衝撃荷重に対する建築構造設計

岡本隆之祐

㈱ 山下設計

1．はじめに

・日本では、建築物を衝撃荷重に対して設計することは少ない。
・稀に国の内外で要求される場合がある。
・ガイドラインの作成が待たれる。

(ここでは以下について紹介します)

・衝撃荷重に対する建物の設計例、被害例
・米国の対衝撃設計の考え方の紹介。
・英国鋼構造協会「爆発に対する建物の防御」

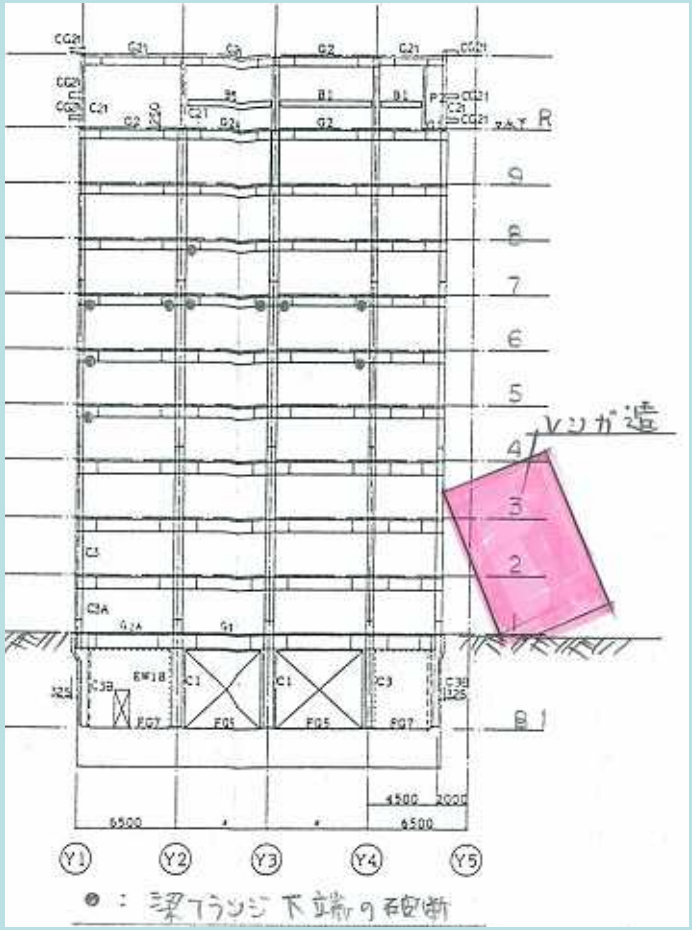
2．衝撃荷重に対する建物の設計例

- 2.1　バクダット放送局の場合
- 2.2　国内の建物の場合
  - ・こうたん化
  - ・阪神大震災で隣接する建物が倒れ掛かる
    (調査・補強)
- 2.3　爆発の被害を受けた建物の調査と補修
  - 2.3.1　被害概要
  - 2.3.2　補強計画

2.1　バクダット放送局の場合

- 1970年代の後半に設計　オイルダラーによりイラクが最も豊かな時代
- イスラエルのミサイルによる攻撃を想定
- ある建物の地下室を堅固にする
- 1階の床と地下室の外壁のコンクリート厚さを1m以上
- ヨーロッパの事例を参考にしている
- 米軍の攻撃に対する情報は不足

2.2建物が転倒し隣接建物に衝突



- 阪神大震災でレンガ造の建物が倒壊し、鉄骨造の建物に衝突
- 柱（箱型）や梁に局部的に最大2cm程度のへこみ
- 衝突のエネルギーが小さい
- 鉄骨造の建物は安全率は十分あった。
- 中間層の梁フランジ下端が破断[1]（衝突の影響ではない）
- 外観は損傷なし

2.3 爆発による被害建物の調査･補修

2.3.1　被害概要

- 2003年3月2日　パキスタンのカラチ
- 米国大統領の訪問を控えた反米活動
- 米国総領事館から20m離れたホテルの前
- 自動車による爆発　焼夷弾型　15kg～20ｋｇ
- 4人死亡、49人が負傷

- 爆発地点から200m離れた当該建物も爆風による被害
- 3階建てのRC造、　人命に被害なし
- 出入り口のドア、窓のガラスの破損、サッシの変形
- 全体的に見ると負圧による被害が目立った。
- ガラスにはフィルムを貼ってあったので、飛散することなく、負傷者なし。
- 強化ガラス、防弾ガラスは被害なし。

朝日新聞2006年3月3日

米領事館前で爆発 パキスタン 4人死亡

3/3(金)

【イスラマバード＝北川学】パキスタン南部カラチの米総領事館近くで2日午前9時（日本時間午後1時）すぎ、自動車爆弾とみられる爆発があり、現地警察によると米国人の総領事館員1人を含む4人が死亡、49人が負傷した。＝国際面に関係記事

犯行声明は出ていないが、ブッシュ米大統領の訪問を控え、パキスタン国内では反米機運が高まっていた。

警察によると、爆発は総領事館から約20m離れた高級ホテルの駐車場で発生。5分後、別の車の燃料タンクに引火して再び爆発が起きたらしい。

ホテルには当時、4組の日本人宿泊客がいたが、在カラチ日本総領事館は全員の無事を確認した。地元民間テレビは情報当局筋の話として自爆テロの疑いがあると報じた。

パキスタン 反米の渦

風刺画問題に大統領訪問が拍車

【イスラマバード＝北川学】ブッシュ米大統領の訪問を控えたパキスタンで、反米運動が勢いを増している。パキスタンでは最近、イスラム教預言者ムハンマドの風刺漫画に対する抗議活動が連日続き、政府が抑え込もうと躍起になっていた。米大統領の訪問が騒ぎに油を注ぎかねない状況で、風刺画を「ブッシュの仕業」とあおる言動まで出てきている。＝3面参照

ゼネストを 野党が計画

風刺漫画に抗議するデモは2月中旬から、パキスタン主要都市に拡大していた。一部が暴徒化し、2日までに5人が死亡。収まる気配を見せない。

この間、北部ペシャワルの宗教指導者は「漫画の作者を殺した者に1500万ルピー（約3000万円）の報奨金を出す」と支持者を扇動。首都で群衆が警察官に投石したり、首都近郊の商業組合がストライキを呼びかけて町中の店舗が閉店したり、といった出来事が起きていた。

騒動は政界にも波及。イスラム教政党の連合体「統一行動評議会」（MMA）代表のカジ師は記者団に「風刺漫画の掲載はブッシュが主導したものだ」と語り、抗議活動を続ける姿勢を示した。MMAは下院（342議席）で67議席を占める最大の野党勢力。ロイター通信によると、MMAは大統領訪問予定日の3日に全国でゼネストを呼びかけたほか、大都市での大規模な抗議活動を開くとも予告している。

パキスタン政府は、MMAの支持者を拘束するなどして抗議活動の抑え込みを図っている。しかし、MMAは批判の矛先をムシャラフ政権にも向け、「約3500人が拘束された」と逆に宣伝しながら、市民の支持を集める戦略をとっている。

パキスタン政府は、米国がアフガニスタンで続ける対テロ戦争に協力する立場を鮮明にしている。首脳会談でも、両国の同盟関係が再確認されるとみられる。しかし、それによってムシャラフ大統領への抗議行動が激化する可能性も指摘されている。

パキスタンのカラチで2日起きた爆発で、炎上する自動車から他の駐車車両を遠ざけようと押す人々＝AFP時事

当該建物から見た爆発による煙

爆発地点の地面の窪み

1階吹き抜け部のサッシの変形②
外側に変形

1階窓ガラスの破損⑦

2.3.2補強計画

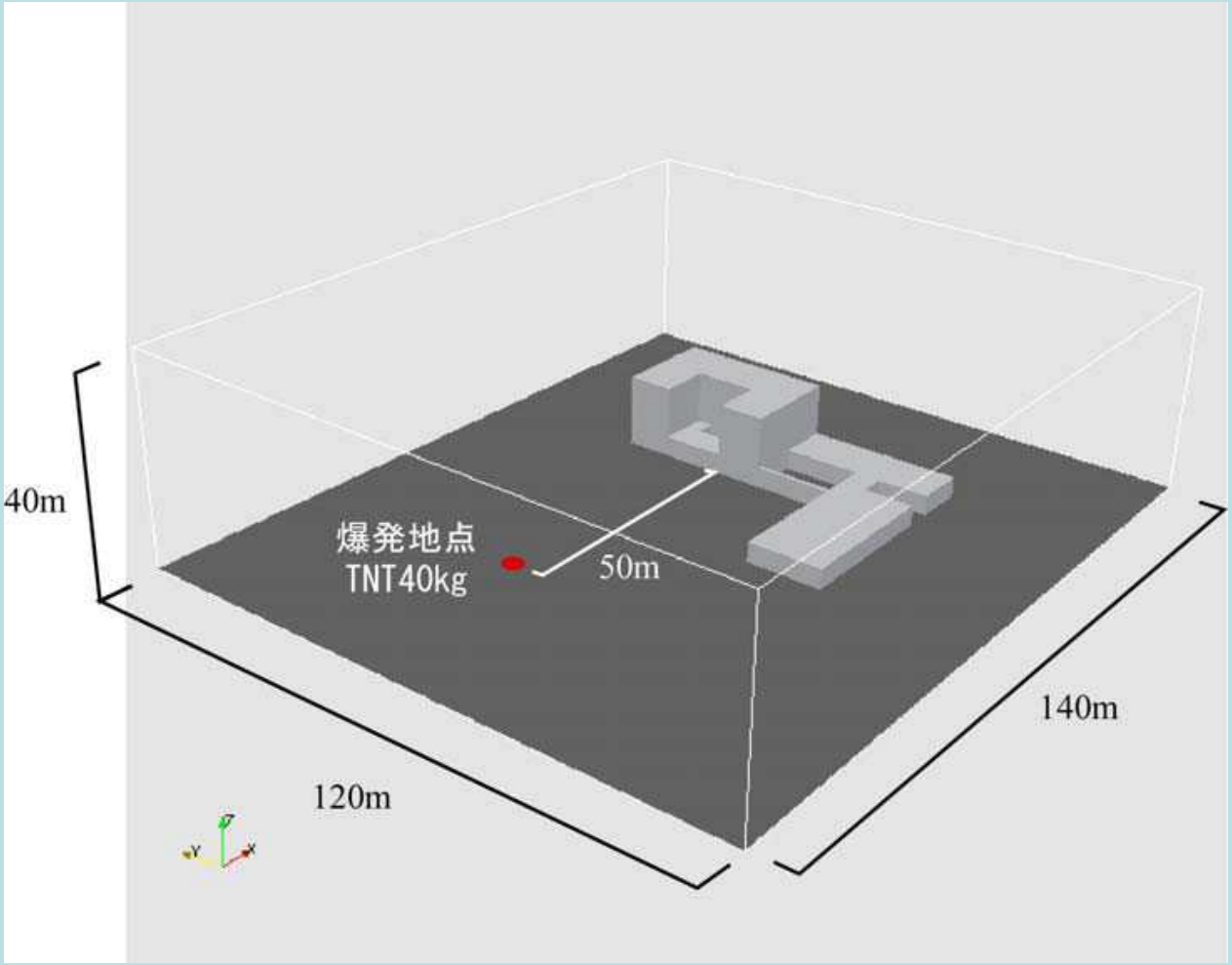
- 基本方針：TNT爆薬40kgが建物から５０m離れた場所で爆発することを想定（近傍）
- 参考のために事故と同じ場所で、上記爆薬が爆発することを想定（遠方）
- 建物に作用する圧力で、外装材を補強する

解析[2)]　　解析モデル

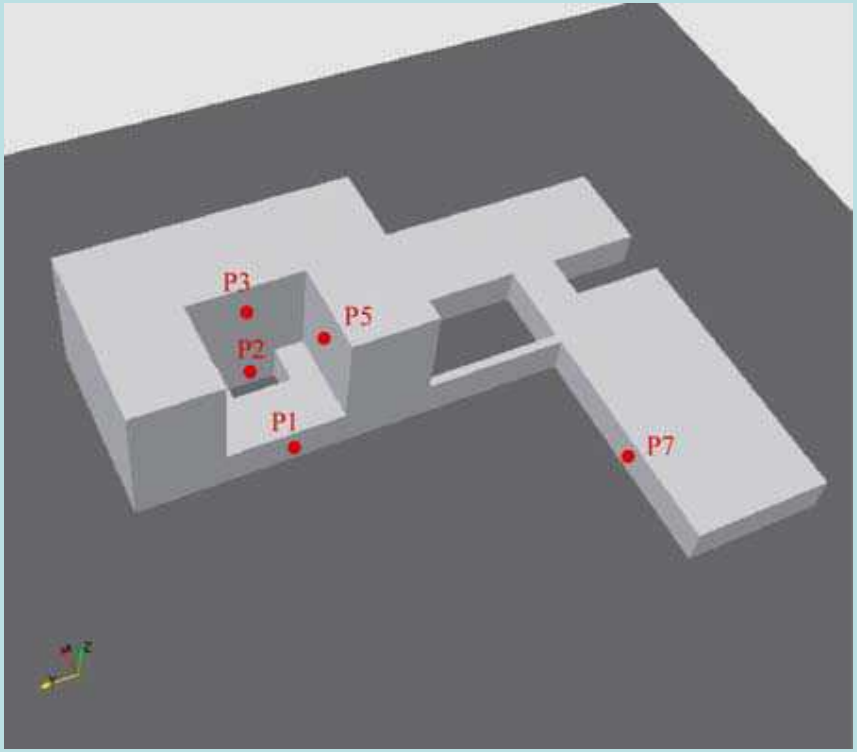
- 基礎方程式：3次元圧縮性オイラー方程式
- 高解像度風上差分であるRoeの近似リーマン解法による三次精度MUSCL型TVDスキームを用いる。（衝撃波による鋭い圧力波を捕獲し、数値的振動を抑制するため）
- 時間積分は二段階のRunge-Kutta法を用いる
- 時間刻み：$\Delta t = 8.82 \times 10^{-5}$
- 等間隔格子：$\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0.5$m

