

(24) 鉄筋コンクリート高層建物への航空機衝突による 衝撃荷重に対する応答特性

RESPONSE CHARACTERISTICS OF HIGH RISE REINFORCED CONCRETE BUILDING
SUBJECTED TO IMPACT LOAD DUE TO COLLISION OF AIRCRAFT

桑原高久*, 河西良幸**, 王国璽***

Takahisa Kuwabara, Yoshiyuki Kasai, Gouxu Wang

* 修士 (工学), 株式会社アルテス (〒100-6006 東京都千代田区霞ヶ関3-2-5 霞ヶ関ビル6階)

** 工博 前橋工科大学教授, 大学院工学研究科建築学専攻 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1)

*** 修士 (工学), 鹿島 (上海) 工程有限公司 (上海市徐匯区汾陽路77号 安盛商務楼6F)

キーワード: 鉄筋コンクリート建物, 航空機衝突, 衝撃荷重, 衝撃応答
(Reinforced concrete building, Collision of aircraft, Impact load, Impact response)

1. はじめに

河西・王・桑原の検討¹⁾では、耐震設計がなされた鉄筋コンクリート(以下RCと称する。)造20階建ての建物(図-1、2参照)にセスナ機が衝突した場合(質量 $m=3.8t$ 、衝突速度 $v=111m/s$)について建物の全体応答を把握した。その検討によると衝突による建物の応答は、レベル2の設計用地震による応答に比べ1/10から1/30程度で崩壊に至るレベルではないことが分かった。

しかし、実際には小型機だけでなく中規模、例えば質量20t程度の航空機が建物に衝突する事故も起こっている。高層建物への航空機の過去の衝突事例²⁾としては、1945年7月に米国のエンパイアステートビルの78階にB25爆撃機の衝突事故がある。機体は建物を通り、衝突によりビルには20ft(6m)の孔があいたが、層崩壊には至っていない。また、オランダのアムステルダム近郊ではボーイング747が高層アパートに墜落し、乗員3名、乗客1名、アパートの住民47名が死亡している。

一般建物の事例としては、1968年6月に米空軍のF4機が九州大学の大型電子計算センターに墜落炎上した事故が知られている。近くの米軍板付基地に着陸しようとした事故で、日曜日の夜の事故で死傷者はいなかったとのことである。

このように中規模の航空機が建物へ衝突することは十分に考えられ、その際の建物の安全性の検討が必要である。

2. 本検討の目的

本検討では衝突実験データのある戦闘機のF4ファントム³⁾(以下F4機と記す。)が滑空状態で当該建物に衝突した場合(質量 $m=19t$ 、衝突速度 $v=150m/s$ 、運動量 $mv=2,850t\cdot m/s$ でセスナ機の6.8倍の mv)、どのような応答特性を示すかの検討を行う。なお、衝突時に燃料による火災の発生も考えられるが、本検討では建物の全体的な挙動に着目するため、火災の影響は考慮しないこととする。

3. 検討方法

(1) 衝撃解析を行う前に、衝突床位置(図-2参照、以

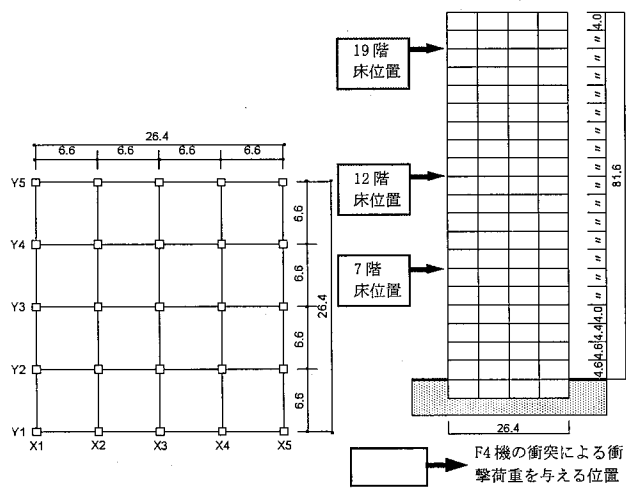


図-1 平面図(単位:m)

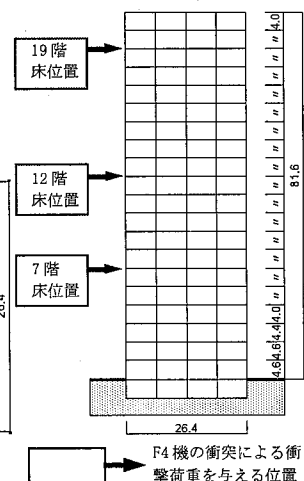


図-2 軸組図(単位:m)

