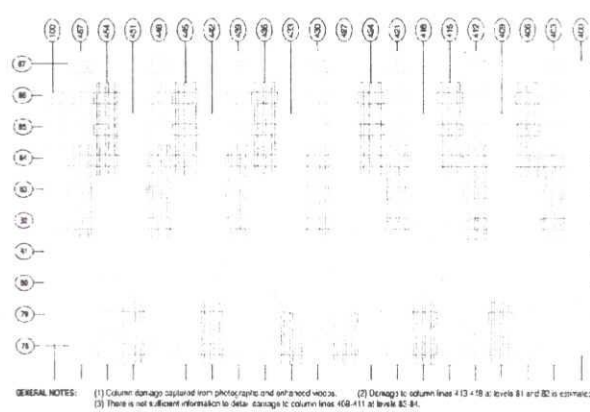


Figure 2-27: Impact damage to exterior columns on the south face of WTC 2.

図8 衝突面の損傷状況（左：WTC1, 右：WTC2）

は、衝突部分より上階では外周柱の引張力と、タワー最上部のアウトリガーシステムによって支えられ、下階は主に外周部およびコア柱の付加荷重として支えられたと考えられる。試算によると、一番大きな付加荷重を受けた部分は WTC2 の外周柱で、通常の約 6 倍の圧縮力

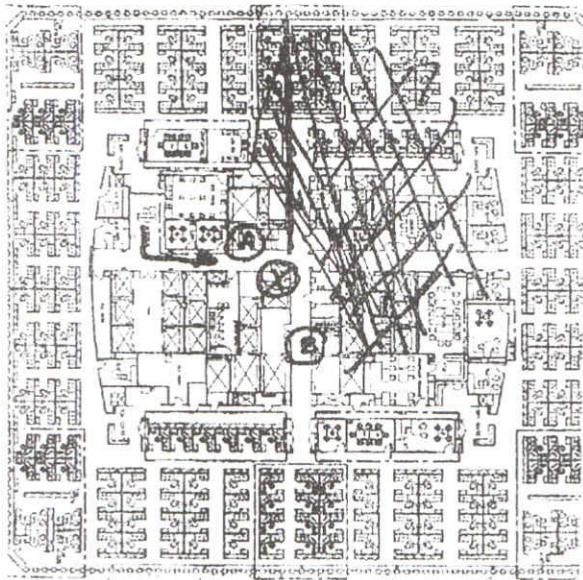


図9 WTC1, 91 階の飛散物の状況

を分担したと見られている。これからも、外周柱は、鉛直荷重に対しては、非常に過大な設計になっていたことが分かる。なお、WTC1 と WTC2 を比較すると、WTC1 は北面ほぼ中央に損傷を受けているため、損傷を受けた柱からの軸力が残存する他の柱に比較的均等に再分配されたと考えられるのに対し、WTC2 は衝突によって損傷した柱が、東側に偏っており、南東側のコア柱の損傷も大きいと考えられ、前述のような応力再配分後の残存した柱の支える荷重が柱の位置によって大きく異なると考えられる。

3.2.2 火災の進展

2 機の航空機に搭載されていた燃料はおよそ 10,000 ガロン (38,000 リットル = 約 30ton) である。ビデオなどの検証によると、衝突時に発生した Fireball (火柱) の大きさから推測しておそらく 1,000 ~ 3,000 ガロンの燃料が衝突時の Fireball で消費されたと見られている。もし、