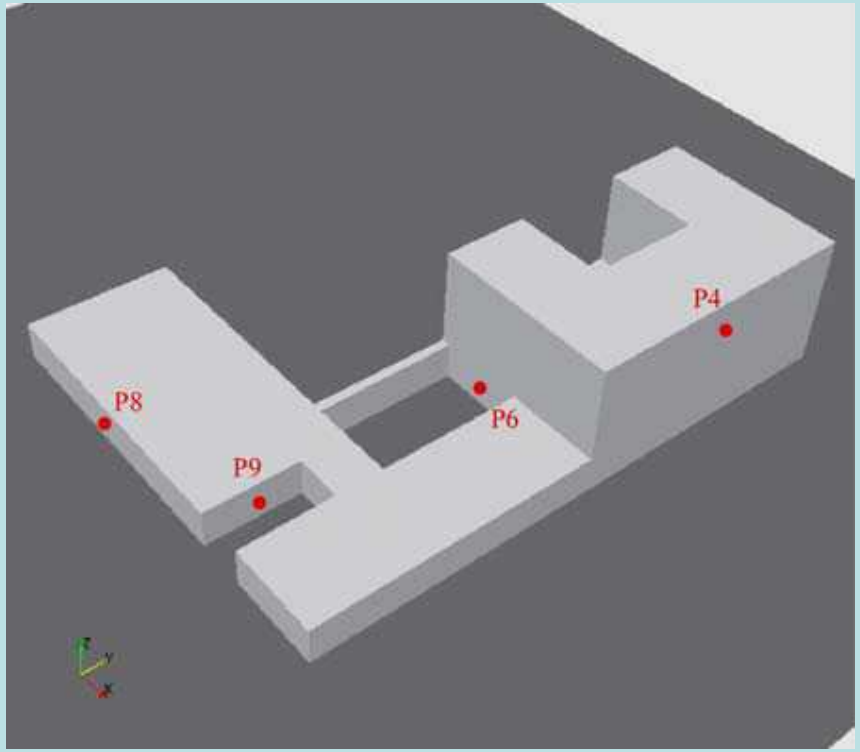
計算領域（近傍）

計算格子：281×241×81

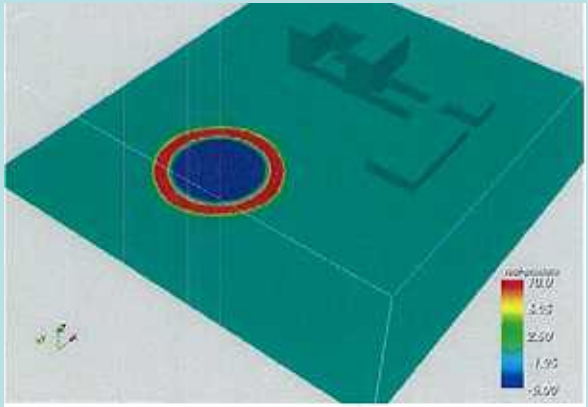


測定点 (近傍、遠方)

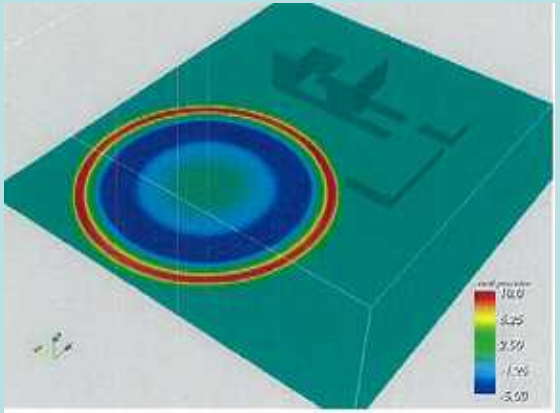




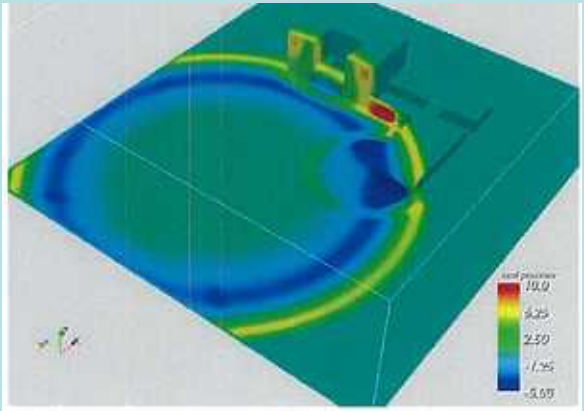
解析結果 (近傍)
圧力コンター図 (時間変化)



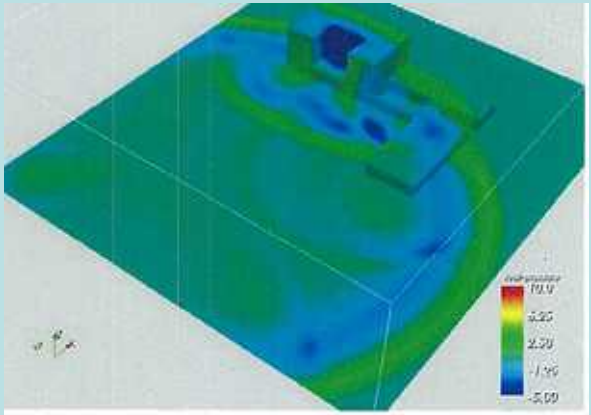
(2) $t = 3.53 \times 10^{-2}$ s



(4) $t = 1.06 \times 10^{-1}$ s

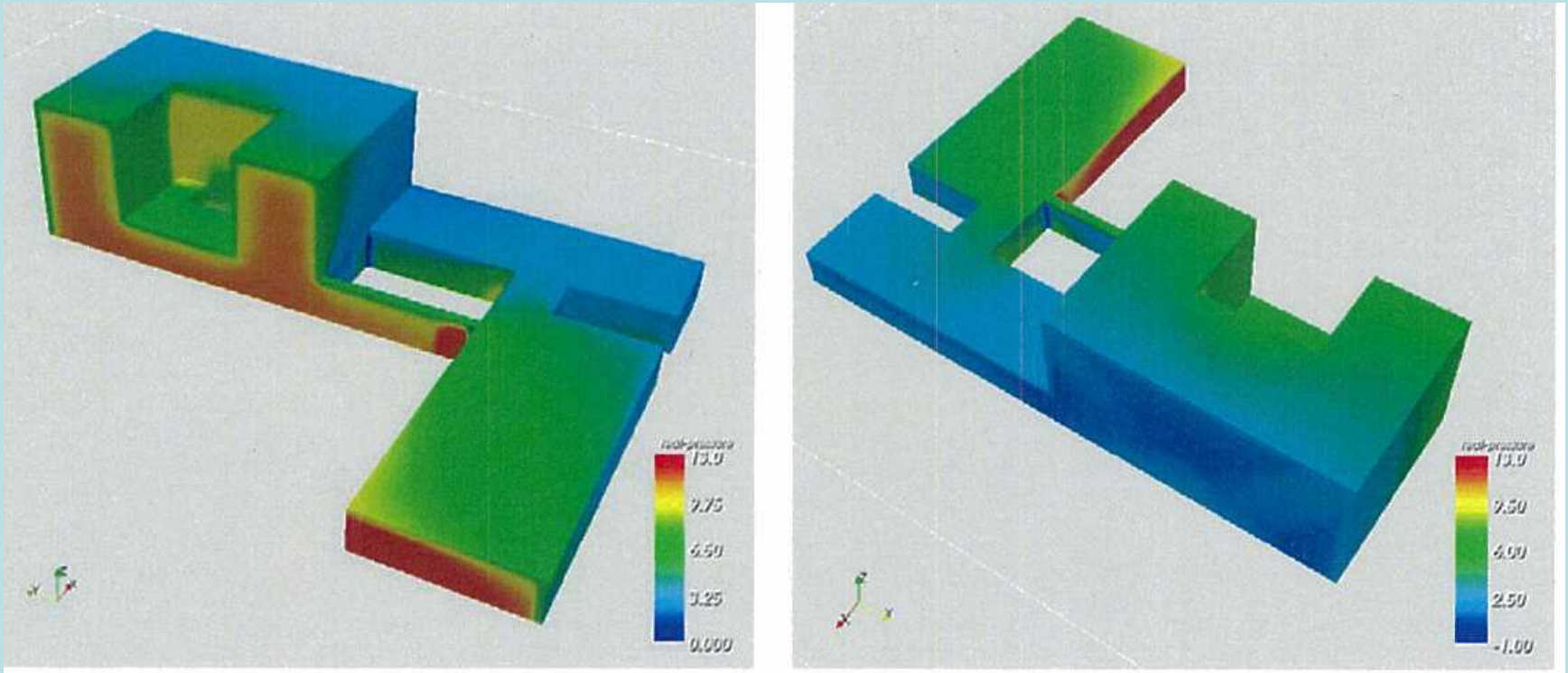


(6) $t = 1.76 \times 10^{-1}$ s



(8) $t = 2.47 \times 10^{-1}$ s

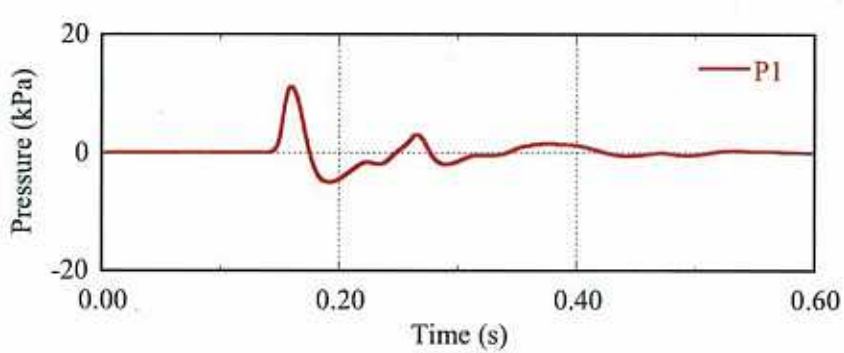
最大圧力分布図 (近傍)
(正圧)



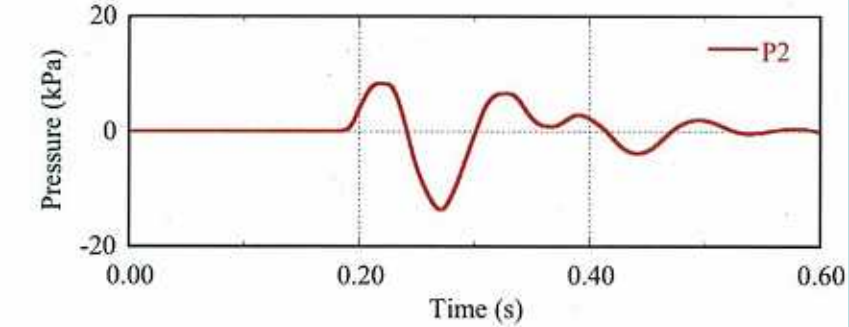
(a) 建物前面　　(b) 建物背面

図 6：近傍で爆発したケースの最大圧力分布図

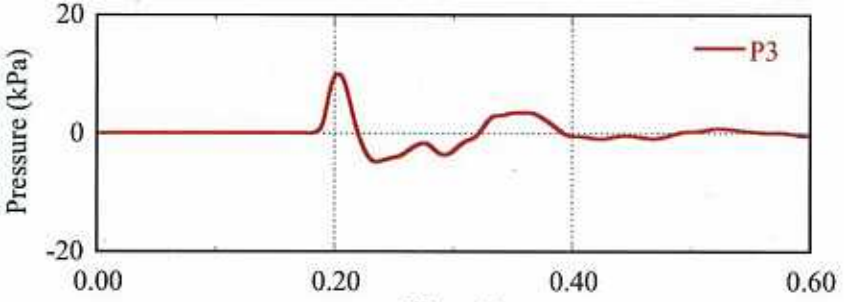
各測定ポイントにおける爆風圧の時刻歴波形（1）(近傍)