下衝突階と記す。)の各々に集中荷重を与えて静的漸増解析(以下プッシュオーバー解析と称する。)を行い、航空機衝突のような集中荷重による建物の水平変位及び保有水平耐力などを把握する。

- (2) F4機が、当該建物に衝突した際の衝撃荷重を与えて、SNAP⁴⁾による時刻歴弾塑性応答解析を行い、建物の衝撃応答特性を把握する。

4. 対象建物とその静的特性

4.1 建物の概要

対象建物は、文献¹⁾の建物と同じ20階のRC造建物とし、基準階平面を図-1に、軸組図を図-2に示す。総重量は218MNである。建物の弾性時固有周期を表-1に示す。本建物はレベル2の設計用地震に対し層間変形角1/100以下に収まり、日本の耐震設計基準を満足している。解析は、文献¹⁾に示したように建物を立体モデル化し、建物を構成する柱及び梁の各々の部材ごとに弾塑性の復元力特性を与えた弾塑性部材モデルとする。

表-1 弾性時固有周期

次数	1	2	3	4	5	6	7
固有周期(s)	1.507	0.539	0.312	0.219	0.167	0.146	0.134

4.2 建物の静的特性

衝突階(図-2参照)の各々に集中荷重を与えてプッシュオーバー解析を行い、衝突階の下階の荷重 Q と層間変位 δ を求め、集中荷重による建物の水平変位及び保有水平耐力などを把握した。図-3にプッシュオーバー解析結果を、図-5(a)には柱のせん断破壊が始めて生じた保有水平耐力 Q_u 時(図-3の黒丸に示す)の水平変位分布を示す。黒丸以降の破線は、後の応答結果を解釈する上での参考として、せん断耐力を仮に7割に低減させて計算したもので、曲げの崩壊機構ないし層間変形角1/100に達した時に荷重を終了している。ちなみに地震荷重分布によるプッシュオーバー解析結果を図-4、図-5(b)に示す。図-4の地震荷重分布の場合には、最大層間変形角1/100まで計算したものである。

図-3には、後述の衝撃荷重のピーク値48.2MN(図-6参照)を記したが、各衝突階の下階の保有水平耐力 Q_u は25~30MN程度で、ピーク値48.2MNのおよそ半分程度である。図-5(a)の水平変位分布も塑性化の進展によって載荷床の下階で大きく変位する結果となっており、地震荷重分布による正弦波状の水平変位分布(図-5(b)参照)とは大きく異なっている。

