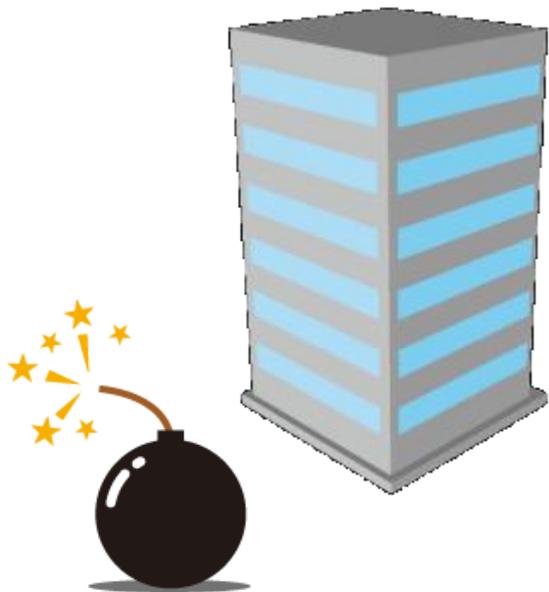


建築分野における爆発安全工学

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



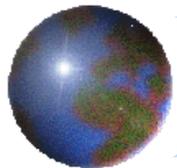
爆薬爆発



ガス爆発



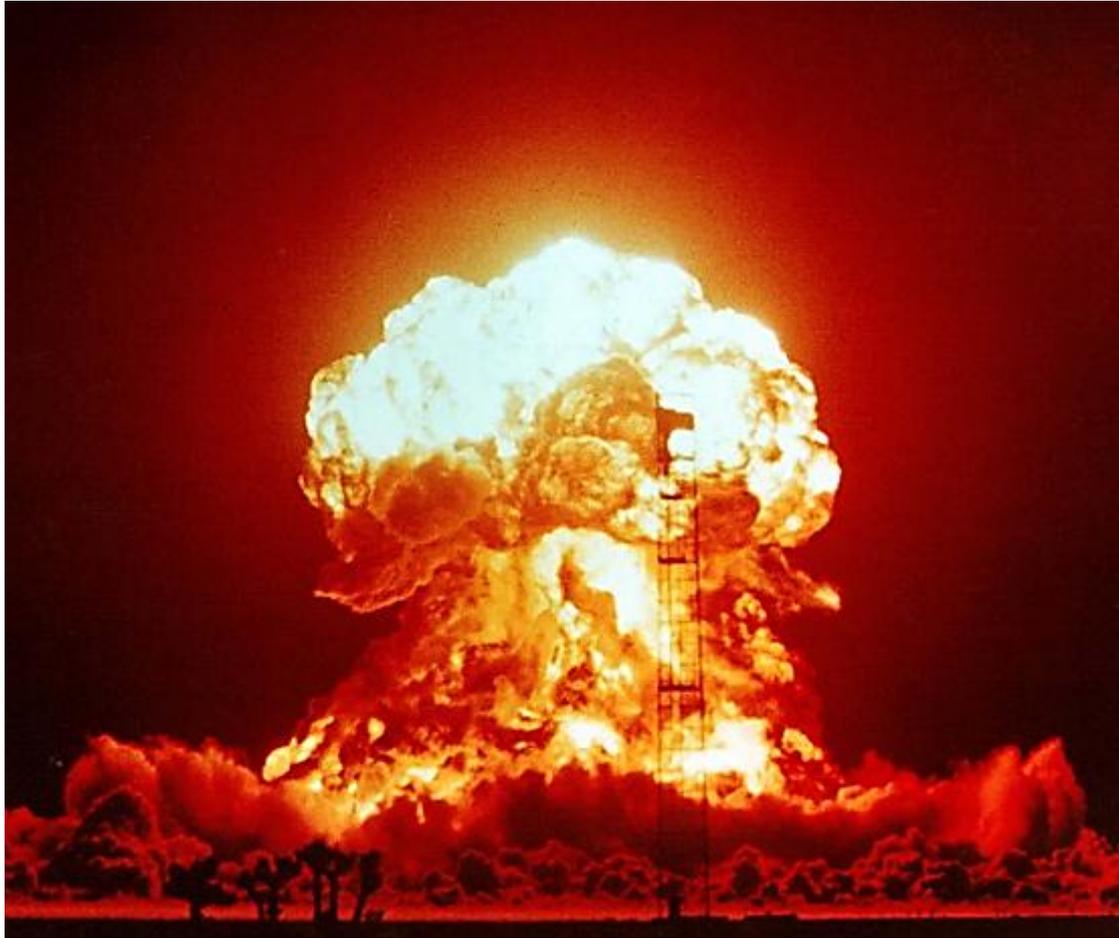
水素爆発



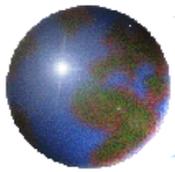
第1部 爆発現象とその周辺への影響

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

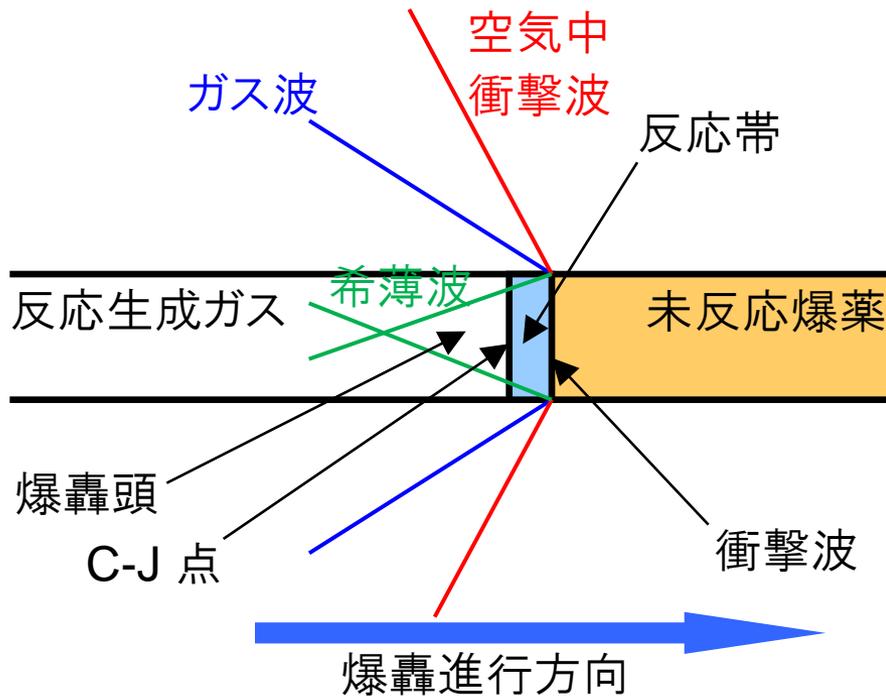
■ 爆発 (explosion)

： 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

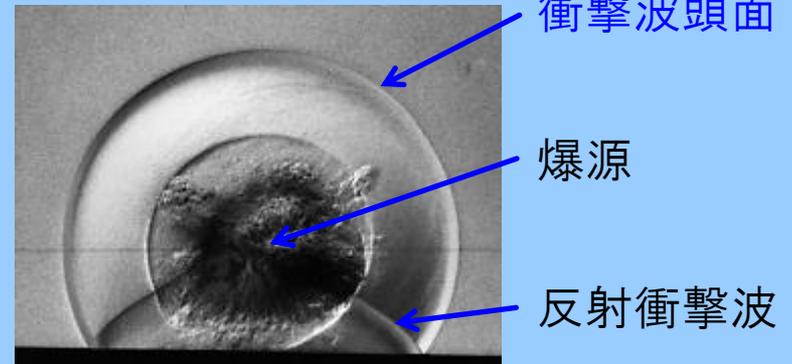
- | | | |
|---|-------|---|
| { | 物理的爆発 | ・・・ 例えば、風船の爆発
真空瓶の爆発
ボイラーの爆発
火山の爆発 など |
| | 化学的爆発 | ・・・ 例えば、火薬類(火薬・爆薬)の爆発
可燃性気体(ガス)の爆発
粉じん爆発 など |

