

# Cellular Bulkhead の設計法

立 石 哲 郎\*

## 1. 緒 言

### 1.1. Cellular Bulkhead の概念

矢板を円形に建込み中に土を詰めれば円周方向の矢板の張力で中詰の土圧を受け Cellular Block の如きもので、之を連続させれば壁体となつて水平力に対抗させる構造物、即ち締切堤、擁壁、岩壁又は防波堤として用いる事ができる。之が“Cellular Bulkhead by Sheet Pile”で、その用途により Cellular Cofferdam, Cellular Retaining Wall, Cellular Quay Wall 又は Cellular Breakwater 等と呼ばれる。

円形に建込み之を連続させると書いたが、之の平面型は以下の如くに大別できる。

- a) Separate Circle Type
- b) Circular Type
- c) Diaphragm Type 又は Semicircular Type
- d) Cloverleaf Type

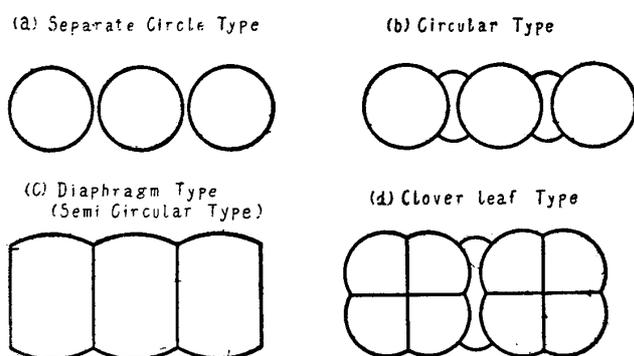


図-1 Cellular Bulkhead の分類

Circular Type は夫々独立した円嚮を小さな弧で連結したもので主円嚮の周と連結弧とのなす角は普通  $90^\circ$  である。施工に当つては各々の円嚮を単独に中詰する事ができ、又流水に直角に壁体を造るような場合には連結弧の施工を残せば流速を大して増加させずに工事を進める事ができ、締切堤には便利である。又破壊が起つても局部的で概ね1つの円嚮を補修すればよいが、壁の張力の分布に対する連結弧の影響が不明確である。又、壁巾を大にしても相似形に大にすれば単位壁長当りの矢板使用量は一定で中詰量が増すだけであるから、工費は大して増加しない。

1910年 Cuba の Havana Harbor で米海軍艦 Main を修理するのに締切堤で囲い中を排水して作業した。この時に米海軍によつて用いられたのが Circular Type

の始めで、基礎が軟弱な粘土で中詰にも粘土を用いた為非常に大きな変形が起つたが目的を達した。

Diaphragm Type は円弧及び隔壁の張力を等しくする為夫々のなす角を  $120^\circ$  とするのが普通である故隔壁の間隔と円弧の半径とが等しくなる。壁巾を一定に保つて、この値を大にすれば矢板の使用量を減ずる事ができる。然し壁の張力は弧の半径を大にすれば増すので、使用矢板の Interlocking Strength からその最大値が決まる為中詰の性質及び内外の水位差にもよるが、一般に壁高が 15m 以上の場合には矢板使用量は Circular Type と大差なくなる。然し隔壁を伸す事によつて壁の張力を増さずに壁巾を任意に大にできる。之の形式の最大の欠点は各を単独に中詰できぬ事である。

Diaphragm Type は 1915年ニューヨーク州トロイに於いて米海軍によつて締切堤に用いられたのが最初である<sup>1)</sup>。

Circular Type では使用矢板の Interlocking Strength から最大半径従つて最大壁巾が決められる。壁の安定上巾をこの値より大にし度い場合には主円嚮を隔壁で補強した型、即ち Cloverleaf Type を採用すればよいが矢板使用量は増加する。

之の型式は 1936年以降の TVA のダム及び閘門建設用の仮締切として大いに利用された<sup>3)4)5)</sup>。

### 1.2. 使用矢板

普通の矢板壁では矢板は控樑の張力と根入部の抵抗土圧とで支持される梁として土圧を受ける。従つて壁としての断面係数の大なる事が必要で八幡、Larssen 等の如き U 型 (Deep Arch Type) 或はヨーロッパ及びアメリカで多く見られる Z 型が多く使用される。