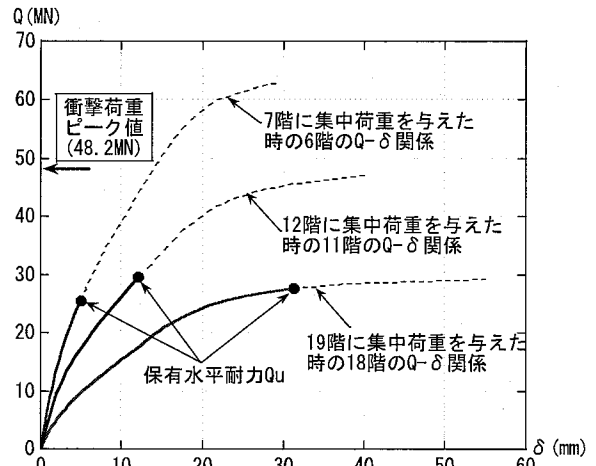


図-3 集中荷重によるプッシュオーバー解析結果

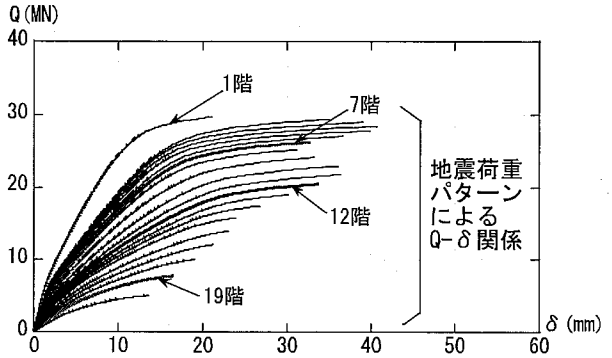
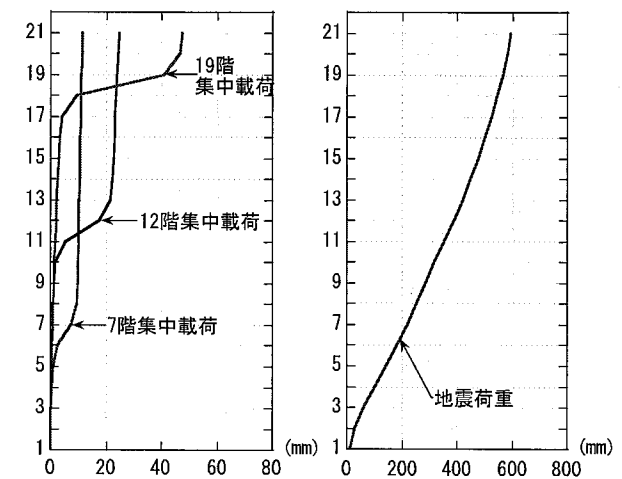


図-4 地震荷重によるプッシュオーバー解析結果



(a) 集中荷重(図3黒丸時) (b) 地震荷重
図-5 プッシュオーバー解析による水平変位

5. 衝撃応答解析

5.1 F4機衝撃荷重の設定

(1) F4機の基本データ

想定した機体のデータ³⁾は、全幅約12m、全長約18m、全高約5m、質量19t(燃料含む)で、衝突実験時の条件によっている。衝突速度は150m/s、100m/s、50m/sの3レベルを想定した。最大の150m/sはF4機程度の大きさの航空機が滑空状態で飛行することを想定して定めたものである。

他の2レベルは、150m/sの2/3、1/3と設定した。

(2) F4機衝撃荷重の算定

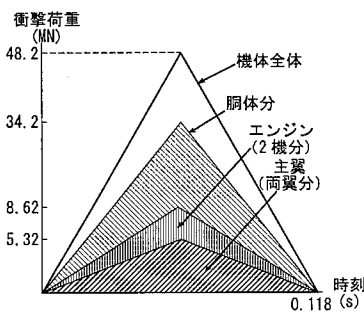
衝撃荷重時刻歴の形状⁵⁾は、航空機の質量分布に対応すると考え、ここでは三角形分布とし、衝突時の継続時間 $\tau=L/v$ (L :航空機の全長、 v :衝突速度)、衝撃荷重のピーク値 $F=2mv/\tau$ (m :航空機の質量)よりF4機の衝撃荷重のピーク値 F と継続時間 τ を算定し表—2に、また衝突速度150m/sの場合の衝撃荷重を図—6に示す。各部分の質量は主翼2.1t、エンジン3.4t、胴体13.5t(燃料含む)で、参考までに衝撃荷重に占める割合を示すと図—6のようになる。F4機の150m/s時のピーク値48.2MNは、セスナ機の解析¹⁾の衝突速度111m/s時のピーク値7.8MNの6.2倍である。衝撃応答にとって重要な運動量 mv でみると、今回のF4機の場合 $mv=2,850t\cdot m/s$ でセスナ機の $mv=422t\cdot m/s$ の6.8倍である。

表—2 衝突条件と衝撃荷重

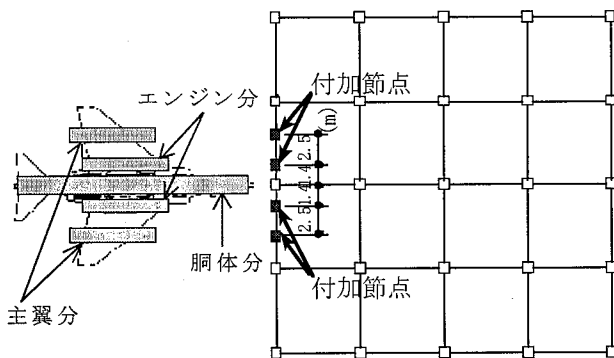
	衝突条件			衝撃荷重	
	質量 m (t)	速度 v (m/s)	長さ L (m)	τ (s)	ピーク値 F (MN)
F4機	19	50	17.74	0.355	5.36
		100		0.177	21.4
		150		0.118	48.2

5.2 衝撃荷重の入力

F4機が建物の19階、12階、7階の各々3ヶ所の正面の床位置に直角に衝突する場合(図—7参照)を想定し、1次周期の減衰定数として3%を与えて、時刻歴の三角荷重を部材モデルの節点に与えた。