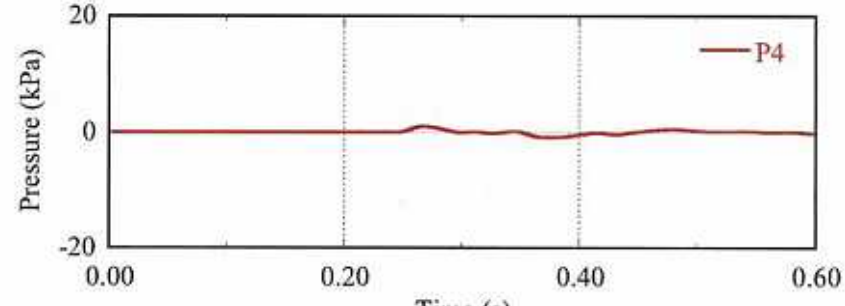
（1）測定ポイント P1



（2）測定ポイント P2



（3）測定ポイント P3

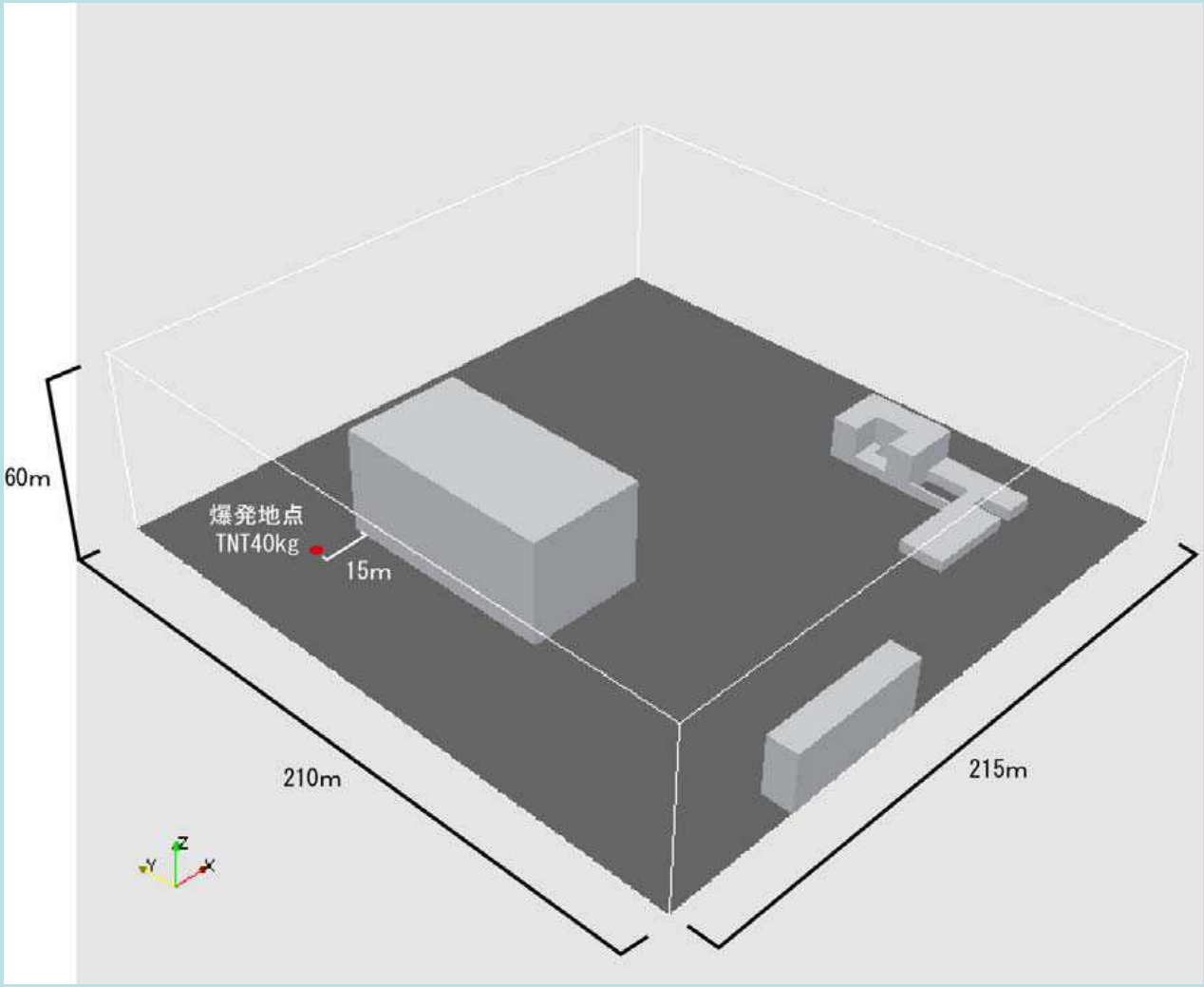


（4）測定ポイント P4

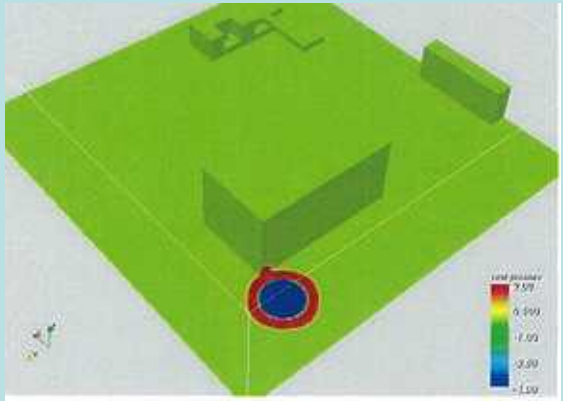
解析結果のまとめ（近傍）

- 爆発直後から爆風圧が半球状に急速に広がり、0.15秒後に建物に達する。
- 暖色系は正圧（押す力）、寒色系は負圧（引っ張る力
- P1,P3,P7点は爆発地点に正対し、最大で約15kPaの正圧が作用する。
- 周辺を壁に囲まれたP2は、正圧よりも負圧が大きく、最大で約15kPaの負圧が作用する。

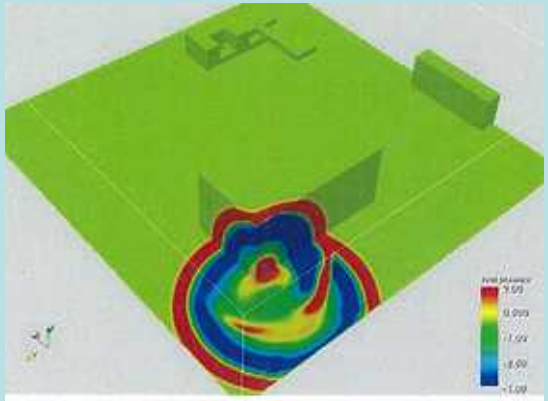
計算領域（遠方）
計算格子：431×421×121



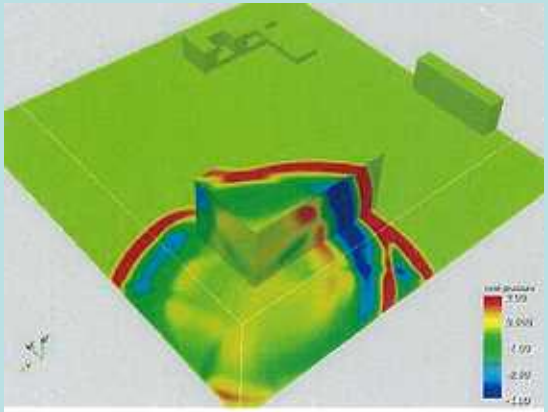
解析結果（遠方）
圧力コンター図（1）（時間変化）



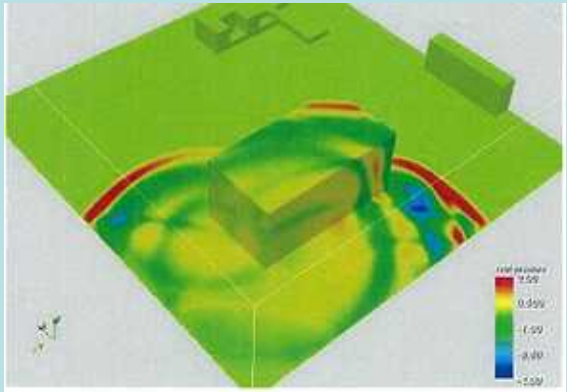
(1) $t = 2.65 \times 10^{-2}$ s



(3) $t = 1.32 \times 10^{-1}$ s

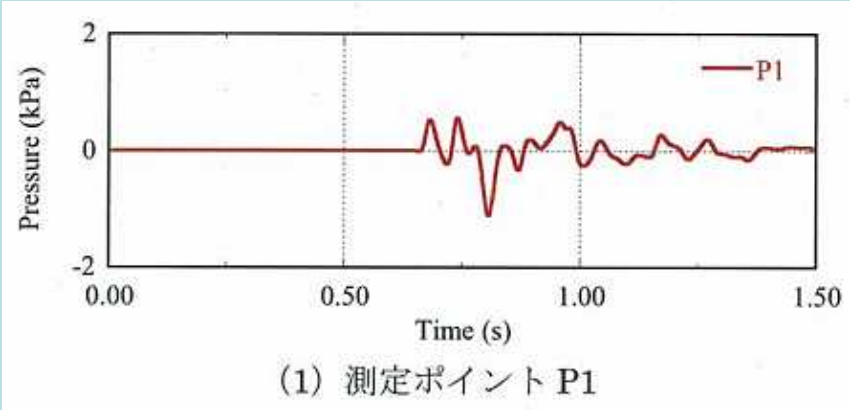


(5) $t = 2.38 \times 10^{-1}$ s

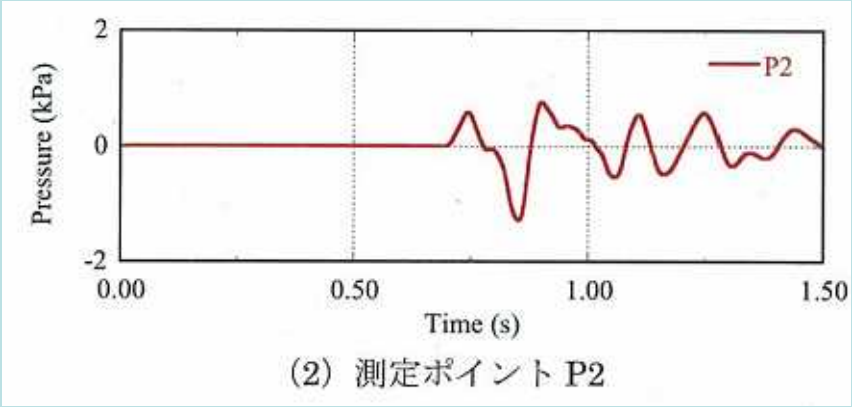


(7) $t = 3.44 \times 10^{-1}$ s

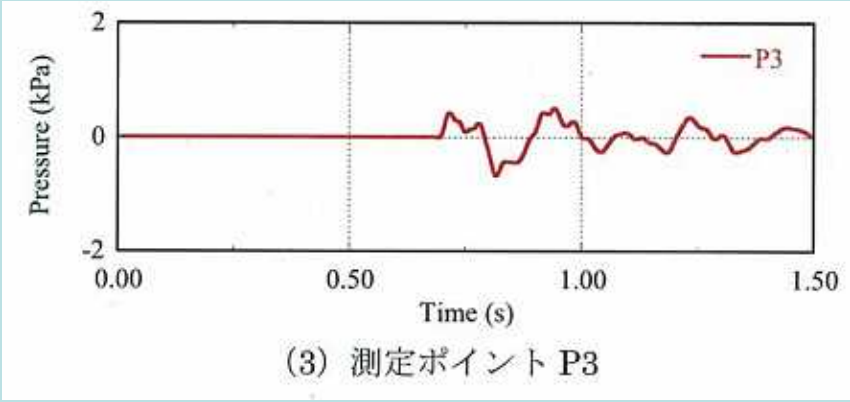
各測定ポイントにおける爆風圧の時刻歴波形（1）（遠方）



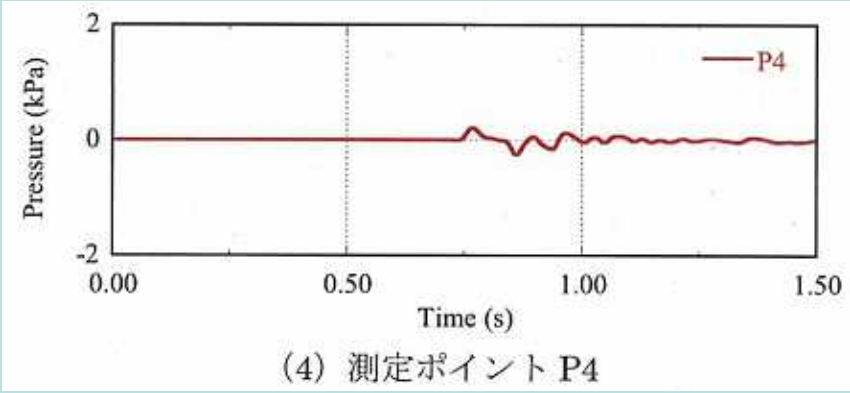
（1）測定ポイント P1



（2）測定ポイント P2



（3）測定ポイント P3



（4）測定ポイント P4

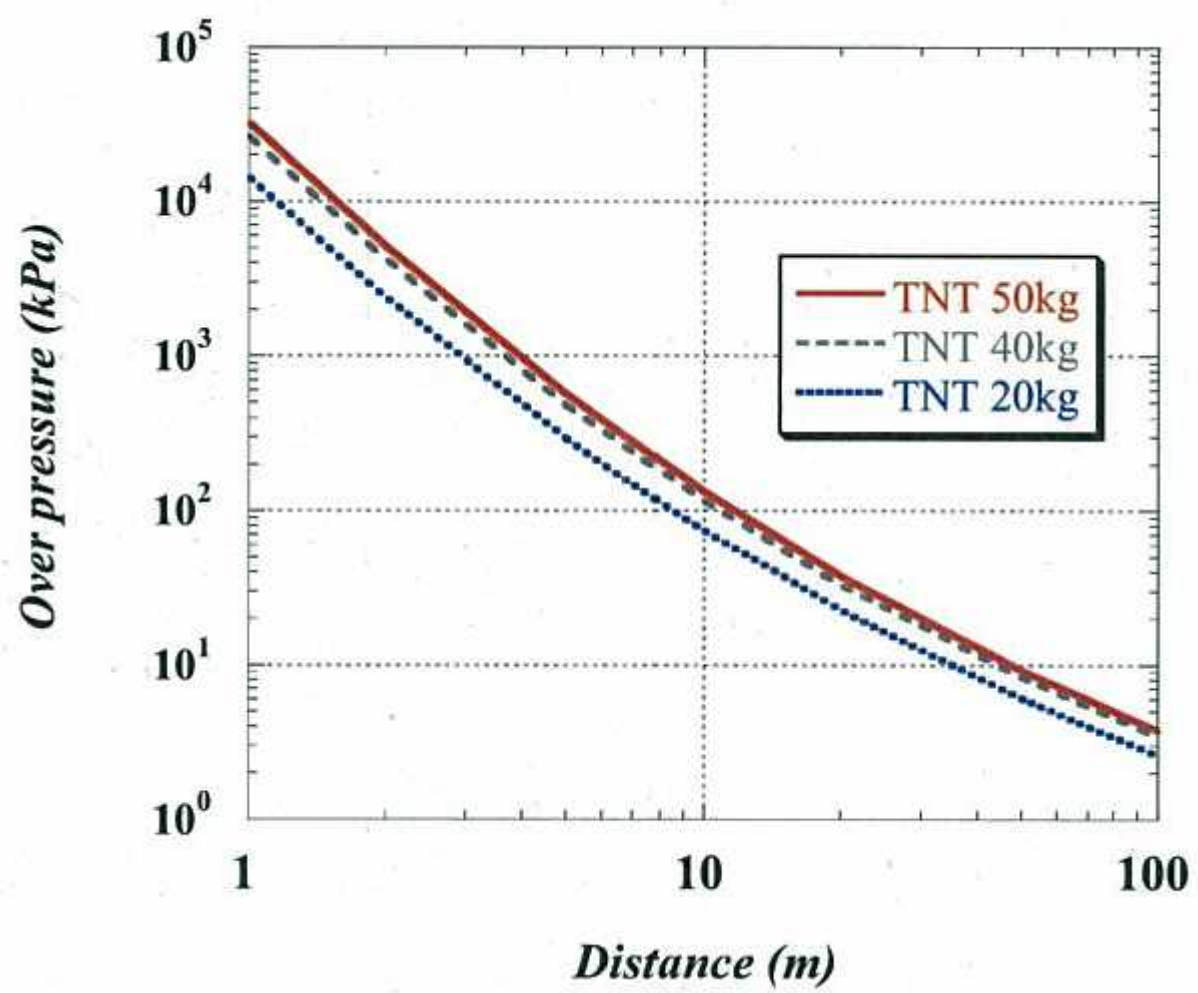
解析結果のまとめ（遠方）

- 爆発直後に圧力波が大きな建物に当たるため複雑な波となる。
- 約0.65秒後に対象建物に到達する。
- 大きな建物による回折で爆風圧が弱められる。
- 各測定ポイントとも、全体的に正圧と負圧の絶対値がほぼ等しくなっている。
- その理由は、正圧の鋭いピーク値が距離減衰の影響を受けるからであろう。

補強方法

- 解析から求めた圧力に耐えるようにガラスとサッシの補強を行った。
- ガラスは強化ガラスを使用
- サッシの芯に鉄を使用
- サッシとコンクリート躯体との接合を十分におこなう

TNT爆薬量と距離減衰
距離が200mで約0.5KP、設計は2倍



3．米国における爆発に対する建物の防御設計の考え方 3)