然るに Cellular Bulkhead に於いては矢板は長さの方向の曲げ強さは必要でなく壁の方向の張力に強くなければならない。この目的に副つた Straight Web Type と呼ばれる型式の矢板が Cellular Bulkhead と共にアメリカで発達し、Larssen 其の他ヨーロッパでも製造されて居る。之の型式も次の2種に分けられる。

- a) Straight Web Type 
- b) Shallow Arch Web Type 

Straight Web Type では断面係数が非常に小さくなるので継手の部分に余分の肉を付けて、長物の取扱いができるようにせねばならず、この為矢板の重量が大と

\* 運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所

なる。

Shallow Arch Web Tyhe では壁が引張を受けると、Web の全長に亙つて曲げ応力を生じ、僅か 20~30 t/m の張力でも降伏点を超し矢板の形状に永久変形を残し、巾も大になり、200~300 t/m の継手の保証強度では巾の増大は 3~4% に達する。然しこの余裕がある為に建込みが多少不整でも打込む事ができる。

この型式の矢板の主なものを 4.2. に示すが、概略の性質は下記の如くである。

矢板の巾	33.3cm, 40cm, 15', 16'
腹部の厚	9~13 mm
矢板の重量	110~170 kg/m <sup>2</sup>
Interlocking Strength	200~300 t/m
2点吊りのできる限界長 (降伏点に対する安全率 1.5)	20~25 m

この種の矢板は継手の強度のみに頼つて構造物を構成するのであるに拘らず、運搬打込に当り最も損傷を受け易い所は継手である。之は Cellular Bulkhead の避けられない欠点で、矢板の取扱いには継手を損傷しないよう充分注意を払わなければならない。

尙八幡製鉄 K. K. に於いてもこの種の矢板の製造を計画して居るようである。

## 2. 設計法

### 2.1. 単体としての設計

Cellular Bulkhead の設計では壁体の安定性から壁巾と中詰の材料とを、次に中詰の土圧から弧の半径と使用矢板とを決定すればよい。然しこの構造の用いられ始めた初期には之が力学的性質の異なる 2 種の材料即ち鋼矢板と中詰の土とでできているにも拘らず、之等が全く単一の物体例えばコンクリートブロックの如く扱つて考へてその安定性を求めた。

即ち転倒及び迂りに対する計算でその所要巾を決めた転倒に対しては、基盤の反力の重心が中央 1/3 以内に留るようにしたようである。

次に

$$t_{max} = K_A \cdot \gamma \cdot H \cdot r \dots\dots\dots(1)$$

- t : 壁の最大張力
- K<sub>A</sub> : 能土圧係数
- γ : 中詰の単位重量
- H : 壁の高さ
- r : 壁の円弧の半径

なる関係から円弧の半径と使用矢板とを決定した。

然し仮締切の場合には上記の計算さえ行わずに次の如き経験法則に依る事も多く結構目的を達して居たようである。

- a. 壁の巾は高さの 85% 以上
- b. 矢板は岩又は硬地盤迄打込む
- c. 中詰は砂又は砂礫を用いる

### 2.2. Pennoyer の計算

Raymond P. Pennoyer は外力によつて壁体内に起る剪断力によつて壁体が破壊する可能性のある事を指摘し上記の諸計算の外に中詰内部の剪断力 (Internal Shear,

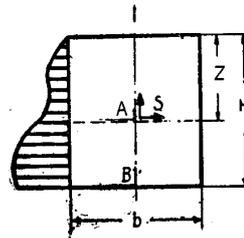


図-2

Vertical Shear) を検討すべき事を 1934 年に提案した<sup>2)</sup>。

即ち図-2 に示す如く、壁の中立軸上の任意の点 A に於ける鉛直方向の剪断応力 S<sub>z</sub> は梁の計算に於けると同様に

$$S_z = \frac{3}{2} \int_0^z p dx \dots\dots\dots(2)$$

にて与えられると考へた。但し外力が土圧の如く鉛直方向の分力を含む場合は、この式は多少修正せねばならない。

然して之に抵抗するものは土圧によつて押し合つて居る中詰の剪断抵抗であると考え

$$S_{rz} = K_{AT} z \tan \phi \dots\dots\dots(3)$$

φ : 中詰の内部摩擦角

を抵抗値とした。

(2), (3) 式を見れば一般に底部に於いて最も危険である事が分るが、この点に於いても S<sub>rz</sub> > S<sub>z</sub> でなければならぬと説いた。