図—6 衝突速度150m/sの衝撃荷重



図—7 衝撃荷重作用点

5.3 解析結果

図—6の衝撃荷重を時々刻々に作用させて10秒まで解析したところ、集中荷重による保有水平耐力(図

—3参照)がピーク荷重の48.2MNの半分程度であるにもかかわらず、曲げ降伏に達する部材は一部発生したが、せん断破壊する部材はなかった。したがって層崩壊することではなく、F4機の運動量が全て載荷点において建物に伝達されて、建物は全体応答することとなった。これらの衝撃応答の分析については5.4に後述する。

衝撃応答解析結果のうち、応答最大加速度、応答最大水平変位、応答最大転倒モーメント、応答最大層せん断力及び応答最大層間変位を図—8~12に示す。図中の応答値を指す数字は衝突階—衝突速度m/sを示す。また、設計用地震4波の応答最大値¹⁾の平均も追記している。

衝突速度が150m/sで19階に衝突した場合の衝突階の下階の層せん断力(各層柱のせん断力の合計から算出)と層間変位関係、時刻歴層せん断力波形、時刻歴層間変位波形を図—13~15に示す。図—14~15にはセスナ機の場合の結果(衝撃荷重のピーク値7.8MN、継続時間0.108s)も示している。床応答加速度スペクトルを図—16に示す。参考までに図—16には文献¹⁾に示した設計用地震4波による床応答加速度スペクトルの平均値を追記している。

- (1) 応答最大加速度(図—8参照)は衝突階で最大となり、衝突階が高いほど衝突位置の応答最大加速度が大きくなっている。セスナ機の場合¹⁾の約8倍である。
- (2) 応答最大水平変位(図—9参照)は19階衝突時の最上階で最大変位が110mmであり、セスナ機¹⁾の場合の約10倍であるが、地震時の最大値¹⁾と比較すると約1/4である。最大転倒モーメント(図—10参照)は1階でセスナ機の場合の約4倍になっているが、地震時の1/2.4である。
- (3) 応答最大層せん断力(図—11参照)は衝突階の下階で大きな値を生じているが、その値は衝突する階によらずほぼ同程度である。また、最大値はセスナ機の5.7倍となる。ただし、19階衝突時の場合には、地震時を上回る部分もある。また建物下部でも比較的大きな層せん断力を生じているが、5.4に後述するように残留応答⁶⁾と呼ぶ自由振動によるものである。
- (4) 応答最大層間変位(図—12参照)は、19階衝突時に最大14mmに達している。セスナ機の場合では、最大で1.4mmでありその10倍であるが、層間変形角は1/100(40mm)には達していない。また、地震時の最大29mmの約1/2である。
- (5) 衝撃荷重時の層せん断力波形(図—14参照)と層間変位波形(図—15参照)によると、載荷後0.08~0.09sで一気に(図—13の大きなループ参照)