1. 爆発現象とその周辺への影響

火薬類の爆発

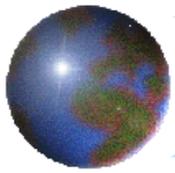


爆轟によって生じた高温・高圧のガスは、周囲の空気を圧縮し、超音速で外側に広がる衝撃波 (shock wave)を形成する。



	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

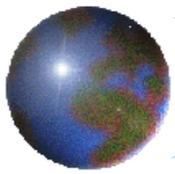
代表的な産業・軍사용爆薬

	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,

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



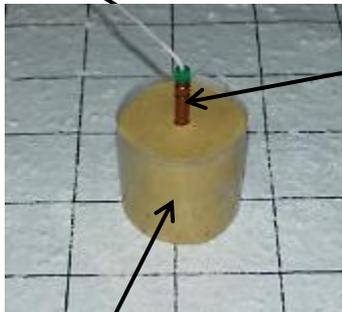
1. 爆発現象とその周辺への影響

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

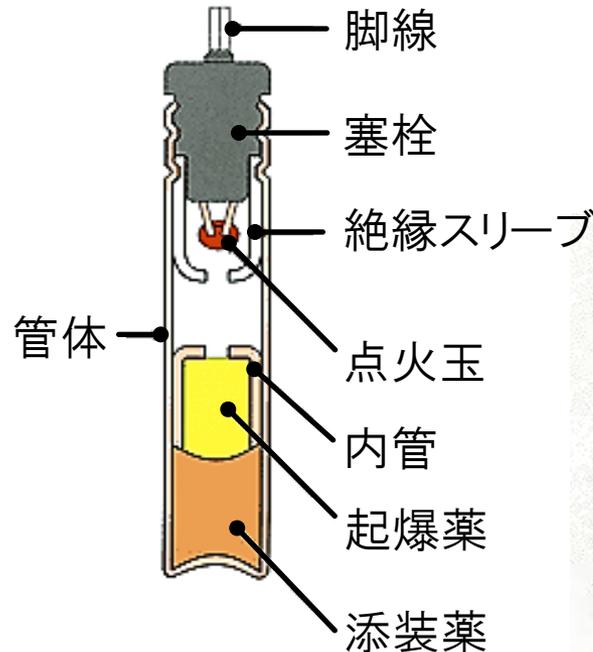
発破器

: 雷管に電流を流す



爆薬

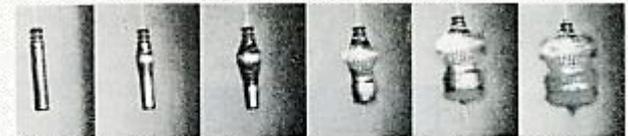
電気雷管
(electric detonator; ED)



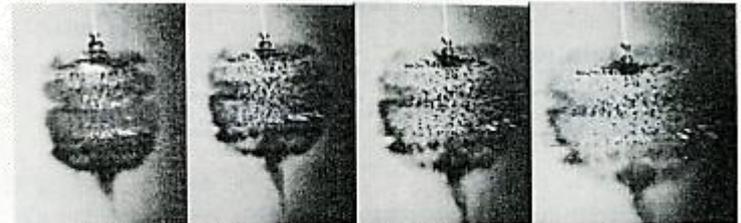
電流によって白金線が加熱

点火薬が発火

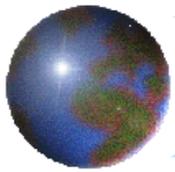
起爆薬⇒添装薬の順に爆轟



起爆前 t = 1 [μs] t = 2 [μs] t = 4 [μs] t = 6 [μs] t = 8 [μs]

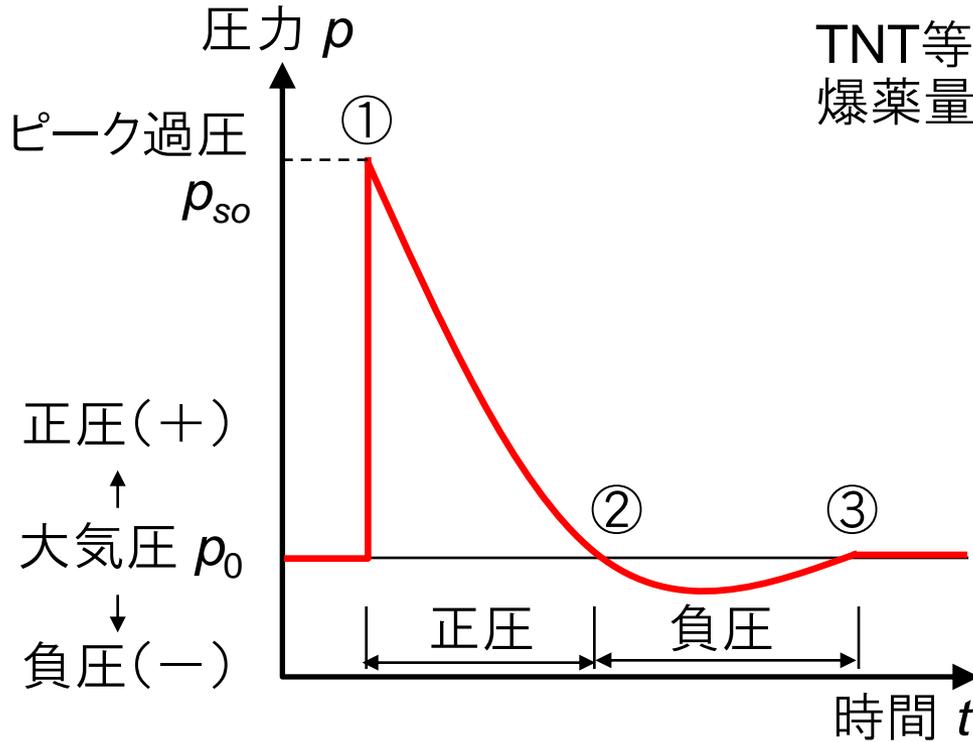


t = 12 [μs] t = 16 [μs] t = 20 [μs] t = 24 [μs]

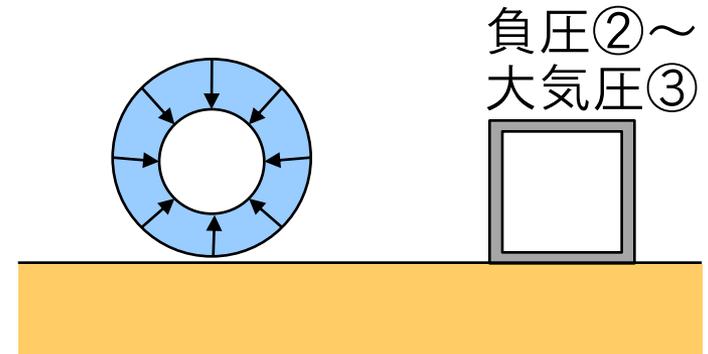
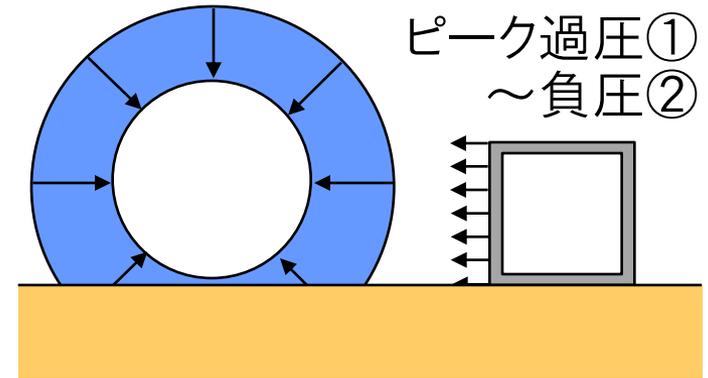
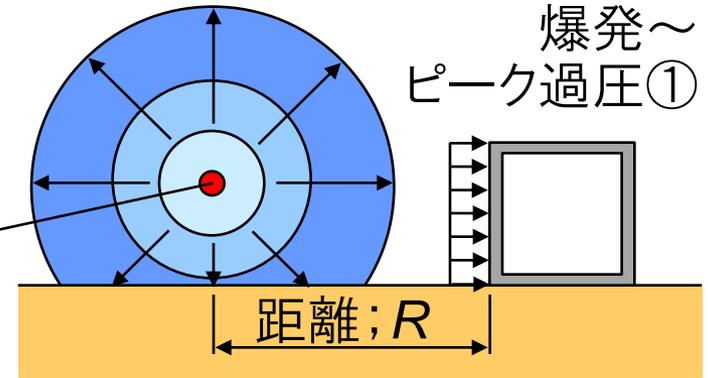