又 Pennoyer は同時に計算に用いる壁巾 b は実際の形と等しい断面係数を持つ様な巾の壁に直し之の巾を用いるべきであると述べた。

### 2.3. Terzaghi の方法

2.3.1. 1934 年に Newport News Dry Dock & Shipbuilding Co. で平行な 2 つの乾ドックを建設した。之の乾ドックは両側の擁壁と 2 つのドックの間の隔壁の外に作業場の護岸も Cellular Bulkhead であり<sup>6,8)</sup>、之の設計及び施工に Karl Terzaghi が指導を行つた。この経験に基いて Terzaghi は Cellular Bulkhead の安定性を論じ、壁の破裂及び中詰内の剪断力の計算に就いての従来の計算法を訂正すべき事を述べた<sup>7)</sup>。

この論文は、壁の変形、透水性、砂層上の締切堤の Boiling についても言及してある。設計法は岩盤上、砂層上及び粘土層上の 3 つに分けて論じてあるがその間の統一性に欠けるので、修正して以下その概要を述べる。

尙、Terzaghi は根入のある場合にも地表面で切つてその上だけの構造物として外力及びそれに対する抵抗を論じ、地表面以下の根入の部分は単に矢板の支持力又は引抜抵抗を増し或は透水を防ぐ為のみにあるものと考えて居る。この点にも大いに疑問があるが、此所ではそのままにして記述する。

2.3.2. 壁の破裂に対する計算 外力による転倒モーメントにより基礎の反力が図-3 に示す如く ABCD) か



るから

$$S' = P_c \tan \phi \dots\dots\dots(16)$$

又矢板の隔壁による剪断抵抗  $S''$  は既に求めた (11) 式の値であるから、全剪断抵抗  $S_r$  は

$$S_r = S' + S'' = P_c(\tan \phi + f) \\ = \frac{1}{2} C_r H^2 (\tan \phi + f) \dots\dots\dots(17)$$

之に対して、外力によつて起る剪断力  $S$  は (2) 式の Pennoyer の値を上端から底部迄積分した値であるから

$$S = \int_0^H s dz = \frac{3M}{2b} \dots\dots\dots(18)$$

$M$  : 外力による転倒モーメント

この両式から剪断力に対する設計ができる。

又前項の壁の破裂の場合と同様に之を転倒モーメントの形で現わすと次の如くなる。

中詰による剪断抵抗  $S'$  は順次中詰の中を伝達されて矢板壁に達し、之にぶら下り又は引抜かんとして矢板に抵抗され抵抗モーメント  $M_f$  となるのであるから、 $S'$  が矢板壁に一樣に分布すると考えれば

$$M_f = S' l_a = P_c b \frac{L+b/2}{L+b} \tan \phi \dots\dots\dots(19)$$

又この時に中詰と矢板との間に作用する摩擦力を  $F$  とすれば

$$F = S' / l = P_c \frac{L}{L+b} \tan \phi \dots\dots\dots(20)$$

矢板壁のみでの抵抗モーメント  $M_s$  は既に (16) 式で求めてある故、剪断力から決まる抵抗モーメントの値は

$$M_f + M_s = P_c b \left( \frac{L+b/2}{L+b} \tan \phi + \frac{L+b/4}{L+b/2} f \right) \dots\dots\dots(21)$$

となり、この時外側の矢板には  $F + Q_p$ 、隔壁の矢板には  $2F + Q_p$  なる押込力又は引抜力が作用する。

尙、中詰と矢板との間の摩擦力は  $F_1$  を超える事ができぬ故、 $F > F_1$  の場合には  $(F - F_1) \cdot l$  なる矢板と伝達できぬ分は基礎の反力の増加となり前趾に於ける土圧を増加せしめる。之を許せない場合には (21) 式の  $M_f$  は  $F_1$  で定められる  $M_1$  と置換えねばならず (15) 式と同一となる。

