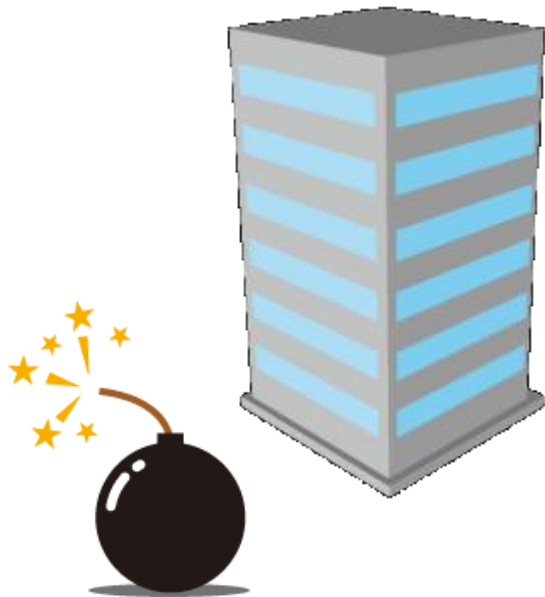


建築分野における爆発安全工学

Blast resistant and safety engineering in building



2013年1月22日

山口 信

熊本大学大学院自然科学研究科
環境共生工学専攻・助教

はじめに：建築分野における爆発問題

爆発荷重	対象構造物
ガス・蒸気爆発	石油精製プラント，可燃性ガス製造・貯蔵施設
粉塵爆発	製粉工場，穀物倉庫，採炭坑道
火薬・爆薬爆発	火薬類製造・貯蔵施設，不発弾等の処理施設， 官庁などの重要施設，社会基盤構造物（運輸，エネルギー等）， 防衛施設・建物，シェルター



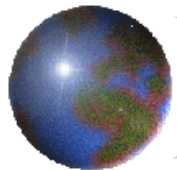
爆薬爆発



ガス爆発



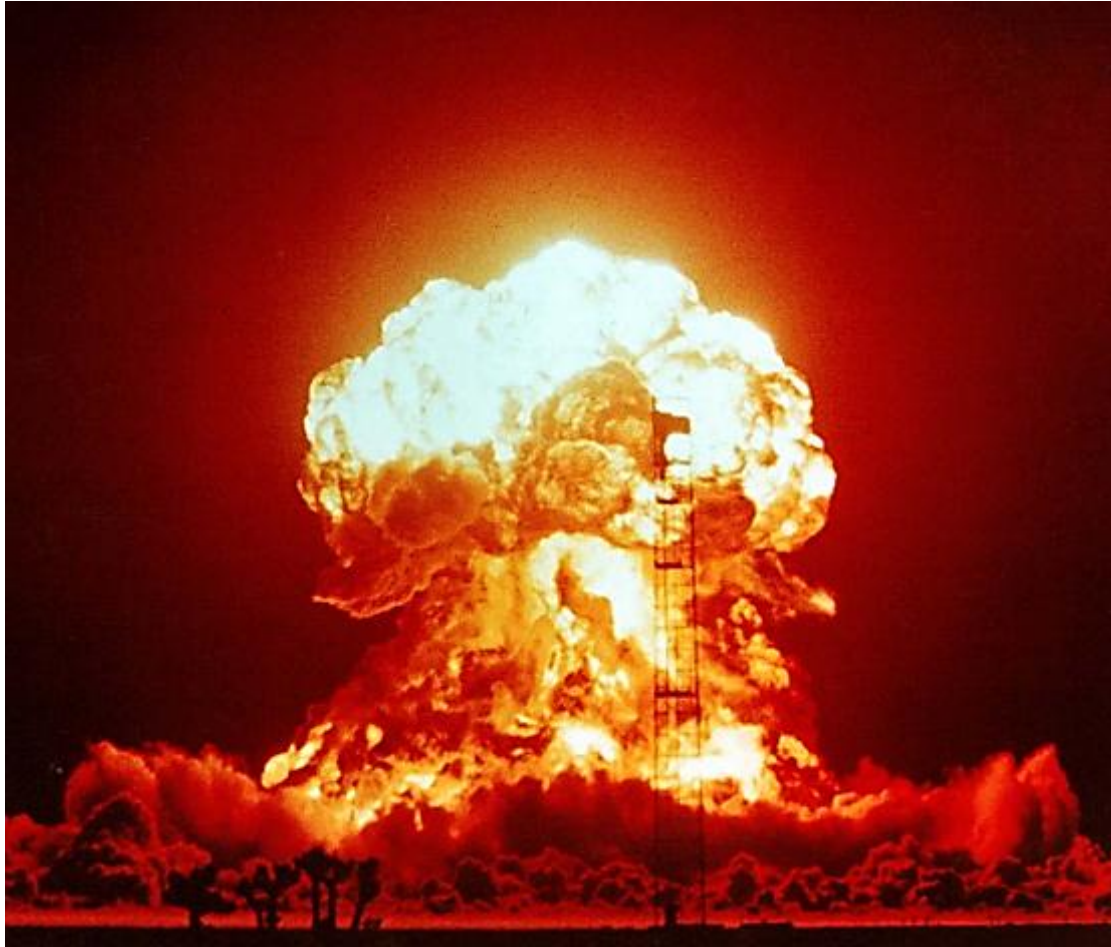
水素爆発



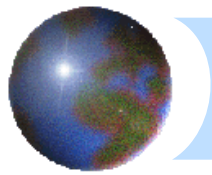
第1部 爆発現象とその周辺への影響

第2部 構造部材の耐爆設計の考え方

第1部 爆発現象とその周辺への影響



(写真) 23キロトンの爆薬の爆発, 1953年



1. 爆発現象とその周辺への影響

用語の定義

■ 爆発物 (explosive substance)

： 化学的・熱力学的に不安定な平衡状態にある一つまたは多くの均一・不均一系物質であり，火や熱あるいは衝撃の作用によって物理的・化学的変化を起こして周囲に急激な圧力上昇を及ぼす物質

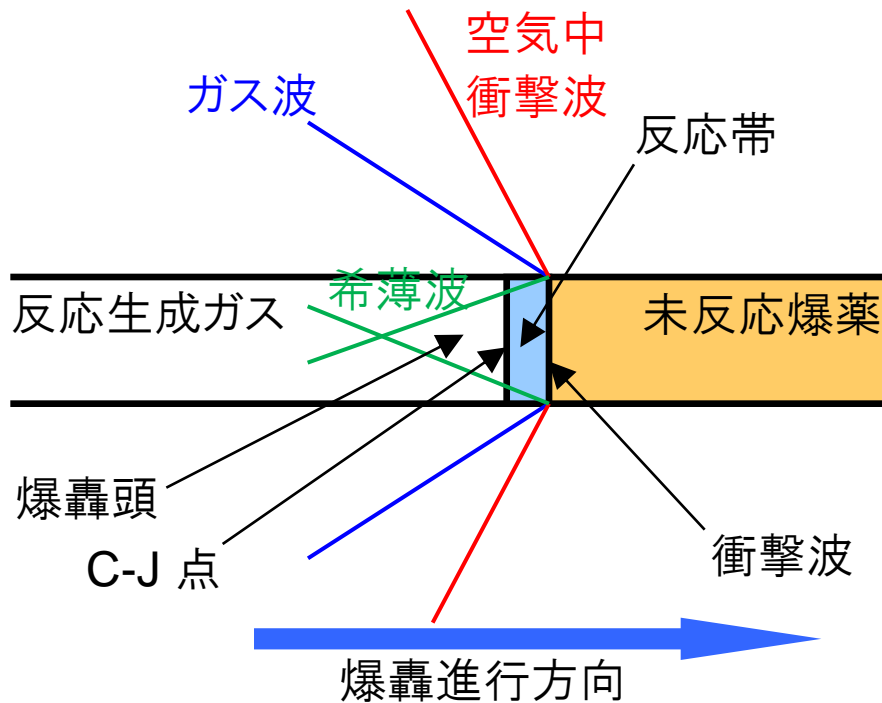
■ 爆発 (explosion)

： 何らかの化学的または物理的原因によって圧力が急激に発生・上昇するかまたは解放することによって，爆発音(爆音)を伴ってガスが膨張する現象

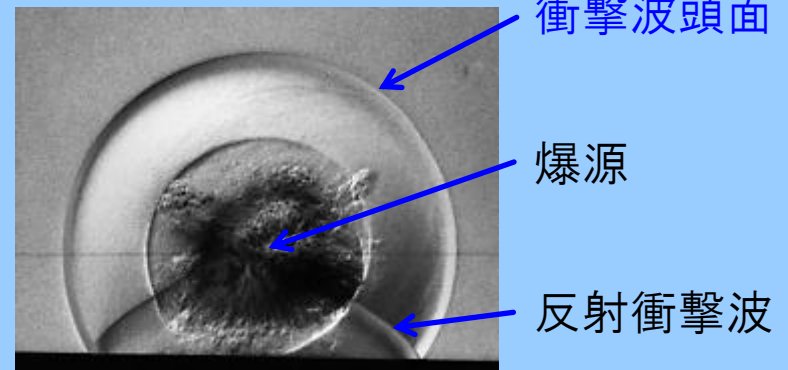
- ・ **物理的爆発** …… 例えば，風船の爆発
真空瓶の爆発
ボイラーの爆発
火山の爆発 など
- ・ **化学的爆発** …… 例えば，火薬類(火薬・爆薬)の爆発
可燃性気体(ガス)の爆発
粉じん爆発 など

1. 爆発現象とその周辺への影響

火薬類の爆発

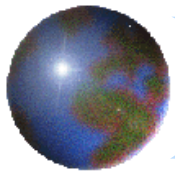


爆轟によって生じた高温・高圧のガスは、周囲の空気を圧縮し、超音速で外側に広がる衝撃波 (shock wave)を形成する。



	反応速度 (m/s)	破壊機構
爆燃 (deflagration)	300程度	ガスの膨張による <u>推進作用</u> (衝撃波を伴わない)
爆轟 (detonation)	2000~8000	<u>衝撃波による破壊作用</u> + 推進作用 (衝撃波の発生を伴う)






1. 爆発現象とその周辺への影響

代表的な産業・軍用爆薬

	密度 (g/cm ³)	爆速 (m/s)	爆轟圧 (GPa)	爆発熱 (MJ/kg)	爆轟エネルギー (MJ/kg)
トリニトロルエン(TNT)	1.654	6950	17.7	4.4	4.29
テトリル	1.73	7720	24	4.8	【不明】
RDX	1.82	8950	34.1	5.4	5.36
HMX	1.905	9120	39.5	5.7	5.68
硝安油剤爆薬(ANFO)	0.85-1.0	3000	【不明】	【不明】	3.84
ペンスリット(PETN)	1.78	8310	34	6.3	5.71

