

彙 報

第 29 卷 第 5 號 昭和 18 年 5 月

防 空 壕 資 料

正會員 原 田 干 三*

緒 言 本稿は赤軍の野戦築城、坑道、掩蔽壕、防空壕等地下工作物に対する教科書より取材せしものである。由來赤軍は地下にもぐるとその鈍重性に一層の拍車をかけて相當頑強な粘り強さを發揮することは、今次獨ソ戦に於ける坑道戦よりみても、認められるようである。ソ聯の土木工學に關係深きかゝる技術並に寒さに關する科學技術上の諸問題に對し、専門的に各分野に互り緻密精確な點迄十分調査研究し置くべき必要性は獨ソ戦の熾烈深刻化するにつれ身近に迫つた問題として、愈々押し進められ吾々の前に展開されたとの感が深い。

本稿は防空壕の如き工作物を地下に設置した場合の土壓のとり方に就いて、次に砲爆彈を受けた場合の安全なるべき地下深さのとり方に就いて叙述されて居る。防空壕の設計に對し一つの資料となれば幸である。

1. 地下工作物の受くる土壓に就て

大地内に地下工作物を築造すれば自然均衡が破られる。掘鑿断面の周圍土内に應力の變動を生起し、その爲め掘鑿断面の天井や側壁は撓み或は孕出、土は剝落し、又裂隙を生じ、時には大崩壞を發することもある。

地下掘鑿断面を破壊より防止し又工事施工のため破られたる土體の均衡を得しめるため、支保工或は覆工を行ふ。この支保工或は覆工に及ぼす壓力が即ち土壓であつて、その大き及び方向は土の組成、堅硬度、賦存状態、含水量等に依據する。一例を挙げれば、土粒子間の緊結度が弱ければ弱い程、土壓は大である。

支保工或は覆工の寸法構造を決定する際に土壓を知らねばならぬ。この土壓は實驗によつて相當精確な値を知り得るのであるが、實驗は長時間を要し又野戦に於ては實際上先づ適用し得ないことである。それで斯る場合には、土壓は理論を根據とせる計算式に依り求めねばならぬ。

計算すべき土壓として垂直土壓及び水平土壓とがある。以下これ等につき述べよう。

垂直土壓

垂直土壓には種々の説があるが、下記の如く二大別し得る：

第 1 — ヘイム、ヤンセン、ビルバウム等諸氏の説で、垂直土壓は地下工作物の存在する深さに直比例する。即ち垂直土壓は上置土の重さに外ならず、その重さが地下工作物の屋根に壓力を及ぼすとす説。

第 2 — リッテル、コムメレル、プロトヂヤコノフ等諸氏の説で、地下工作物の存在する深さは土壓の大き及び性質に影響を及ぼさず、或る拱で制限された土體のみが壓力を該屋根に及ぼすとす説。但しその拱の形は土の物理-機械的性質及び工作物の寸法に依據する。

第 2 の説の方が本地下工作物に對し一般に適用さるべきである。しかし第 1 の説も淺い處に在る地下工作物や脆弱な土内に在る工作物に對しては意義を有するのである。

深さ 10~12 m よりも深い處に在り、その徑間 2.5 m 以内なる普通の野戦地下工作物の場合にあつては、第 2 の理論より垂直土壓を求めるのが妥當である。

* 南滿洲工業専門學校教授

ソ聯で最も廣く使用されてゐる理論はプロトヂャコフ教授の提唱にかゝるものである。この説に據れば、地下工事の際、掘鑿断面の天井土内に應力の再分布する結果自然拱が形成され、その拱に上置土の壓力が作用するとする。

この拱内の土は軟げられ崩れんとする傾向を有する。自然拱は拋物線形をなし、その高さは

$$h = \frac{a}{f} \dots\dots\dots(1)$$

こゝに： a —掘鑿断面の半径間 (m)； f —土の緊硬度 (表-1 参照)

