

NY世界貿易センタービル ～ 崩壊要因の解明に向けた数値解析～



ニューヨーク, グラウンド・ゼロ, 2006年6月

筑波大学 システム情報工学研究科
構造エネルギー工学専攻
計算・構造工学研究室
磯部大吾郎

研究概要

2001年9月の米国同時多発テロは、NY世界貿易センタービルWTC1, 2, 7が完全倒壊するという、建築史上未曾有の悲劇を引き起こした。NY世界貿易センタービルの崩壊に関しては、FEMA(2002年)やNIST(2005年)によって報告書がまとめられ、一応結論が出たかのように思われる。しかし、なぜ2棟(WTC7を含めれば3棟)とも完全に崩れ去ってしまったのか、また、なぜ自由落下するがごとく地上まで崩落してしまったのか、未だに数多くの疑問が残っている。我々は、これらの疑問に応えるべく、以下の4つのスタンスに立って数値解析的研究を実施している。

1. **大規模火災と崩壊現象との因果関係を調べる。**
(火災崩落解析プログラムを開発中、WTC全体モデルへの適用を検討)
2. **WTCの接合部強度と崩壊現象との因果関係を調べる。**
(部材接合強度を考慮した解析プログラムを開発、近日中にWTC全体モデルへ適用)
3. **飛行機衝突と崩壊現象との因果関係を調べる。**
(WTC1, 2の全体モデルに対する解析を実施)
4. **爆破解体された可能性を調べる。**
(爆破解体解析プログラムを開発、全体モデルへの適用を検討)

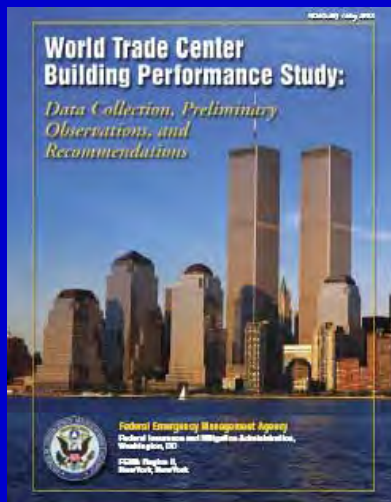
本資料では、飛行機衝突と崩壊現象との因果関係について調査した結果について記す。

世界貿易センタービル崩壊に対する見解 (FEMA, 2002)

World Trade Center Building Performance Study: Data Collection, Preliminary Observations, and Recommendations, Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2002

ASCEと共同で大規模な調査を展開。簡略な計算、観察結果から崩壊要因を推察。

「ジェット燃料が広範囲に広がり、これによって生じた火災によりダブルトラスが座屈、コア構造の耐力が衰退し、結果的に全体崩壊につながった。飛行機突入により甚大な被害を受けたのにも関わらず、一定の時間建ち続け何人もの命を救ったのはむしろ“remarkable”である。」



Initiation of Collapse (初期崩壊)

コア柱が火災により耐力を喪失し、床構造が部分崩壊。それに伴い、外周柱が座屈し、層全体が陥落。

Progression of Collapse (崩壊の進行)

もともと大きな位置エネルギーを有していたものが、初期崩壊により一気に運動エネルギーに変化し、衝突部周辺の構造を破壊した。破壊された床構造が上層部と一緒に、さらに大きなエネルギーを持ち、下層部を次々と破壊し、ついには完全崩壊に至った。

世界貿易センタービル崩壊に対する見解 (NIST, 2005)

Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2005

大規模な構造・流体連成解析, 火災解析を展開. 詳細な被害状況, ジェット燃料の拡散の様子, 火災延焼の様子などが克明に.

「フレームチューブ構造の冗長性と建物の大規模なサイズが, 飛行機突入直後の建物の全体崩壊を防いだ. 突入部から周辺への応力再配分が効率よく行われた. 特に建物最上部のハットラス構造が応力再配分に大きく寄与し, 早い時間帯での崩壊を防いだ. 崩壊に至るまでの時間は, 衝突被害状況と耐力を失った柱位置の相違によって変化した。」



Initiation of Collapse(初期崩壊)

火災の熱により外周柱が内部方向へ引っ張られ, 上層部を支えるための許容耐力が減少した. 外周柱が座屈すると, 周辺の柱も次々と限界耐力を越えた.

Progression of Collapse(崩壊の進行)

FEMA 報告書と同等の見解. 大規模火災が生じなければ, あるいは耐火被覆に被害がなければ崩壊は生じなかった可能性もある. 爆破解体やミサイル攻撃などを裏付ける証拠は発見されなかった(政府陰謀説に対する反論).

未だに残る疑問 (構造工学的観点から)

なぜ完全崩壊してしまったのか？

進行性崩壊時に落下部の質量が増大するとはいえ、周辺部に相当量の埃や構造物が散らばり、運動エネルギーに関わる質量は飽和したはずである。また、下層になるにつれ柱の強度が増したはずで、どこかの階層で持ち応えるか、少なくとも落下速度を抑えることができたのではないか。

なぜ崩壊速度は自由落下速度とほぼ同じだったのか？

ビデオ映像によると、WTC 1, 2, 7ともに自由落下速度とほぼ同じ速度で崩壊している。部材耐力が少しでも残っていれば、そこで運動エネルギーが費やされ、落下速度が減少するはずである。爆破解体説やミサイル攻撃説が未だに根強く残っているのは、この疑問が残っているからである。ちなみにFEMA, NISTの報告書ともにこの問題に関する見解は記されていない。

これらの疑問に対する諸説(ウワサ)、裏付ける証拠(とされているもの)など
燃料格納庫の存在(WTC 7)、上空を飛来するヘリコプターから発した閃光、WTC 1, 2の地階近辺で上がった白煙、時折聞こえた爆発音、崩壊時に立ち起こった噴煙の量、崩壊後数週間も収まらない熱, etc.