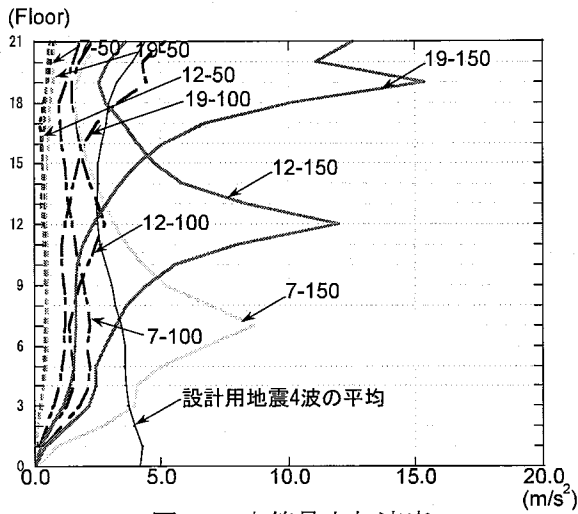


図-8 応答最大加速度

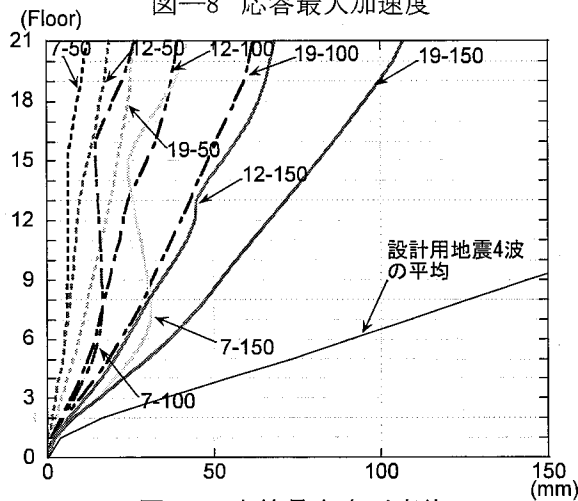


図-9 応答最大水平変位

最大値に達し、その後は建物の高次周期を伴いながら1次周期が卓越(後述の図-17 参照)している。

- (6) 19階衝突時の19階での床応答加速度スペクトル(図-16 参照)を見ると0.12sの波形成分が非常に卓越していることが分かる。0.12sのピーク値3100Galはセスナ機の場合に比べて約6倍である。地震の場合(図-16の設計用地震4波の平均参照)の短周期(0.6s)のピーク値(平均で約1100Gal)に比べて非常に大きい。0.12s以外の周期では地震の場合に比べて数分の一である。0.12sのピークについては、5.4(4)に後述する。

以上の結果をまとめると、F4機(150m/s)による衝撃応答はセスナ機(111m/s)の場合に比べて4~10倍で、設計用地震の応答に比べるとせん断力が部分的に超える場合もあるが、概ね1/2~1/4であった。