脆弱土に對し $f = \tan \varphi$ ， こゝに φ —土の内部摩擦角

表-1. 地層の緊硬係數 f ，容積重量 γ 及び内部摩擦角 φ

No.	緊 硬 度	地 層	f	(γ t/m ³)	φ
1	最も緊硬度の高い地層	最も堅硬にして緻密な石英及び玄武岩	20	2.9	87°
2	非常に堅硬な地層	非常に堅硬な花崗岩質地層，石英斑岩。非常に堅硬な花崗岩，珪石質片岩，No. 1 よりも稍堅硬の劣る石英，最も堅硬な砂岩及び石灰岩	15	2.6	85°
3	堅硬な地層	花崗岩及び花崗岩質地層。非常に堅硬な砂岩及び石灰岩。石英脈岩。緊硬な礫岩。非常に堅硬な鐵鑛	10	2.6	82°30'
4	堅硬な地層	堅硬な石灰岩，堅硬でない花崗岩，堅硬な砂岩，堅硬な大理石，白雲石，黃鐵鑛	8	2.7	80°
5	可成堅硬な地層	普通の砂岩，鐵鑛	6	2.4	75°
6	可成堅硬な地層	砂岩質片岩，片岩質砂岩	5	2.5	72°30'
7	中庸な地層	堅硬な粘板岩。堅硬でない砂岩及び石灰岩，軟質な礫岩	4	2.8	70°
8	中庸な地層	種々な板岩 (堅硬でない) 緻密な泥灰石	3	2.5	70°
9	可成軟質な地層	軟質な板岩，軟質な石灰岩，白堊，岩鹽，石膏，凍結土，無煙炭。普通の泥灰石。崩解せる砂岩，凝結砂利及び砂礫，石混り土	2	2.4	65°
10	可成軟質な地層	碎石混り土。崩解せる板岩，長期放置せる砂利及び碎石，堅硬なる石炭 ($f=1.4\sim 1.8$)，堅硬粘土	1.5	1.8~2	60°
11	軟質な地層	粘土 (緻密な)，中庸な石炭 ($f=1.0\sim 1.4$)，堅硬な沖積土，粘土質土	1.0	1.8	45°
12	軟質な地層	軽い富砂質粘土，ロス，砂利。軟質な石炭 ($f=0.6\sim 1$)	0.8	1.6	40°
13	壤土質地層	植土。泥炭。軽い砂質粘土，濕潤砂	0.6	1.5	40°
14	碎れ易い層	砂，軟質な砂利，バラバラにせる土	0.5	1.7	37°
15	ドロドロの地層	泥濘土，沼澤土，水を含めるロス及び其他水を含める土 ($f=0.1\sim 0.3$)	0.3	1.5~1.8	9°

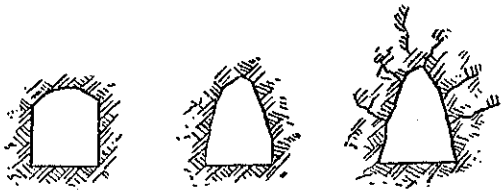
更に土の崩壊が進むと掘鑿断面の側方も崩れてくる。この形も亦圖-1 の如く拋物線をなす。

土が崩壊せんとする丁度前では、掘鑿断面側方に在る脆弱土の弛緩面は水平と内部摩擦角をなす。而してこの弛緩面と掘鑿断面天井線との交點を基點とする圖-2 の如き、拋物線拱が畫かれる。この拱を崩壊拱と呼ばれる。

崩壊拱の高さは

$$h_2 = \frac{a_2}{f} \dots\dots\dots(2a)$$

圖-1. 掘鑿断面の崩壊する形状



ここに:

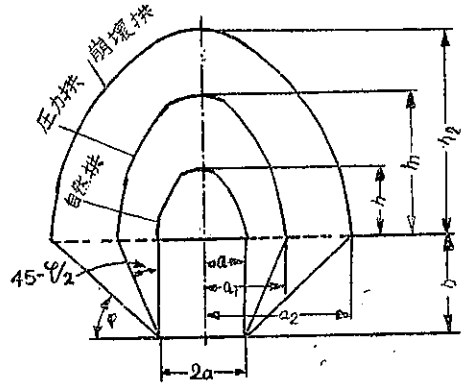
a_2 - 崩壊拱の半徑間にして、次式より求められる

$$a_2 = a + b \operatorname{tg}(90 - \varphi)$$

ここに,

a : 掘鑿断面の半徑間 (m),

圖-2. 崩壊拱, 壓力拱及び自然拱



b : 掘鑿断面の高さ (m),

置換して次式を得る:

$$h_2 = \frac{a + b \operatorname{tg}(90 - \varphi)}{f} \dots (2b)$$

若し掘鑿断面に覆工が施されれば、その側方よりは滑り面(掘鑿断面側面と滑り面との間の角は $45 - \frac{\varphi}{2}$ である)で限られた範囲内だけで起ることとなる; この際掘鑿断面に壓力拱が形成される。壓力拱の内部に在る土が覆工に壓力を及ぼす。壓力拱の高さは

$$h_1 = \frac{a_1}{f} \dots (3a)$$

ここに: a_1 - 壓力拱の半徑間 (m) にして、次式より求められる

$$a_1 = a + b \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$$

置換して次式を得る:

$$h_1 = \frac{a + b \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}{f} \dots (3b)$$

垂直土壓は覆工上に等分布するものとし、その力度は

$$q = h_1 \gamma \cdot 1 \dots (4)$$

ここに: γ - 土の容積重量 (單位容積の重量或は見掛比重の意)

[計算例] 幅 $2a = 2.3$ m, 高さ $b = 2.3$ m なる地下掘鑿断面の壓力拱高及び覆工に及ぼす垂直土壓を求めよ。但し土は粘土にして、その容積重量 $\gamma = 1.8$ t/m³, 内部摩擦角 $\varphi = 40^\circ$, 緊硬係数 $f = 0.84$ であるとする。

[解] 壓力拱高 h_1 は (3b) 式より

$$h_1 = \frac{a + b \operatorname{tg}\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}{f}$$

これに各典項を代入して

$$h_1 = \frac{1.15 + 2.3 \cdot 0.47}{0.84} = 2.65 \text{ m}$$

垂直土壓力度 q は (4) 式より

$$q = 2.65 \cdot 1.8 \cdot 1 = 4.77 \text{ t/m}^2$$

水平土壓

水平土壓はクローンより、擁壁の土壓を求めると同様にして求められる。若し土が同質のものよりなるならば、

- 壓力圖は、圖-3 の如く、 e_1 及び e_2 を 2 邊とし b を高さとする梯形にて表はされる。

e_1 及び e_2 なる壓力度は：

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= h_1 \gamma \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \\ e_2 &= (h_1 + b) \gamma \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (5)$$

ここに：

h_1 — 壓力拱の高さ； b — 掘壕断面の高さ； γ — 土の容積重量； φ — 内部摩擦角

圖-3. 地下通路壁に及ぼす水平土壓圖

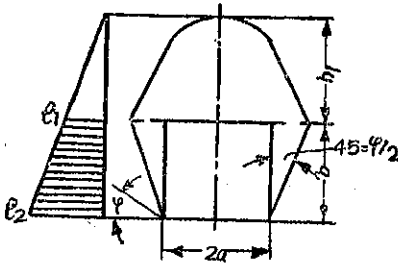
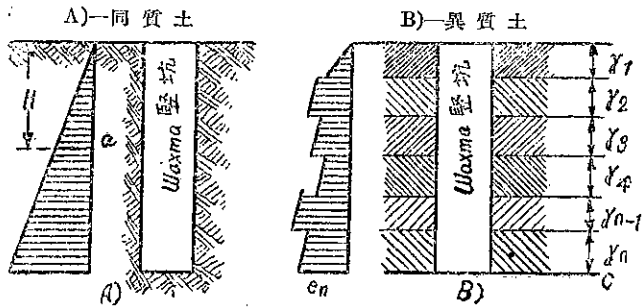