研究の目的

飛行機衝突と崩壊現象との因果関係を調べる。

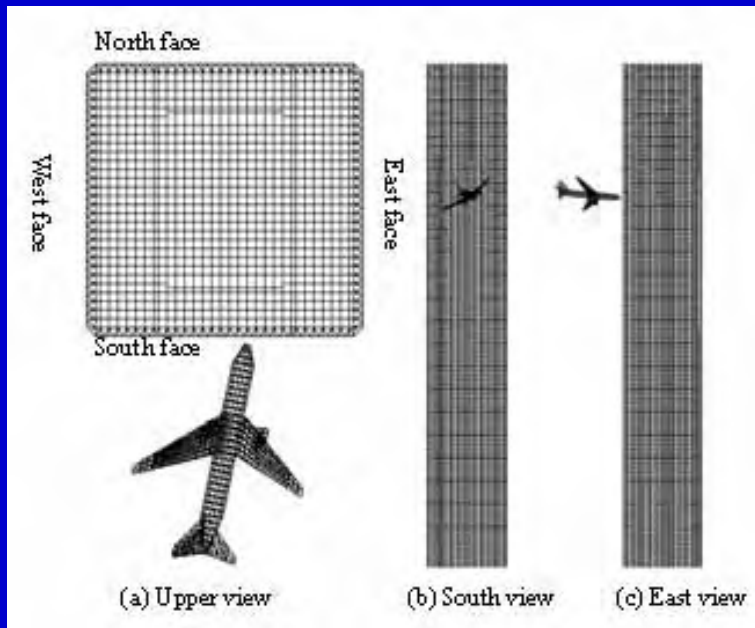
飛行機が衝突した瞬間に、建物に想定外の衝撃的応力変化が生じ、構造強度を著しく減退させた可能性がある。特に、コア構造の接合部の破壊につながる引張力が発生した疑いがある。全体モデルを用いた飛行機衝突解析により建物の応力状態の動的な変化を追い、衝突の瞬間に建物が受けた構造的ダメージについて調査する。



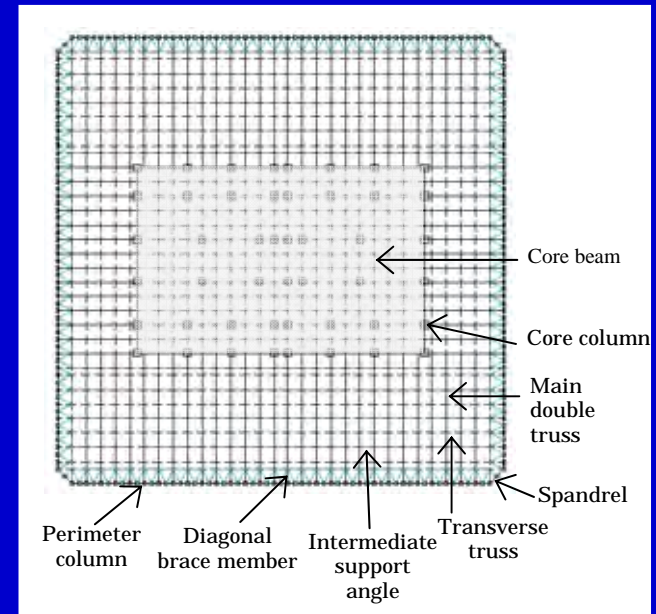
NIST, 2005

飛行機衝突解析 のモデルと解析条件

- Initial velocity of aircraft = 262 m/s, mass = 142.5 t
- Implicit scheme (Newmark's β method) used
- Numerical damping ($\delta=5/6$, $\beta=4/9$) applied
- Updated Lagrangian Formulation used
- Conjugate Gradient scheme used as solver
- Time increment = 0.2 ms (actual time 0.8 s)
- ASI-Gauss technique applied