- 米国では1995年のオクラホマの爆破テロや1993年のNYのWTC爆破テロを契機として、重要な建物は防御設計を行っている。
- 構造設計事務所ワイドリンガー・アソシエーツの考え方を紹介する。
- 対象は民間の建物で、大使館等の近くの建物あるいは大使館がテナントである建物
- 2001年時点では民間建物の耐爆発設計は明確ではないが、ガイドライン策定の動き

3.1屋外の爆破テロ

- 対象：建物から３０m以内の建物前に駐車した車か、建物沿いの路上に置かれた包みに仕掛けられた爆発を想定
- 爆破の規模は想定していない（個別に検討）
- 建物各部に甚大な被害が生じても、崩壊を防ぎ人命を守る

3.1.1　窓ガラス及び外壁

- ｵｸﾗﾎﾏの爆破では168人が亡くなり多数が負傷したが、8割がガラスの飛散による
- ガラス対策

  ①合わせガラスの使用、2枚のガラスの間に合成樹脂の膜をはさむ

  ②強化ガラスに飛散防止フィルムを貼る

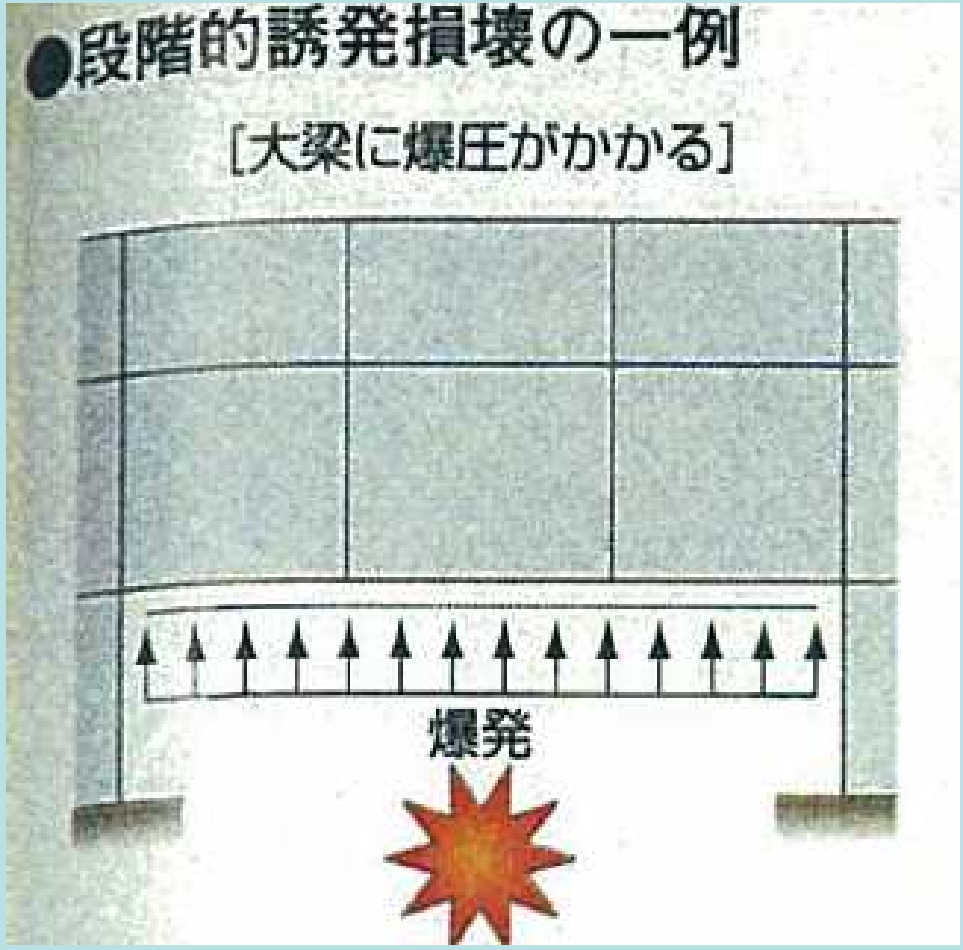
  ③防弾ガラスの使用

  ④アルミサッシの内部を鉄骨で補強

  ⑤ガラスのサッシへの飲み込みをより深くする

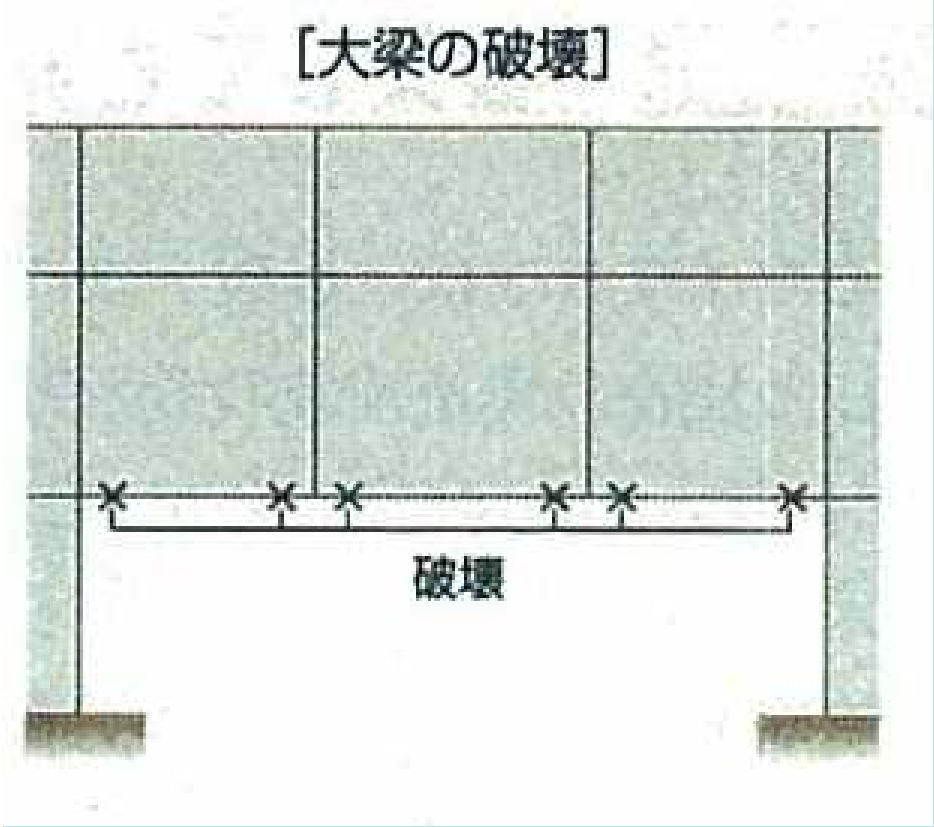
  ⑥特殊シリコンでガラスとサッシを強固に接着
- 外壁の対策：外壁の開口部の面積を小さくする。30%以下も考える。在外公館では15%以下もある。

3.1.2進行性破壊（1）



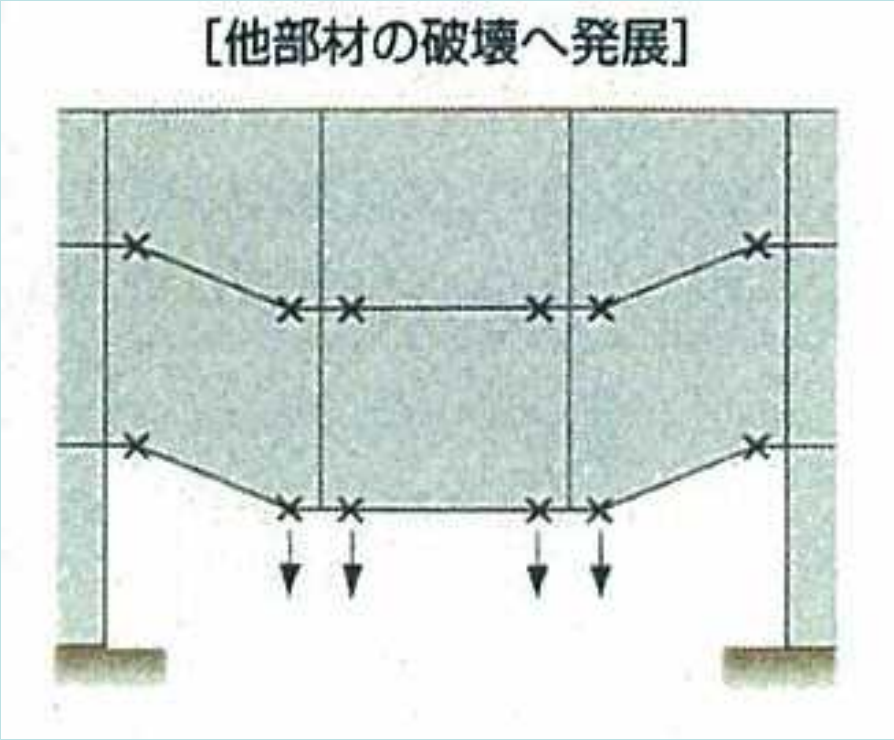
- スラブが下からの爆圧で上に突き上げられる
- スラブを支持している梁も同様に上向きの力を受ける
- スラブも梁も下からの力に弱い

進行性破壊 (2)



- 大スパンの梁やスラブが損傷を受けると、下側に大きく撓む

進行性破壊 (3)



- 梁が損傷すると、接続する柱も内側に引きずられ、損傷する。
- 上階に向かい次々と連鎖的に破壊を誘発する。
- 進行性破壊は過去の事故でも見られる。
- これを防ぐためには構造システムを補強する。

