2001. 9. 11 建築物崩壊大事件の構造的調査概況

嶋 津 孝 之*

概 要 2001 年 9 月 11 日のテロリストによる米国の世界貿易センター建物および国防省本部建物（部分）の崩壊事件は、世界中に大きな衝撃を与えた。本文は、この大事件の後に行われてきた米国の調査チームならびに調査機関の各構造的調査結果について、その基本的な内容を紹介するもので、次の項目順で解説する。1. 2001 年 9 月 11 日の建築物崩壊大事件のあらまし、2. 国防省本部建物の部分崩壊の構造的調査概要、3. 世界貿易センター建物の全体崩壊の構造的調査概要

キーワード：衝撃力、建築物崩壊、火災、柱の変形能、外柱の安定性、床システム、安全率

1. はじめに

今年 9 月でちょうど 3 年が経過したこの世界的な大事件は人類史上いつまでも記憶に残ることであろう。この事件は、建築物の構造設計の方法という観点から見ると、従来、自然災害や偶発的事故災害を対象に行ってきたことに対して、まったく新たな視点を加えねば、ならないことを示している。もちろん、このような人為的、意図的災害は、構造物の設計以前に、災害そのものの発生を極力食い止めるためのあらゆる手段の開発が先行しなければならないことは明らかである。米国では、そのための対策を各種講じているようであるが、一方、事件後これから建築物崩壊の構造的な原因究明に乗り出し、その成果の一部を公表してきている（文献 1）および文献 2）。文献 1）は、American Society of Civil Engineers（米国土木学会）の中に設けられた調査チームの調査結果であり、文献 2）は、National Institute of Standards and Technology（米国立規格技術研究所）の調査各プロジェクトの内の、特に構造的検討を主眼としたものである。本解説は、それら調査結果の一部を紹介するものであるが、崩壊した建物は、一方は RC 造の中低層であり、他方は鉄骨造の超高層である。両調査とも、この 2 種の構造に衝撃、爆発、火災が加わった時の挙動説明が当面の調査課題となっており、この種災害に対する建物の具体的な設計手法については今後の課題のようである。

まず、この大事件のあらましを述べる。

2. 2001 年 9 月 11 日の建築物崩壊大事件のあらまし

表-1 にこの事件に関係して、各建物概要、衝突機、死亡者数、ならびに、衝突時間および建物崩壊までの時間等を示す。また、図-1 および図-2 に国防省本部建物の平面図と衝突された外面の様子を示す。さらに、図-3

表-1 事件の概要

	国防省本部 Pentagon	世界貿易センター WTC 1（北棟）	同 左 WTC 2（南棟）	同 左 WTC 7
建物概要	5 階建 RC 造 高さ約 20m	110 階建 S 造 高さ約 411 m	同 左	47 階建 S 造
衝突機 ¹	A.A 77	A.A 11	U.A 175	—
乗客・乗員	72 名	103 名	74 名	—
スピード	856 km/h	756.4 km/h	942.9 km/h	—
衝突場所	西面中央	北面 94～98 階	南面 78～84 階	—
衝突時間 ²	2001. 9. 11 9. 40 a.m.	同左 8. 46 a.m.	同左 9. 03 a.m.	—
建物崩壊 時 間 ³	10. 00 a.m. (部分)	10. 28 a.m. (全体)	9. 59 a.m. (全体)	5. 20 p.m. (全体)
崩壊するま での時間 ³	20 分	102 分	56 分	412 分

¹ Boeing 752-200 クラスの寸法は全長約 50 m、幅約 40 m、高さ約 14 m（尾翼を含め）で、全重量は、約 200 トン（うち燃料重量は、その 1/3）

² 米国東部時間

³ ペンタゴンの場合、総数約 200 名の人が、WTC の場合、両棟で、約 3 000 名の人々が亡くなっている。また、WTC の場合、この時間内で、20 000 余名の人が脱出出来たとされている。