 **TNT等価薬量** …… 爆薬の爆発によって放出されるエネルギーを
エネルギーが等しいTNTの質量に換算する方法

(例) ペンスリット(PETN)のTNT等価係数は,

$$\frac{5.71}{4.29} = 1.331 \Rightarrow \underline{100\text{kgのPETNは, 133.1kgのTNTに相当する}}$$

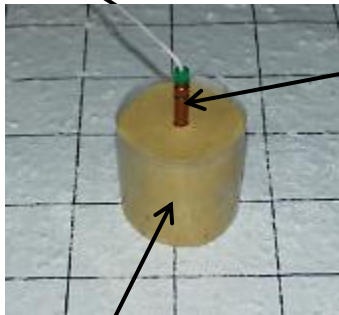
1. 爆発現象とその周辺への影響

爆薬の起爆

爆薬は、ライターやマッチで火を着けても燃えるだけで爆発しない
 ⇒ 火工品(導火線, 導爆線, 雷管)が必要

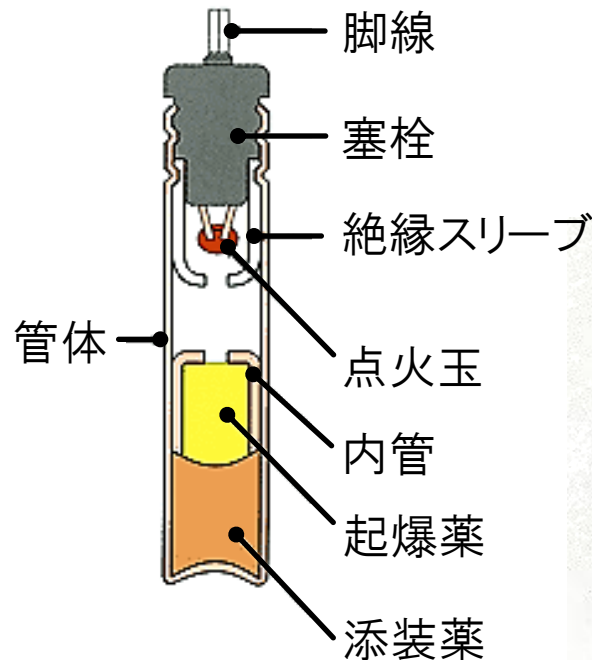
発破器

: 雷管に電流を流す



爆薬

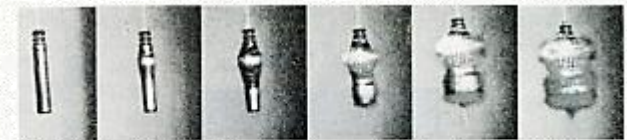
電気雷管
 (electric detonator; ED)



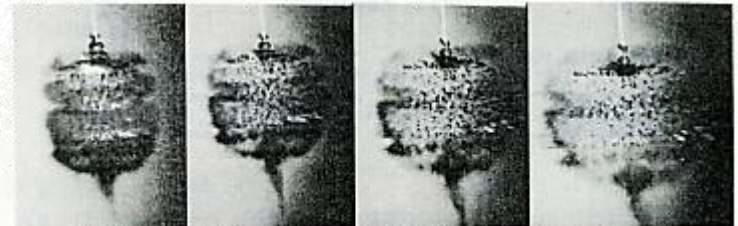
電流によって白金線が加熱

点火薬が発火

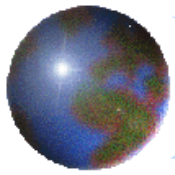
起爆薬⇒添装薬の順に爆轟



起爆前 $t = 1 [\mu s]$ $t = 2 [\mu s]$ $t = 4 [\mu s]$ $t = 6 [\mu s]$ $t = 8 [\mu s]$

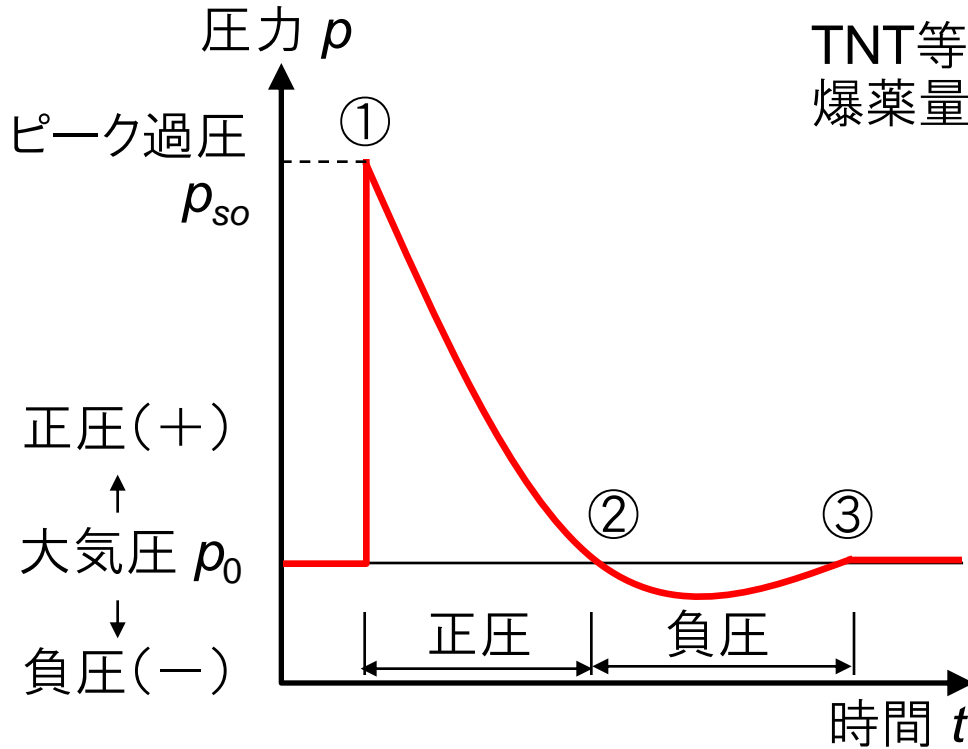


$t = 12 [\mu s]$ $t = 16 [\mu s]$ $t = 20 [\mu s]$ $t = 24 [\mu s]$

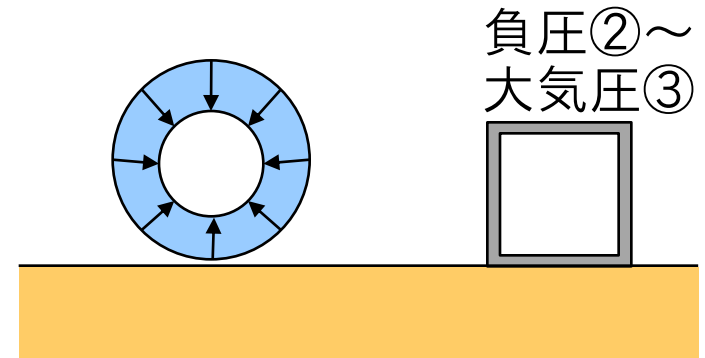
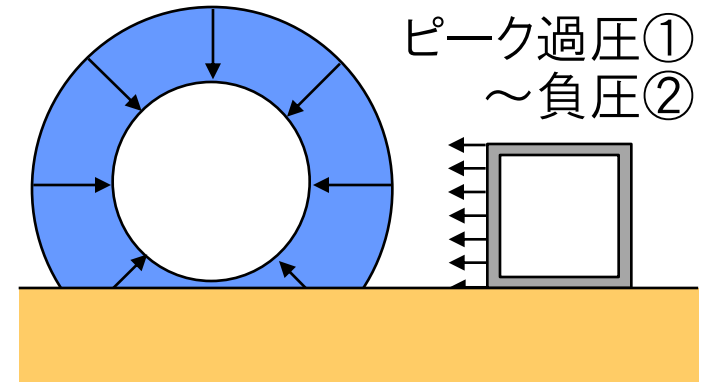
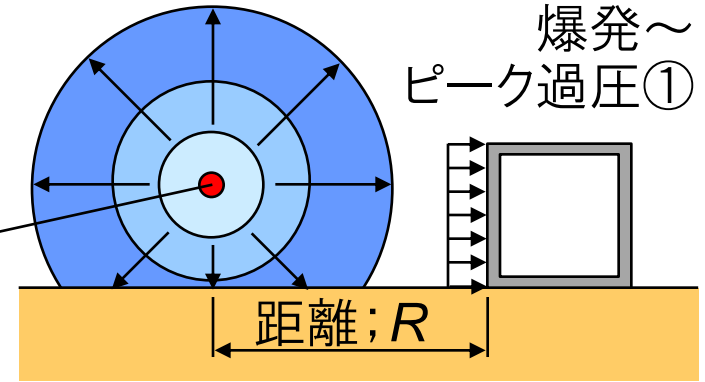