進行性破壊を防ぐ対策

1）内部での防護策

・壁や天井の一部を外し、爆圧を逃がす。

・合わせガラスや強化ガラスを使用する

2）構造の防護策

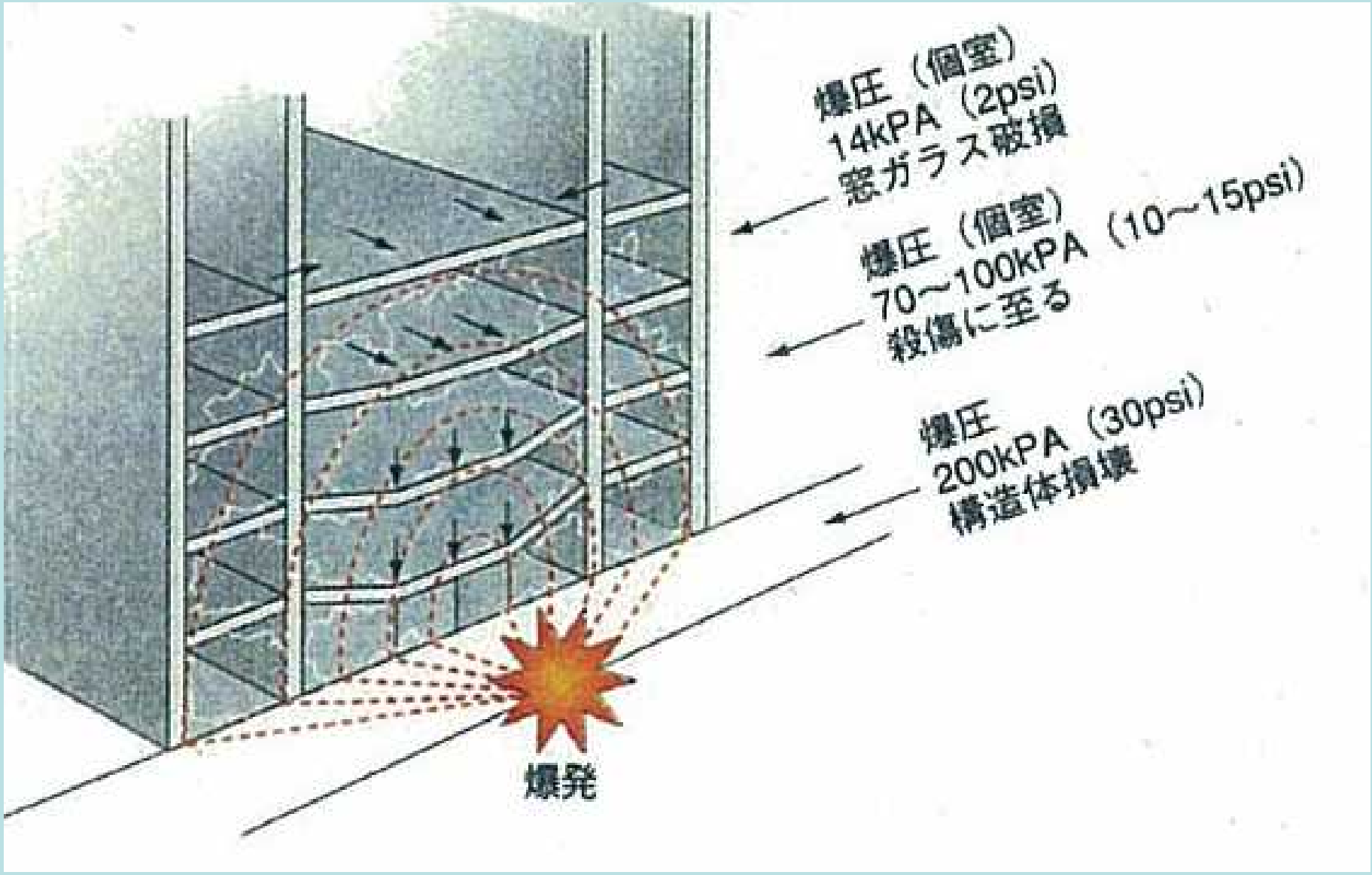
・長大スパンの梁やスラブを補強

・外壁を構造補強する

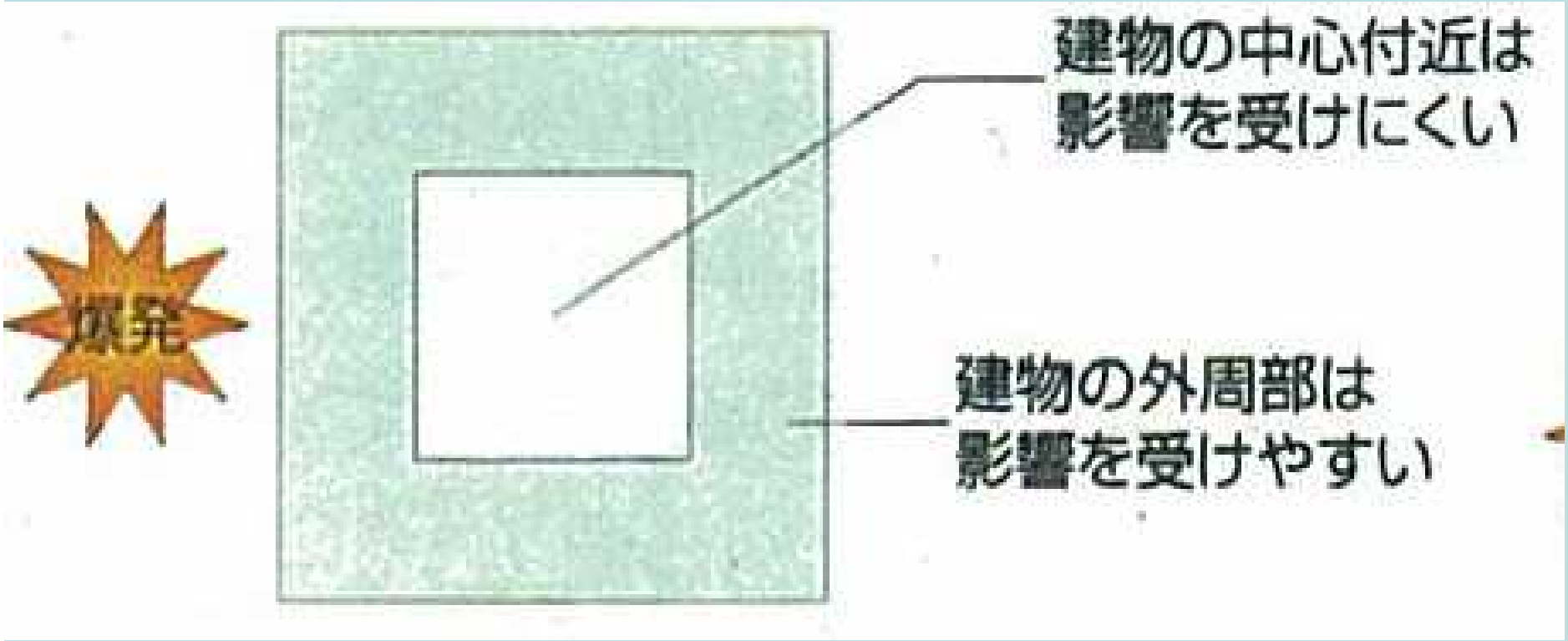
・柱を補強する

・柱と内壁の間にスリットを設ける

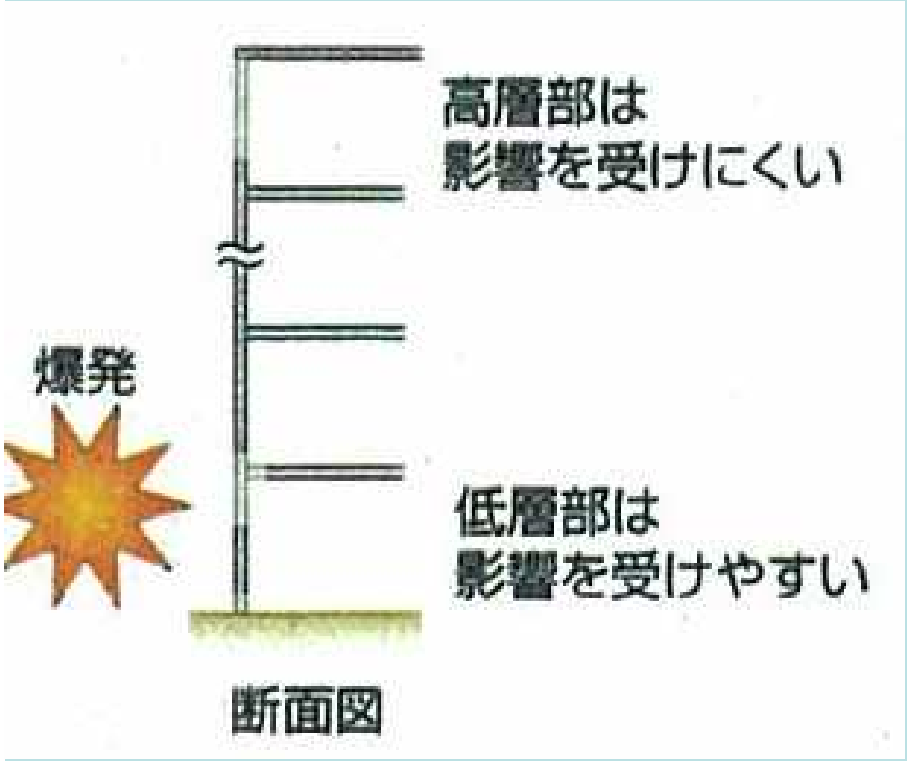
爆圧レベル


爆圧（個室）
14kPA（2psi）
窓ガラス破損
爆圧（個室）
70～100kPA（10～15psi）
殺傷に至る
爆圧
200kPA（30psi）
構造体損壊
爆発

3.1.3　建物の内部位置による影響（平面）



建物の内部位置による影響（立面）



- 低層部は危険
- 高層部はより安全

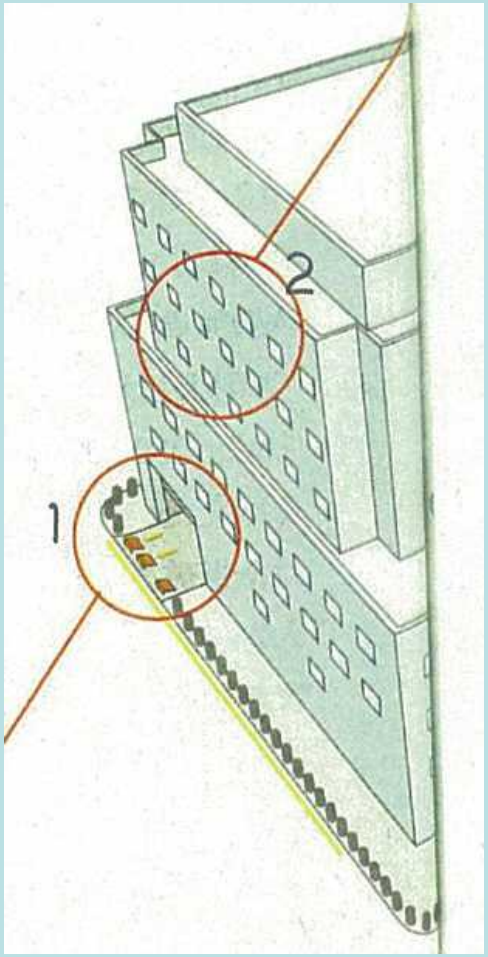
- 建物の部位が低価値、中価値、高価値に分類できる
- 重要な部屋はより高価値な場所に設ける

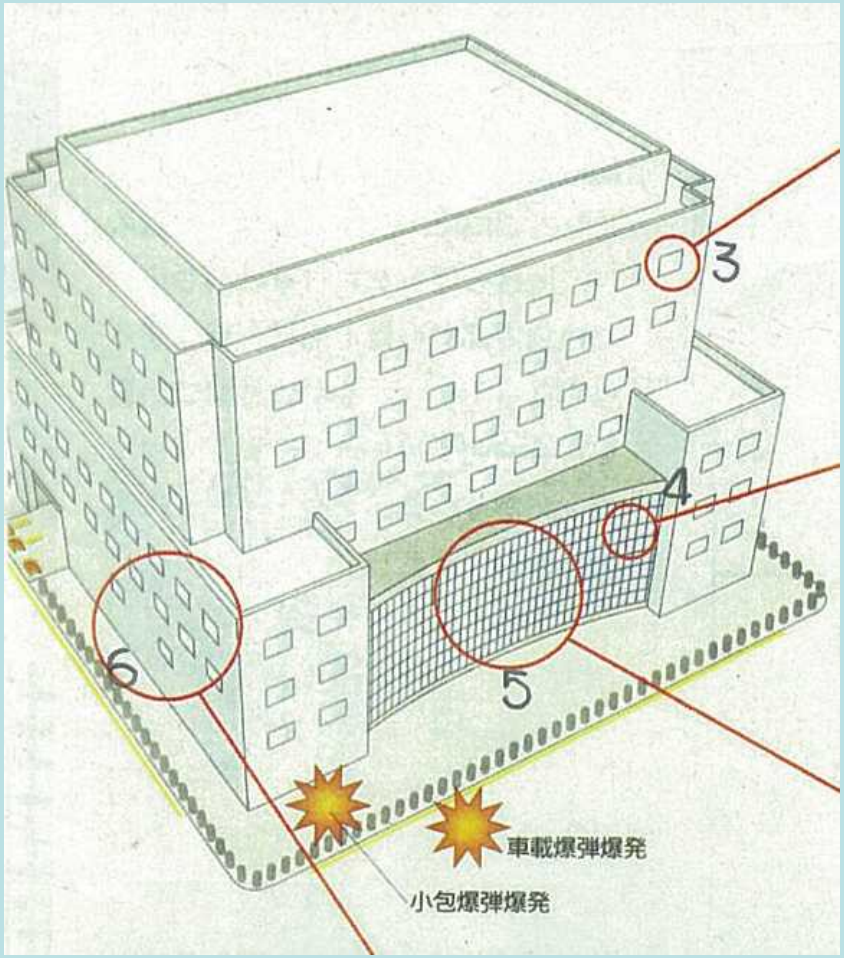
3.2屋内の爆破テロ対策

3.2.1　不法侵入を防ぐ

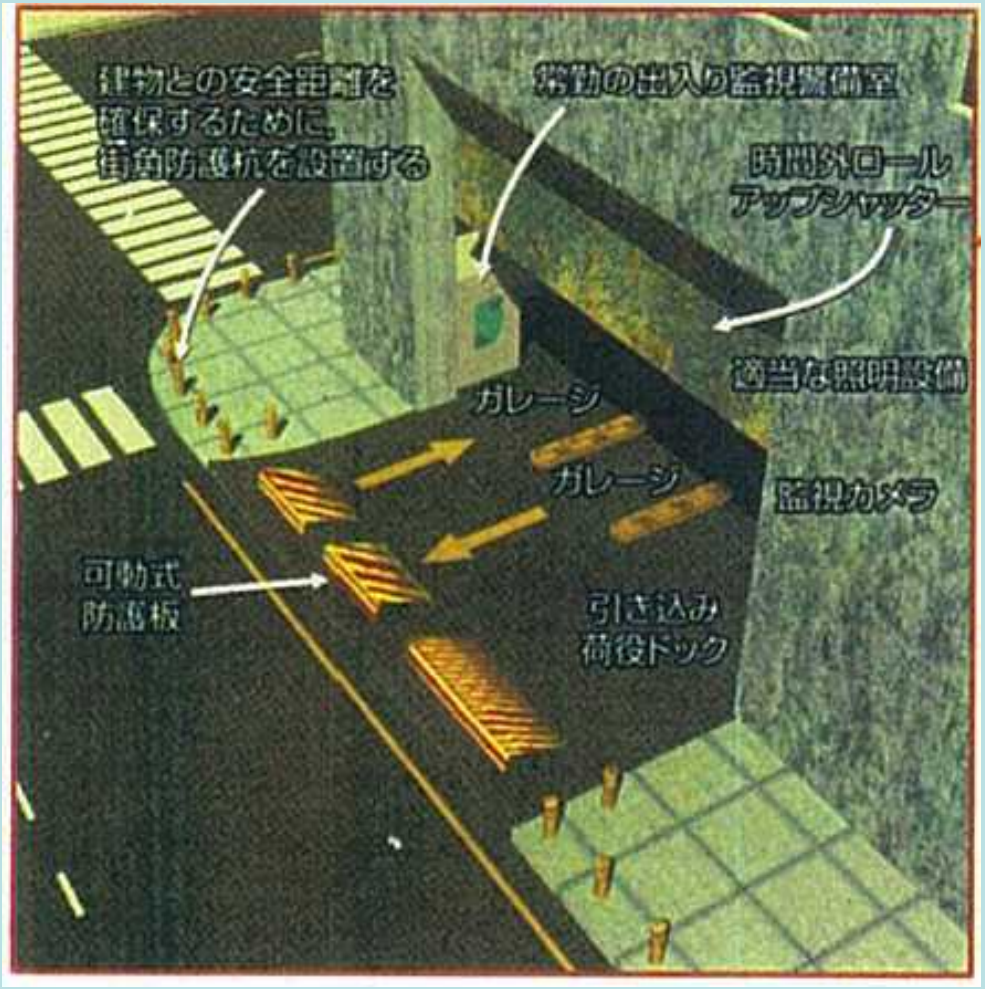
- 入り口から内部への通路部分を隔離個室化
- 前室では3面を強固にし、ドアはソフトにし、衝撃をやわらげる
- 前室につながるロビーも個室化し、ロビー内に回転通過ゲート、磁気反応スクリーン、X線探知スクリーンを設置し、柱や開口部を補強
- 警備室は窓を防弾ガラスとする