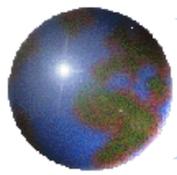
1. 爆発現象とその周辺への影響

衝撃波の伝播 ⇒ 爆風圧荷重



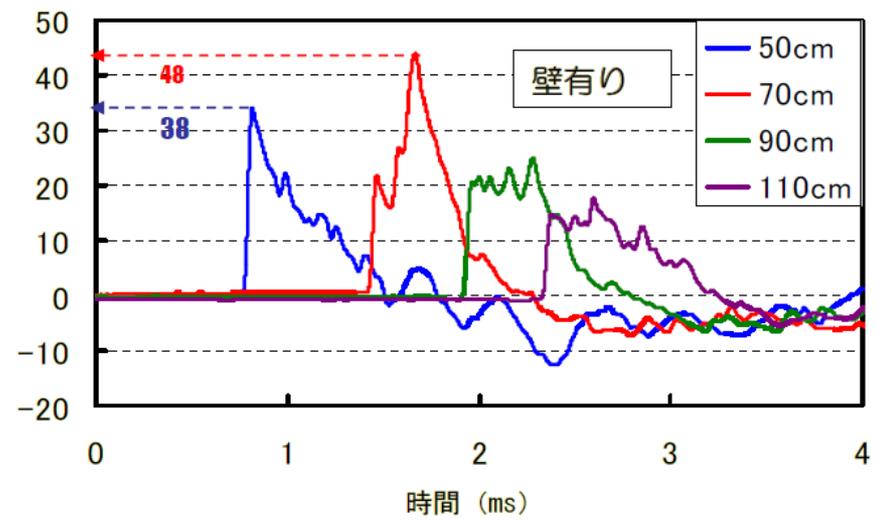
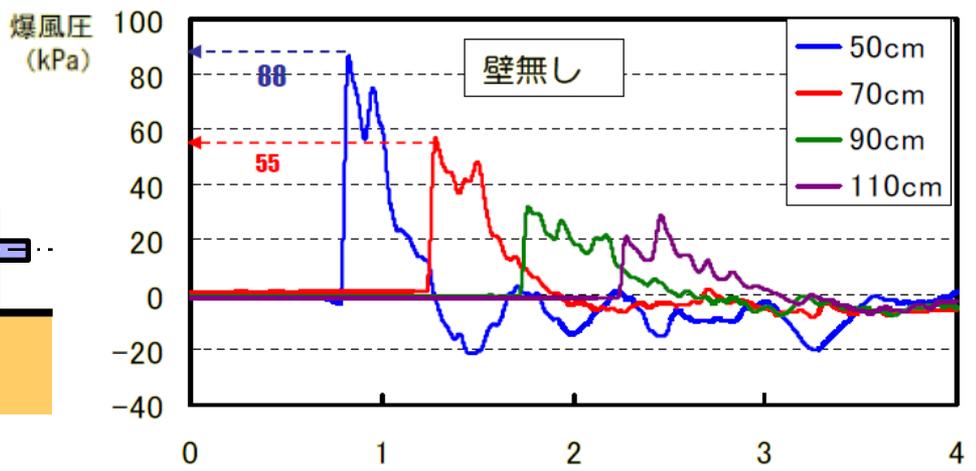
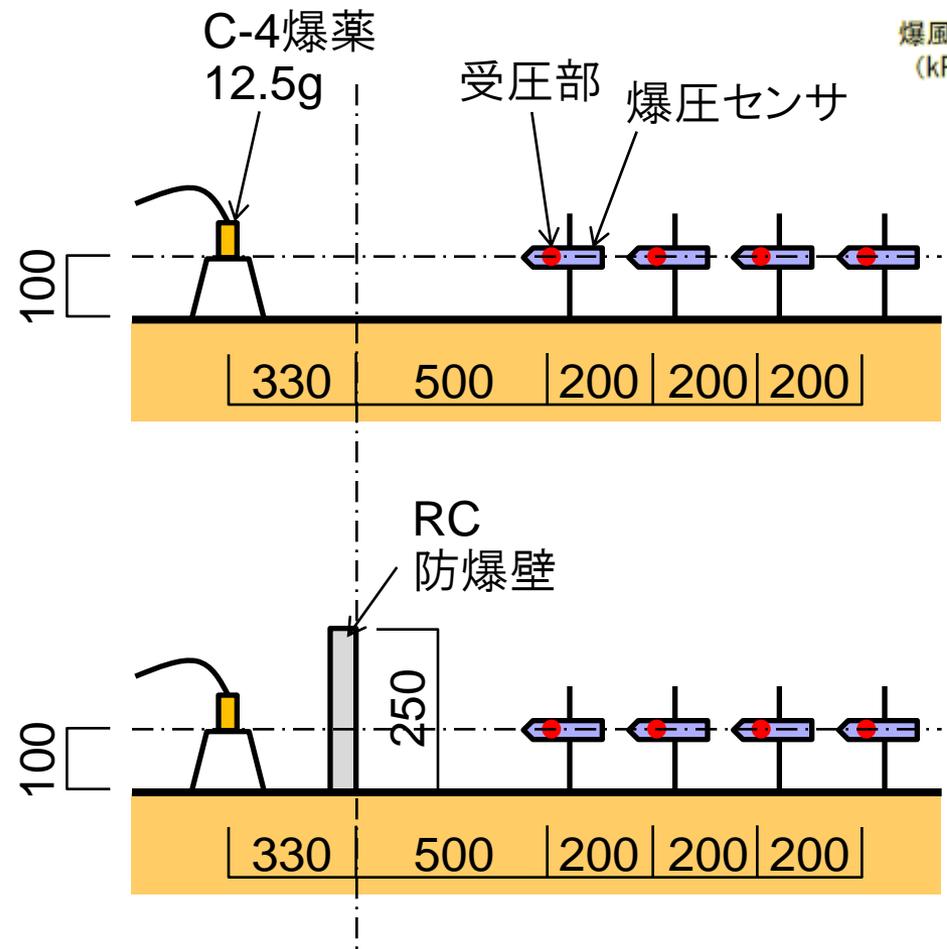
TNT等価
爆薬量; W

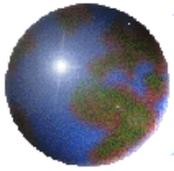




1. 爆発現象とその周辺への影響

爆風圧荷重の距離減衰



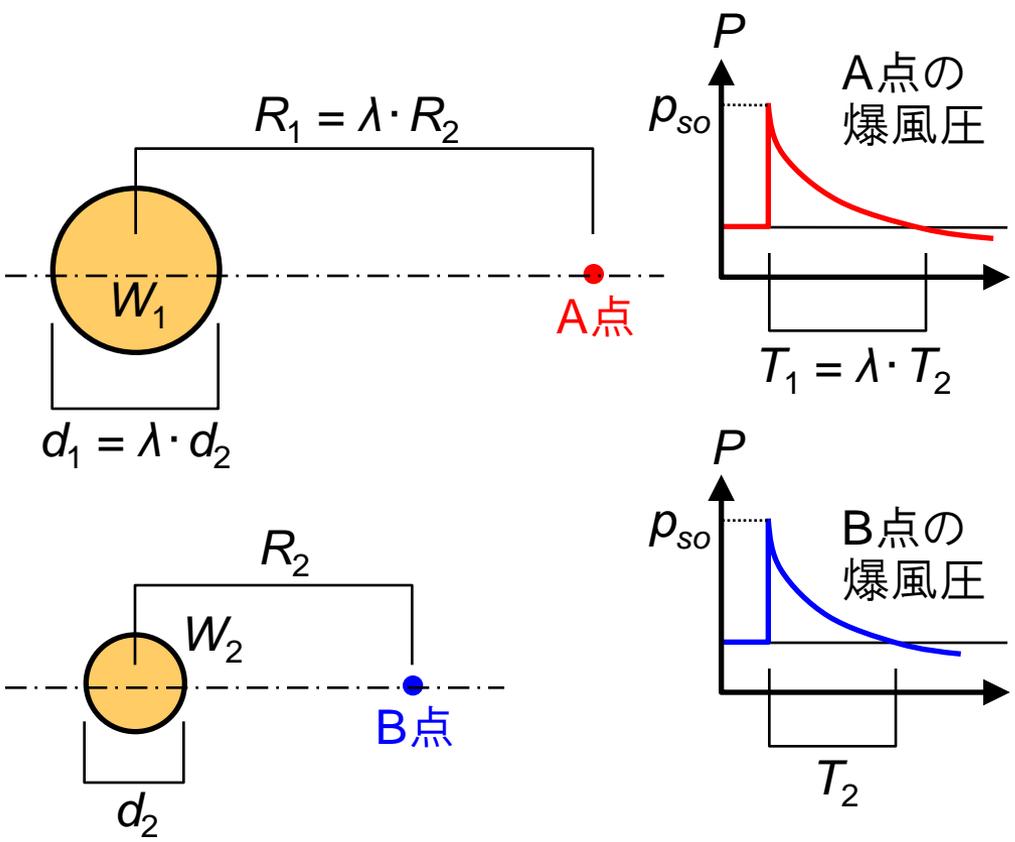


1. 爆発現象とその周辺への影響

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

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



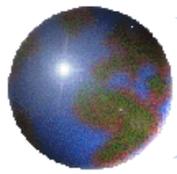
$$W_1 \propto d_1^3, \quad W_2 \propto d_2^3$$

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

左図の関係より,

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

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

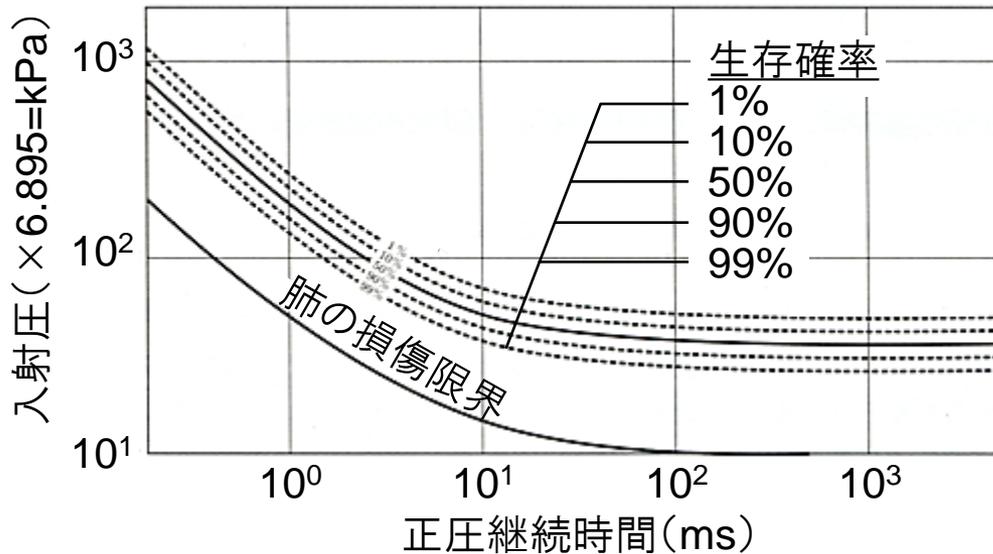


1. 爆発現象とその周辺への影響

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?