**2.3.4. 実際の場合への適用** a) 矢板の張力を求める場合の外  $M_1$ ,  $M_f$ ,  $M_s$  等を求めるのに何れも土圧係数  $C$  の値が必要であるが、Terzaghi は Rankine の能土圧係数  $C = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$  を念頭に置き、実際には之より大で、砂又は砂利を中詰を用いた場合に  $C = 0.4$  程度を用いればよいと述べて居る。

b)  $M_s$  を求めるのに継手に於ける矢板間の摩擦係数  $f$  の値が必要であるが、之は継手の形状によつて異なる値である。即ち継手を模型的に図-5 の如く現わし、鋼と鋼との摩擦係数 (この値も表面の湿潤状態や砂粒等の存在によつて大いに変るのであるが) を  $\mu$  とすれば、図

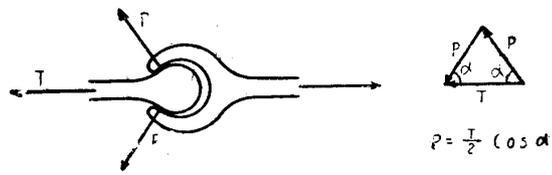


図-5

より直に  $f = \frac{\mu}{\cos \alpha}$  である事が分る。Terzaghi は一般に  $f = 0.3$  とすればよいであろうと述べて居り、之と無関係に TVA に於いても設計には  $f = 0.3$  を用いた様である。

c) 壁が直接岩盤に載つて居る締切堤の場合には矢板のみでは引抜抵抗は無いので  $M_s = 0$  となる。但し擁壁の如く外側が土の場合にはこの面での摩擦による引抜抵抗が期待でき、 $M_s$  の値は之によつても定り、(13) 式の値と何れか小なる方となる。

d) 迂りに対する抵抗を増す為内側に置土をする場合にはこの抵抗によつて壁の張力  $T$  が従つて  $S''$  が減り  $M_s$  も小となる。

e) 基礎又は中詰が粘土で建設後も圧密沈下を続ける場合は下の方向が中立軸の両側で反対方向を取り得ず常に中詰がぶら下る方向に限界値の  $F_1$  まで働く故、 $M_f = 0$  となる。

f) 隔壁の矢板の継手を溶接し又は斜方向の Tie を取付ければ剪断抵抗を増し  $M_s$  の値が大になる。但し方法を検討しないと  $M_f$  と同時に妨かぬ事となり Progressive Failure を起す。

## 2.4. krynine の方法

Dimitri P. Krynine は Terzaghi の剪断力に対する計算の中  $C$  の値の扱い方を訂正すべきことを指摘した<sup>7), 12)</sup>。即ち  $C = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$  は最大最小主応力の比であり、Pennoyer 及び Terzaghi が念頭に描いて居る如く、中詰内で鉛直及び水平方向の応力の比がこの値であるならば鉛直面は主応力面である筈で、従つて剪断応力は無く、之の面で剪断破壊を論ずるのは甚しい矛盾である。

鉛直面で剪断破壊が起るならば主応力面は之と  $45^\circ \pm \phi/2$  の傾をなす面であり中詰内の応力状態は図-6 に示すモール円で表わされる。

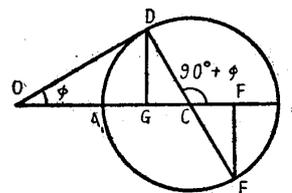


図-6

図を見れば直に分る如く  $OA$ ,  $OB$  が主応力であり、 $OF$  が鉛直方向の圧縮力  $\sigma$  を又  $OG$  が之と直角、即ち水平方向の圧縮応力を表すよつてこの点に於ける土圧

$$C_K = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} = \frac{\cos^2 \phi}{2 - \cos^2 \phi} \dots\dots\dots(22)$$

となり、 $\phi = 30^\circ$  の場合には  $\tan^2(45^\circ - \phi/2) = 0.33$  又は Terzaghi の  $C = 0.4$  に対して  $C_K = 0.60$  となる。