に世界貿易センター建物群（World Trade Center Complex）の配置図を、図-4 に WTC Tower の平面図を、さらに、ここの全体崩壊した両タワーをはじめ、それにより、影響を受けた地域の広がりをも図-5 に示す。ここで、両ケースについて、建物崩壊のことを中心に以下に補足説明を行う。

前者の通称＜ペンタゴン＞と呼ばれる国防省本部建物は、米国のワシントン D.C. にある 5 階建の鉄筋コンクリート造建物で五角形の一辺が 300 m 近くあるリング状平面をもつ巨大構造物である。飛行機は西面のほぼ中央の約 30m 幅の 1, 2 階の部分に衝突した。後述するように、1 階は中廊下に至るまでの柱が破壊されているが、約 20 分後、後の写真-1 に示すように、衝突部右側の三角形形状の部分が各階床スラブが折れるようにして、全階崩壊した。

一方、世界貿易センター建物は、飛行機の衝突を直接受けたのは、ニューヨークの全部で 7 つある WTC 群のうち、その主構造物で 110 階の双子の鉄骨造構造物

* しまづ・たかゆき／広島大学名誉教授（正会員）

図-1(a) ペンタゴン 1 階平面図¹⁾

図-1(b) 同上階平面図¹⁾

図-2 衝突場所 (西面)¹⁾

図-3 WTC Complex 配置図³⁾

図-4 WTC Tower 基準階平面図³⁾

(WTC 1—北棟と WTC2—南棟)である。両棟は、一辺 64m の正方形の平面を有する Hull-Core 型である。前者は、北側から、後者は、南側から、飛行機が突入した。前者の方は、建物真正面の 94～98 階に、後者は建物の斜め方向に 78～84 階の隅角部に衝突した。飛行機突入後、前者は、黒灰色の煙を出し続け、後者は、衝突時に火の玉状のものを発し、その後、白色の煙を出し続けた。

Outline of the Structural Investigations into the Buildings' Performance during the Events of September 11, 2001

By T. Shimazu

Concrete Journal, Vol. 42, No. 11, pp. 15～20, Nov. 2004

Synopsis This paper outlines the results of the structural investigations conducted on the 2001. 9. 11 building structures collapse due to the collision of hijacked airplanes in U.S.A. The following three aspects are presented

1. Outline of these events, 2. Main results on the structural investigation into the partial collapse of the Pentagon (Headquarter building of U.S. Department of Defense), 3. Main results on the structural investigation into the overall collapse of WTC 1 and WTC 2 (North and South towers on World Trade Center Complex). Finally, some findings of these investigations are introduced regarding resistance capability of reinforced concrete structures and steel structures under these impact, blast and thermal stresses.

The contents of the above 2 and 3 are mainly based on the publications of ASCE and NIST respectively.

Keywords : Impact, Building collapse, Fires, Columns ductility, Exterior columns stability, Floor system, Safety factor

図-5 WTC 崩壊と付近への影響¹⁾

写真-1 ペンタゴン部分崩壊¹⁾

最初に衝突された WTC 1 は、衝突後、約 102 分後に、また、WTC 2 は、衝突を受けたのは、WTC 1 より、17 分後であるが、その後 56 分後にそれぞれ全体崩壊した。このように、衝突後に両棟が全体崩壊することは、まったくの予想外のことであったが、特に、WTC 2 は WTC 1 の半分程度の短い時間で全体崩壊した。なお、これら時間内に建物から、逃れた人の数は、表-1 に示すように、2 万余名であったそうである。さらに、WTC Complex の 7 番目の 47 階建鉄骨造建物の WTC 7 が、WTC 1 の崩壊後、約 7 時間後に全体崩壊している。この建物は、Complex の中の他の建物と違って、通りを一つ隔てたところにあったが、WTC 1 の崩壊後、火災が発生し、燃え続けた後、全体崩壊した。最初に火災が発生したのはこの建物の場合、10 階、11 階および 23 階だったそうである。なお、他の 4 つの WTC 建物のうち WTC 3 は WTC 1 や WTC 2 の全体崩壊のあおりを受けて崩壊した。しかし、低層 RC 造の WTC 4, 5, 6 は、原型を留めたようである。