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

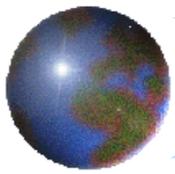
$$\therefore K = \left(\frac{476.2}{p_{so}} \right)^{1/1.40}$$

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

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

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

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



1. 爆発現象とその周辺への影響

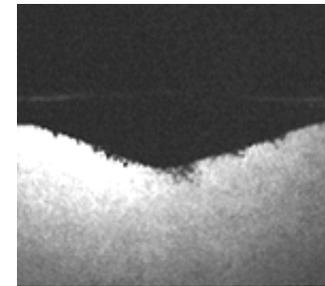
人体への影響(2): 二次傷害

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

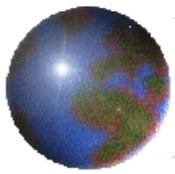
(試算)

版厚75mmのRC版の
接触爆発(爆薬量200g)



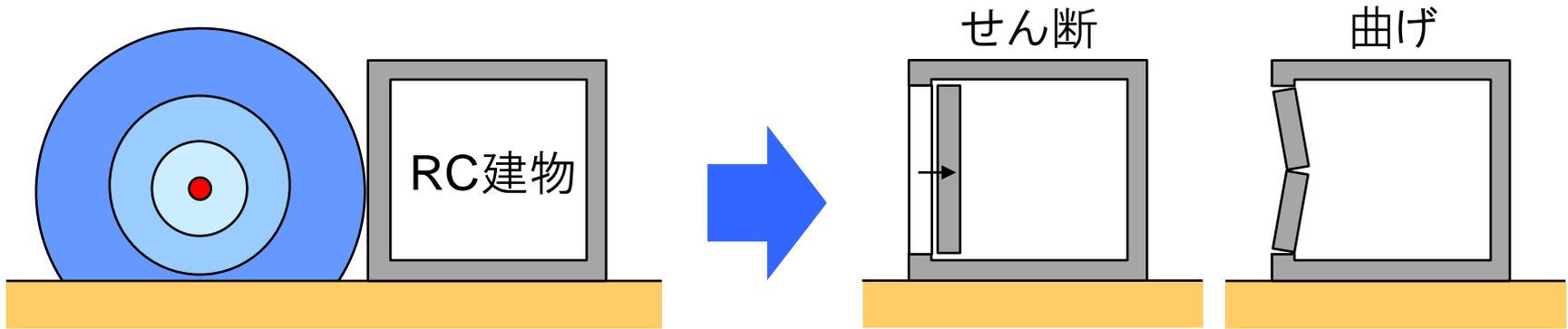
スポール片速度 : 111 m/s
スポール片質量 : ≤ 50 g

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

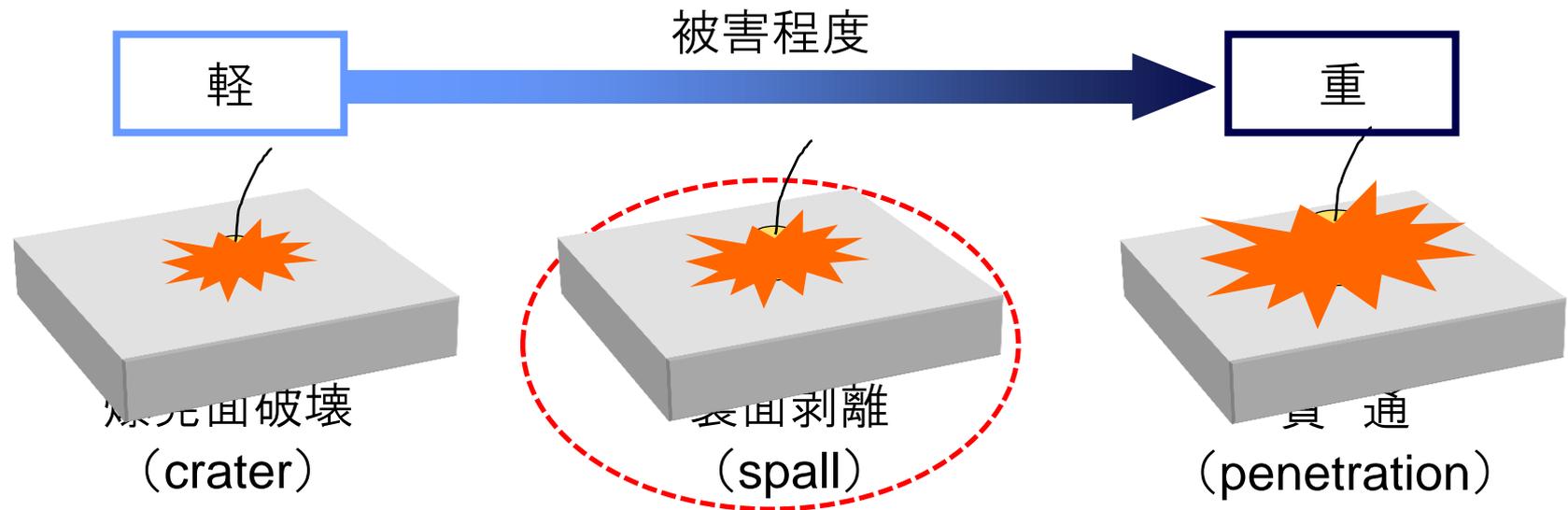


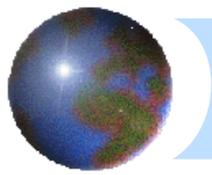
1. 爆発現象とその周辺への影響

Case-1 : 遠距離爆発 ⇒ 全体破壊