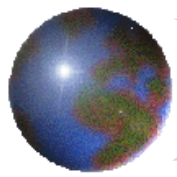
1. 爆発現象とその周辺への影響

衝撃波の伝播 ⇒ 爆風圧荷重



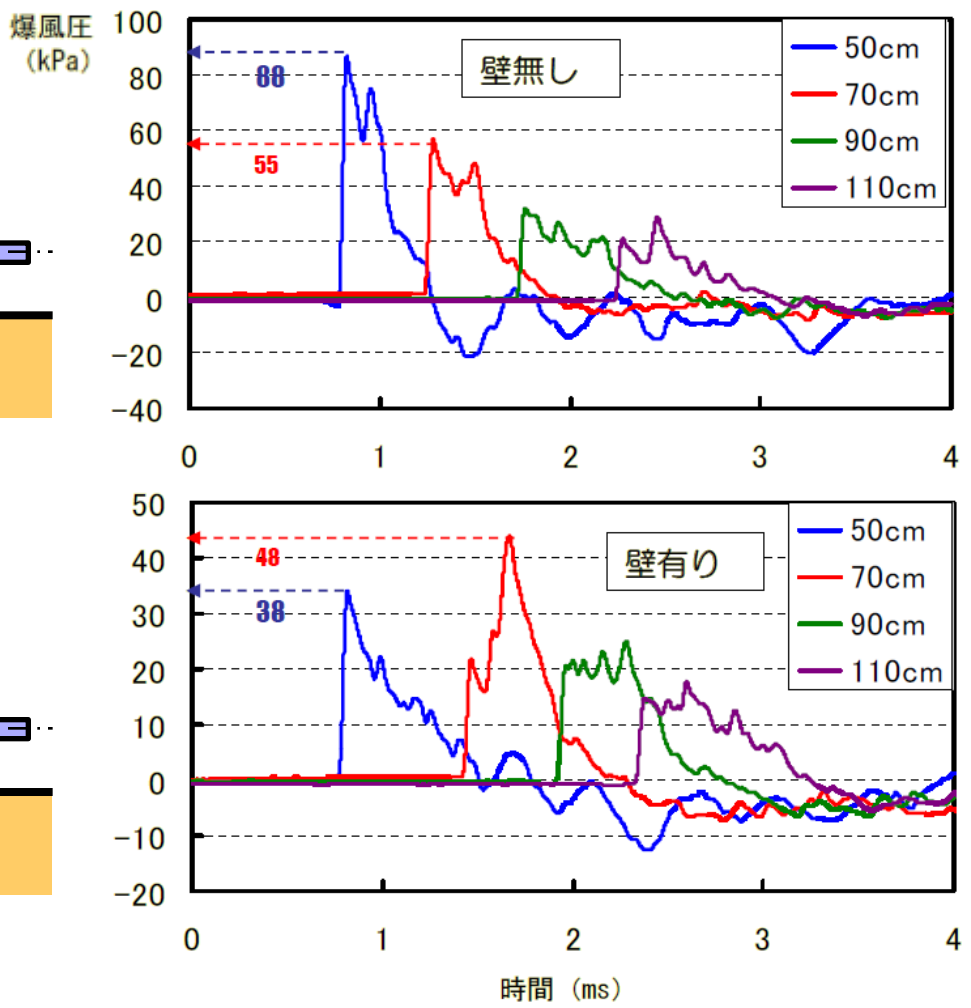
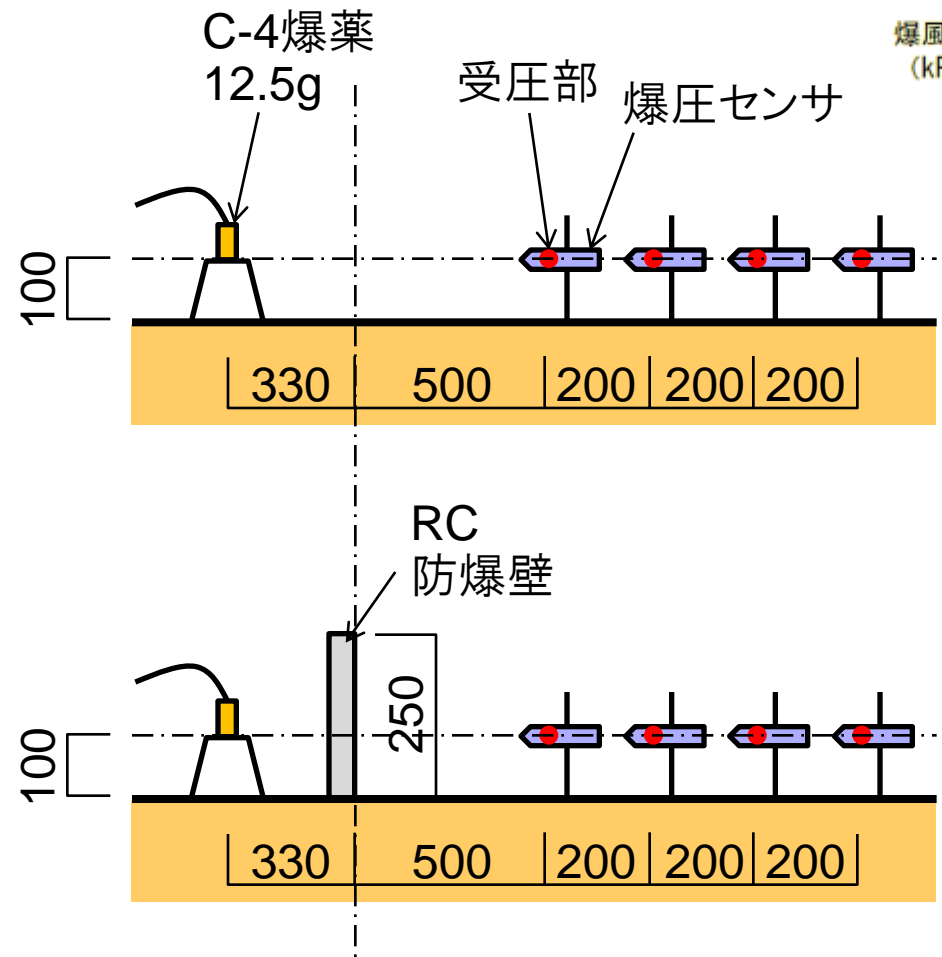
TNT等価
爆薬量; W





1. 爆発現象とその周辺への影響

爆風圧荷重の距離減衰



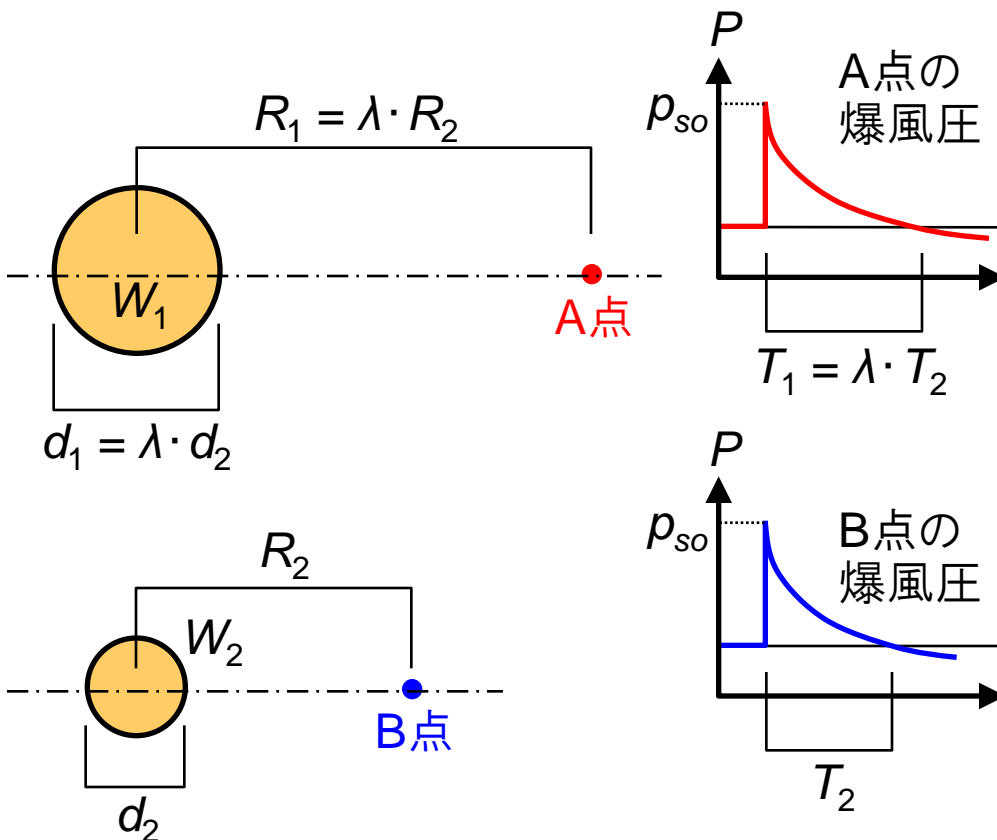
時間 (ms)

1. 爆発現象とその周辺への影響

$$p_{so} = 476.2 \times K^{-1.40} \quad (\text{単位: kPa})$$

ここに, $K = \frac{R}{W^{1/3}}$: 換算距離 (R, W の単位はそれぞれm, kg)

爆発問題における相似則 : Hopkinson-Cranzのスケール則



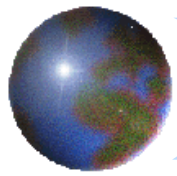
$$W_1 \propto d_1^3, \quad W_2 \propto d_2^3$$

$$\therefore \frac{d_1}{d_2} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{1/3}$$

左図の関係より,

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{\lambda \cdot d_2}{d_2} = \frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^{1/3}$$

$$\rightarrow K = \frac{R}{W^{1/3}} : \text{換算距離}$$

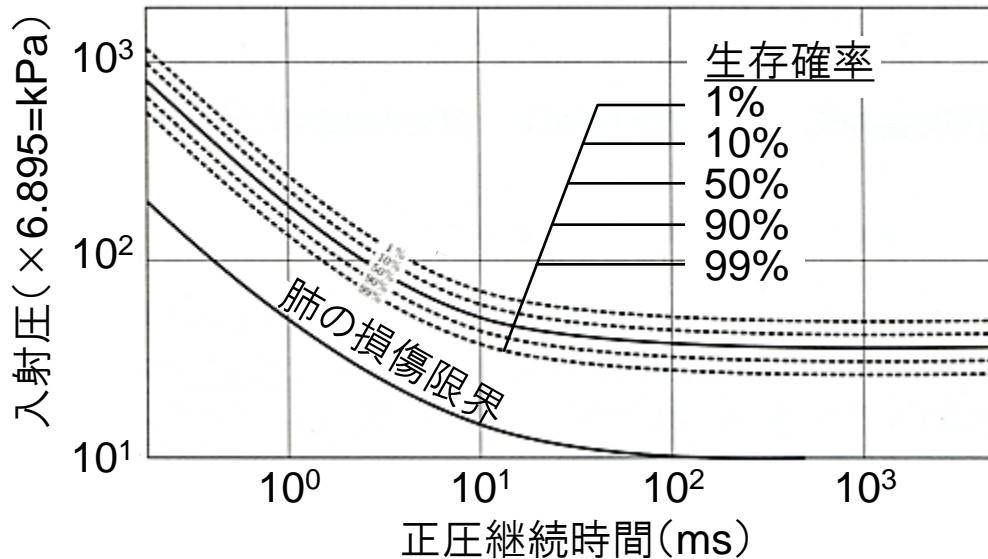


1. 爆発現象とその周辺への影響

人体への影響(1): 一次傷害

一次傷害 …… 爆風圧による直接被害

損傷を受け易い部位は、肺、耳、喉頭、気管、腹腔など



爆薬の爆発による正圧継続時間は数十～数百ms

- ・90%の人が圧死する圧力 = 約400kPa
- ・死亡率が1%以下になる圧力 = 約300kPa

(出典)大野友則編著:基礎からの爆発安全工学,
森北出版, 2011

(試算)