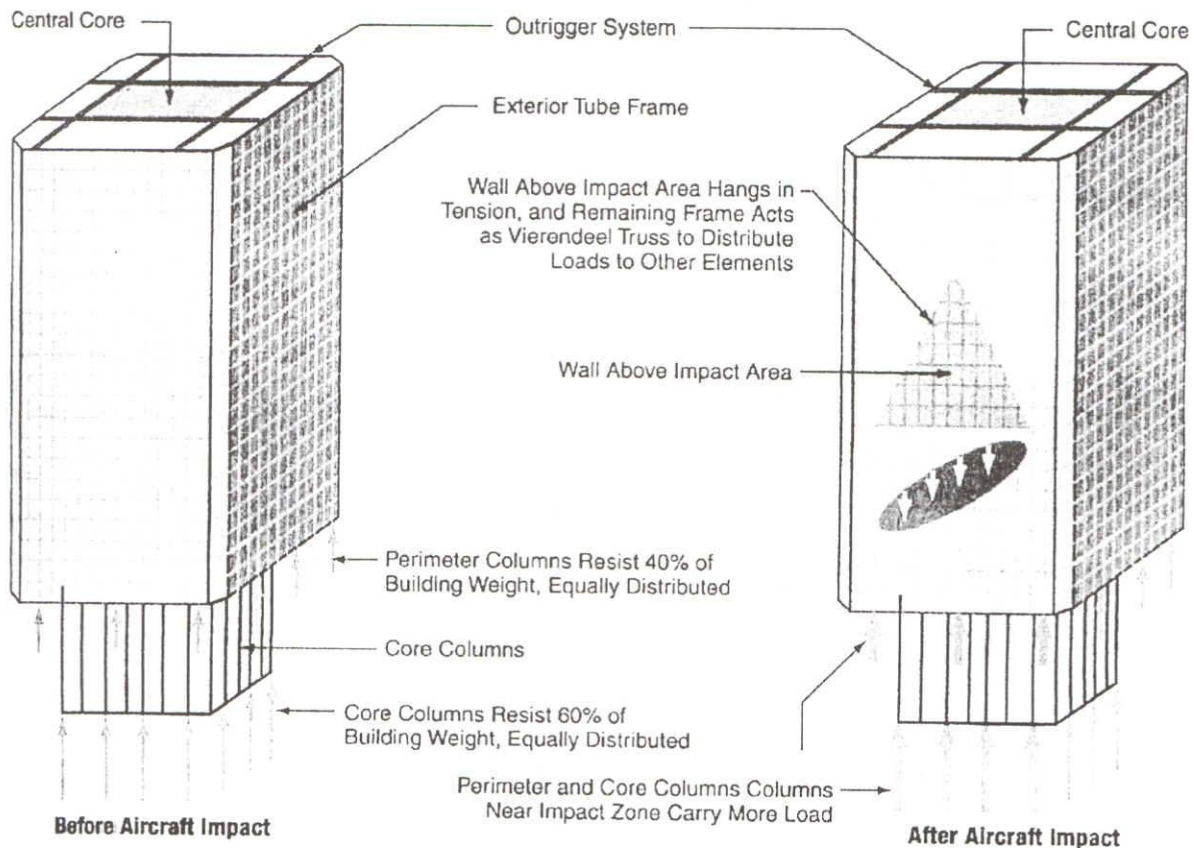


Figure 2-19 Redistribution of load after aircraft impact.

図10 衝突による外周柱の損傷と応力の再分配状況

3,000 ガロンが Fireball で消費されたとすると、残りの 7,000 ガロンのうち 3,000 ガロンが他階へ流出、4,000 ガロンが衝突階で燃焼したとされる。流出したジェット燃料は十分な気化が行われると仮定すると一瞬のうちに燃焼してしまい、(おそらく 5 秒以内) その後は、オフィス内の什器や書類などが燃焼していたものと考えられる。この火災によって発生した熱量は商用の大型発電所と同等の熱量であったとされる。

また、衝突時の衝撃により、スプリンクラシステムや消火用水供給システムは瞬時に破壊されたか、あるいは、Fireball の過大な熱に相当数のスプリンクラが一斉に放水をはじめ、一気に水圧が低下し、その後の火災に対しては、ほとんど機能しなかったと考えられる。

3.3 倒壊へのシナリオ

前述の通り、WTC1,2 は航空機の衝突自体に対しては、その過剰な耐荷能力により倒壊に至らず、居住者の避難にある程度の時間を与えた。しかしながら、結果的には、2 棟のタワーとも完全倒壊に至った。倒壊に至るシナリオは以下の通りである。

3.3.1 衝突階付近の状況

- 1) 衝突による破片の飛散、Fireball の影響で耐火被覆が脱落していた。
- 2) 衝突で柱に損傷を受けたことによる荷重の再分配が発生し、残存柱の応力度が増加
- 3) 衝突時に局部的に破壊された床が、下階の床の付加荷重となった。

3.3.2 火災の進行に伴う現象

- 1) 床スラブを支持するトラス、柱が熱により膨張し、柱に面外変形を生じさせる。(図 11)
- 2) 床スラブを支持するトラス、柱が熱により強度低下を起こし、床が垂れ下がる。そのカテナリアクションでスラブの端部の接合部が破断。(図 12)
- 3) 下階の床スラブに過荷重がかかると同時に床の補剛効果を失った柱が座屈。(図 13)