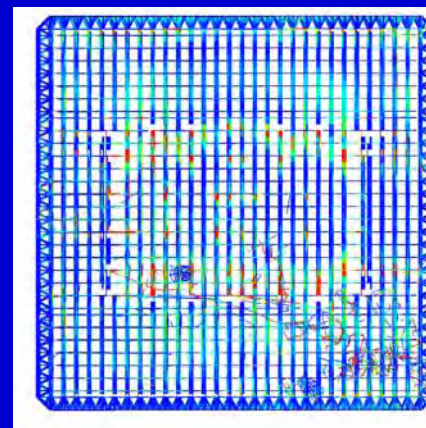
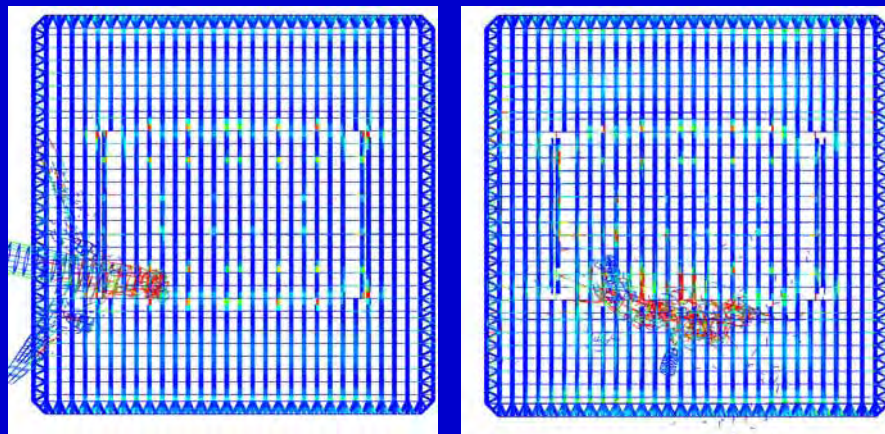
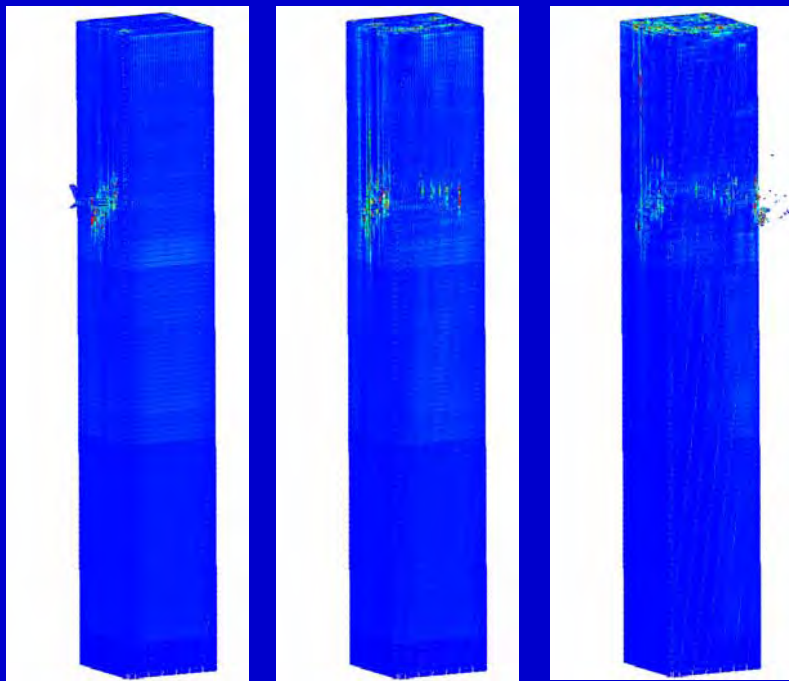
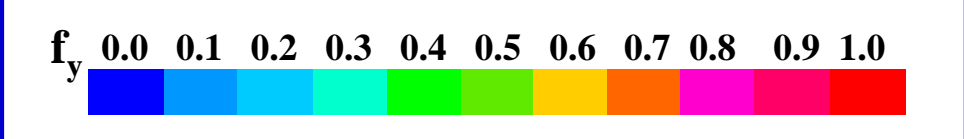
WTC2と飛行機のモデル



WTC1, 2の断面構造

解析結果 (WTC 2)

応力の強さ



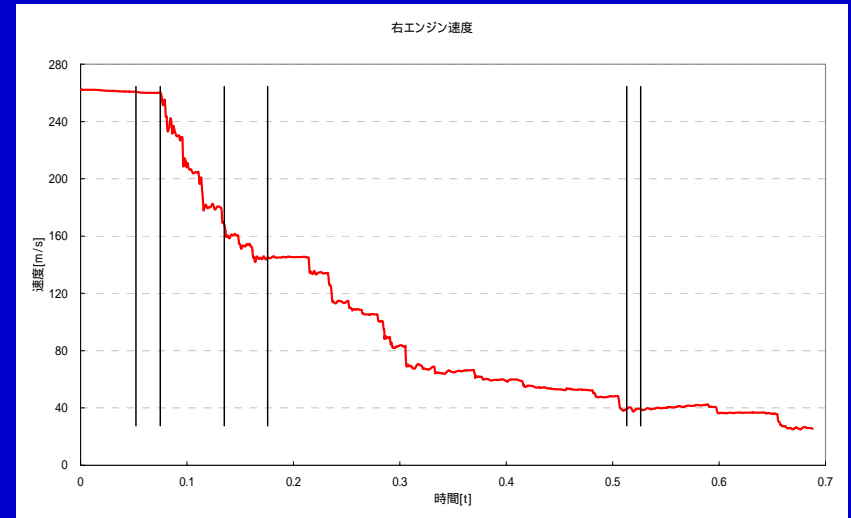
全体図

機体とエンジンの動き

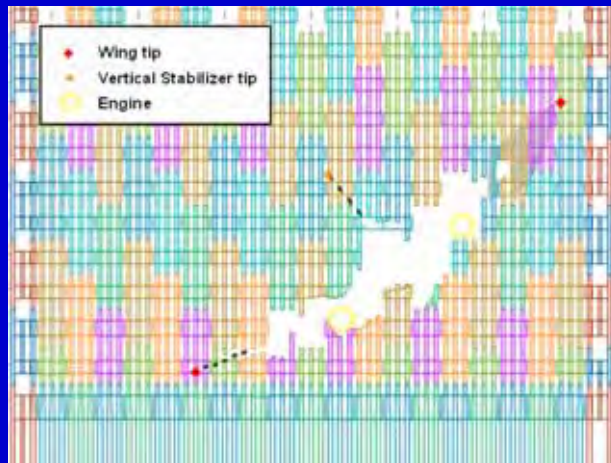
機体の動きと被害状況

| 時刻 | 機体の部位 | | |
|-------|-----------|--------------|---------|
| | 左エンジン | 右エンジン | 機首 |
| 0 | 機首が外周壁に接触 | | |
| 0.048 | | | コア構造に接触 |
| 0.072 | 外周壁に接触 | | |
| 0.076 | | 外周壁に接触 | |
| 0.128 | コア構造に接触 | | |
| 0.168 | 柱902に接触 | | |
| 0.504 | 柱903に接触 | | |
| 0.512 | | 進行方向右の外周壁に接触 | |