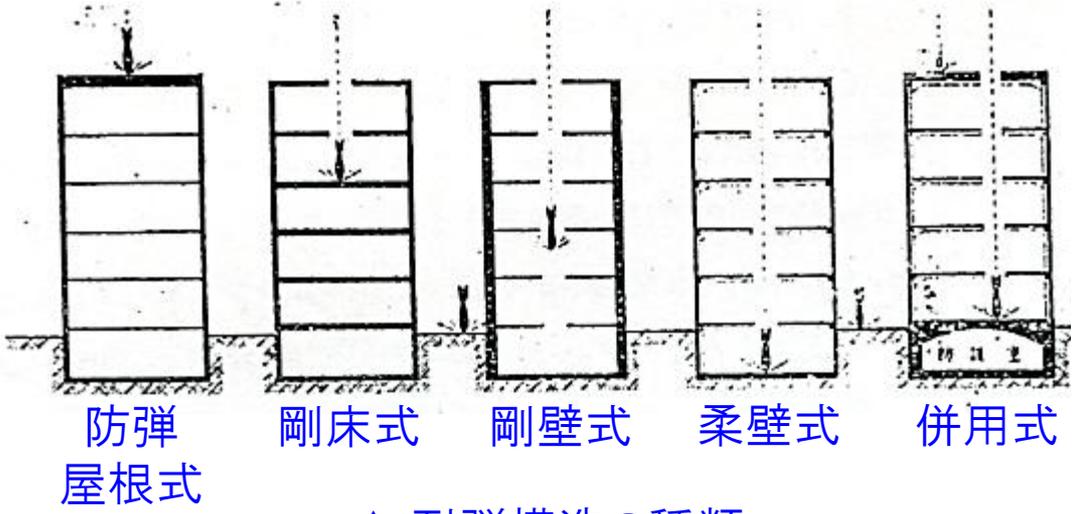
Case-2 : 接触・近接爆発 ⇒ 局部破壊



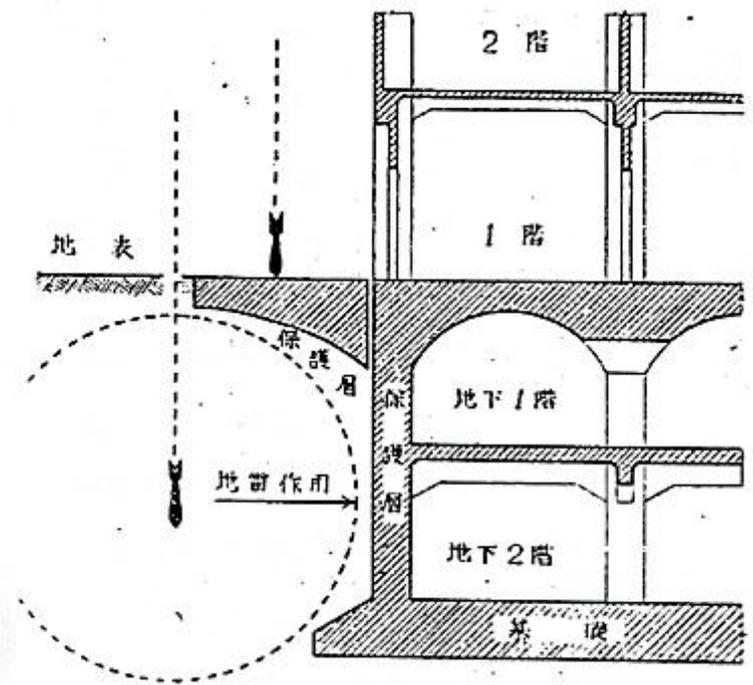


1. 爆発現象とその周辺への影響

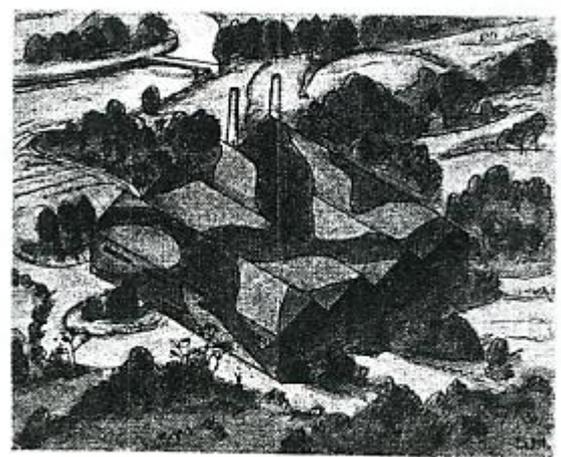
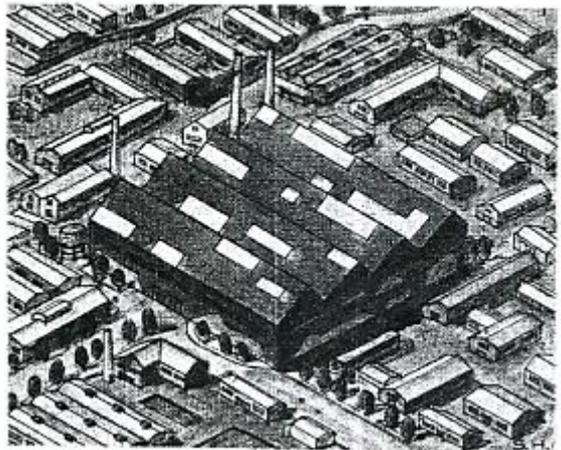
戦時中はどうしてた？



▲ 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)

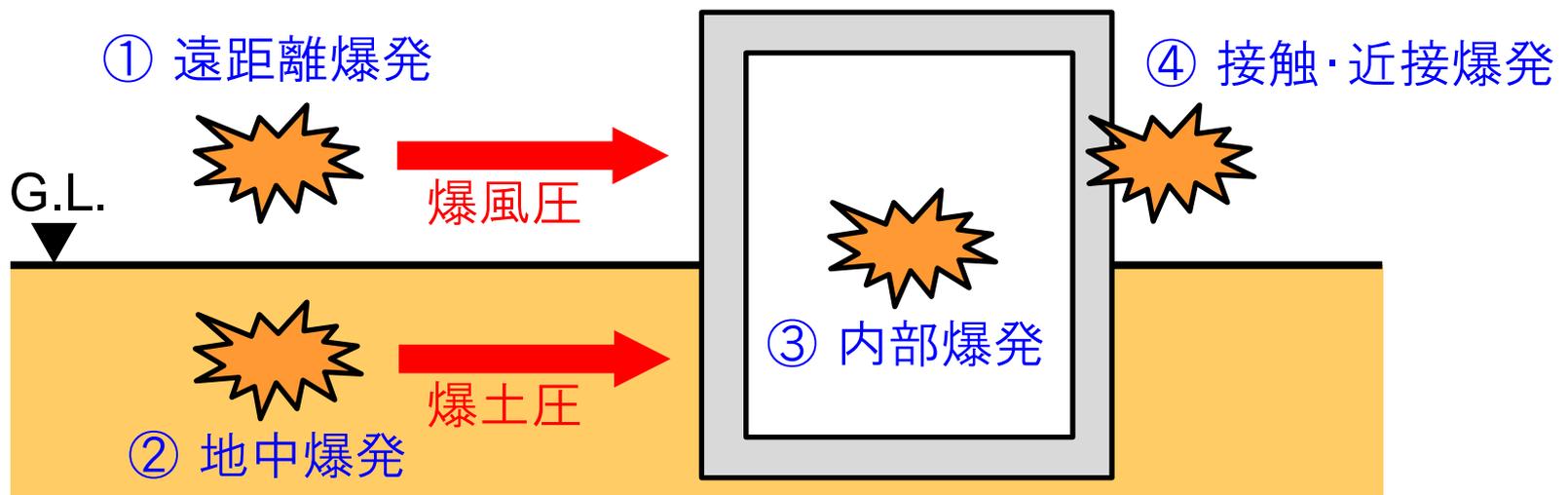
・・・爆発荷重の作用に対して壊れない(爆圧に耐える)性能

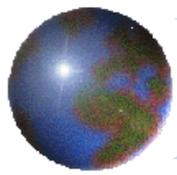
■ 防爆 (blast protection)

・・・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

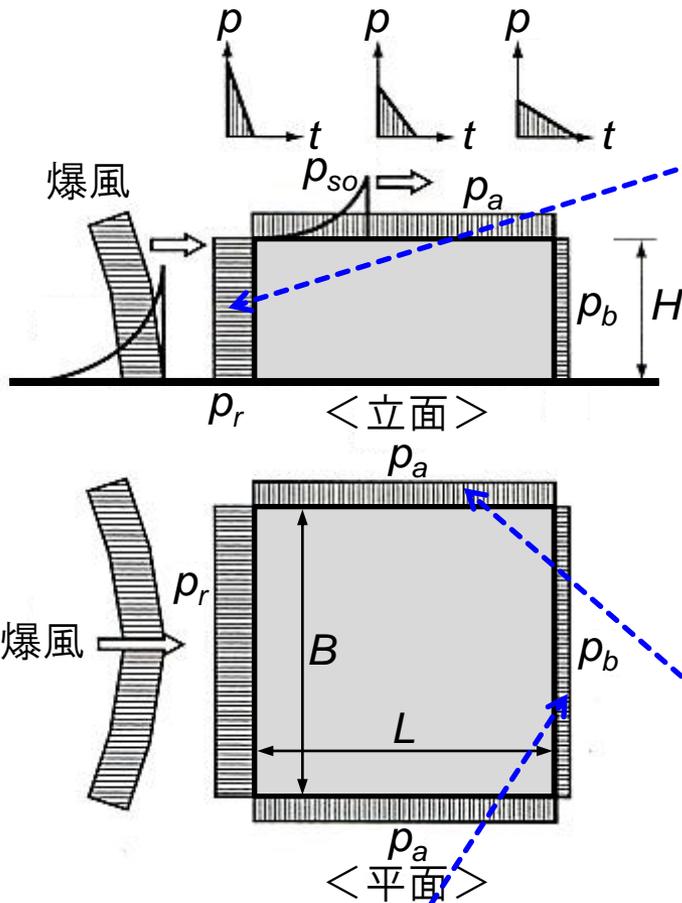
爆源位置による分類





2-1. 遠距離爆発に対する考え方

爆風圧荷重



前壁

反射圧:

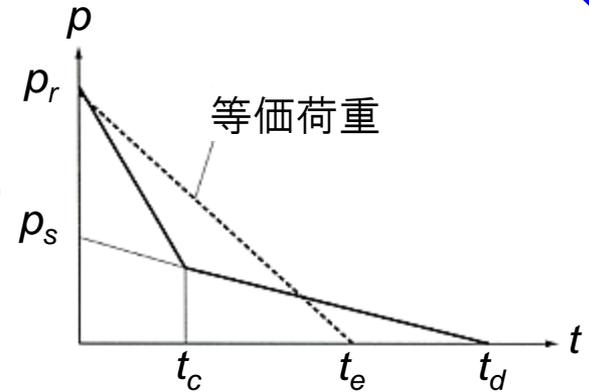
$$p_r = 2p_{so} + (\gamma + 1) \cdot q_0$$

よどみ圧:

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

$$t_c = 3S/U$$

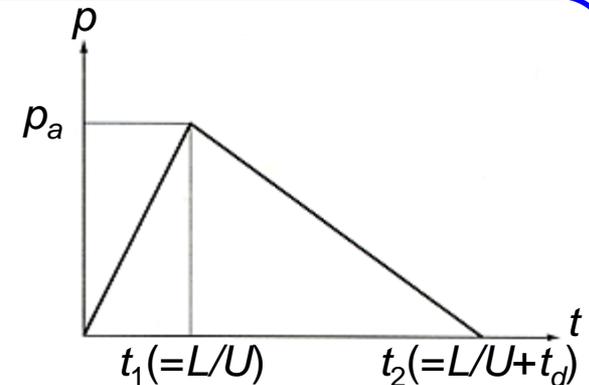
ここに、 p_{so} :ピーク過圧、 γ :比熱比、 q_0 :最大動圧、 C_D :抗力係数、 S :通過距離、 U :衝撃波速度