3. 国防省本部建物（ペンタゴン）部分崩壊の構造的調査概要

この建物の場合、前述した文献 1) に従って、話を進める。図-2 に示したように西面のほぼ中央部に飛行機

図-6 飛行機突入の影響範囲（1 階）¹⁾

写真-2 3次元曲率をもつ柱¹⁾

が衝突したが、この部分の柱群の破壊程度を平面的に区分を示したのが、図-6 である。Col. lines 8~19（11 スパン 33.5 m）の外面に約 42 度で衝突され、1 階の中廊下まで破壊が及んでいる。外面と中廊下までの奥行き 67 m である。図-6 において、1 階の赤色および桃色の柱はいずれも完全崩壊して、飛散している。また、青色の柱は写真-2 に示すように、被りが取れて、大変形している。さらに、図-6 の右下の濃青部が、衝突後、約 20 分後に前述した写真-1 のように、全層崩壊した。濃青部左端の Col. line 11 はエキスパンジョイント部である。飛行機突入に直面したのは各柱であるが、その柱の断面は、図-7 に示すとおりである。柱の外形は正方形であるが、軸筋は円形断面に配され、それをスパイラル筋で巻いている。軸筋の上下端部での定着力は十分らしく、柱の破壊は、上下端での軸筋破断で起きている。文献 1) では、これら柱の衝撃力による破壊に至るまでの詳細な解析を展開するとともに、20 分後の部分破壊については、図-8 の降伏線と図-9 の飛行機燃料の燃焼に伴う室内温度の上昇曲線を仮定して、その現象の説明を試みている。

以上の解析により、次のような結論を導いている。

図-7 典型的な柱の詳細¹⁾

図-8 崩壊部分の降伏線解析¹⁾

(1) 衝突時の破壊について

飛行機の重量を m とし、衝突時の速度を v とすると、その運動エネルギー（破壊エネルギー）は $mv^2/2$ （文献5)) で表される。一方、破壊された柱一本のひずみエネルギーは、上下端部および柱中央に降伏ヒンジが出来ると仮定してその抵抗モーメントを M_u 、回転角を θ とすると、 $4M_u \times \theta$ で表される。柱以外に壁、梁、床スラブの分もあるが、飛行機突入に直面した柱の吸収エネルギーが大きなウェイトを占めるとしている。なお、衝突時の飛行機燃料の爆発とその後の火災も建物各所の破壊をより進展させたとしている。

(2) 20分後の部分崩壊

前述した図-8の降伏線により部分崩壊が起きるためには、衝突時の爆発および火災による熱により、はりおよび床のコンクリート被りが、全部取れていなければ、図-9の室内温度上昇曲線からは崩壊するわけがなく、ひずみクリープや、消火のための撒水による影響もあるとしており、結局のところ、衝突で破壊がほぼ決定されたとしている。

(3) まとめ

このような衝撃力に対して RC 造の被害を最小限に食

図-9 燃料密度に対する時間-温度曲線¹⁾

写真-3 外フレームと床トラスシステム²⁾

い止めるためには、1. スパイラルフープ柱が有効である。2. 梁、床スラブは全長にわたり複軸筋にする。3. 構造物の不静定次数を高める。などの提言が行われている。