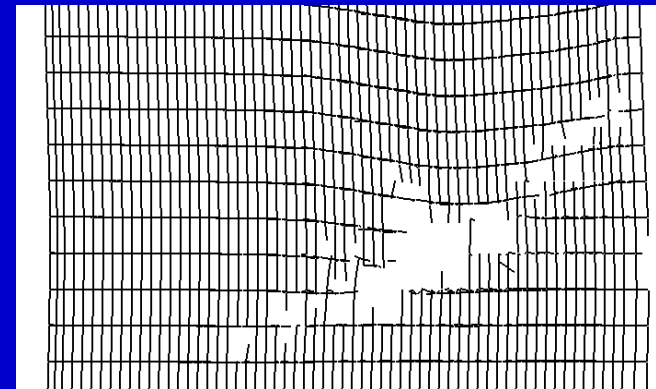
機体の衝突タイムライン



右エンジン速度の時刻歴

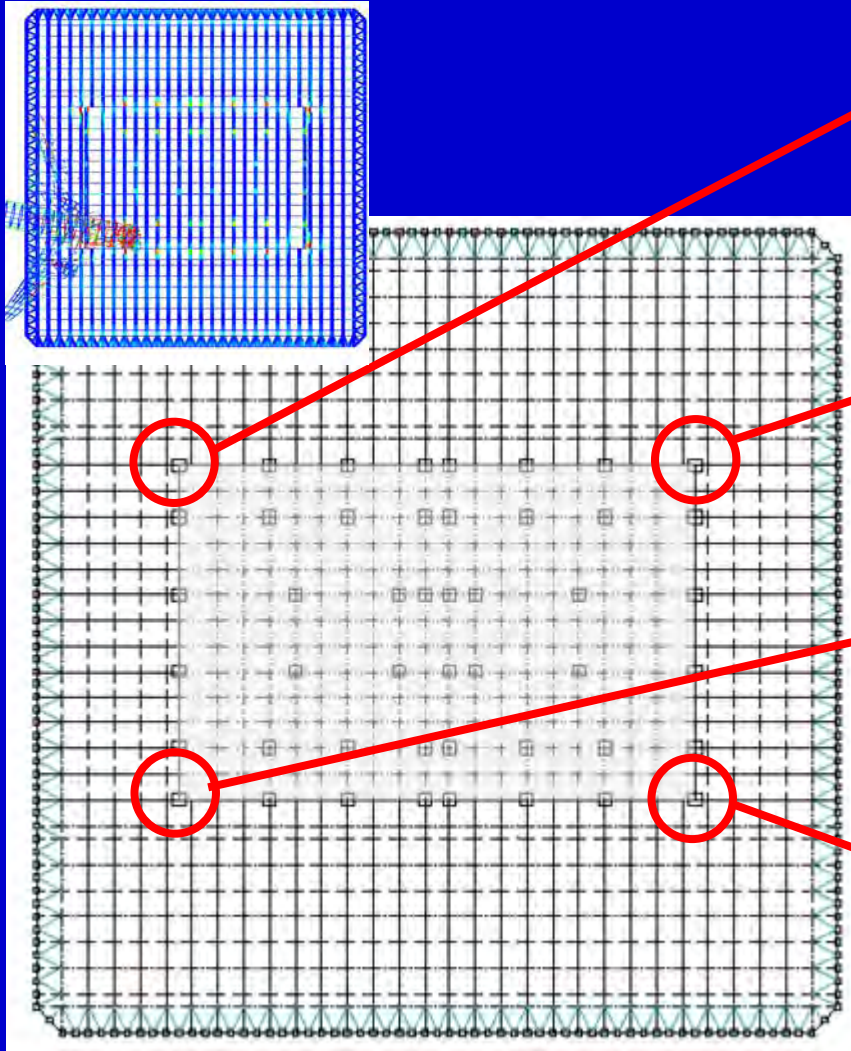


WTC2南面の被害状況 (観測結果, NIST)