圖-4. 堅坑壁の水平土壓圖



次に堅坑壁に及ぼす水平土壓は、矢張り擁壁の土壓を求めると同様にして求められる。圖-4. A) に於て、 a 點は地表より H なる深さにあり、且同質土より成るものとすれば、 a 點の壓力度は

$$e_a = H \gamma \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) \dots \dots \dots (6)$$

圖-4. B) の如く n 種の異質土より成る場合の水平土壓は、次式より求められる

$$e_n = (\gamma_1 \gamma_1 + \gamma_2 \gamma_2 + \dots + \gamma_{n-1} \gamma_{n-1} + \gamma_n \gamma_n) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_n}{2} \right) \dots \dots \dots (7)$$

ここに：
 e_n — c 點の水平土壓力度； $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{n-1}, \gamma_n$ — 種々層の厚さ； $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_{n-1}, \gamma_n$ — 種々層の容積重量； φ_n — n 層の内部摩擦角

〔計算例〕 前題に於て、天井部の水平土壓力度 e_1 及び底部の同じく e_2 を求めよ。

〔解〕 公式 (5) より

$$\begin{aligned} e_1 &= 2.65 \cdot 1.8 \cdot 0.47^2 = 1.054 \text{ t/m}^2 \\ e_2 &= (2.65 + 2.3) \cdot 1.8 \cdot 0.47^2 = 1.968 \text{ t/m}^2 \end{aligned}$$

掘壕断面側面に働く全壓力は

$$E = \frac{(e_1 + e_2)}{2} b = \frac{(1.054 + 1.968)}{2} \cdot 2.3 = 3.45 \text{ t}$$

2. 地下工作物の防護厚の決定

砲爆彈より地下工作物を防護する地層厚とは地表面と地下掘壕断面天井との距離を謂ふ。勿論地下工作物はこ

の距離より下方深くに設置せられねばならぬ。而して設置せらるべき場所の地質を緊硬係數(表-1 参照)により 3 種: 緊結土, 非緊結土, 岩石に分類し, 所要防護厚を求める。尙更に同種地層より成る場合と多種地層の累層せる場合とに就いて考慮する。以下これ等について記述しよう。

緊結土(緊硬係數 1 乃至 4 の土を謂ふ, 表-1 参照)内に在る工作物の防護厚は, 砲爆彈の侵徹, 爆破兩作用の合計線が地下掘鑿斷面上に形成せられる壓力拱の範圍外に在るべき條件より決定される。

圖-5 より次の如く書き得る

$$H_1 = h_y + r_p + h_1 - u \dots\dots\dots (8)$$

ここに: H_1 —全防護厚; h_y —砲爆彈の侵徹深; r_p —破壊半徑; h_1 —壓力拱高;
 u —砲爆彈の重心より地層と接觸する最下底迄の距離

圖-5. 緊結土内に在る場合地下工作物の全防護厚

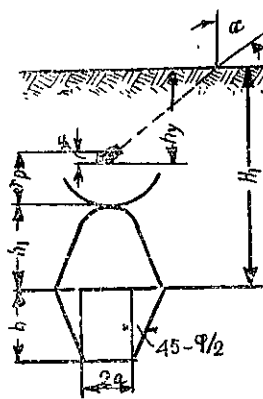
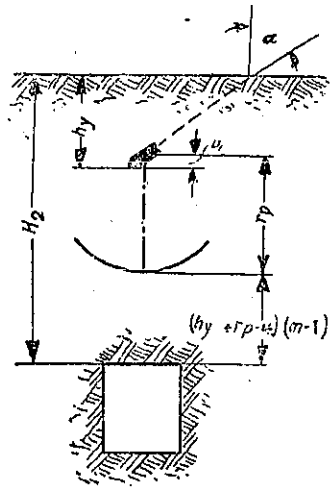