質量 $W=1\text{t}$ の TNT が爆発したとき、
死亡率1%以下となる爆源からの
距離 R は?

$$p_{so} = 476.2 \times K^{-1.40}$$

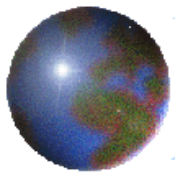
$$\therefore K = \left(\frac{476.2}{p_{so}} \right)^{1/1.40}$$

$$= \left(\frac{476.2}{300} \right)^{1/1.40} = 1.391$$

$$K = \frac{R}{W^{1/3}}$$

$$\therefore R = K \cdot W^{1/3}$$

$$= 1.391 \times 1000^{1/3} = 13.9 \text{ (m)}$$



1. 爆発現象とその周辺への影響

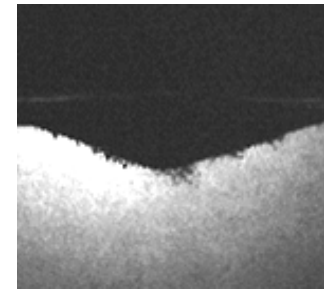
人体への影響(2): 二次傷害

二次傷害 …… 構造物などの破片が飛散・衝突することによる傷害
裂傷, 貫通, 鈍的傷害など

国名	損傷エネルギー基準値
アメリカ	人員が戦闘能力を維持するためには, 破片の許容エネルギー値は58 ft-lb(約8kgf·m = 79 J)以下
フランス	① 人体内部が損傷 : 2.6 kgf·m以上 ② 骨部が損傷 : 6 kgf·m以上 ③ 致死にはいたらないが戦闘能力が喪失 : 8 kgf·m以上
ドイツ	戦闘を不能にする最小限值は8 kgf·m
日本	① 人体内部が損傷 : 2.6 kgf·m以上 ② 骨部が損傷 : 6 kgf·m以上 ③ 致死にはいたらないが戦闘能力が喪失 : 8 kgf·m以上 ④ 戦闘能力を不能にする最小値 : 10 kgf·m ⑤ 骨部が破砕し, 死にいたる : 20 kgf·m以上

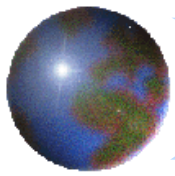
(試算)

版厚75mmのRC版の
接触爆発(爆薬量200g)



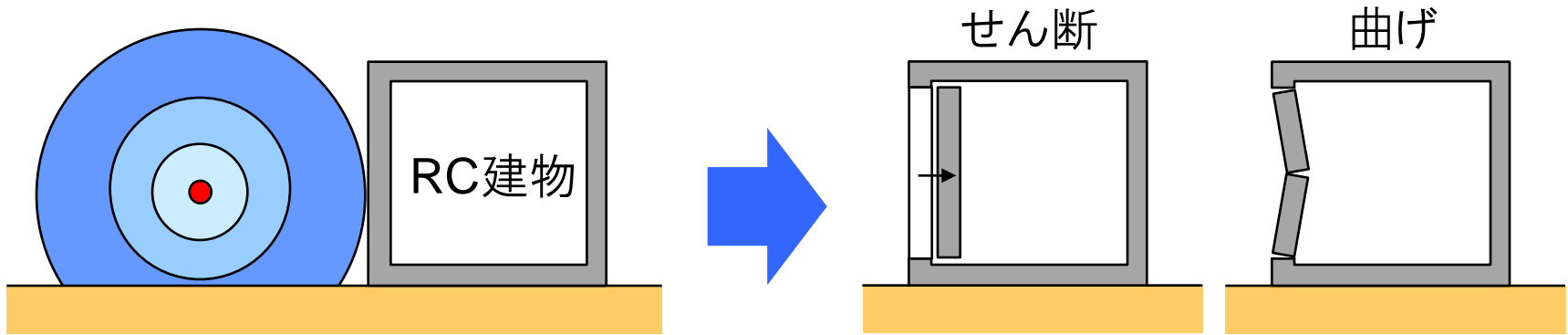
スポール片速度 : 111 m/s
スポール片質量 : ≤ 50 g

$$\begin{aligned} \therefore \frac{1}{2}mv^2 &= \frac{1}{2} \times 0.05 \times 111^2 \\ &= 308 \text{ J} \gg 79 \text{ J} \end{aligned}$$