4. 世界貿易センター建物全体崩壊の構造的調査概要

この建物の場合、広範囲で、長期にわたる調査を展開している NIST の各種調査プロジェクトのうち、文献2) の内容に基づいて、話を進める。

調査の焦点は、もちろん、WTC 1 と WTC 2 の建物である。この両棟について、写真-3 に建設時における一般階での様子を示す。外フレームへの床の取り付け方として最も重要な箇所での様子であるが、図-10 に示すように、3種の抵抗が設けられている。床ばり端部上部のガセット、水平ストラップ、およびコンクリート床の外フレームへのスタッドである。文献2) では、図-11 に示すように、このような外フレームと床との接合を前提に、外柱の安定性、床システムの水平座屈耐力および床と外フレームの接合耐力を比較し、結局、外柱の座屈が先行するとしている。また、図-12 に示すように、部屋の温度が通常の場合と 600°C の場合について、床が除去されると、柱の鉛直耐力が、どう低下するかを比較している。通常の場合、設計荷重の数倍もの安全率が設け

図-10(a) 外柱への水平拘束状態²⁾

図-10(b) 同拘束力²⁾

図-11 3水平力の相互比較²⁾

られているが、温度が上がると、床がなくなると急激に安全性が低下することがわかる。図-13は、コア柱の防火被覆の状態が部屋が加熱されている場合、600℃に達する時間が大きく変わることが示されている。

NIST 機関による WTC Tower についての調査研究は、まだ、進行中であるが、文献2)の上記結果を参考に、WTC 建物崩壊に及ぼす衝突による影響と爆発と火災による影響をまとめてみると以下のとおりとなる。

(1) 衝突時の影響

WTC 1 および WTC 2 は、それぞれ建物の全重量は約 50 万トン程度である。一方、飛行機の全重量は約 200 トン程度で、建物全重量に比べると、1000 分の 1 にもみえない。また、風圧力に対して、本建物は飛行機重量の数十倍の水平力に抵抗できるように設計されている。また、その日は風が特に強くなかった。さらに、上記の図-12に示されているように、常時荷重に対して外柱は数倍の安全率を有している。したがって、衝撃力によって、建物が、崩壊に至ったとは、考えにくい。

もちろん、衝突時に、建物外周の一つの面が、数階に

図-12 温度と床除去数の柱耐力に及ぼす影響²⁾

図-13(a) コア柱の防火被覆タイプ (仮定)²⁾

図-13(b) 同各 600℃ に至るまでの時間²⁾

わたって、斜めに切断されているが、他の柱の方へ応力が伝達されるので、この切断によって、直接、建物が崩壊に至ったとは、考えられない。

(2) 爆発と火災の影響

飛行機重量の 1/3 にあたる約数十トンの重油燃料が、衝突後、燃え出し、建物室内や飛行機内の諸々のものに火が移り、室内の温度が高まり、当該床や梁、そしてコア壁や外柱を強く熱していったに違いない。その場合、WTC 1 と WTC 2 の衝突後の火災による煙の色の違いからも明らかに、火災が継続するためには、酸素の供給が必要であって、WTC 1 の方は、不完全燃焼の様相を呈している。一方、WTC 2 の方は、衝突時に火の玉が発生し、その後、白煙が続いたように後者の方が、酸素の供給が続き、早期より火災の温度がより高かったに違いない。WTC 1 の場合、崩壊直前に爆発音が聞こえたとも言われており、それまで、不完全燃焼が続いたと思われる。

(3) まとめ

前述したように、NIST 機関における調査研究は、現在、進行中であり、まだ結論は出ていないようであるが、図-10～図-13に示されている事項を参考に現時点の知見をまとめてみる。超高層建物によく使用される Hull-

core 型は各層ごとの床システムが外フレーム柱の安定性を保っているが、室内で、爆発などにより、高温となり、それが続くと、床システムの膨張によって、外フレーム柱の安定性が崩れ、またそれが、柱と床の接合をはずし、結局、各層床がドミノ現象で落下していったのが、WTC Tower 両棟の全体崩壊であったと考えられている。もちろん、燃料爆発によって、瞬時に柱から、床がはずれた場合もあると考えられる。現在、NIST 機関は、WTC 7 の崩壊原因も調査中のようなのであるが、鉄骨造の場合、火災が数時間以上続くと、構造体自体が崩壊に至ることもあることを示しており、鋼材に対する十分な防火被覆がきわめて重要であることがわかる。