建物各部位の安全対策の模式化



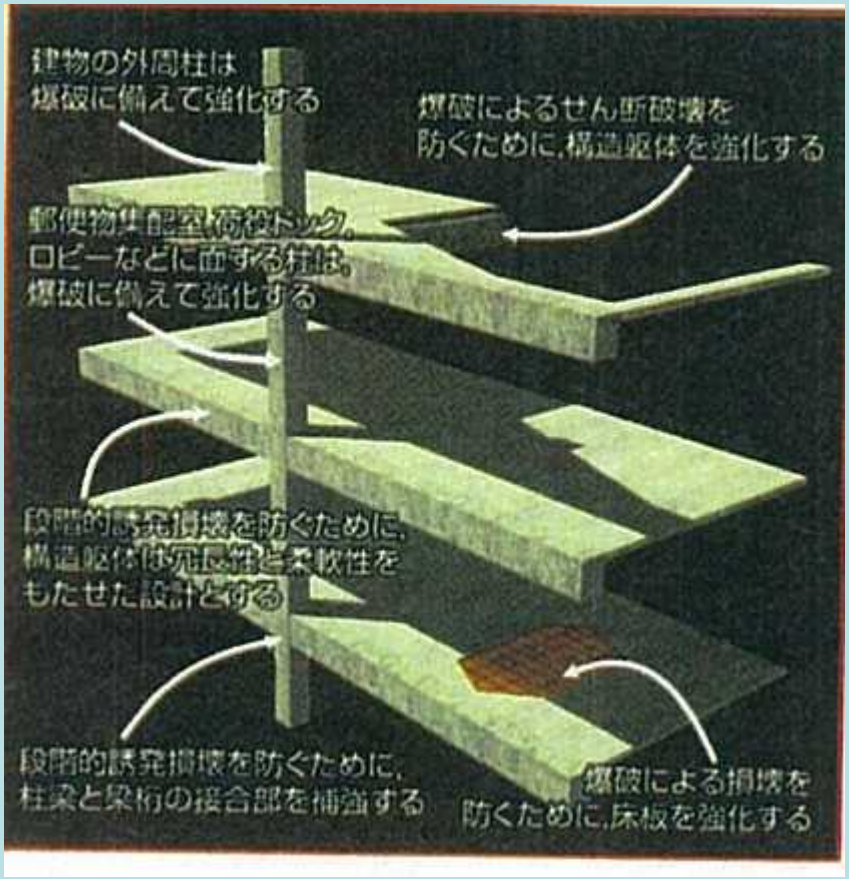


①　ガレージ近傍



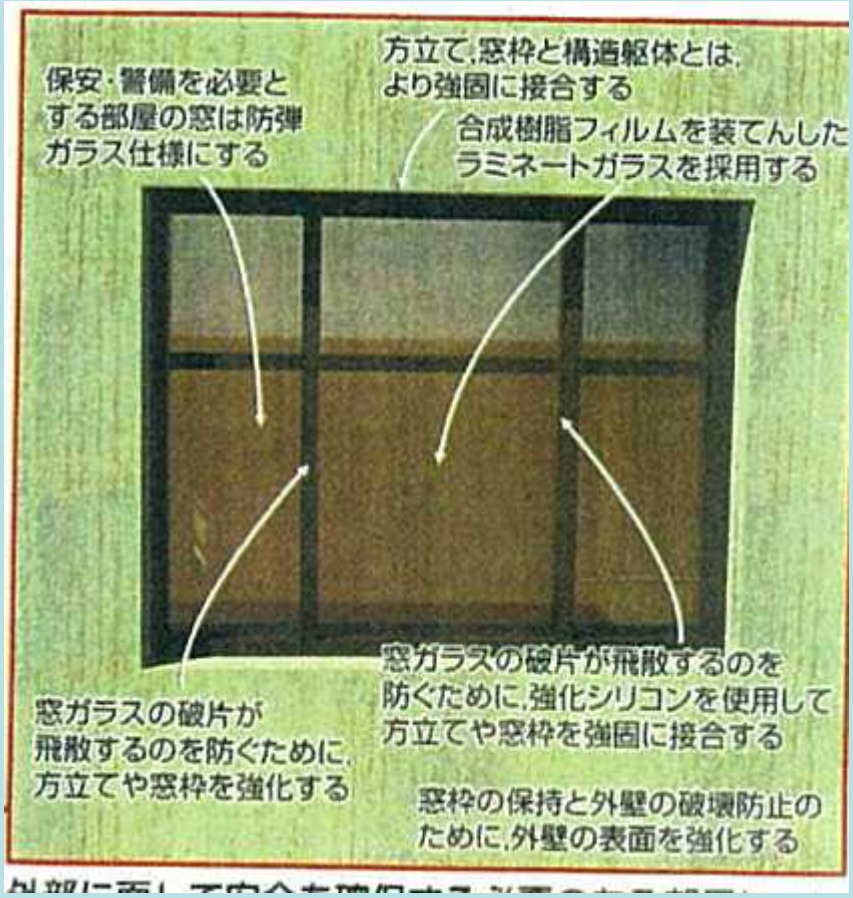
- ガレージ近傍に防護杭を設置する
- 可動式防護板を設ける
- 常勤用の守衛室を設ける
- 時間外の自動シャッター
- 照明設備
- 監視カメラ

②　建物の構造補強



- 道路側の外周柱は鉄板で補強し、鉄筋を増す。
- 荷卸場、郵便物集配室、ロビーに面する柱は補強する
- 進行性破壊を防ぐため、柱、梁、接合部、スラブを補強
- 壁の鉄筋を増やす。

③外部に面する重要な部屋

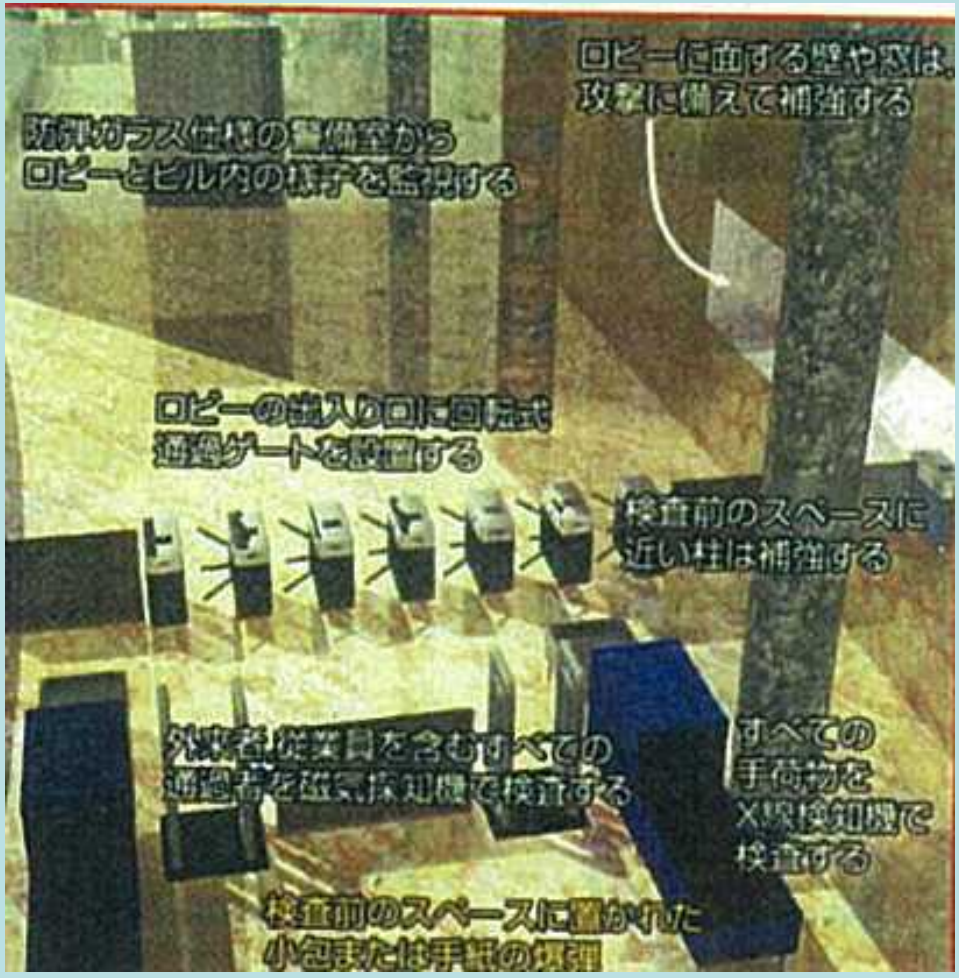


- 窓ガラスを防弾仕様
- あるいは合わせガラス
  (中にフィルムを挟む)
- ガラスはサッシに強化シリコンで固定
- また、ガラスの飲み込みを深くする。
- サッシや方立は鉄で補強し、構造体に固定

④ガラスカーテンウオールの補強

- 爆圧を吸収するため、カーテンウオールの柔軟性を維持する。
- ガラスは合わせガラスとし、飛散を防ぐ
- アルミの方立ては鉄を中に入れ補強する
- ガラスの窓枠への飲み込みを深くし、特殊シリコンで接着する

⑤エントランスの補強



- 防弾ガラス仕様の警備室から建物各所を監視
- 全ての手荷物はX線探知機で検査する
- 全ての通過者は磁気探知機で検査
- ロビーの出入り口に回転式通過ゲートを設置
- ロビーに面する柱・壁を補強する

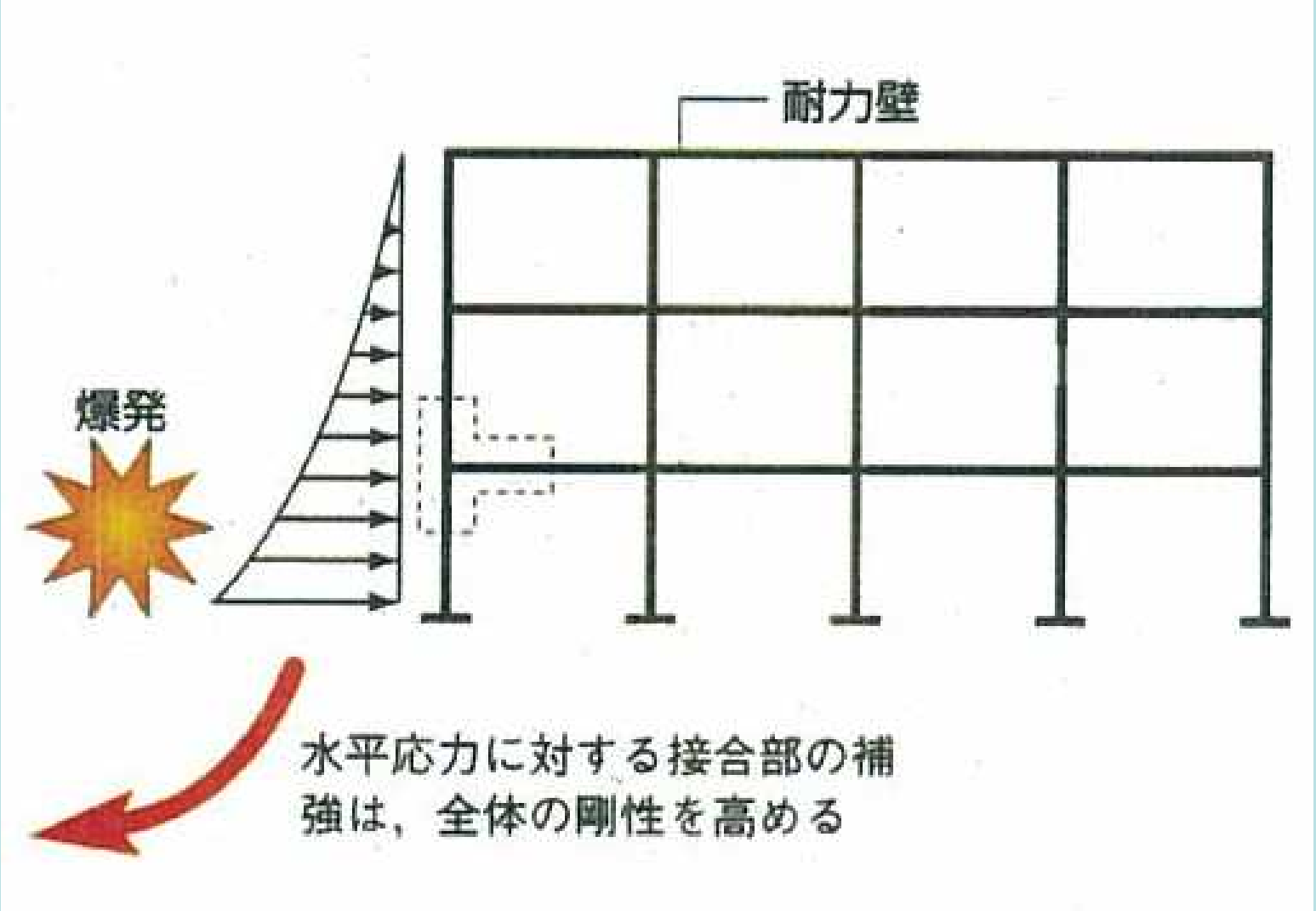
⑥駐車場、郵便物集配所、荷卸場に爆発物が持ち込まれた場合の対策

- １人が1回に持ち込む爆発量をＴＮＴ火薬４５ｋｇと仮定する
- 荷卸場では大型爆弾
- 郵便物集配所は小型爆
- 一般駐車場の爆弾
- 攻撃対象の床、壁、柱を補強
- 進行性破壊を防ぐため柱、梁、接合部の補強

テロ対策を施した建物
開口部が少い、塀と建物との距離

テロ対策を施した建物例。開口部が少ないのが一目で分かる。塀と建物の間に安全距離を確保している

外部の爆発による水平力



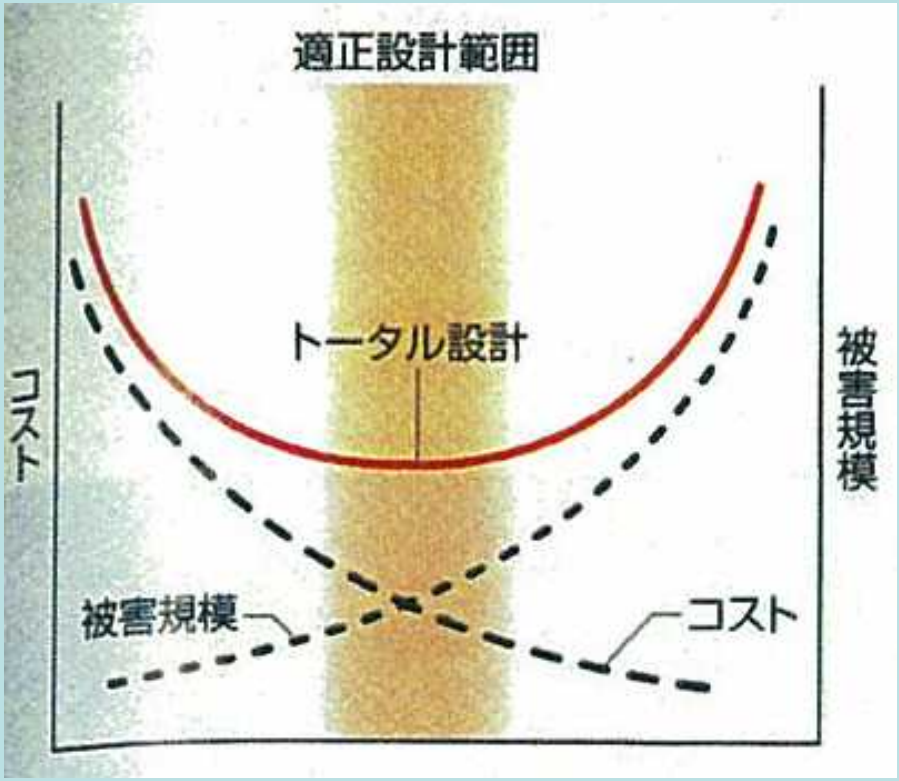
米国における民間建物の爆破対策

- 軍関係施設、公共施設だけでなく民間施設も対象
- 設計段階から補強対策を行う場合が増加
- 経験値、実験値、経済性を考慮
- 体系的な設計法の作成を目指している
- 軍関係のテロ対策の専門家の協力が必要
- 建設費の上昇
- 資産価値の増大
- 保険会社の損保保険料率の低下傾向
- 不動産マーケットでも注目される