圖-6. 非緊結土内に在る場合の防護厚



非緊結土(緊硬係數 1 以下なる土を謂ふ, 表-1 参照)内にある工作物に對する防護厚は, 壓力拱高を考慮しないが, 侵徹深と破壊半徑との和より更に或る餘裕をとる。

壓力拱高を考慮せずその代りに或る餘裕を採る理由は, 脆弱な非緊結土内に在る工作物に對し従前の様に壓力拱をとると極めて大きな寸法となり, その結果過剰な深さを必要とすることとなり, 土工量並に覆工に及ぼす壓力の増大をみるからである。

非緊結土内に工作物を設置する場合, その防護厚は次式より決定される(圖-6 参照)。

$$H_2 \geq (h_y + r_p - u)k \dots\dots\dots (9)$$

ここに: k —安全率で, 工作物の徑間及び構造狀況に依據し 1.2 乃至 1.5 に採る。

ここに注意すべきは, 非緊結土内に在る掘鑿斷面の覆工を計算する場合, 全土柱の重さ即ち天井より地表面間の距離を考慮せねばならぬことである。

岩石地内に覆工を施さずに工作物を建造する場合, 防護厚は砲爆彈が爆發せし際掘鑿斷面天井部の岩石を破碎しないといふ條件より求める(圖-7 参照)。

掘鑿斷面天井に破碎を及ぼさない最小防護厚は, 次式より求められる:

$$H_3 \geq h_y + r_0 - u \dots\dots\dots (10)$$

ここに: r_0 —破碎半徑

式(8),(9),(10)に在る h_y は同一媒體に對し次の如く求められる:

$$h_y = r K_1 \frac{P}{V} \cos \alpha \dots\dots\dots (11)$$

ここに: h_y —砲爆彈の侵徹深 (m); K_1 —侵徹係數(表-2 参照);

r —砲爆彈の形狀を考慮せし修正係數; 1.3 乃至 1.5 を採る;

圖-7. 岩石地内に在る場合の防護厚

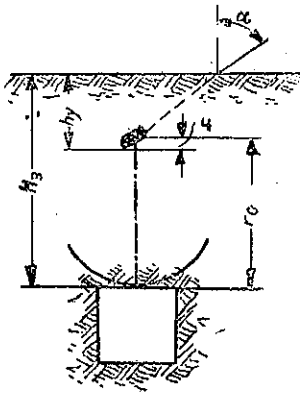
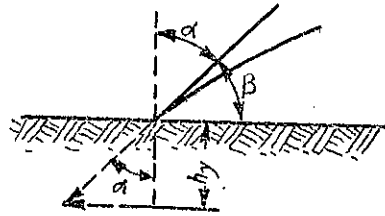


圖-8. 遭會角と落着角
α-遭會角 β-落着角



P-砲爆彈の重さ (kg);

d-砲爆彈の直径 (m);

V-砲爆彈の終末速度 (m/sec);

α-遭會角, 即ち圖-8 の如く, 砲爆彈の落着せし點に於ける垂直と彈道とのなす角

[計算例] 152mm 榴砲彈の侵徹深を求めよ。但し土は緻密なる壤土にして, 計算に必要な各項次の如し:

$r=1.3, \quad P=41 \text{ kg}, \quad d=0.152 \text{ m}, \quad V=250 \text{ m/sec}, \quad \alpha=36^\circ, \quad K_1=0.0000 \text{ 065}$

[解] (11) 式より,

$$h_p = 1.3 \cdot 0.0000 \text{ 065} \times \frac{41}{0.152^2} \times 250 \cdot 0.809 = 3.2 \text{ m}$$