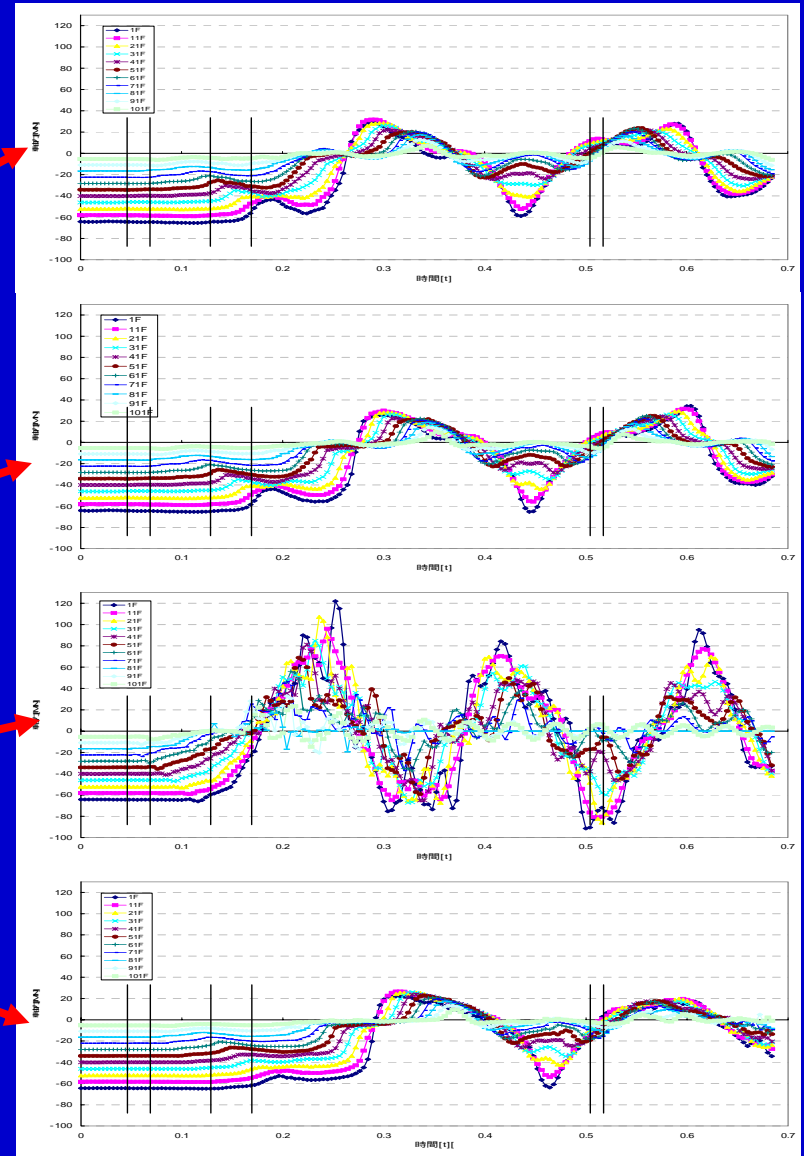


WTC2南面の被害状況 (解析結果)

柱軸力の推移



コア柱位置

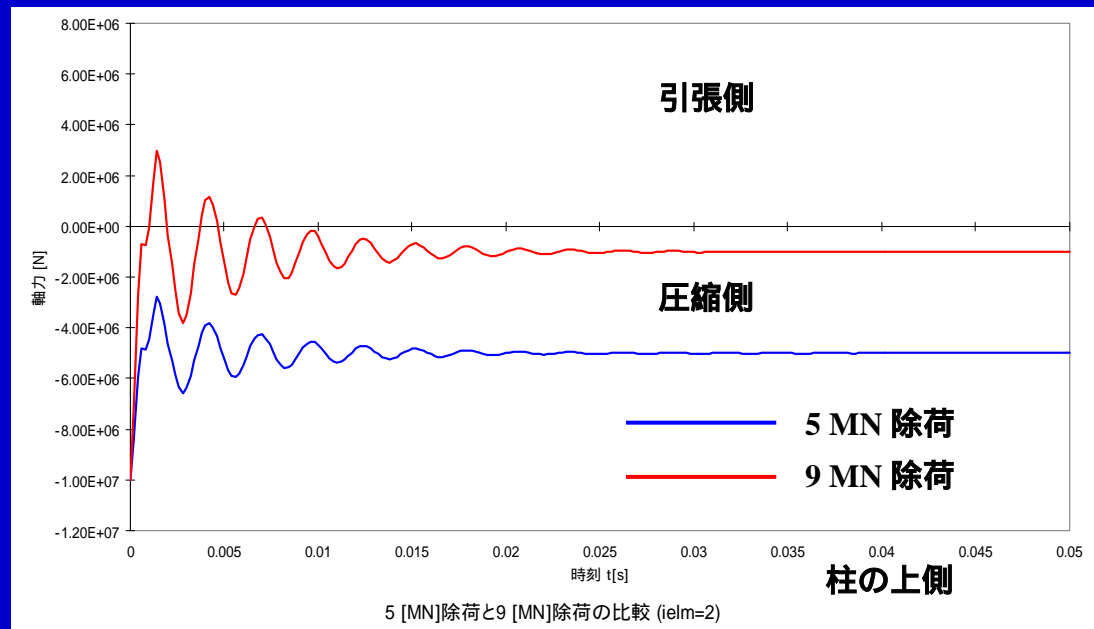
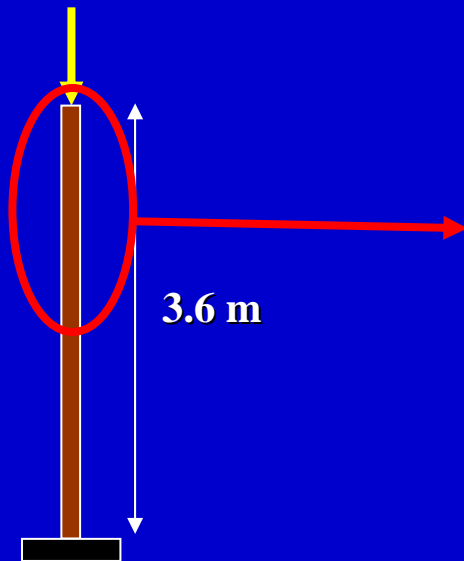


コア柱(四隅)の軸力推移

なぜ柱に引張力が生じたのか？(1)

圧縮力が作用している柱に対し、その力を静かに緩めると、軸力は引張方向に転じることはない。ところが、瞬間的に圧縮力を緩めると柱はバネのように伸び上がり、緩める量によっては軸力が引張方向に転じる場合がある。