5.4 衝撃応答の分析

本節では衝撃応答特性の考察を行う。

19階衝突時の19階、12階及び7階の基礎位置からの水平変位の時刻歴波形を図-17に示す。19階衝突時の19階及び12階の水平変位(図-17 参照)の時

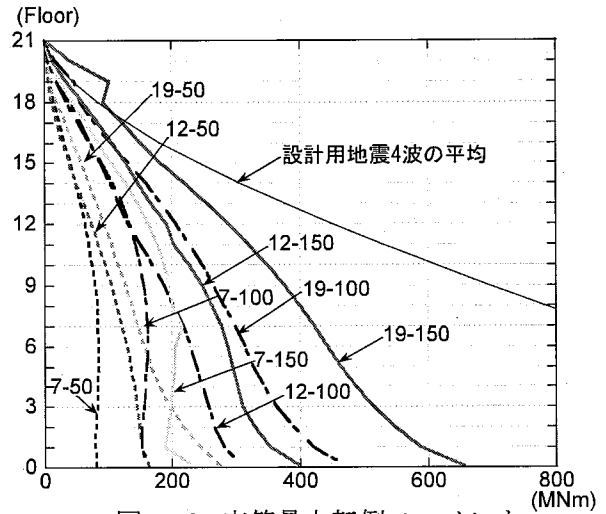


図-10 応答最大転倒モーメント

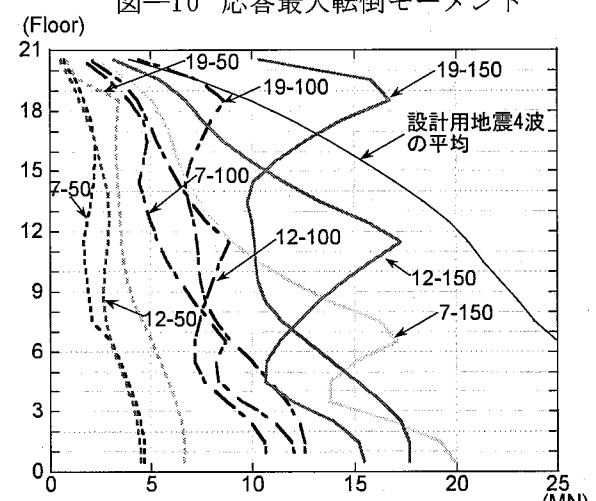


図-11 応答最大層せん断力

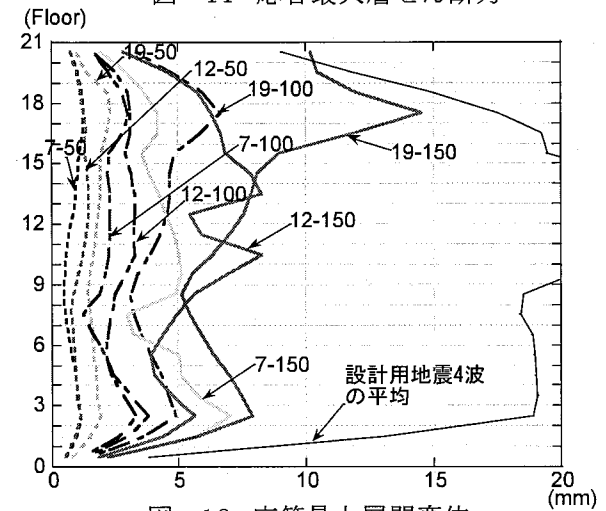


図-12 応答最大層間変位

刻歴波形の時間軸を拡大して図-18に示す。また、19階衝突時の下階(18階)の層間変位(図-15 参照)及び19階衝突時の11階の層間変位の時刻歴波形の時間軸を拡大して図-19に示す。

- (1) 19階の水平変位(図-17 参照)は、0.45sで最大100mmを生じ、その後は1.5sの卓越周期の自由振動を示している。衝突した19階のみでなく、他の12階、7階もほぼ同じ自由振動の波形形状

を示している。このことは、図-9に示した応答最大水平変位は、衝撃荷重が作用した瞬間ではなく衝撃荷重の作用終了後(時刻0.118s)、0.33s(≒0.45s-0.118s)経過して、残留応答、即ち、自由振動によって発生していることが分かる。

- (2) 水平変位波形と層間変位波形の時間軸拡大図(各々図-18、19参照)を見ると、19階衝突時の下階(18階)の層間変位波形(図-19参照)は、0.094sないし0.24sで最大値を生じているが、19階の水平変位波形(図-18参照)はかなり遅れて0.45sで生じている。一方、19階衝突時の12階の水平変位波形(図-18参照)は、19階衝突時の下階(18階)の層間変位が最大値を生じている時刻(図-19の0.094~0.24s)では、わずかな水平変位しか生じておらず、0.55s(図-18参照)で最大変位を生じている。解析結果のアニメーション映像によると0.094sでは衝突階から下階は図-5(a)の19階の集中載荷時に近い水平変位分布であるが、0.45sでは図-5(b)に示す地震荷重時に近い水平変位分布に変化している。したがって、図-11に示す層せん断力の最大値分布は、図-20の模式図に示すように衝撃荷重載荷直後(0.12s)の衝突階近傍の層せん断力の最大値と、荷重終了後に生じた残留応答による自由振動によって生じた、その他の階の層せん断力の包絡によって決まっていると解釈できる。また、同様に図-12の最大層間変位の分布も衝撃荷重載荷階の最大層間変位と残留応答時の最大層間変位の包絡で決まっていると言える。

- (3) 三角形状の衝撃荷重の継続時間 τ と1質点系の弾性固有周期 T の比 τ/T と、衝撃応答最大変位 X_m の関係を示すと図-21のようになる。ここで、縦軸は衝撃荷重のピーク値 F を静的に作用させた場合の変位 X_s で衝撃応答最大変位 X_m を割った衝撃倍率 ϕ として示し、横軸は文献⁶⁾にならって τ/T で示した。本建物の場合、 $\tau=0.118s$ 、図-17と図-16の床応答加速度スペクトルのピーク値からみて等価な1次周期 T_1 は1.53sであるから、 $\tau/T_1=0.08(1/12.5)$ となり、図-21中に示すように ϕ が0.3程度となる。このことから、衝撃荷重載荷時には保有水平耐力25~30MN(図-3及び図11参照)には達しないと考えられる。なお、最初の半波の周期1.1sが後続の自由振動周期1.5sより長くなるのは、文献⁶⁾の衝撃荷重の形状と応答波形の関係(図4.3)に見るように衝撃応答特有の現象である。