表-2. 侵徹係数 K_1 , 爆破係数 K_2 , 破砕係数 K_3

NO.	媒體 (土, 岩石, コンクリート等)	K_1	K_2	K_3
1	耕したばかりのボロボロした土	0.0000 13	1.40	—
2	砂及び砂利を含めるボロボロにしたばかりの土	0.0000 09	1.12	—
3	緻密な壤土 (普通の植土)	0.0000 065	1.08	—
4	緻密な清浄な砂	0.0000 045	1.04	—
5	濕潤砂, 砂土	0.0000 055	1.00	—
6	堅硬な粘土, 砂質粘土, 石を混ぜる土	0.0000 07	0.99	1.93
7	砂礫質土 (砂礫を混ぜる砂)	0.0000 045	0.98	—
8	砂土を含める粘土, 石化土, ロス	0.0000 045	0.98	0.9
9	礫石, 泥灰石を含める青粘土	0.0000 04	0.94	1.70
10	石灰質岩, 砂質岩, 粘板岩	0.0000 03	0.92	1.17
11	非常に堅硬な粘土 (赤色)	0.0000 02	0.88	—
12	花崗岩或は龜裂なき片麻岩	0.0000 016	0.84	1.0
13	コンクリート	0.0000 013	0.70	0.52
14	鉄筋コンクリート	0.0000 0065 0.0000 009	0.60	0.47

次に工作物天井と地表間との媒體が種々なる層より成る場合には, 砲爆彈の侵徹深は次式により地表より各層を逐次算出する:

$$\left. \begin{aligned}
 h_{y'} &= \gamma K_1' \frac{P}{d^2} F \cos \alpha \\
 h_{y''} &= l_1 + (h_{y'} - l_1) \frac{K_1''}{K_1'} \\
 &\dots\dots\dots \\
 h_{y^n} &= l_{n-1} + (h_{y^{n-1}} - l_{n-1}) \frac{K_1^n}{K_1^{n-1}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

こゝに：
 $h_{y'}$ —最初層の侵徹深； $h_{y''}$ —第 2 層の侵徹深； h_{y^n} —第 n 層の侵徹深；
 $K_1', K_1'', K_1^{n-1}, K_1^n$ —地層に對應せる侵徹係數；
 l_1, \dots, l_{n-1} —地表より賦存各層に至る距離。

〔計算例〕 152 mm 榴砲彈の多層狀
 媒體内の侵徹深を求めよ。成層狀況並に
 性状は圖-9 に與ふるが如し。

〔解〕 a) 最初層よりの侵徹深：

$$h_{y'} = 1.3 \cdot 0.000065 \times \frac{41}{0.152^2} \times 250 \cdot 0.809 = 3.2 \text{ m}$$

算出せる侵徹深 $h_{y'} = 3.2 \text{ m}$ は最初層の厚さ、即ち $l_1 = 0.6 \text{ m}$ よりも大なり、従つて砲彈は最初層を貫通し第 2 層に侵徹すべし。

b) 第 2 層の侵徹深：

$$h_{y''} = 0.6 + (3.2 - 0.6) \times \frac{0.000045}{0.000065} = 2.4 \text{ m}$$

算出せる侵徹深 $h_{y''} = 2.4 \text{ m}$ は最初層及び第 2 層の合計厚、即ち $l_2 = 1.8 \text{ m}$ よりも大である。従つて、砲彈は最初層及び第 2 層を貫通し、第 3 層に侵徹すべし。

c) 第 3 層内の侵徹深：

$$h_{y'''} = 1.8 + (2.4 - 1.8) \times \frac{0.000004}{0.000045} = 2.33 \text{ m} < l_3 = 12 \text{ m}$$

即ち砲彈は第 3 層内に停止す。

斯くて、本砲彈の實際の侵徹深は：

$$h_y = h_{y'''} = 2.33 \text{ m}$$

式 (8) 及び (9) 内にある r_p は同一質媒體に對する値にして、次式より求められる：

$$r_p = K_2 \sqrt[3]{C} \dots\dots\dots (13)$$

こゝに：
 r_p —破壊半徑 (m)； K_2 —爆破係數 (表-2 參照)； C —裝藥重量 (kg)