10 MN 5, 9 MN 除荷

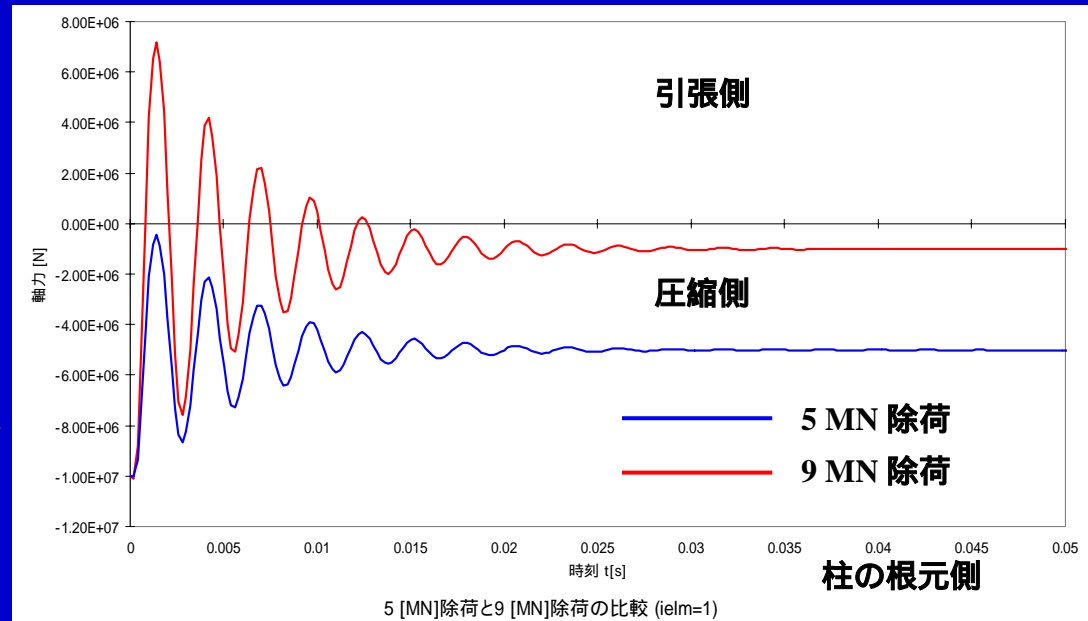
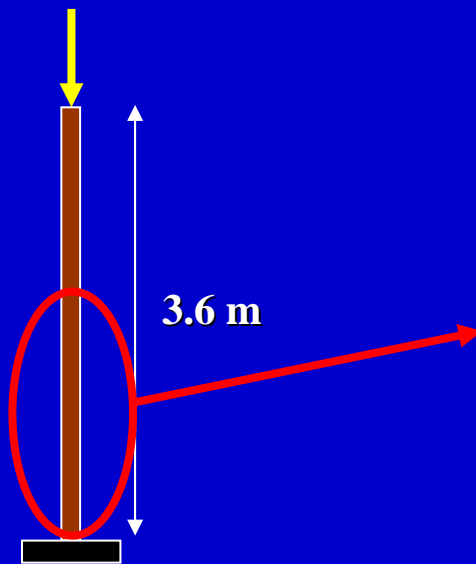


圧縮力がかかった柱から荷重を瞬時に取り除いた場合の軸力推移

なぜ柱に引張力が生じたのか？(2)