Krynine はこの  $C_K$  の値を  $M_f$  のみでなく  $M_s$ ,  $M_1$  の計算にも用いる事を提案した。

### 3. 結 び

a) Cellular Bulkhead は矢板の建込が多少困難であるがこの他には中詰をするだけであり、現場の作業は極めて単純である。

b) 設備のない土地で防波堤や岩壁にケーソンを用いる事を考えればこの型式の長所が理解される。

c) 外国の矢板を購入しても大して高価でなく、又八幡で製造を開始すれば入手も容易になるので、今後我国でも大いに使われるであろう。

d) 矢板の入手及び打込に当つては継手を損ぜぬように特に注意を要する。

e) 設計は Terzaghi-Krynine の方法に準ずればよいが、この方法にも以下述べる如く疑点が多い。然し多数の一次的又は永久的構造物がこの方法に従つて造られ各々目的を達して居る事は事実である。

f) 根入のある場合の安定計算は根入の下端迄の構造物とし、根入部の前後に能土圧と受動土圧を考えるべきであろう。

g) このように考えると矢板の根入が一ような場合には隔壁の矢板の支持力は Point Bearing だけとなり、又両外側の矢板はその外面の摩擦と Point Bearing となるので、前述の  $M_1$ ,  $M_f$ ,  $M_s$  の値は矢板の支持力か修正せねばならない。

h) 又根入部の受ける受動土圧の為に壁の張力  $T$  は減少するのであるが、水平方向の釣合から考えて底部の摩擦と根入部の受動土圧が両者同時に最大値まで働く事は無く、何れがどれ程働くかは決定できない。従つて、 $M_s$  がどれだけ減少するかは判断の問題となる。

i) 何れの設計法でも鉛直面で剪断破壊を論じて居るが、矢板及び中詰内の応力状態が明かでなく従つて鉛直面が剪断破壊に最も危険であると云う証拠がない。

j) 使用矢板を決定する場合と隔壁の継手に於ける摩擦抵抗を求める場合とに同一の土圧係数を用いるのは理論上正しいが、之は何れか一方に危険側の設計をする事となる。又、かゝる小さな Cell の中で而も曲面の壁に働く土圧が長い平面の壁に働く土圧と同様であるとは考えられない。

k) 中詰の剪断抵抗を求めるには土圧係数に Krynine の  $C_K$  を用いるのが正しいと思われるが、Krynine の如く矢板の張力を求めるにもこの値を用いる事には疑問がある。

l) 地震時に中詰の土圧及びその剪断抵抗がどのように変わるかは全く不明である。従つて上述の計算を地震時に如何に適用すべきかは我々地震国で考えるべき問題である。

m) 地震を考えて上述の方法で岸壁を設計すると  $b/H$  が 2~4 となり、それでも Internal Shear に対しては充分に安全にはならない。このような場合には  $b/H$  の値が 1 程度の場合を想定した設計計算と相当異つた現象が起るかも知れない。

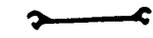
### 4. 資 料

以上 Cellular Bulkhead の設計に就いて簡単な紹介を行つたが、これを補う意味で関係ある主な文献、主な Straight Web Tyhe の矢板の諸元及び岸壁に用いた 2, 3 の例の大略の構造図を掲げる。

#### 4.1. 主な文献の目録

- 1) Charles W. Staniford "Unusual Cofferdam for 1000 Feet Pier, New York City" T., A. S. C. E. 1917 Vol. 81
- 2) Raymond P. Pennoyer "Gravity Bulkhead and Cellular Cofferdams" Civil Eng, 1934 No. 6
- 3) R. T. Colburn "Steel Pile Cofferdams & Test Cells for T.V.A. Project" Civil Eng, 1939
- 4) J.W. Peerson "Big Rigsd rive Cofferdam Piles" Eng. News Record 1942 Vol. 128
- 5) A.F. Hedman "Cofferdam Design for Kentucky Dam" Eng, News Record 1942 Vol. 128
- 6) C. B. Jansen "Constructing the Shipways" Civil Eng. 1943 No. 7
- 7) Karl Terzaghi "Stability & Stiffness of Cellular Cofferdam" T., A.S.C.E. 1945
- 8) M.M. Fitz Hugh, J.S. Miller & K. Terzaghi "Shipways with Cellular Wall on a Marl Foundation" T., A.S.C..E. 1947
- 9) Hermann Blum "Flach-Stahlspundwände, Entwicklung und Anwendung in Europa" Die Bautechnik Juli 1949
- 10) R.R. Shoemaker "Steel Sheetpile Cells form Bulkhead for Long Beach Harbor Expansion" Civil Eng 1950 No. 9
- 11) Frank H. Newnam "New Wharves of Cellular Bulkhead Design" Dock & Harbot Auth. 1951 Aug
- 12) L. White & E. A. Prentis "Cofferdams" Columbia Univ. Press 1940  
訳：後藤憲一 „締切工” 常盤書房
- 13) D.P. Krynine "Soil Mechanics" Mcgraw-Hill 1947
- 14) C. W. Dunham "Foundation of Structures" Mc Grow-Hill 1952
- 15) G.P. Tschebotarioff "Soil Mechanics. Foundations and Earth Structures" Mc Graw-Hill 1953