多層狀媒體内の破壊半徑は、次式の如く、砲彈の停止位置より各成層を逐次算出して求める：

圖-9. 成層狀況並に性状圖

黑土		0,6	$l_1 = 0,6$	$K_1 = 0,000065$	水平 成層
砂質粘土		1,2	$l_2 = 1,8$	$K_2 = 0,000045$	
泥灰石		10,2	$l_3 = 12,0$	$K_3 = 0,000004$	
地質記号	層厚	地表ヨリ 地深サ	土、性質	備考	

$$\left. \begin{aligned}
 r_p' &= K_2' \sqrt[3]{C} \\
 r_p'' &= y_1 + (r_p' - y_1) \frac{K_2''}{K_2'} \\
 &\dots\dots\dots \\
 r_p^n &= y_{n-1} + (r_p^{n-1} - y_{n-1}) \frac{K_2^n}{K_2^{n-1}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

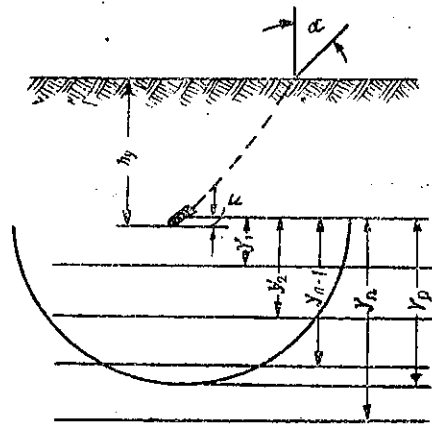
こゝに：
 r_p' —最初層より求められし破壊半径；
 r_p'' —第 2 層の破壊半径；
 r_p^n —第 n 層に對し求められし破壊半径；
 $K_2', K_2'', K_2^{n-1}, K_2^n$ —各地層に對應せし爆破係數；
 $y_1 \dots y_{n-1}$ —砲爆彈重心より各層に至る距離
 (圖-10 參照)

破碎半径は次式より求められる：

$$r_0 = K_0 \sqrt[3]{C} \dots\dots\dots (15)$$

こゝに：
 r_0 —破碎半径 (m)；
 K_0 —破碎係數 (表-2 參照)
 C —裝藥重量 (kg)

圖-10. 多層煤體內の破壊圖



〔計算例〕 断面 $2a=2.3$ m 及び $b=2.4$ m を有する掩蔽壕が粘土地に在る場合、必要なる防護厚を求めよ。但し掩蔽壕は 203 mm 榴砲彈に對し安全に防護せらるべきものとす。

〔解〕 式 (11) より砲彈の侵徹深は：

$$h_y = r K_1 \frac{P}{d^3} \Gamma \cos \alpha,$$

本題與項として：

$$r = 1.3, \quad K_1 = 0.000\ 007, \quad P = 91\ \text{kg}, \quad d = 0.203\ \text{m}, \quad \Gamma = 350\ \text{m/sec}, \quad \alpha = 34^\circ$$

上値を代入して：

$$h_y = 1.3 \cdot 0.000\ 007 \times \frac{91}{0.203^3} \times 350 \cdot 0.829 = 5.8\ \text{m}$$

式 (13) より $K_2 = 0.99$ 及び $C = 13$ kg なる場合の破壊半径を求めれば：

$$r_p = 0.99 \sqrt[3]{13} = 2.33\ \text{m}$$

式 (3b) より、壓力拱高を求めれば：

$$h_1 = \frac{a + b \operatorname{tg} \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)}{f},$$

こゝに本題與項として：

$$a = 1.15\ \text{m}; \quad b = 2.4\ \text{m}; \quad \varphi = 45^\circ; \quad f = \operatorname{tg} \varphi = 1.$$

上値を代入して：

$$h_1 = \frac{1.15 + 2.4 \cdot 0.414}{1} = 2.14 \text{ m.}$$

全防護厚は式 (8) より次の如く求められる：

$$H_1 = h_y + r_p + h_1 - u;$$

$$H_1 = 5.8 + 2.33 + 2.14 - 0.102 = 10.17 \text{ m}$$

u なる値は普通砲弾爆弾の半径，即ち $u = d/2$ (但し d は砲弾の直径) にとられる。

(昭. 18. 2. 20. 受付)