しかもその場合、柱(バネ)の根元側には、より大きな引張力が作用する。

10 MN 5, 9 MN 除荷

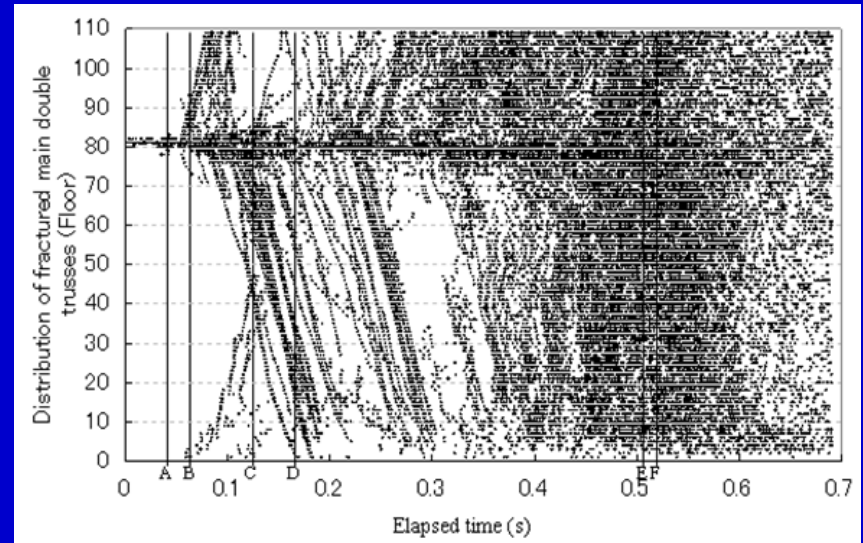


圧縮力がかかった柱から荷重を瞬時に取り除いた場合の軸力推移

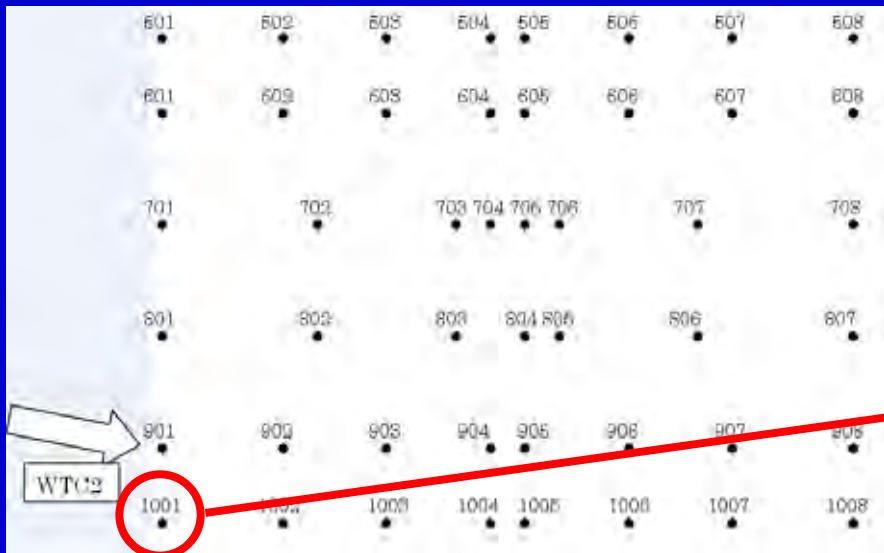
設計段階では引張力がコア柱に作用することは想定されておらず、これが接合部の脆弱な柱に対し作用したとすると、致命的な構造的欠陥を発生させた可能性がある。特に下層部では引張力の作用が大きかったため、ダメージも大きかったことが予想される。

なぜ引張力はこんなに大きいのか？

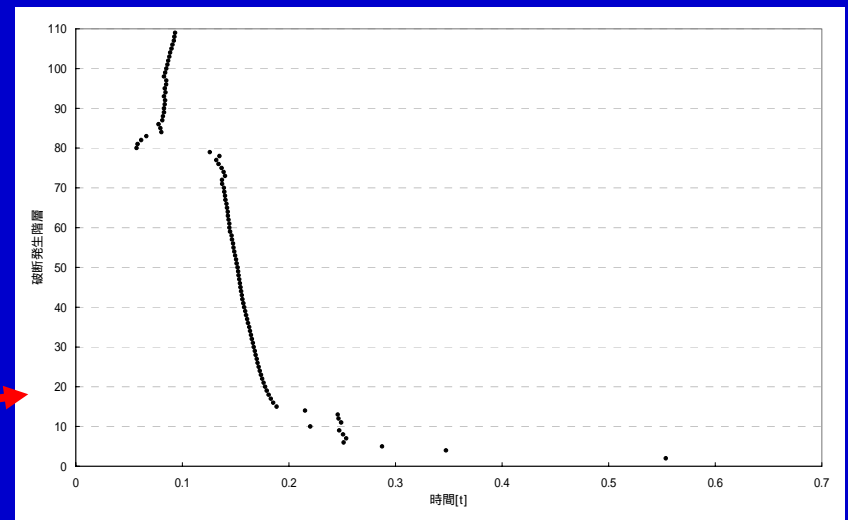
飛行機の衝突階から上層階，下層階へ向けて次々とダブルトラスの破断が進行している．時には屋上や1階で他の柱に衝撃波が反射し，ダブルトラスの破断が伝播している様子が観察できる．床荷重を支えていたコア柱が何本も瞬時に解放されたものと思われる．