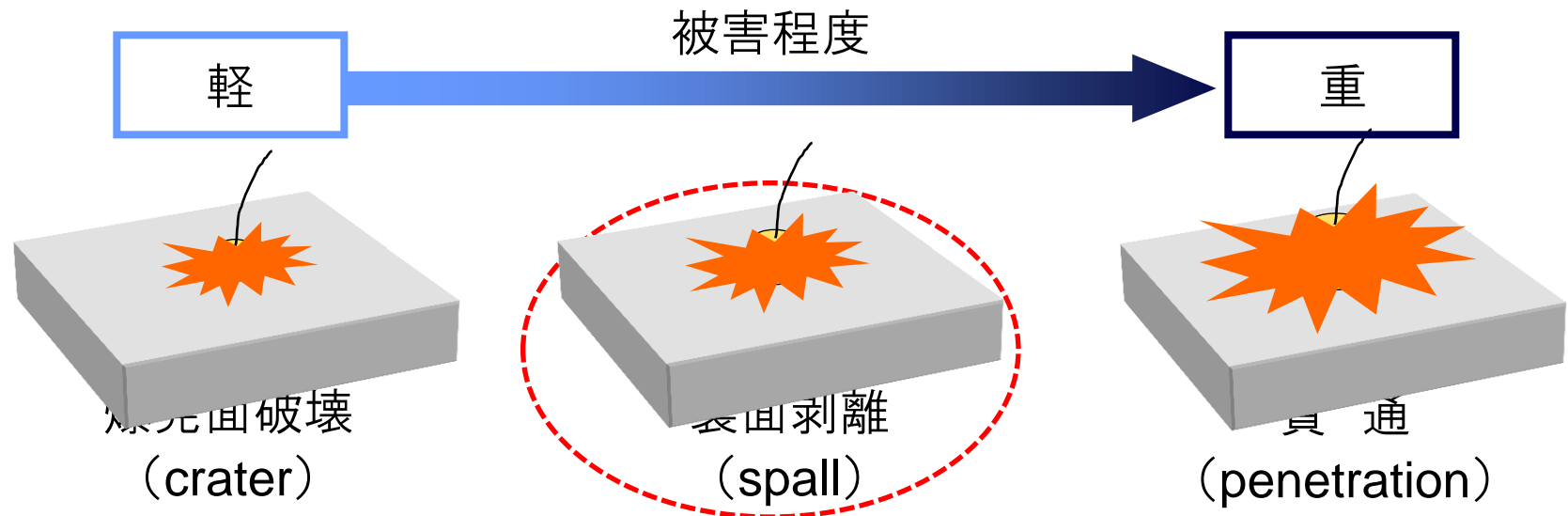


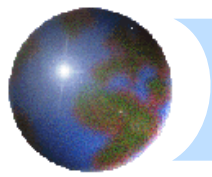
1. 爆発現象とその周辺への影響

Case-1 : 遠距離爆発 ⇒ 全体破壊



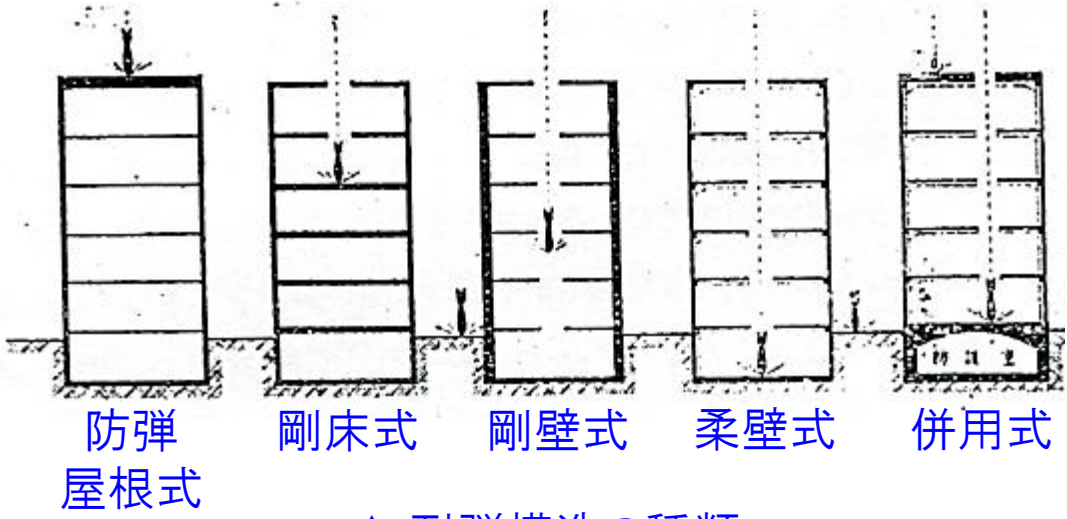
Case-2 : 接触・近接爆発 ⇒ 局部破壊



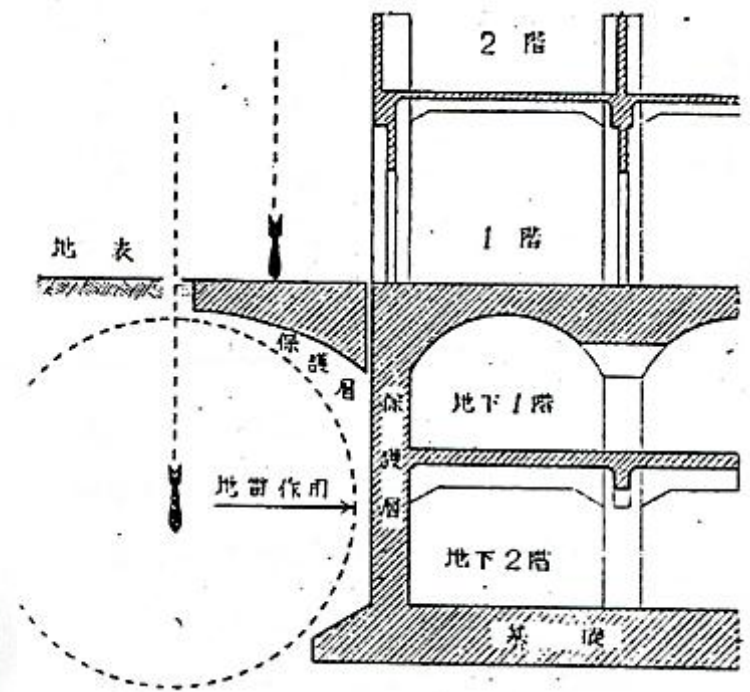


1. 爆発現象とその周辺への影響

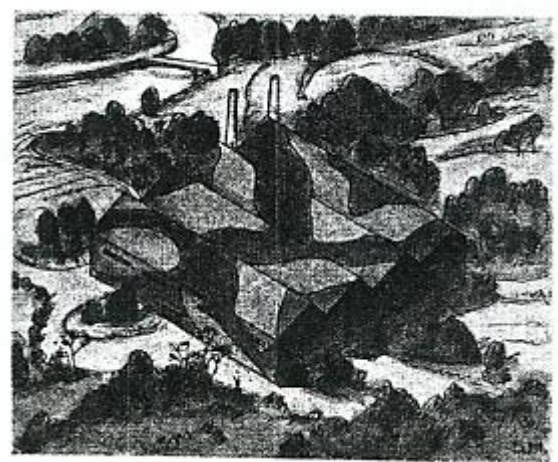
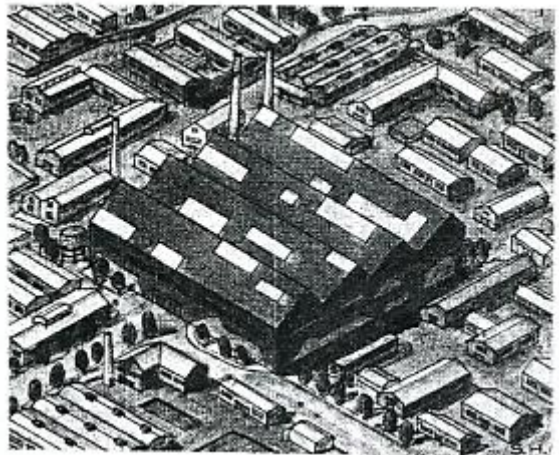
戦時中はどうしてた？



▲ 耐弾構造の種類



▲ 地下室防護の考え方



▲ 建築偽装(これに関する指針もあった)

(出典)

- 1) 日本建築学会: 建築雑誌, pp.1-12, 昭和12年2月号
- 2) 日本建築学会: 建築雑誌, pp.37-44, 昭和16年2月号

第2部 構造部材の耐爆設計の考え方



(写真) イラク・バグダッドでの爆発, 2011年

2. 構造部材の耐爆設計の考え方

「耐爆」と「防爆」の違い

■ 耐爆 (blast resistance)

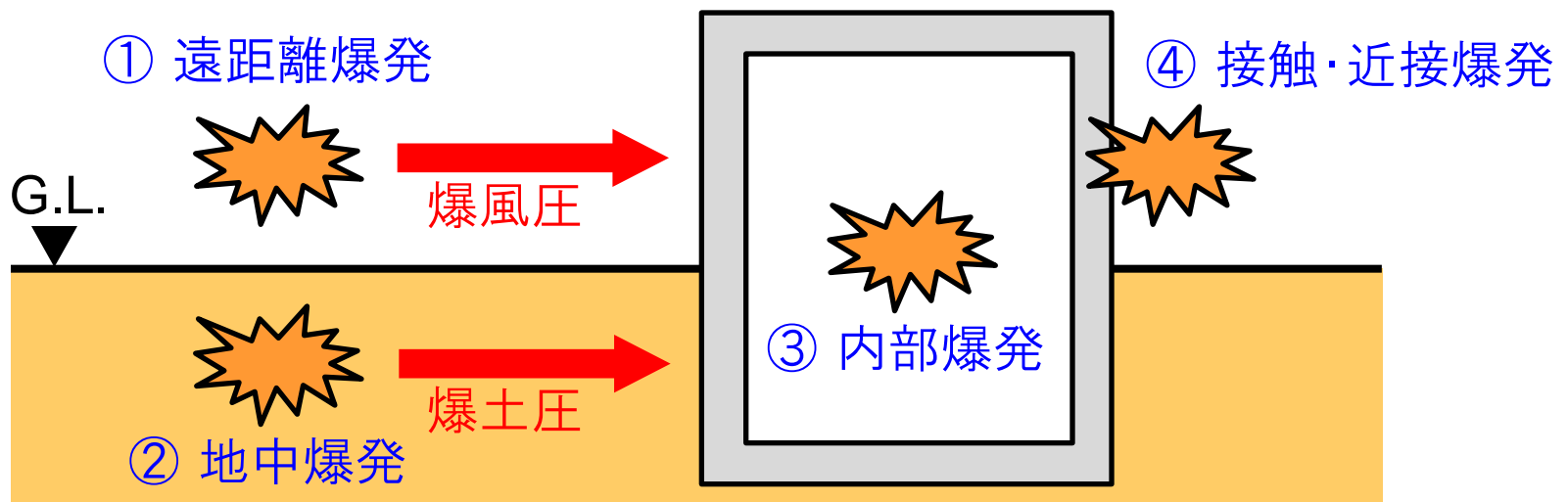
・・・爆発荷重の作用に対して壊れない(爆圧に耐える)性能

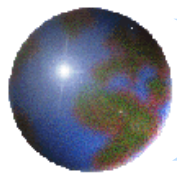
■ 防爆 (blast protection)

・・・① 爆発が発生するのを防止する性能

② 爆発によって発生した爆風や飛散物から人や物を保護する性能

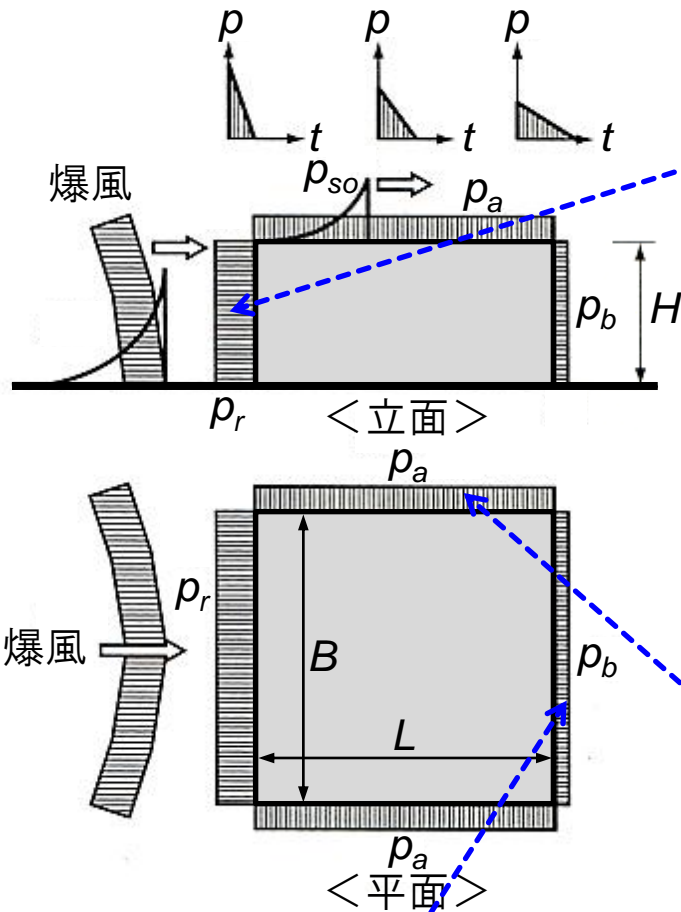
爆源位置による分類





2-1. 遠距離爆発に対する考え方

爆風圧荷重



前壁

反射圧:

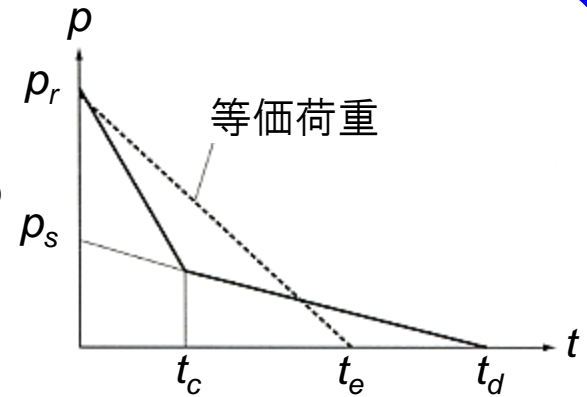
$$p_r = 2p_{so} + (\gamma + 1) \cdot q_0$$

よどみ圧:

$$p_s = p_{so} + C_D q_0$$

$$t_c = 3S/U$$

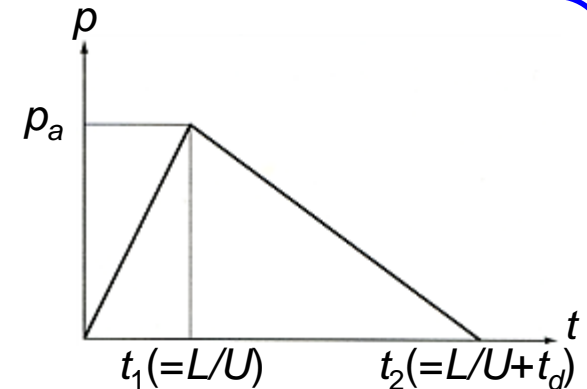
ここに、 p_{so} :ピーク過圧、 γ :比熱比、 q_0 :最大動圧、 C_D :抗力係数、 S :通過距離、 U :衝撃波速度