4.2. 主な矢板の諸元

断面略図	矢板名称	製造会社	矢板の巾 (cm)	腹部の厚 (mm)	断面係数 (cm <sup>3</sup> /pile)	壁の重量 (kg/m <sup>2</sup> )	断手の強度 (t/m)
	SP-4	Bethlehem (米)	40.6	9.5	52.4	112.4	214
	M-112	Carnegie Illinois (米)					
	I-23	Inland (米)					
	SW-23	Tones & Langhlin (米)					
	SP-5		40.6	12.7	54.1	136.7	214
	M-113						
	I-28						
	SW-28						
	SP-9		21.6	5.2	16.4	102.5	
	I-21						
	SP-6a		38.1	9.5	49.2	136.7	286
	M-101				39.3	"	
	I-31-5				60.6	151.4	
	SW-31				"	"	
	SP-7a		38.1	12.7	49.2	156.2	286
	M-102				39.3	"	
	I-35				62.3	170.9	
	SW-35				"	"	
	L-X1	Larssen (独)	28.7	14.0		150.0	
	FL-23		40.0	9.5		155.0	200
	FL-9		"	9.0		135.0	300
	400.G	Rombas (仏)	40.0	9.0	75.0	131.25	
	F-12	Hösch (独)	33.3	12.0		140.0	200
	B.P	Belval (リュクセンブルグ)	40.0	9.0		138.0	300