ダブルトラス破断発生階層

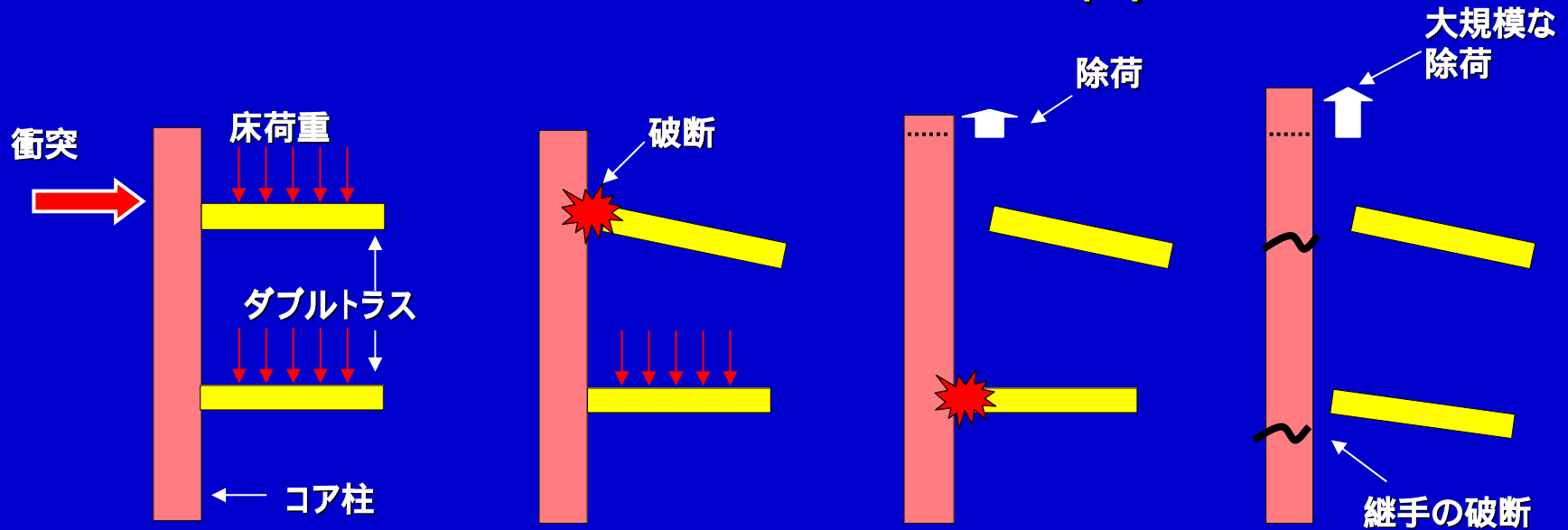


コア柱位置



コア柱に接合されたダブルトラスの破断発生時刻歴

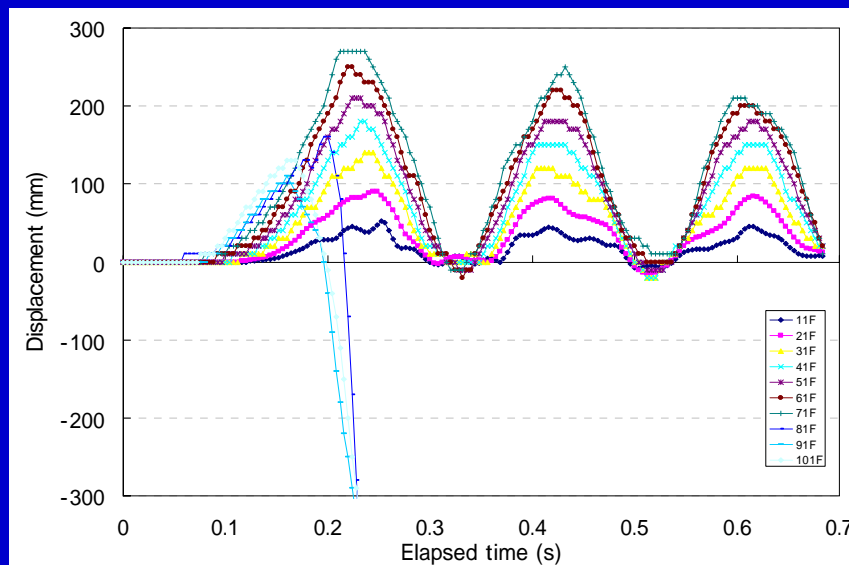
スプリングバック説(1)



接合部破壊の連鎖反応

飛行機の衝突に伴う衝撃力が各階層のダブルトラスの接合部を破壊し、コア柱に除荷を生じさせた。コア柱がそれに伴って変形し、連鎖反应的に他のダブルトラスとの接合部を破壊した。コア柱に対する床荷重の作用が瞬時に無くなったため、コア柱がバネのように伸び上がり(スプリングバック現象)、そこに想定外の引張力が生じた。その結果、多くのコア柱で継手が破壊された可能性がある。

スプリングバック説(2)



スプリングバック現象により発生した軸方向変位(コア柱No.1001)

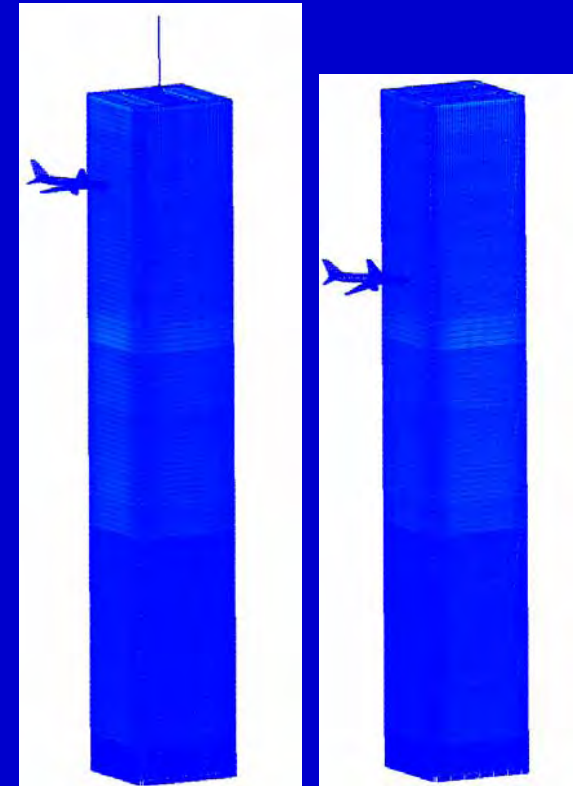
飛行機の衝突直後、60階付近のあるコア柱では、0.2秒の間に25cmの上下動があったと計算された。このことは、激しい突き上げによって椅子から振り落とされた、などという証言ともよく合致する。

結論と提言

飛行機の衝突により、WTCタワーを実質的に支えていたコア構造の柱継手に、致命的なダメージが生じてしまった可能性が高い。引張力が大きく作用した下層部では特にダメージが大きく、広範囲で柱継手が破壊されていたものと思われる。継手が破壊された柱は下の柱にただ載っかっている状態となり、きっかけがあればいつでも倒壊してしまう状態となった。そこへ、衝突部付近で火災により柱が座屈し、上層部が落下した。主な柱の継手が破壊されている下層部は抵抗することもできず、そのまま完全崩壊へとつながってしまった。

テロの標的となりそうな重要構造物(特に高層建築)に対しては、柱 - はり接合部、柱継手の強度を高めること、および衝撃波を伝播させないための対策を講じる必要があるものと思われる。

ちなみに日本の高層建築物は、耐震設計されているために接合部の強度が高く、上記の現象は起こりにくいものと思われる。



WTC 1

WTC 2