安全対策の確立

- 民間と公的機関の情報交換
- 国の立法措置
- 広範囲にわたる行政のすばやい関与
- 国際協力が必要
- 費用対効果の検討

費用対効果の設計決定要因

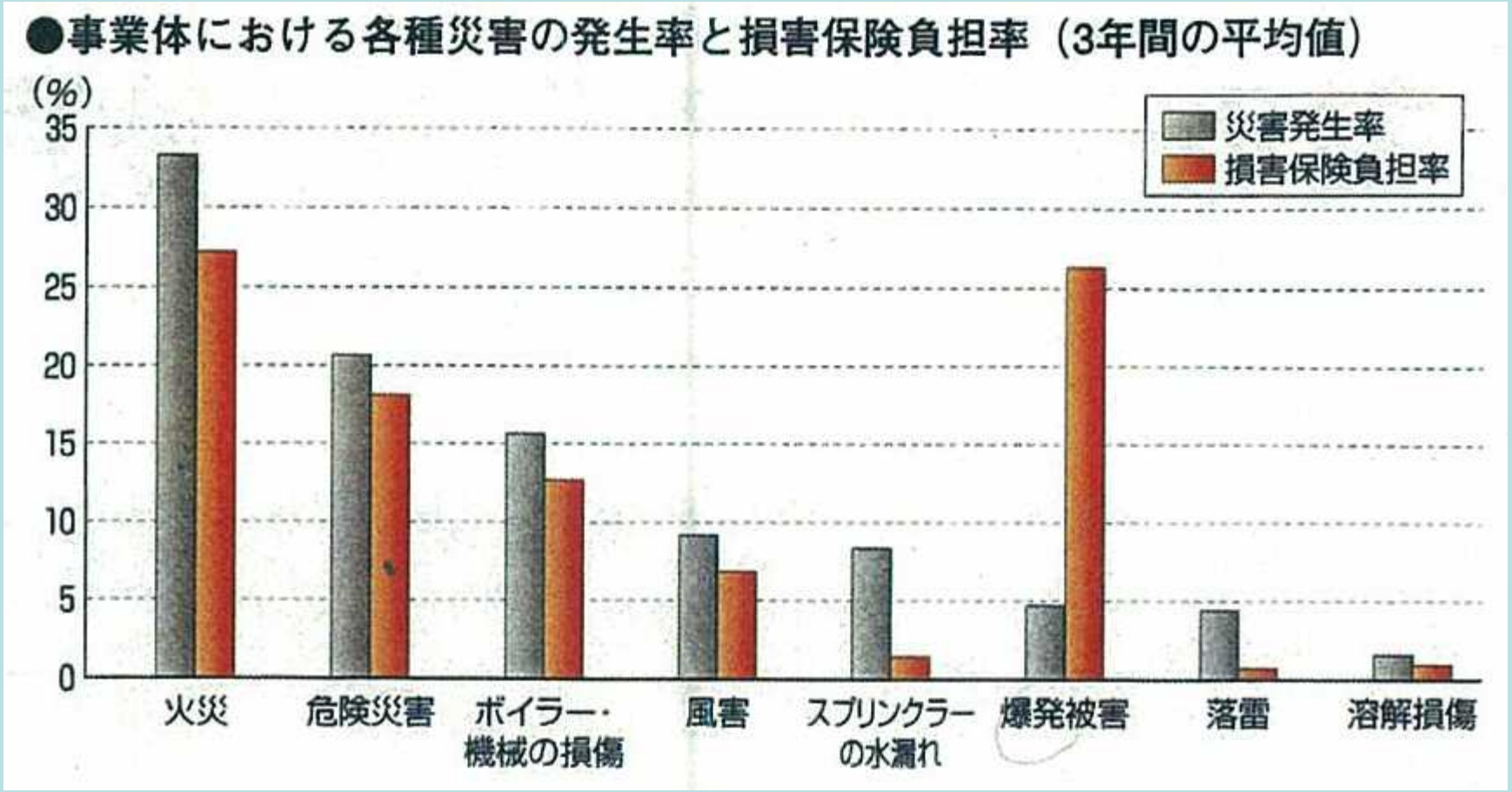


- 左図において
- 対策を行わないとコストはかからないが、被害規模が増加
- 対策を十分に行うと被害規模は減るがコストが上昇する
- コストと被害のバランス（費用対効果）が必要

被災時の緊急対策

- 多人数が集中的に緊急避難する経路の確保
- 避難通路（階段）の増設
- 避難階段どうしを離して設置
- 避難スペースの設置
- 消防専用のエレベータ、階段の設置
- 今までの常識が通用しない時代

各種災害の発生率と損害保険負担率
(3年間の平均率)



4．NYのWTCの教訓

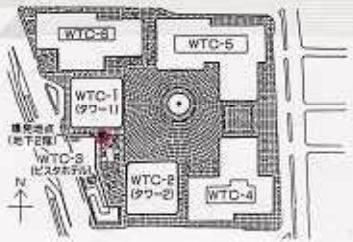
4.1　1993年2月26日（金）の攻撃

- 北棟と南棟の中間の地下2階駐車場で爆発
- 車に爆薬（206リットル）を積む
- 死者6人、負傷者1042人
- 全館停電、煙充満、避難に2～3時間
- B2階RC造の床1900㎡破壊
- B1階床900㎡、1階床40㎡破壊
- 高層棟下部の鉄骨ブレースが1箇所破壊

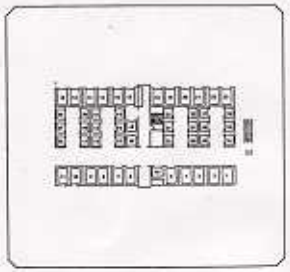
日本建築学会による調査･報告[4)]

- テロ対策のマニュアル
- 防災センターの分散
- １次側受電に予備を設ける
- 2次側受電を多重化
- 電気シャフトの分散化
- エレベータと階段にバッテリー型の照明設備
- 重要な情報を複製し他の場所に保管する。
- 平時より訓練を行う

1993年2月26日

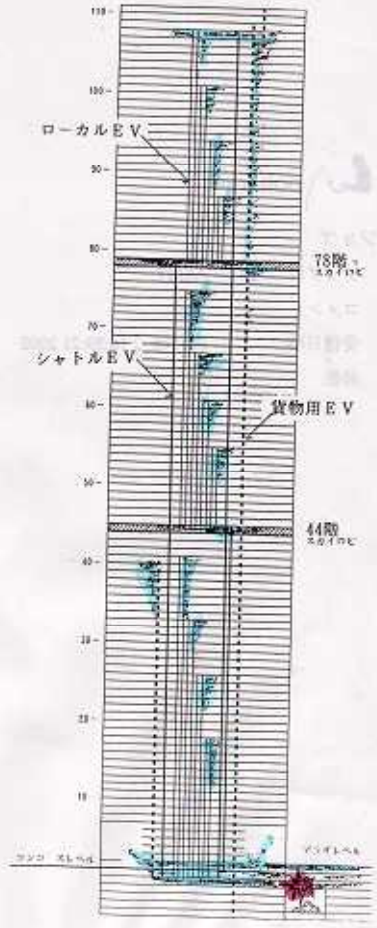


図－1　ＷＴＣの全体配置



図－2　タワー平面（１階）

図－３　Ｂ２階平面略図



図－４　エレベーターの構成（スカイロビー方式）と煙伝播経路推定

（2）（社）日本建築学会　情報システム技術委員会シンポジウム，ニューヨーク世界貿易センター爆破被害調査結果，－情報化超高層ビルが爆破されたら－，

1993年2月26日

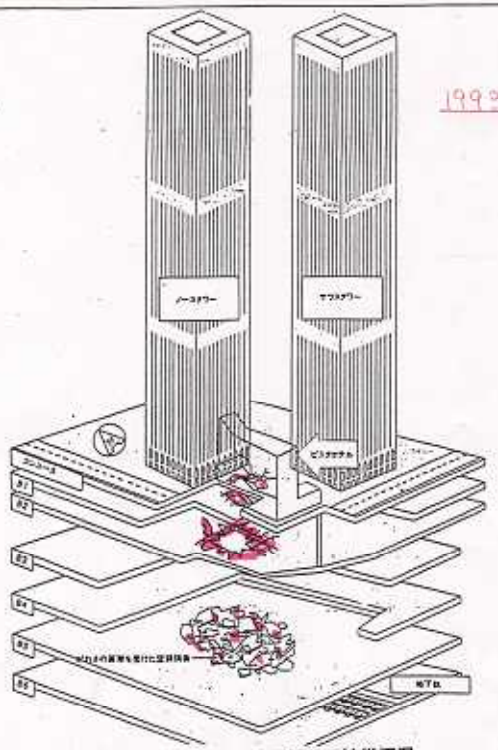


図5　ツインタワー地下部分の被災概況

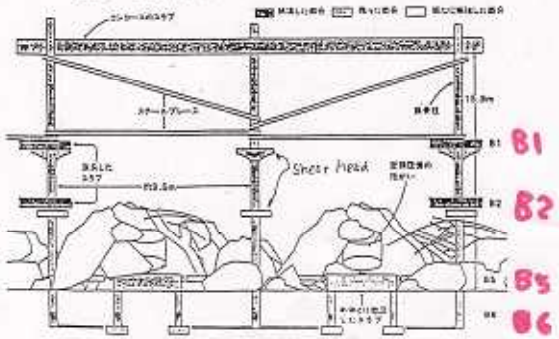


図6　地下構造体の応急補修

4.2　2001年の攻撃の教訓

- 様々な報告がなされているが、日本建築学会の報告書より抜粋[4)]

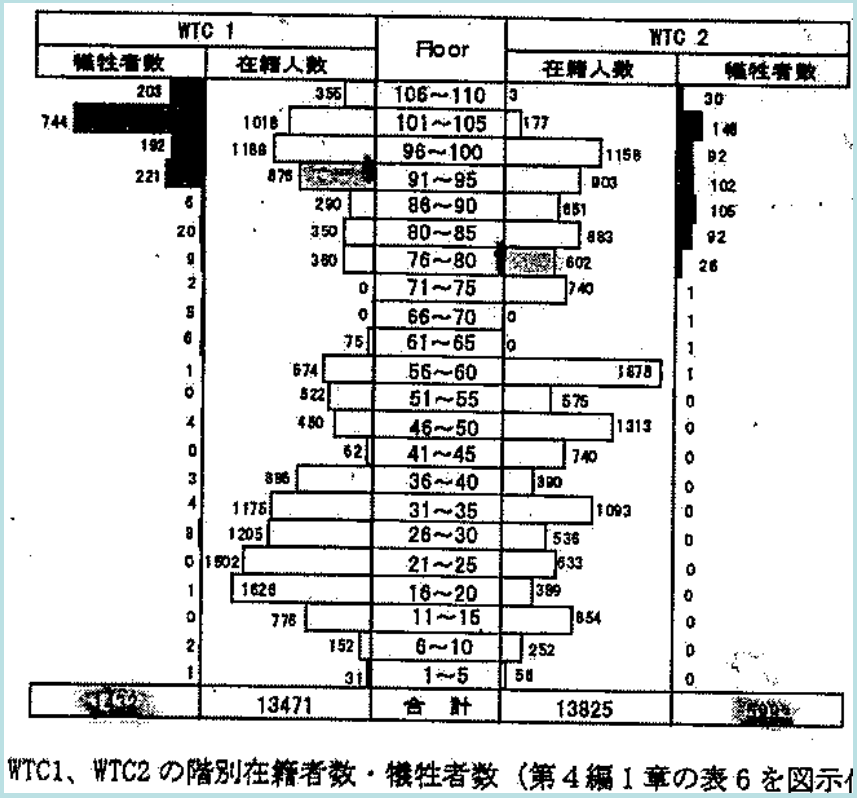
4.2.1建築計画

①人命の救助（避難安全）

②財産の保全（延焼防止、崩壊防止）

③近隣に災害を及ぼさない（延焼防止、崩壊防止、周辺街区の安全）

階別犠牲者数



WTC1、WTC2 の階別在籍者数・犠牲者数（第４編１章の表６を図示

- 左が北棟で最初に衝突され、崩壊は後から死者が多い（2倍以上）
- 右が南棟で、後から衝突され、先に崩壊死者は少ない
- 死者は殆んど衝突階以上

北棟の犠牲者数が多い理由

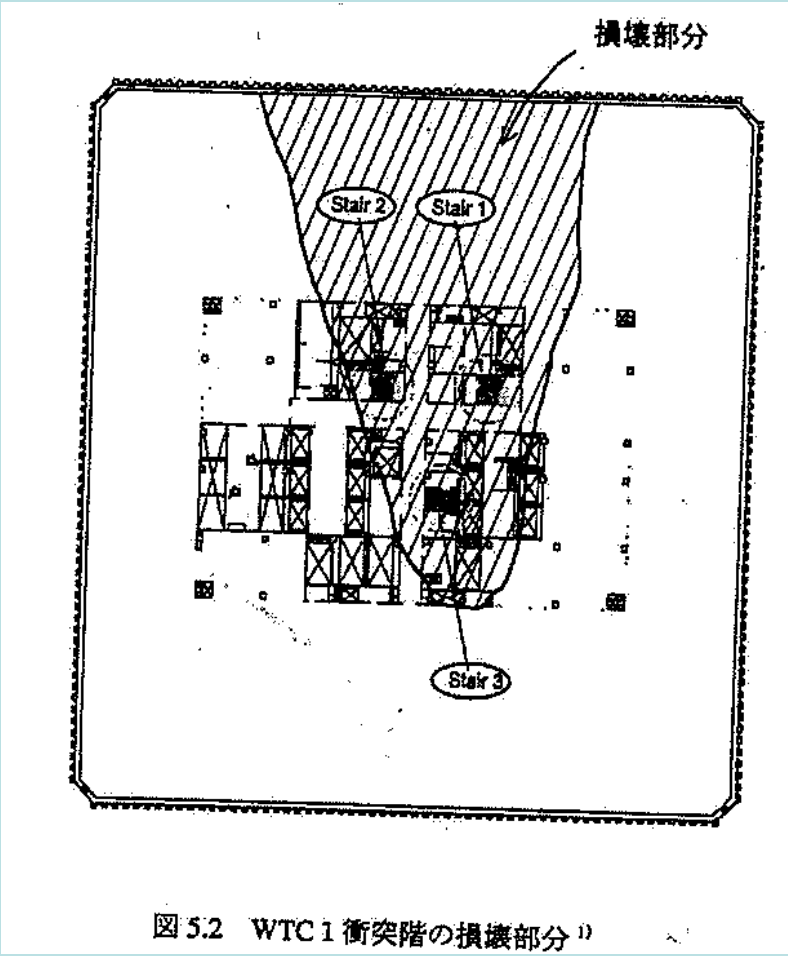


図 5.2　WTC 1 衝突階の損壊部分 [1]