側壁・屋根面

$$p_a = C_E p_{so} + C_D q_0$$

ここに、 C_E :減衰係数



※ 後壁に作用する爆発荷重は、設計上考慮しないことが多い

2-1. 遠距離爆発に対する考え方

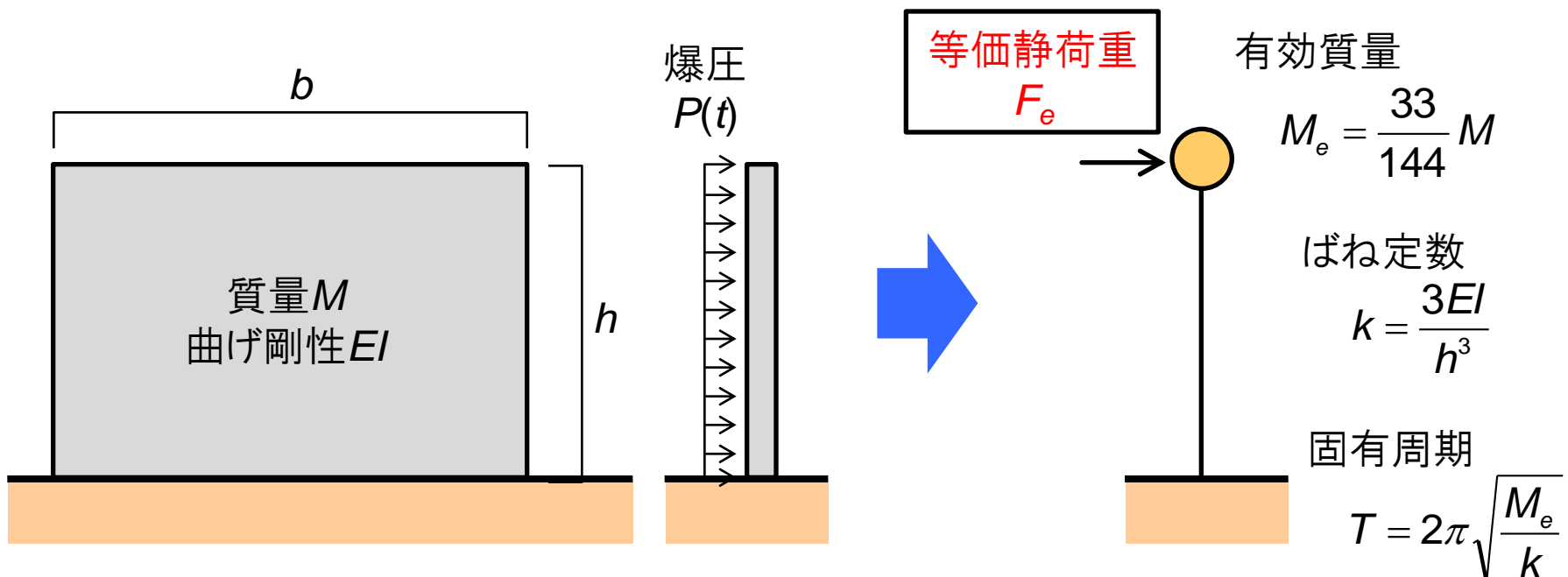
RC防爆壁の耐爆設計方法(1)

設計方針

■ RC壁を等価な1質点系構造物に置換

■ 爆発荷重を等価静荷重に置換

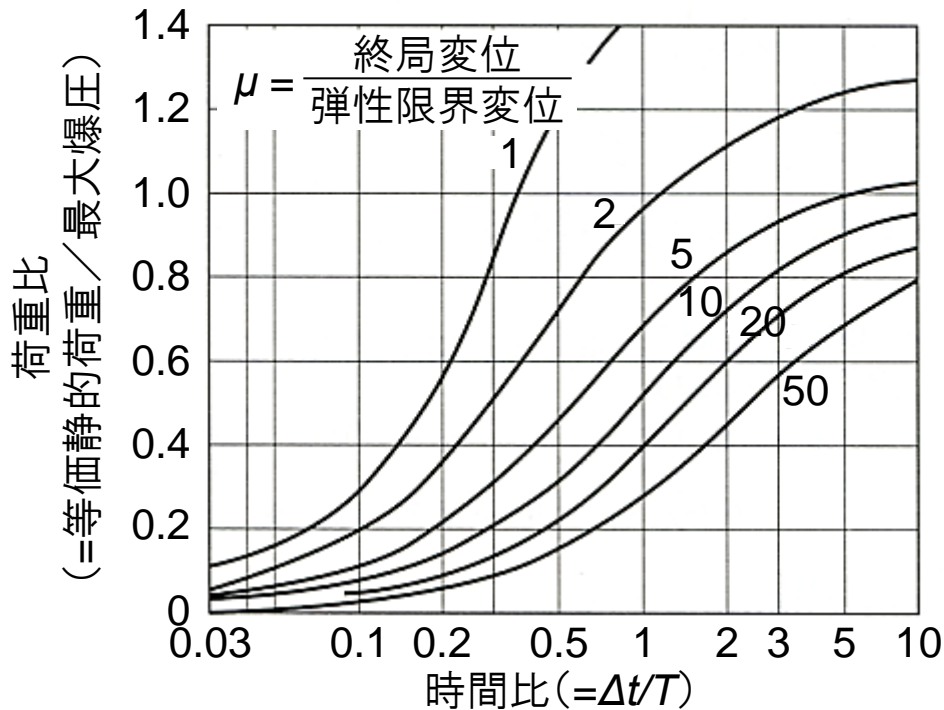
曲げ耐力照査・・・終局曲げモーメント > 作用曲げモーメント ⇒ O.K.



2-1. 遠距離爆発に対する考え方

RC防爆壁の耐爆設計方法(2): 等価静荷重の導出

■ 靱性率 $\mu = \frac{\text{終局変位}}{\text{弾性限界変位}}$



高靱性 ⇒ 耐爆性能に優れる

(例)