- (4) 床応答加速度スペクトル(図-16参照)の0.12sでのピーク値が非常に大きいことに関しては、

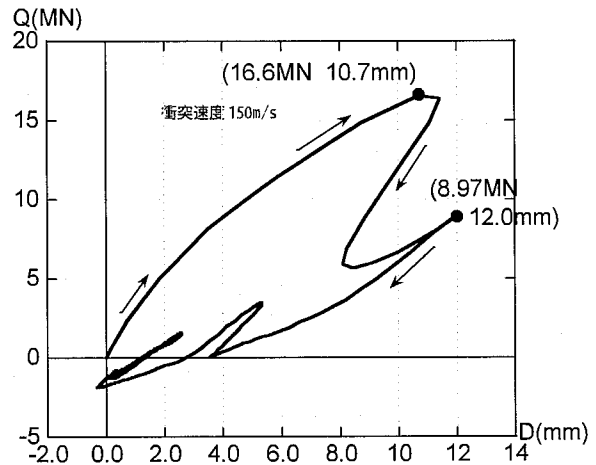


図-13 19階衝突時の18階の層せん断力-層間変位関係

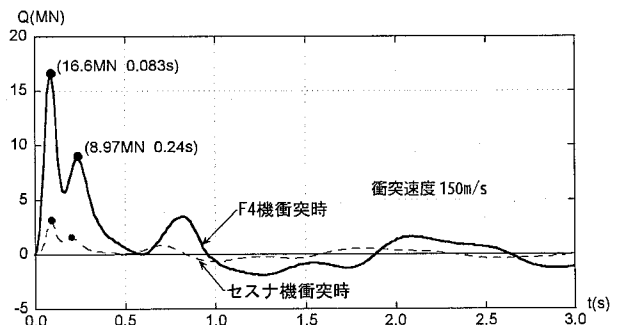


図-14 19階衝突時の18階の層せん断力波形

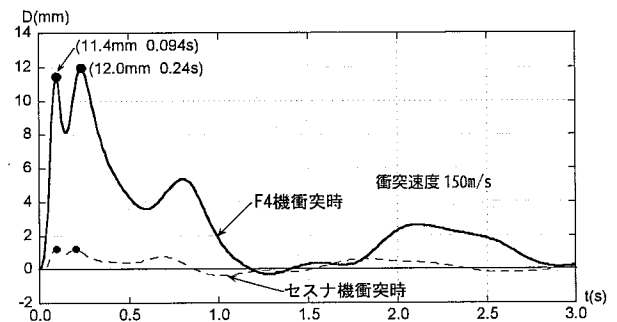


図-15 19階衝突時の18階の層間変位波形

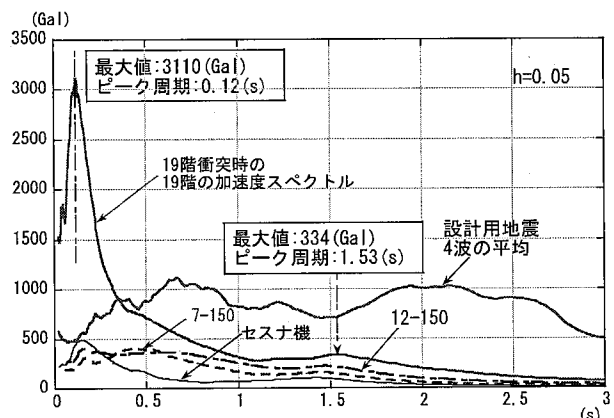
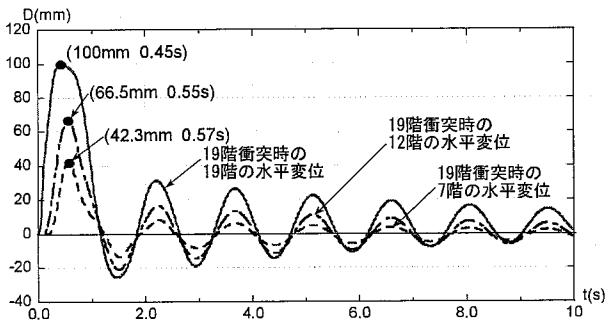
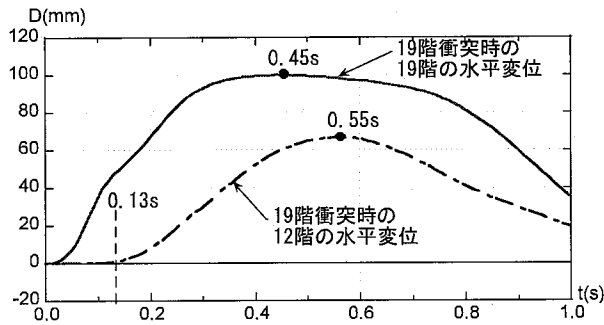


図-16 19階の床応答加速度スペクトル(速度150m/sで19階衝突時と地震時)