5. む す び

以上の両ケースを総合して考えてみると、鉄骨造の場合、火災による熱に対して十分な防火被覆がなされていないと、構造体自体が全体崩壊に至ることがあることは驚くべきことである。鋼材の熱伝導率はコンクリートに比べ、30 倍程度大きいのでこのことも両者の現象の違いと関係がある可能性がある。今後この点の検討も加えられてゆくものと思われる。将来、このような事件を2度と起こしてはならないことは、もちろんであるが、こ

の度の調査研究結果が、偶発的災害の防止にも役立ってくれることを期待したい。

謝 辞 冒頭で述べたように、本解説は、米国の調査結果の紹介であり、引用した図が多くある。各図の出典元は参考文献の項に示してある。当該学会、機関等に謝意を表したい。

あとがき

この建築物崩壊大事件によって、実に多くの人達の命が失われた。心から、ご冥福をお祈りいたします。

参 考 文 献

- 1) Paul. F. Mlakar, Donald O. Dusenberry, James R. Harris Gerald Haynes, Long T. Phan and Mete A. Sozen : The pentagon building performance report, ASCE Publication (ISBN 0-7844-0638-3) Jan. 2003
- 2) John Gross and Therese McAllister : Federal safety investigation of the WTC center disaster-Project 6 Structural fire response and collapse analysis, NIST Apr. 2004
- 3) Engineering News-Record Sep. 24, 2001 & Oct. 1, 2001
- 4) The city of New York and Urban Date Solutions : Damage report from the city of New York, CNN com Apr. 2004
- 5) G.C. Mays and P.D. Smith : Blast effects on buildings-design of buildings to optimize resistance to blast loading, Thomas Telford (ISBN 0-7277-2030-9)

≪図書案内≫

コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用

重要な構造物の設計においては、ポストピーク挙動に関する情報は必須と言っても良い。本書は、「コンクリート構造物のポストピーク挙動解析に関する研究委員会」(委員長：田辺忠顕 名古屋大学大学院教授) 4 年間の活動において、コンクリート構造物のポストピーク挙動に関して活発に議論した内容、特に、各種コンクリート構造物のポストピーク挙動、耐荷力とポストピーク挙動を予測するための最新の非線形解析手法、ポストピーク領域の設計への応用などについて、有用な成果をとりまとめたものである。

1. ポストピーク挙動評価の工学的意義
2. RC 構造物のポストピーク挙動に関する実験的検討
3. 材料レベルのポストピーク挙動とそのモデル化
4. ポストピーク領域の数値解析法
5. RC 構造物のポストピーク挙動の解析
6. 衝撃の問題に対するポストピーク解析の応用
7. ポストピーク挙動評価と設計への応用

参考文献

索引

B5 判・277 ページ (2003 年刊行) / 定価 10 500 円 (税込), 会員特価 9 450 円 (税込) / 送料 390 円

●申込先：(社) 日本コンクリート工学協会「書籍販売」係

〒102-0083 東京都千代田区麹町 1-7 相互半蔵門ビル 12 階 / 電話 (03) 3263-1573

〈申込方法〉 郵便振替 (振替口座：00120-5-99133・加入者名：社団法人日本コンクリート工学協会) にて払い込み・お申込み下さい。代金 (書籍代・送料合計) 受領次第お送りします (振替手数料は申込者にてご負担願います)。通信欄に書籍名・冊数・当協会会員の場合は会員番号を明記して下さい。ご依頼人欄 (お届け先) に郵便番号・住所・名称・担当者名・電話番号を必ず明記して下さい。送料は 1 冊分の金額ですので、2 冊以上お申込みの場合は、お問合せ下さい。