固有周期 $T = 5.578 \times 10^{-3} \text{ s}$

爆速 6000 m/s

爆源からの距離 $R = 2 \text{ m}$

∴ 爆発作用時間 Δt は,

$$\Delta t = 2/6000 = 3.333 \times 10^{-4} \text{ s}$$

∴ 時間比は,

$$\Delta t / T = 0.06$$

靱性率 $\mu = 20$ とすると, 左図より
荷重比は 0.01

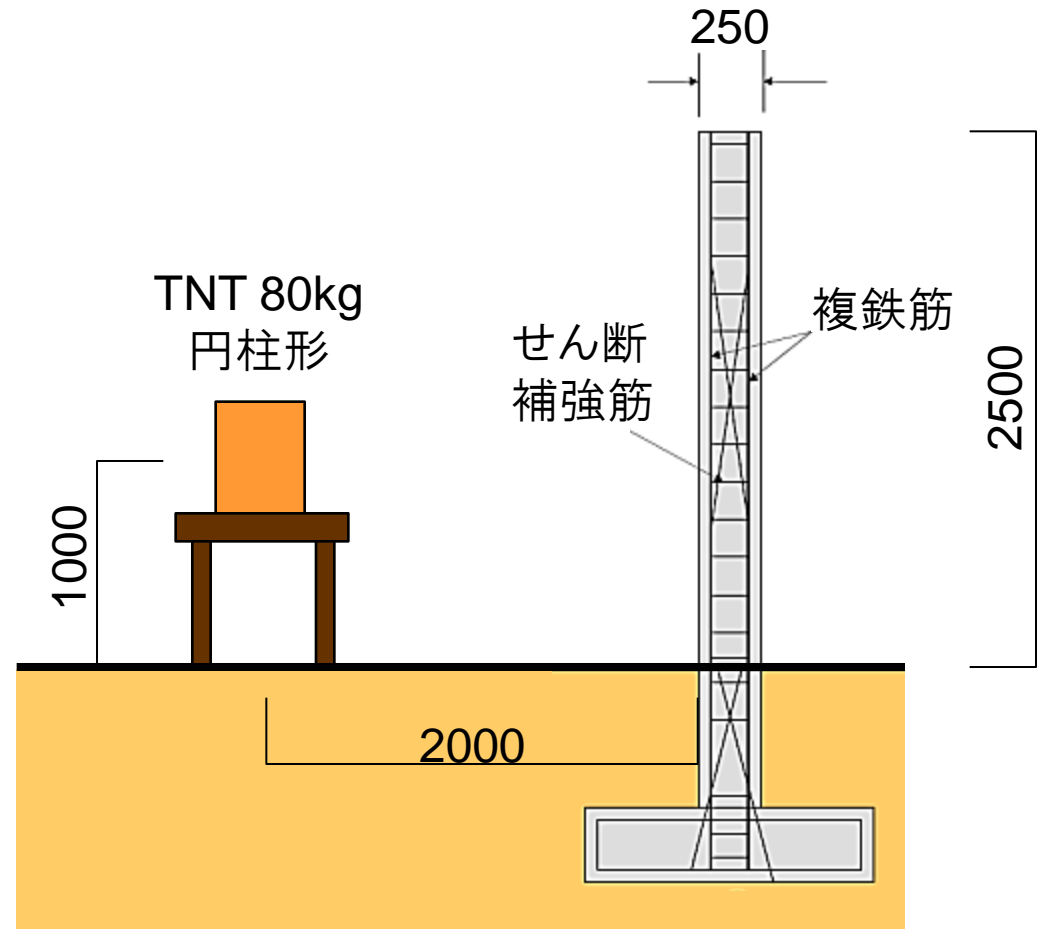
∴ 等価静荷重 $F_e = 0.01 P(t)$

2-1. 遠距離爆発に対する考え方

RC防爆壁の検証実験(1): 実験方法

経済産業省

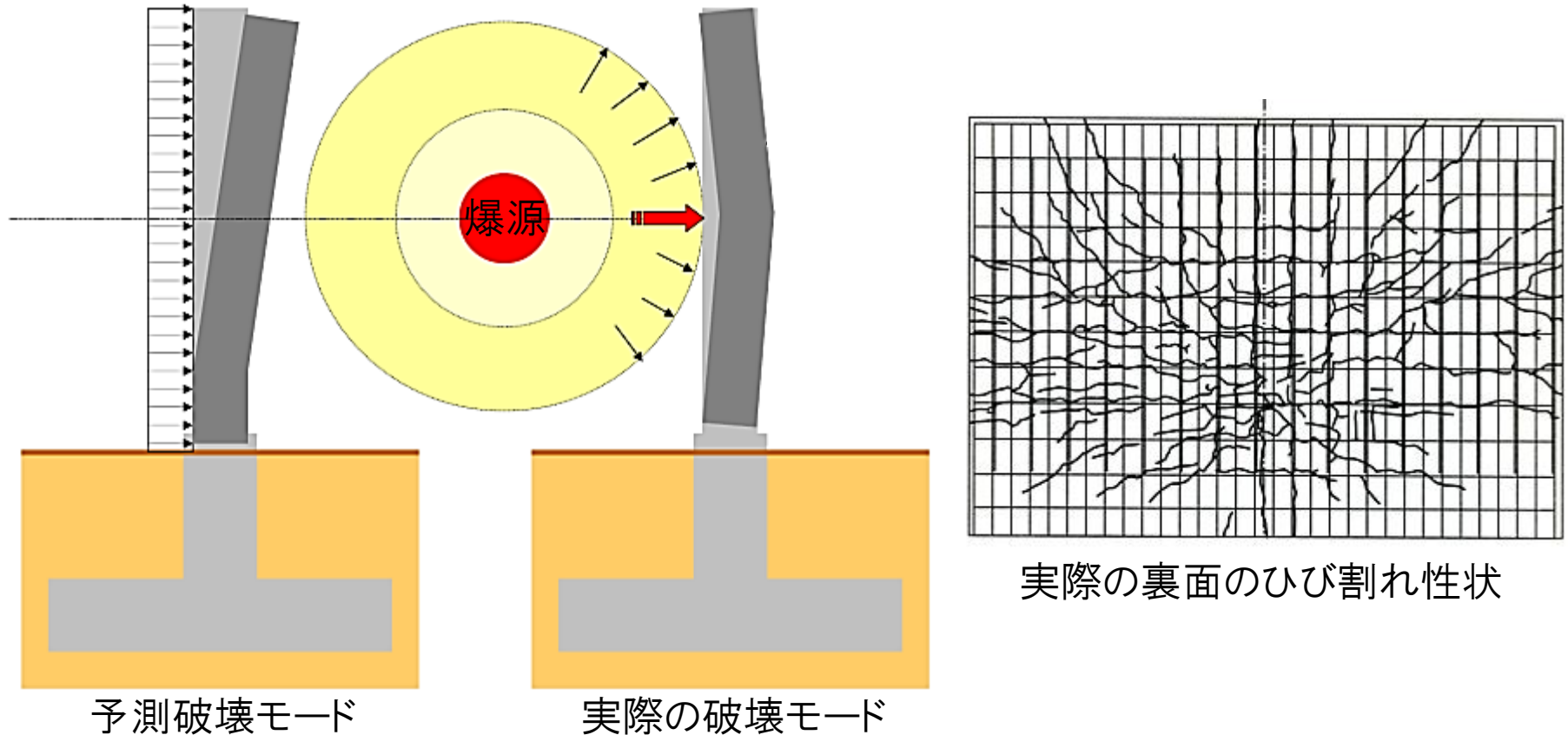
「保安設備の検討に資する
保安設備強度評価の研究」
(2005年11月)



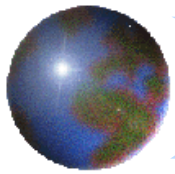
※ 防爆壁は、前頁の耐爆設計法により設計されたもの

2-1. 遠距離爆発に対する考え方

RC防爆壁の検証実験(2): 実験結果



- 防爆壁が十分な耐爆性能を有していることは確認できた
- 破壊モードの相違 ⇒ 設計に爆源位置を考慮する必要あり



2-1. 遠距離爆発に対する考え方

エネルギー耐爆設計法(武藤清, 1966)

「爆圧は構造物に力積として加わる」

① 爆圧によるエネルギー E_B を算出

$$E_B = \alpha \cdot E$$

ここに, $E = I/(2M)$: 全エネルギー

I : 力積

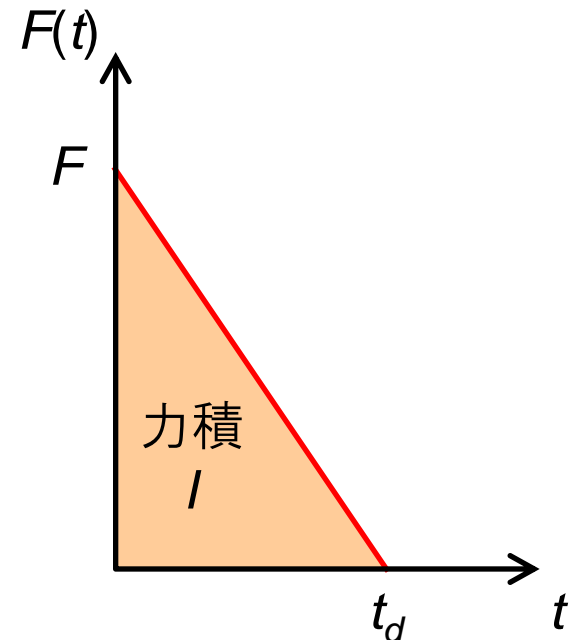
M : 質量

α : 減衰・移動による減少率

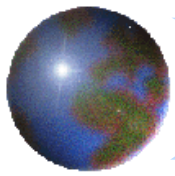
② 部材の吸収エネルギー U を実験または計算で求める。

③ 部材設計

$$E_B < U \Rightarrow \text{O.K.}$$



<理想化した爆発荷重>



2-1. 遠距離爆発に対する考え方

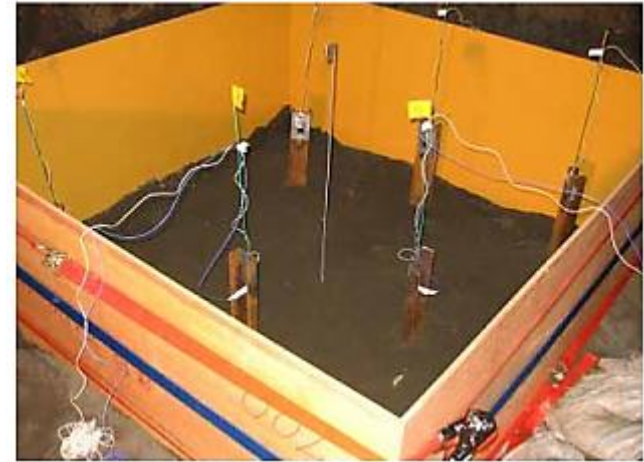
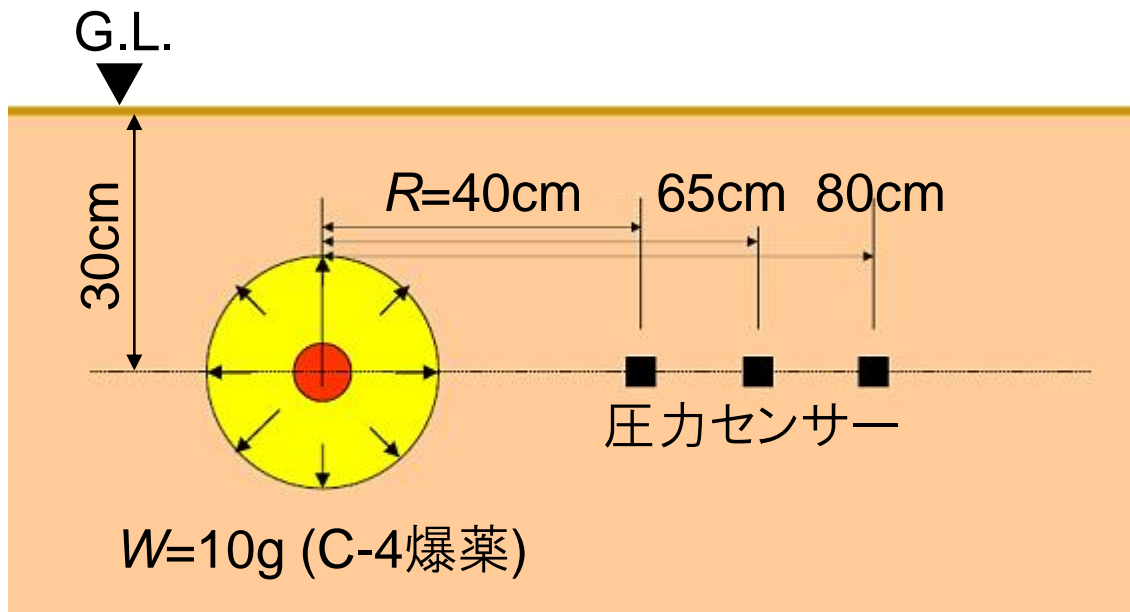
爆風圧荷重の建築物への影響

爆風圧 (kPa)	被害状況
0.2-0.7	ひずみのある大小の窓ガラスが割れる
1	窓ガラスが破壊する一般的圧力
2-3	窓ガラスの10%程度が破壊
3-10	大小の窓ガラスが殆ど破壊
3-5	建物に小さな被害が発生
5-7	家屋の一部に多少の被害が発生
7-14	軽量鉄骨建物の骨組が変形
14-21	<ul style="list-style-type: none"> ・家の壁や屋根が一部崩壊 ・建物に大きな被害が発生 ・煉瓦造家屋の50%が破壊 ・無筋コンクリート壁が破壊

爆風圧 (kPa)	被害状況
21-35	無筋コンクリートおよび軽量鉄骨建物が破壊
35-50	建物の屋根瓦が崩落
50-60	無筋コンクリートブロック(厚20-30 cm)構造物が崩壊
60-70	<ul style="list-style-type: none"> ・木造建物の小屋組が変形, 柱が折損 ・殆どの木造建物が半壊
150-600	木造建物が倒壊
1000-2000	重木造建物, 煉瓦造建物が倒壊
2000-5000	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート造建物の被害大 ・重量コンクリート造建物の崩壊