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

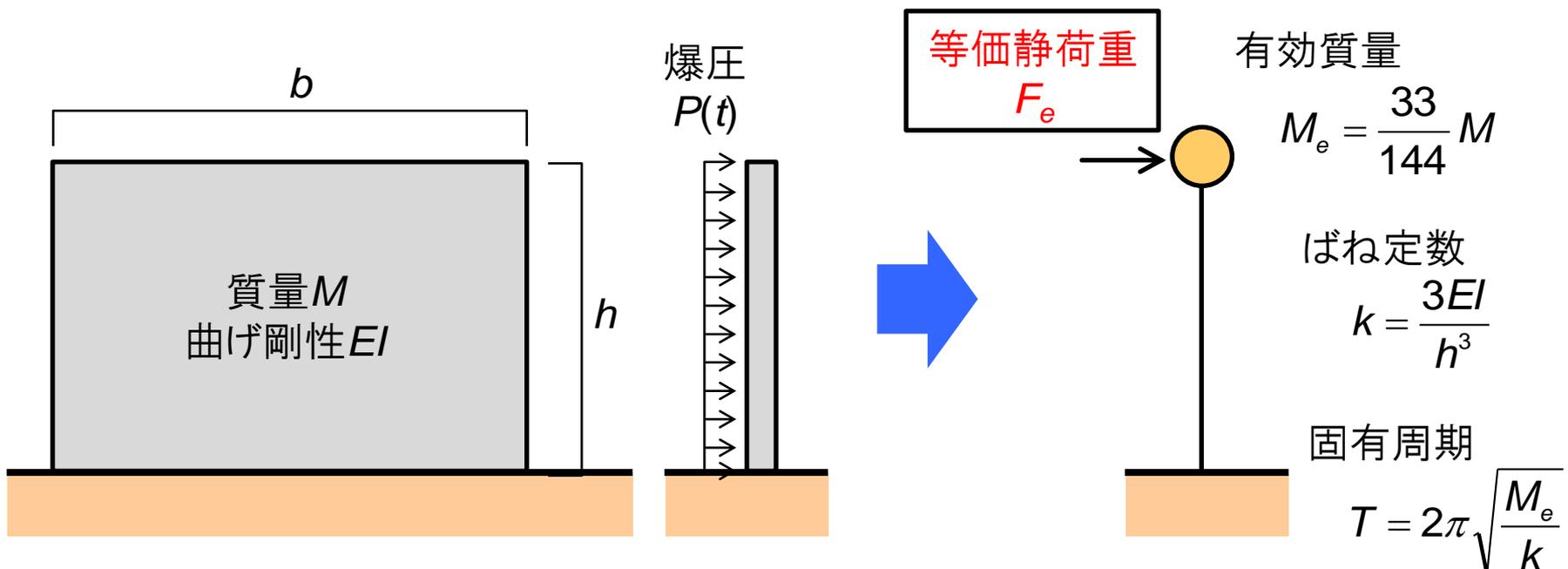
RC防爆壁の耐爆設計方法(1)

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

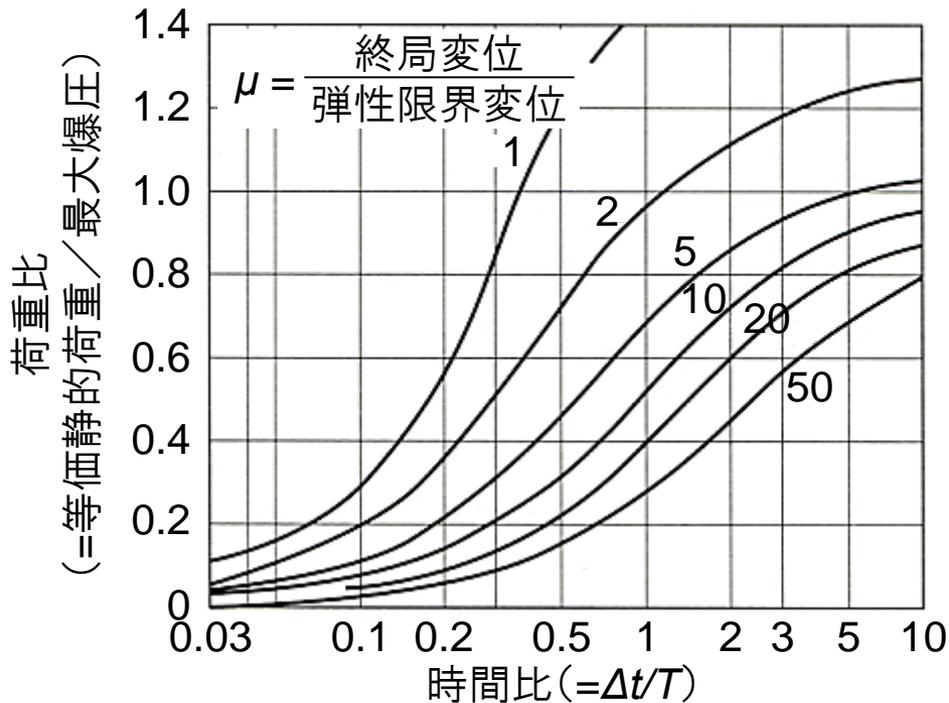
曲げ耐力照査・・・終局曲げモーメント > 作用曲げモーメント ⇒ O.K.



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

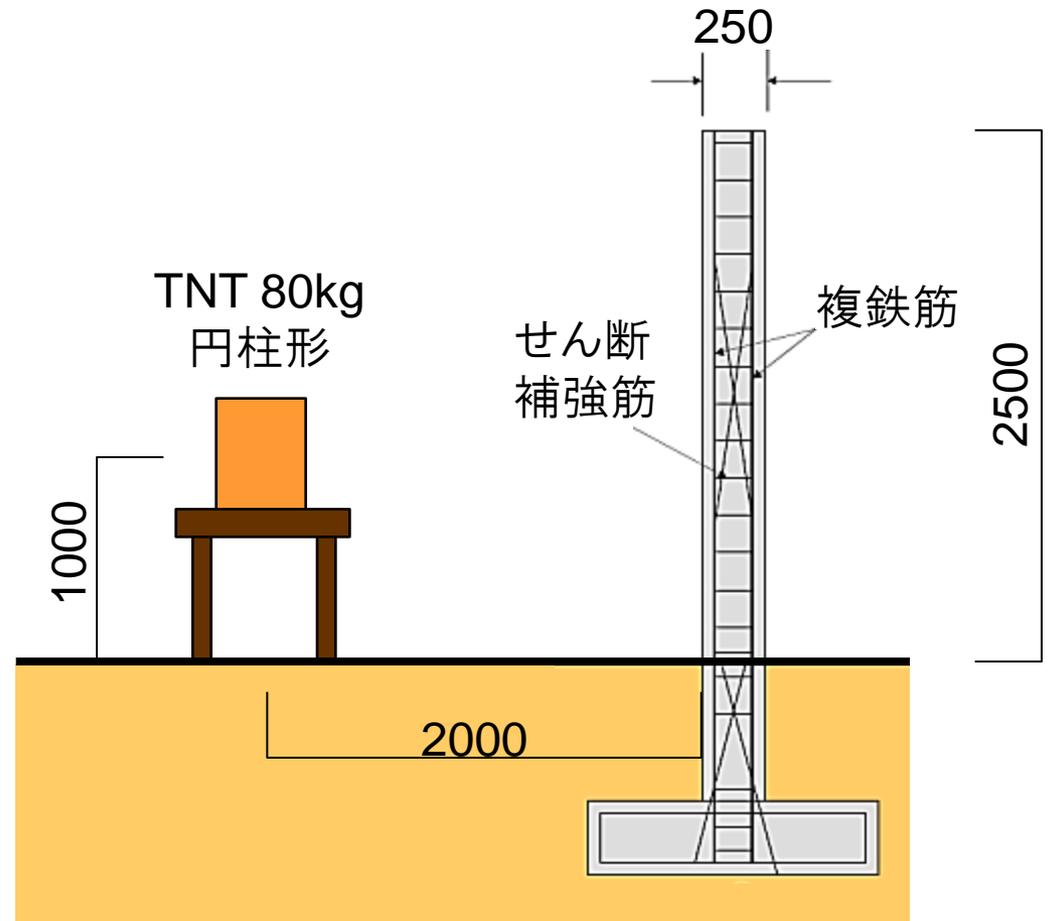
∴ 等価静荷重 $F_e = 0.01 P(t)$

2-1. 遠距離爆発に対する考え方

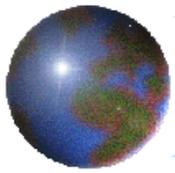
RC防爆壁の検証実験(1): 実験方法

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)