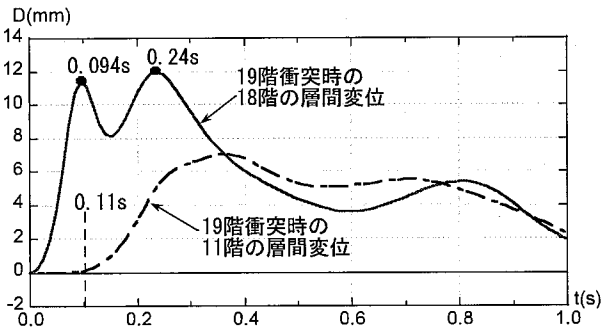
衝撃荷重の継続時間 $\tau=0.118s$ と建物の5次固有周期 $T_5=0.167s$ (表-1参照)が $\tau/T_5=0.70$ の関係にあり、図-21から見て、5次振動が非常に増



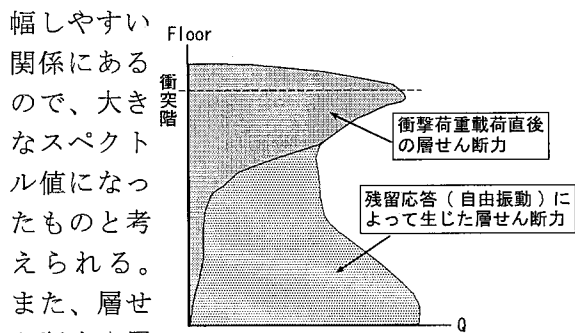
図一17 19階衝突時の19、12、7階の水平変位波形(速度150m/sで19階衝突時)



図一18 19階衝突時の19、12階の水平変位波形(速度150m/sで19階衝突時)

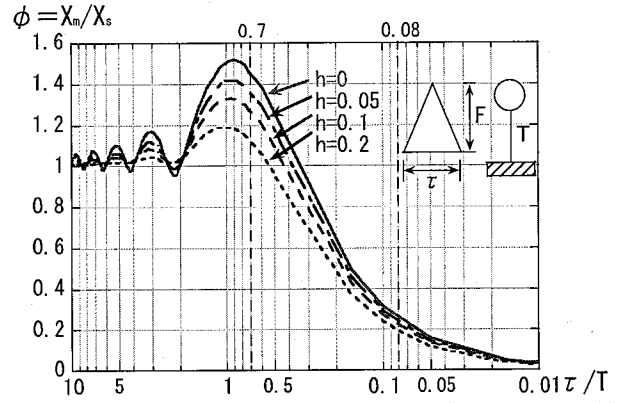


図一19 19階衝突時の18、11階の層間変位波形(速度150m/sで19階衝突時)



図一20 応答最大層せん断力の模式図

幅しやすい関係にあるので、大きなスペクトル値になったものと考えられる。また、層せん断力や層間変位の時刻歴波形(図一14～15参照)の初期に現れる2つのピーク(●で示す)は、その5次振動が1次振動に重なって生じたものであり、1次振動のみの衝撃応答に比べてやや大きくなったと考えられる。また、図一13の層せん断力-層間変位の関係を見ても、高次振動が関与していることが分かる。



図一21 三角荷重による1質点モデルの弾性応答

6. まとめ

以上の結果をまとめると、F4機による衝撃応答はセスナ機の場合に比べて4～10倍で、F4機衝突の条件(質量19t、衝突速度150m/s)では、本建物が層崩壊に至ることはないと判断される。

本報告では、建物の全体の応答に着目したが、航空機衝突時の局所的な損傷も重要である。そのため、建物とF4機を有限要素にモデル化し、F4機そのものを衝突させた場合の解析結果を、次の機会に報告したい。

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金[基盤研究(A)「重要建造物の耐衝突・耐爆性能評価と防止対策」研究代表者・野中泰二郎]によるものである。

参考文献

- 1) 河西良幸, 王国壘, 桑原高久: 鉄筋コンクリート高層建物への衝撃荷重に対する応答特性-航空機衝突による応答と地震応答の比較-, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp. 211-216, 2005.12
- 2) 河西良幸: 建築物への航空機衝突による衝撃荷重, 前橋工科大学研究紀要, 第5号, pp. 101-106, 2002.4
- 3) Sugano, T. Tsubota, H. Kasai, Y. et al.: Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force, Nuclear Engineering and Design 140, North-Holland Publishing Company-Amsterdam, pp.373-385, 1993
- 4) 樹構造システム
- 5) 河西良幸: 航空機衝突時の衝撃荷重の形状と衝撃応答の関係: 日本機械学会第17回計算力学講演会講演論文集, pp.491-492, 2004.11
- 6) 土木学会: 構造工学シリーズ15 衝撃実験・解析の基礎と応用, pp. 349-359, 2004.3