2-2. 地中爆発に対する考え方

模型地盤を用いた地中爆発実験(1): 実験方法



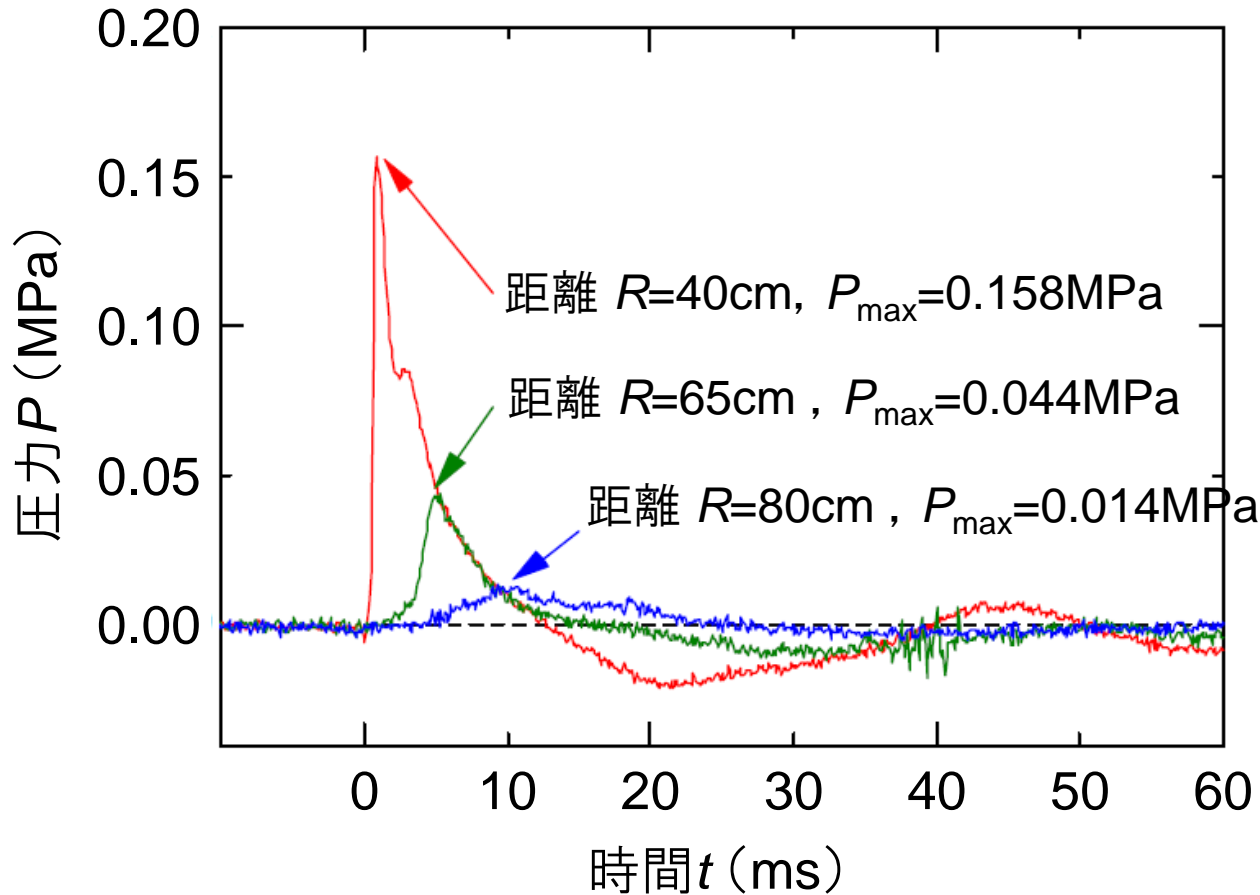
圧力センサー設置状況



模型地盤の外観

2-2. 地中爆発に対する考え方

模型地盤を用いた地中爆発実験(2): 爆土圧の距離減衰



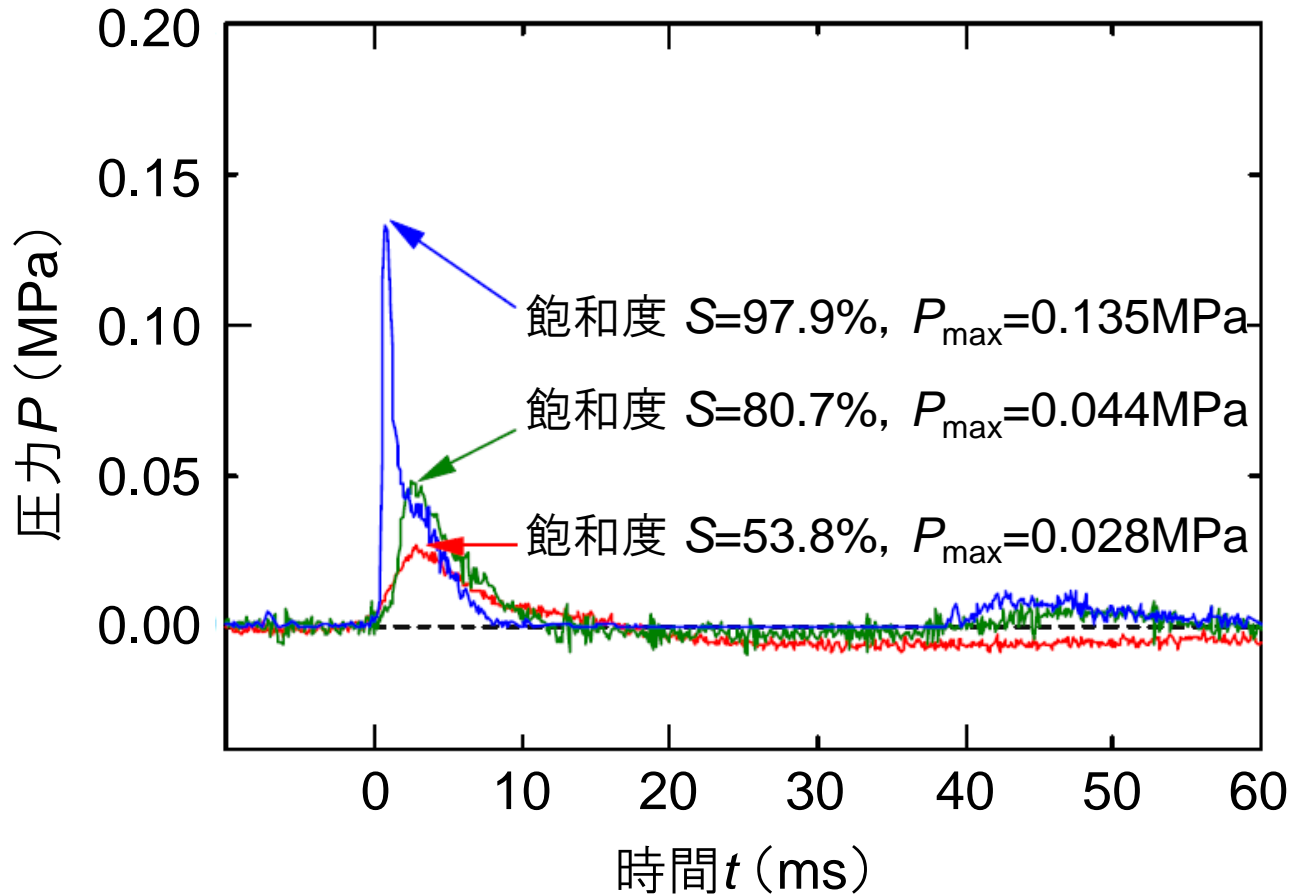
※ 土の飽和度は
80.7%一定

爆源からの距離 ⇒ ① 最大爆土圧 ② 立ち上がり勾配 ③ 継続時間

増
減
緩
長

2-2. 地中爆発に対する考え方

模型地盤を用いた地中爆発実験(3): 爆土圧に及ぼす飽和度の影響



※ 飽和度
: 土中の間隙に
占める水の体積
割合

※ 爆源からの距離
 $R=65\text{cm}$ 一定

土の飽和度 \Rightarrow ① 最大爆土圧 ② 立ち上がり勾配

① 増 ② 増 ③ 急

2-2. 地中爆発に対する考え方

最大爆土圧 P_{\max} の算定式

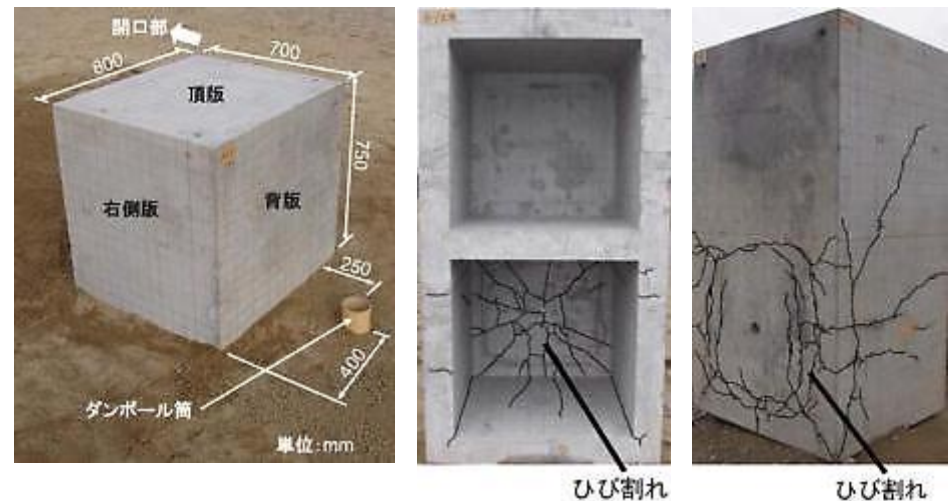
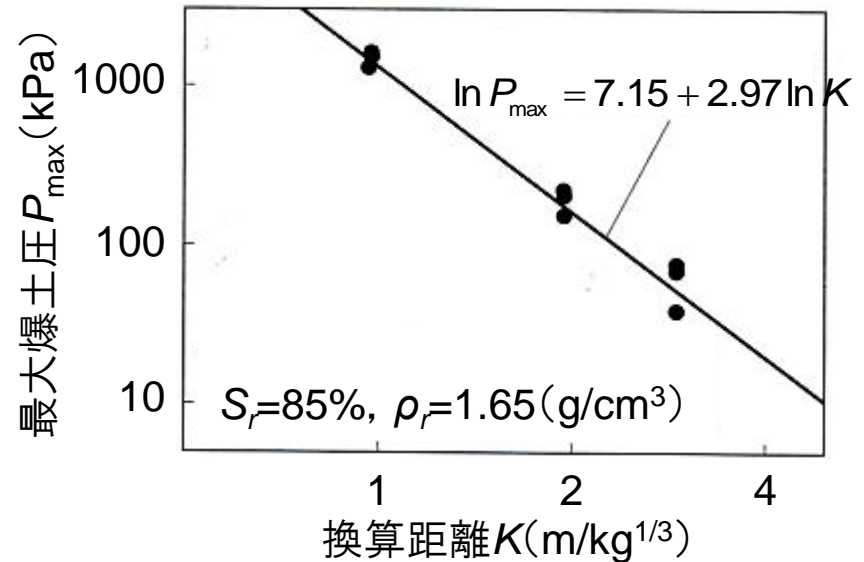
$$\ln P_{\max} = A_p + B_p \ln K$$

$$A_p = 1.85 \rho_t + 4.10$$

$$B_p = \exp\left(\frac{S_r + 5}{99}\right)^9 - 4.5$$

$$K = \frac{R}{W^{1/3}} : \text{換算距離}$$

ここに、 P_{\max} : 最大爆土圧 (kPa)
 ρ_t : 土の湿潤密度 (g/cm³)
 S_r : 土の飽和度 (%)
 R : 爆源からの距離 (m)
 W : TNT等価爆薬量 (kg)



▲ 埋設構造物の地中爆発実験