3.3.3 倒壊のきっかけ

いったん崩壊が始まると、上階のポテンシャルエネルギー (WTC1 では、8,000,000,000J と推定されている) は、運動エネルギーに変わり、上層階の大きな質量が下階の床に衝突し、その大きな衝撃荷重によって床スラブ端部の破断、柱の座屈という繰返しにより、連鎖的崩壊が生じた。崩壊のきっかけは、ビデオからも明らかな様に、外周柱が動く前に屋上のタワーが下方わずかに横にズレながら移動して崩壊が始まっていることから、外周柱より耐荷能力の低いコア柱の崩壊である。

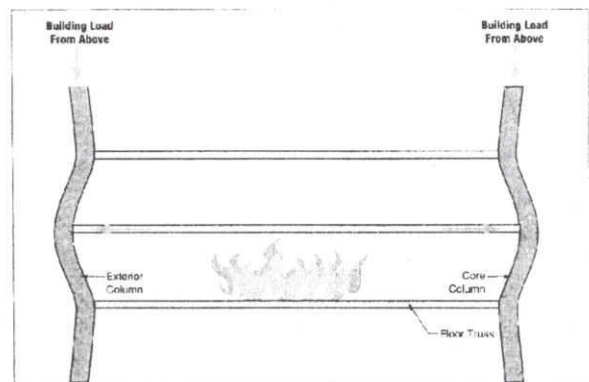


Figure 2-20 Expansion of floor slabs and framing results in outward deflection of columns and potential overload.

図 11 トラスの熱膨張による柱の面外変形

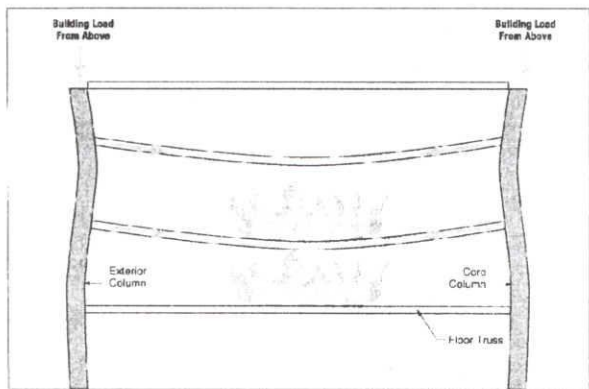


Figure 2-22 Catenary action of floor framing on several floors initiates column buckling failures.

図 12 カテナリアクション

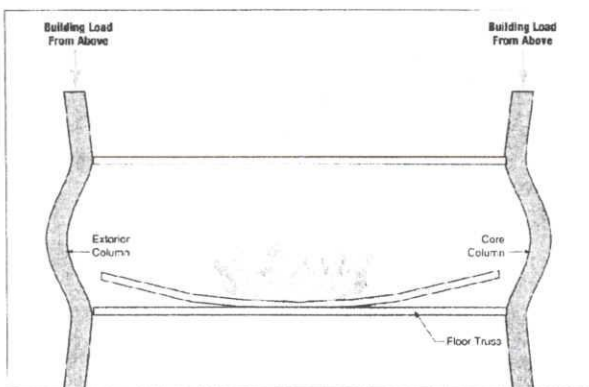


Figure 2-21 Buckling of columns initiated by failure of floor framing and connections.

図 13 下階への過荷重と柱の座屈

4. まとめ

以上のことをふまえると、今回の事故は、故意の航空機の衝突という原因で、通常考えられないほどの大きな衝撃荷重が建物に与えられたにも関わらず、衝突から一定時間の間建物は倒壊せずに持ちこたえ、ほとんどの住人が避難することができたという点で、その技術力は称賛に値すべきことである。この事実は、嵐や、地震などの災害においてもこの建物は、ある程度ダメージを受けても、ダメージを受けた状態で倒壊することが無いことを示唆している。しかし今回はダメージを受けた状態の建物が、2回目の非常に大きな荷重を受けたため（ジェット燃料による火災）倒壊に至ったものである。

今回の事故はあくまでも非常に特殊なケースであるので、これが直接設計規準やその他の基・規準に影響を与えるものではないが、この事故が、我々エンジニアに与えた教訓は大きい。本講演では、この事故をハードウェアの安全性という観点からのみ解説を行ったが、建物は「人間を守シェルターである」という考えに立つと、現代の建物はハードウェアの安全性のみならず、ソフトウェアも非常に大きな責任を果たさなくてはならないということは明白である。

今回の事故は、我々エンジニアの使命はただ単に高い技術を追及・開発し、社会に還元してゆくのみではなく、それと同時に、技術の限界を知り、社会に広く周知してゆくことであることを、当たり前ながら再認識させるものであった。

参考文献

1)FEMA, SEI/ASCE: World Trade Center Building Performance Study, 2002.5.