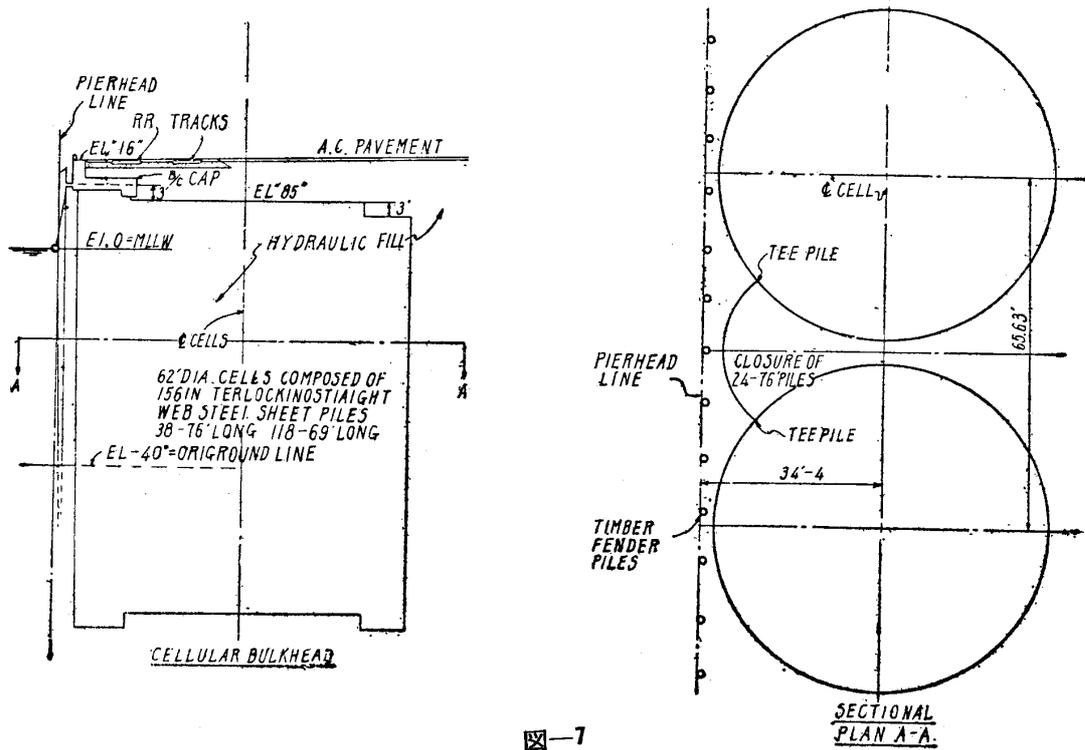


図-7

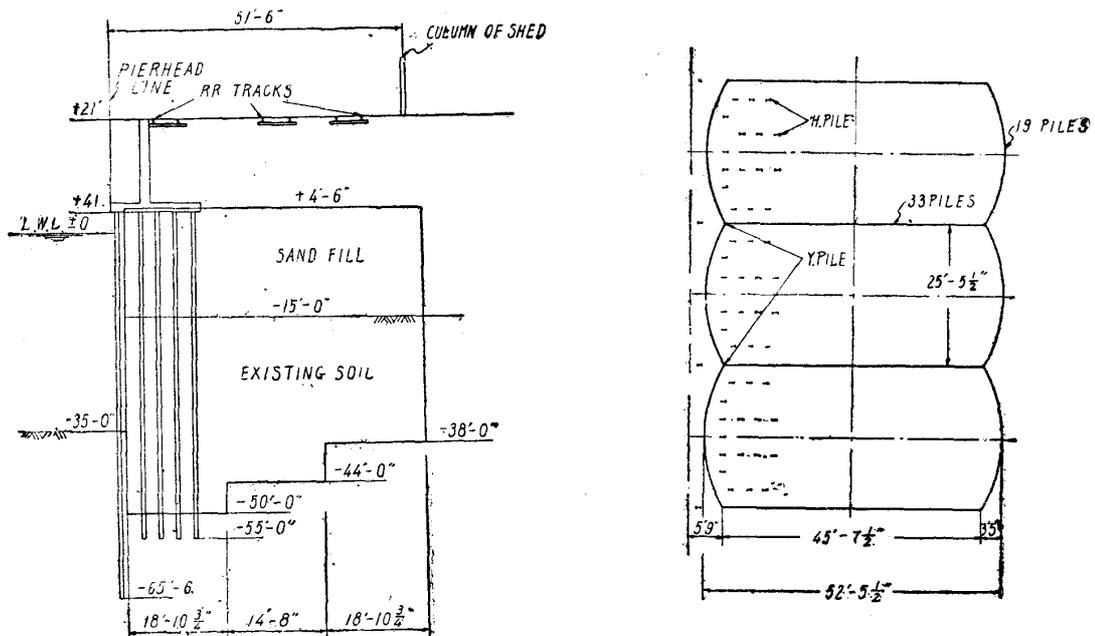


図-8

## 土質工学会 第2回 総会ならびに春季講演会・見学会

第2回定例総会ならびに春季講演会及び見学会を、次の次第により開催いたします。会員諸氏多数の御参加をお願い致します。

### 次 第

- 期 日：昭和 30 年 5 月 20 日 (金) 午前 10 時より  
 会 場：国鉄 本庁クラブ 2階会議室 (東京駅八重洲口観光ビルうら)  
 総 会：1) 昭和 29 年度事業報告及び決算報告  
 2) 昭和 30 年度理事改選について  
 3) その他  
 春季講演会：総会に引続き 11 時より 2 時の予定  
 見 学 会：講演会終了後  
 地下鉄丸の内線工事現場の予定

### 春季講演会 講演申込について

春季講演会の講演を募ります。下記の次第により御申込み下さるようお願い致します。なお講演概要を作りますから原稿の御提出を願います。

#### 記

- 講演題目申込：5月7日までに土質工学会あてお申込み願います。  
 講演概要原稿：5月15日までに、900字(図表を含み)程度、ガリ版に適するよう執筆御提出を願います。