- 三つの階段が損傷し、階段の上部の人は逃げるのが困難であった。

南棟の犠牲者が少なかった理由

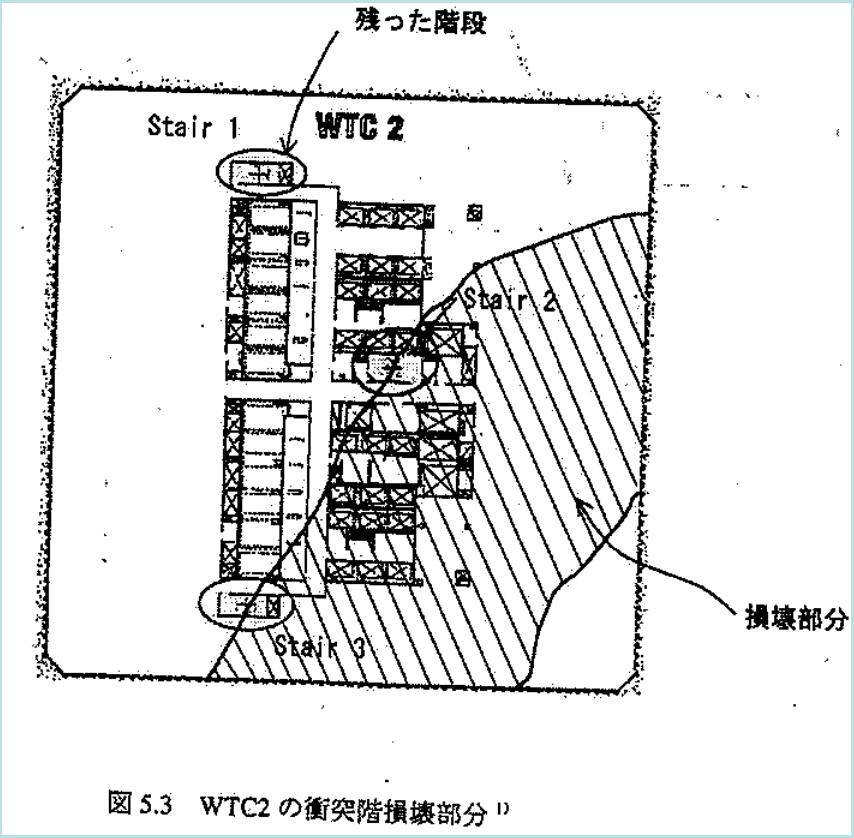
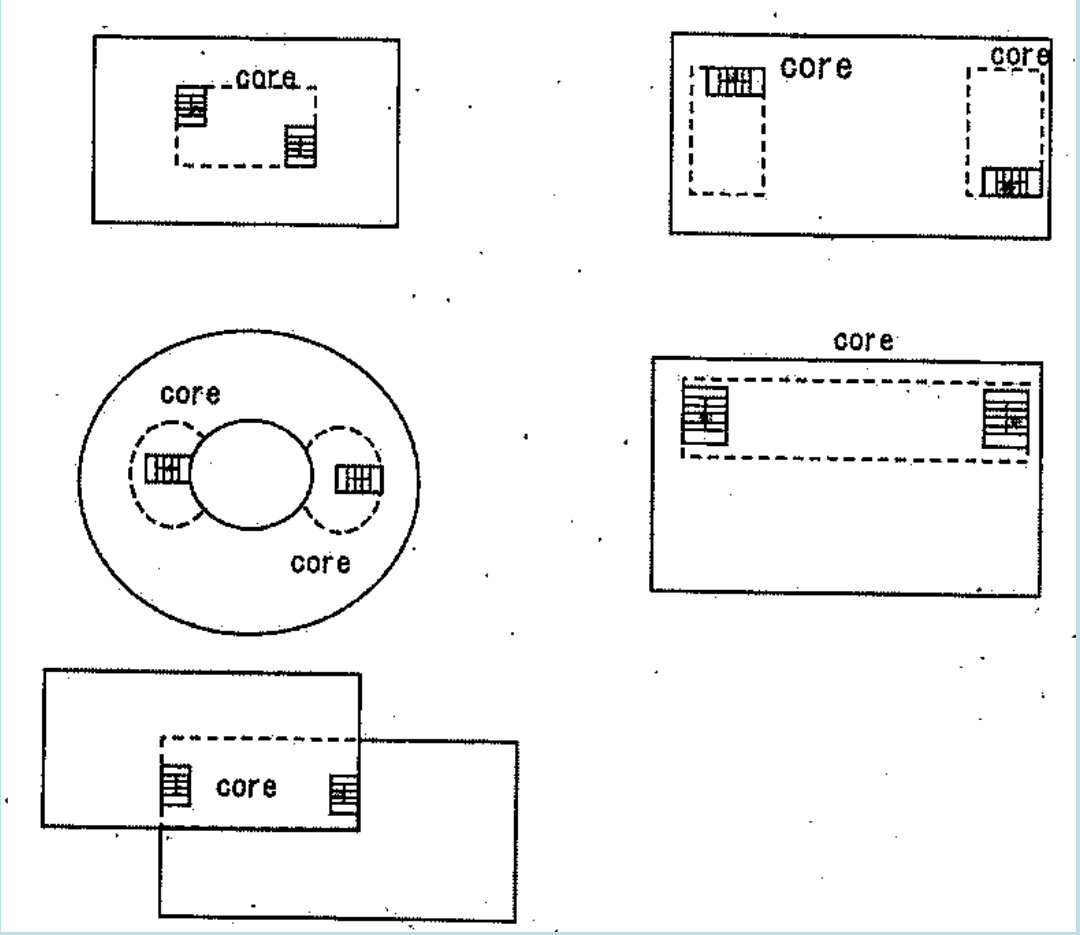


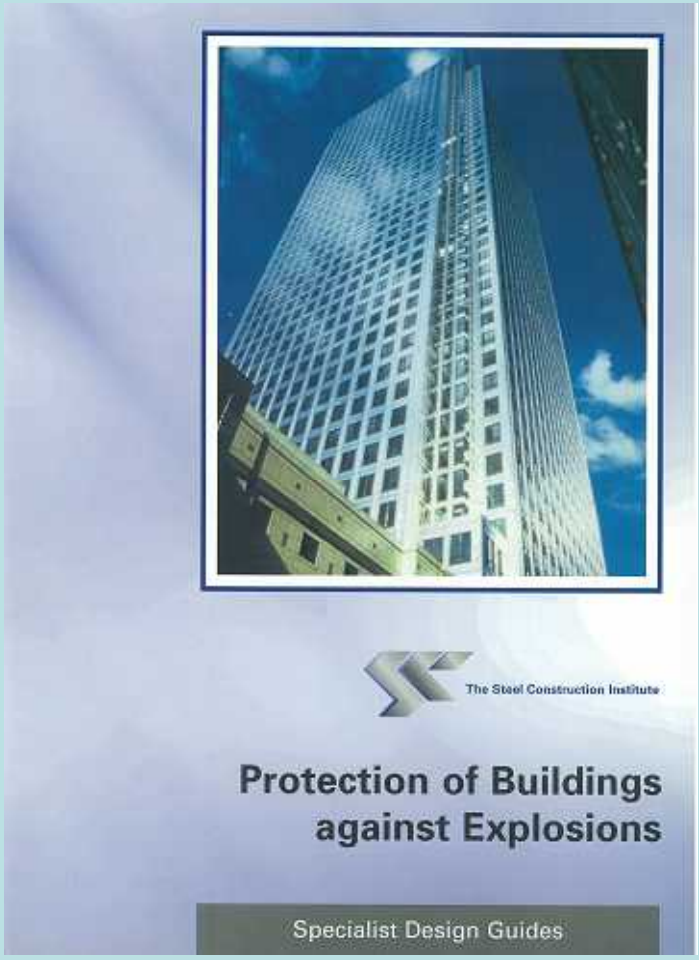
図 5.3　WTC2 の衝突階損壊部分 [1]

- 三つの階段のうち1つは損傷しなかったので、上階の人は逃げやすかった。

階段室を分散するのが望ましい



4. 英国における爆発に対する建物の防御設計の考え方 5)



- 「爆発に対する建物の防御設」 1999年

  Protection of Buildings against Explosions

  英国　の鋼構造協会
- 爆発から建物を守るための設計のガイダンスを提供
- 民間建物、公共建物を対象

１章　序

- 爆発による人命や財産への被害
  飛散物（ガラス等）、人命の損傷、部分的な構造破損、全体崩壊
- 上記の被害を完全になくすことは難しいが、減少させることは可能であり、その方法が述べられている
- 爆発の被害を最小限にすることは重要であり、一般大衆、オーナー、保険会社、政府も認めている

序 (続き)

次の内容を含む

- 建物防御の設計の考え方
- 爆発を受ける構造物の動的応答の解析方法
- 鉄骨構造の強度と変形に対する設計
- 構造体と非構造物の強化方法
- 予防処置

2章 建物の爆破被害例

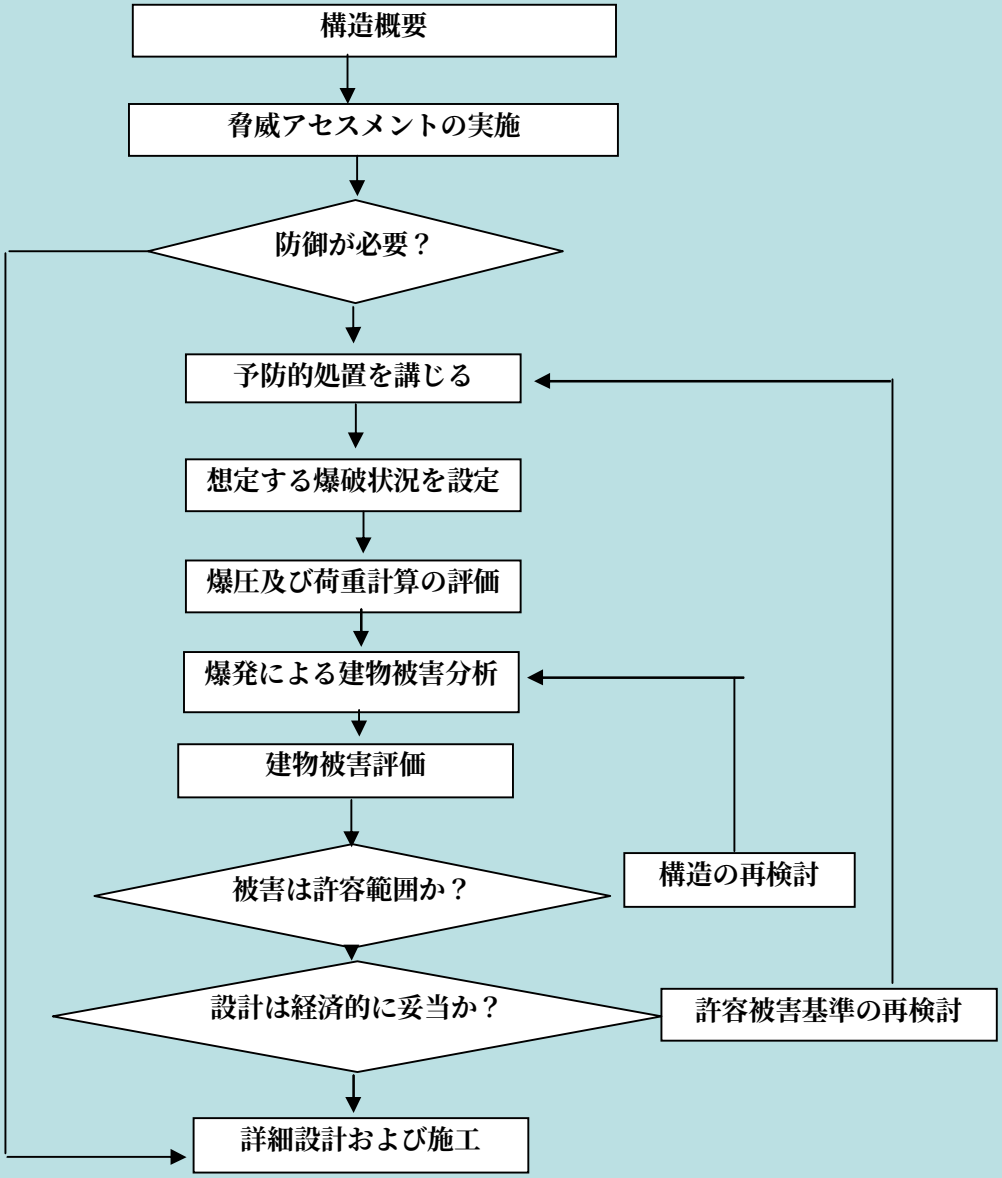
7件の爆破被害例を紹介している

- ワールドトレードセンター　ニューヨーク（‘93）
- Murra　連邦ビルディング　オクラホマ市
- St Mary Axe　ロンドン
- マンチェスター市役所
- ロンドン　ドックランド
- ステープルズ　コーナー　北ロンドン
- ユダヤ人　コミュニティセンター　ブエノスアイレス

３章 建物防御の考え方

- 建物の防御は建物を守るために考えられるあらゆる手段の総和である
- 配置計画、警備計画、防御体制によりテロリストに攻撃を思いとどませる
- 攻撃対象を分散し、甚大な被害を防ぐ
- 物理的な防御壁を構築する
- 構造を強化し被害を最小限にする
- 業務がすぐに再開できる機能を有する

3.1 設計における防御


構造概要
脅威アセスメントの実施
防御が必要？
予防的処置を講じる
想定する爆破状況を設定
爆圧及び荷重計算の評価
爆発による建物被害分析
建物被害評価
被害は許容範囲か？
構造の再検討
設計は経済的に妥当か？
許容被害基準の再検討
詳細設計および施工

目次 (以下省略)

4章　防止方法
5章　建物の設計
6章　爆薬
7章　爆圧と荷重
8章　動的応答
9章　材料特性
10章　構造設計のアプローチ
11章　詳細設計と構造物の接合

目次（以下省略）

12章　基礎
13章　非構造物の対策
14章　被害を受けた建物の調査
参考文献
付録A　シェルター空間
付録B　衝撃波のパラメータ
付録C　変形に関する図表
付録D　ガラスの防御設計

参考文献

1) 岡本隆之祐　水平力を受ける箱形断面柱-H形断面はり接合部に関する研究

2) 野津、日比、小川：第18回　風工学シンポジウム、2004　P133～138

3) 日経アーキテクチュアー　2001.11.26

4)情報化超高層ビルが爆破されたら
　情報システム技術委員会シンポジュム1993

5) 爆発に対する建物の防御　英国鋼構造協会