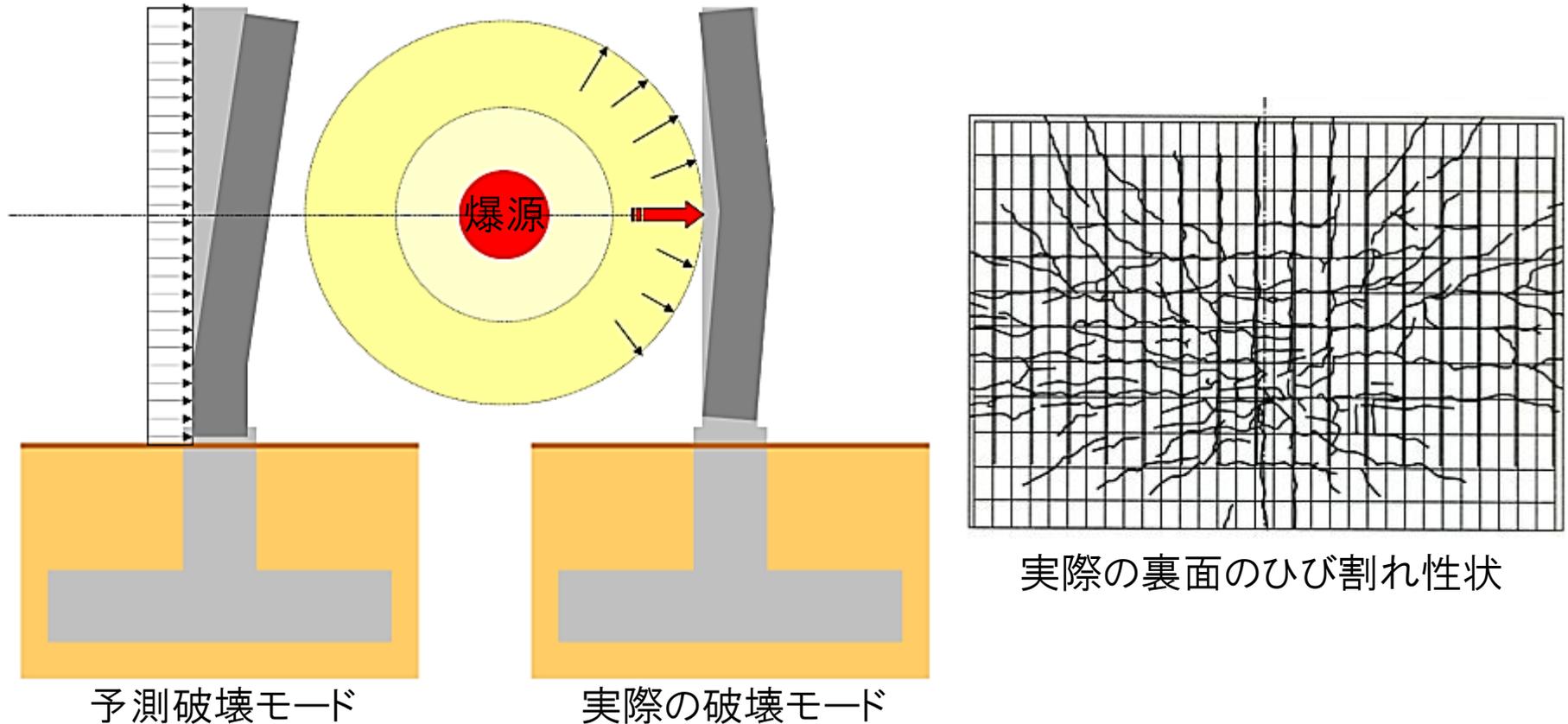


※ 防爆壁は、前頁の耐爆設計法により設計されたもの

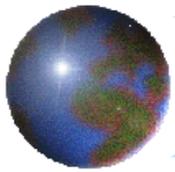


2-1. 遠距離爆発に対する考え方

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

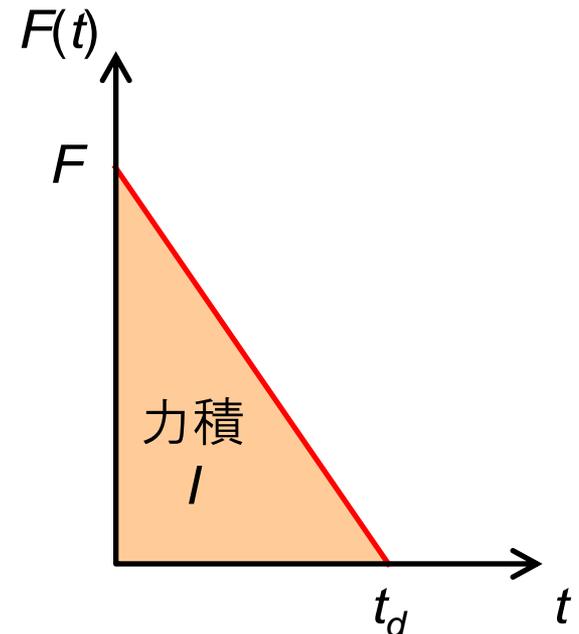
M : 質量

α : 減衰・移動による減少率

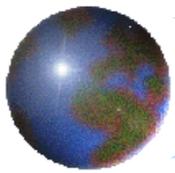
② 部材の吸収エネルギー U を実験または計算で求める。

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

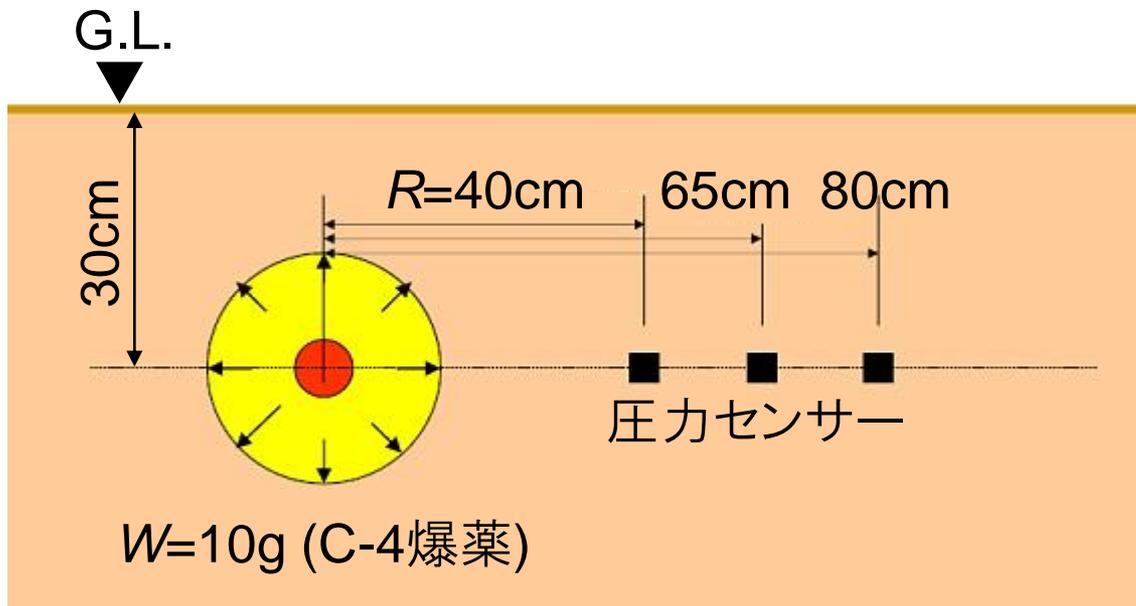
爆風圧荷重の建築物への影響

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



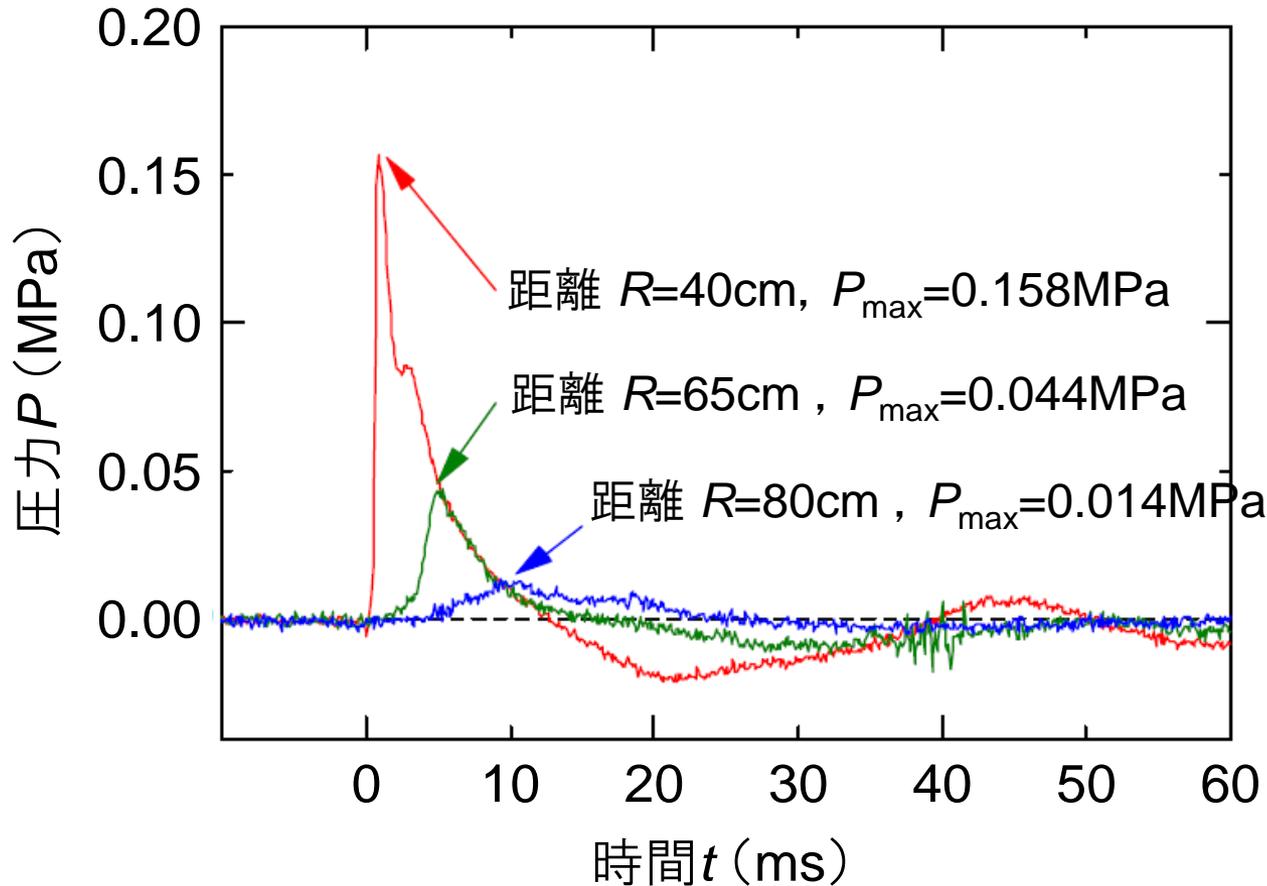
圧力センサー設置状況



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



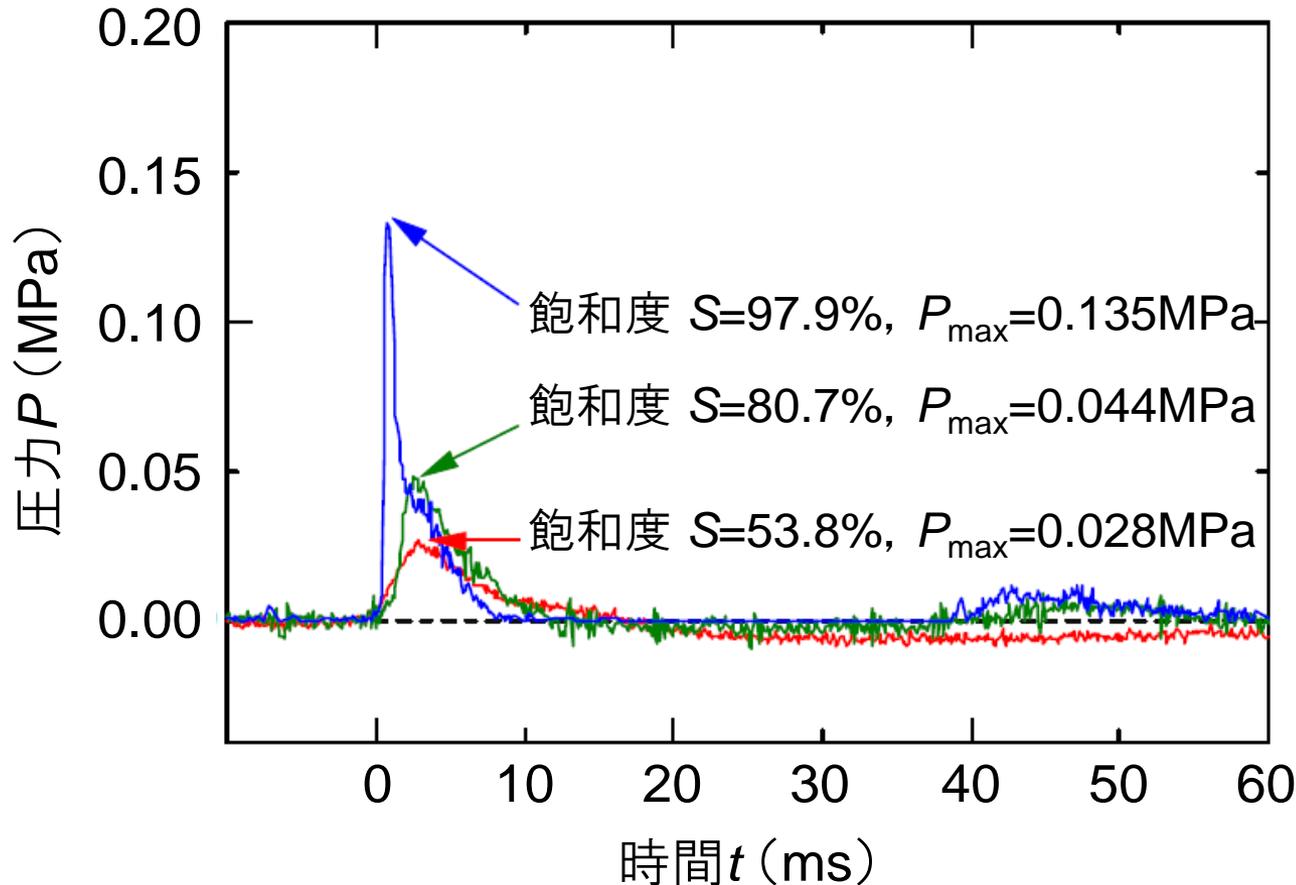
※ 土の飽和度は
80.7%一定

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

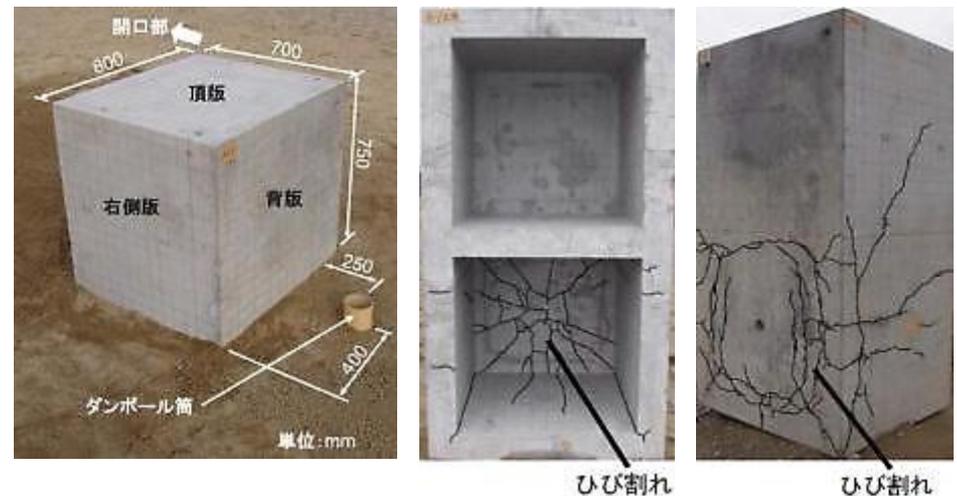
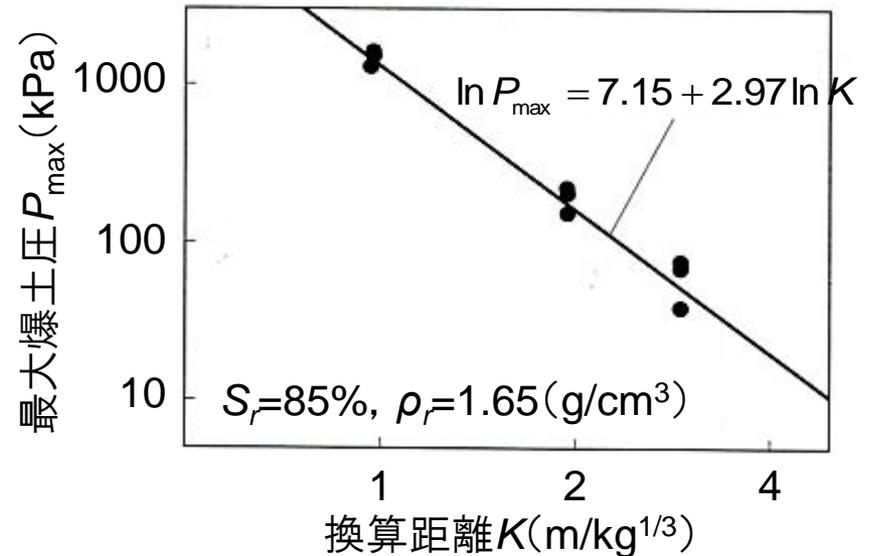
$$\ln P_{\max} = A_p + B_p \ln K$$

$$A_p = 1.85 \rho_t + 4.10$$

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

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

ここに、 P_{\max} : 最大爆土圧 (kPa)
 ρ_t : 土の湿潤密度 (g/cm^3)
 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