

わかり易い土木講座



土木学会編集

新訂第三版

土質工学

箭内寛治

浅川美利

彰国社刊

序 文

この本を執筆するよという話があった時、たまたま、そばにいたある先輩に、これは“わかりにくい土質工学”になりそうだなと、釘をさされたものである。

土質工学のわかり易い解説書としては、すでに

最上武雄・渡辺 隆：平易なる土質工学：土質工学会

Sowers & Sowers; Introductory Soil Mechanics and
Foundations; Macmillan

などが良く知られている。したがって“わかり易い”本にすることについては、多少議論もし、気も使った。各頁に必ず説明図を入れよう。簡単な例題を随所に入れよう。式の誘導にも、微積分はほとんど使わないようにしよう。など計画したが、必ずしも、その通り実行できなかった。そして結局は、上記二書を参考にして、講義用の原稿を、多少書変えるに止まった。

本書を手にした方は、この本をごく短い期間に、集中的に一通り読んでもらいたい。そして、さらに関係の深い専門書に進むとか、“土と基礎”などの学会誌に接して、最近の新しい理論技術について勉強していただきたい。本書は、そのような踏台にしてほしいと思っている。

最初の企画では、能城正治氏（現・泉尾工業高校教頭）を含めた3人が、この本の担当者であったが、同氏は執筆期に新しい任務につかれ、その責任と多忙な仕事のため辞退された。しかし、本書は少なからず同氏の影響を受けている。ここに記しておきたい。

1968年7月

箭 内 寛 治
浅 川 美 利

〔章別担当著者〕

1. 3. 4. 5.

6. 7. 8 章……………箭内 寛治

2. 9. 10章……………浅川 美利

新訂第二版にあたって

平成2年3月に土質試験の方法が大幅に変わり、新しい試験法が数多く制定された。さらに土の性質を確かめる基本的な試験法も少なからず改められた。教科書として利用されている面もあるので、この機会をとらえて改訂することとした。

前回の改版後、共著者の浅川教授が急逝されたが、その後、義弟の巻内勝彦氏（日本大学助教授）が本書の全般的な点検をして下さった。また彰国社の田代勝彦氏には、この新訂第二版についても多大の御尽力をいただいた。あわせて厚く感謝の意を表する次第である。

平成3年2月

著 者

新訂第三版にあたって

平成4年に新しい計量法が公布されしばらくは猶予期間が認められていたが、1999年10月以降は、われわれがなじんできた重力単位や、大部分のCGS単位は法定計量単位から外されることになった。その間、JISや地盤工学会基準の改定などもあり、今回、それらも含めた修正を行った。修正に当たって少なからぬ御助言をいただいた彰国社の中山重捷氏には厚く感謝の意を表する次第である。

平成13年8月

著 者

目 次

1 地質と土質工学	11	2.4.4 沈降分析法	44
1.1 ちゅう積層・洪積層		2.4.5 粒度の表示	50
および第三紀層	12	2.4.6 よく用いられる粒径	50
1.2 岩石の硬軟	14	2.5 土のコンシステンシー	51
1.3 関東ローム、シラスおよび		2.5.1 コンシステンシーの	
真砂土	17	状態と限界	51
1.4 地下水の探査	19	2.5.2 コンシステンシー試験か	
1.4.1 弾性波地下探査法	19	ら得られる諸指数とその	
1.4.2 電気地下探査法	20	利用	52
[演習問題]	22	2.6 土の締固め	56
2 土の基本的性質および		2.6.1 含水比-密度の関係	56
物理的性質	24	2.6.2 相対密度	58
2.1 土の相構成	24	2.7 土の分類	59
2.2 土の構造	25	2.7.1 土の工学的分類法	60
2.2.1 単粒構造	25	2.7.2 分類の条件と基準値	61
2.2.2 はちの巣構造	26	2.7.3 分類表	61
2.2.3 縮毛構造	26	2.7.4 塑性図	62
2.3 土の基本的性質	27	2.7.5 日本統一分類法	63
2.3.1 土粒子の密度と比重	27	3 土の透水と毛管現象	66
2.3.2 土の間隙率と間隙比	28	3.1 ダルシーの法則と透水係数	66
2.3.3 土の含水量	30	3.2 透水係数の測定	69
2.3.4 飽和度	31	3.2.1 定水位透水試験	69
2.3.5 土の密度と単位体積重		3.2.2 変水位透水試験	70
量	32	3.2.3 圧密透水試験	70
2.3.6 土の物理定数および相状		3.2.4 揚水試験	71
態定数相互の関係	36	3.3 浸透水圧とポイリング	73
2.4 土の粒度	40	3.3.1 浸透水圧	73
2.4.1 粒度区分	41	3.3.2 ポイリング	74
2.4.2 土の粒度の測定	42	3.4 流線網とその応用	77
2.4.3 ふるい分け試験結果の		3.4.1 流線網の求め方	78
整理	43	3.4.2 流線網の試的図解法	78

3.4.3	断面の変わる場合の浸透 水量と浸透水圧	81
3.5	成層土の浸透性と浸透 水圧	83
3.5.1	成層面に平行な方向の平 均透水係数	83
3.5.2	成層面に垂直な方向の平 均透水係数	83
3.5.3	方向性ある均一地盤の流 線網図解法と浸透水量	85
3.5.4	層化した地盤の境界面に おける流線網の図解法	85
3.6	堤体の浸潤線と浸透水量	87
3.6.1	浸潤線の作図法	88
3.6.2	堤体の浸透水量	90
3.7	毛管現象と土の凍上	92
3.7.1	土の毛管作用	92
3.7.2	毛管水の動き	93
3.7.3	土の凍害とその対策	93
3.7.4	サクション	95
	[演習問題]	96
4	圧密	99
4.1	土の圧縮と一次元圧密	99
4.2	圧密の機構と間隙水圧	101
4.2.1	間隙水圧と有効応力	102
4.2.2	間隙水圧の測定	104
4.2.3	圧密の機構	104
4.2.4	圧密圧力と間隙比の 関係	107
4.3	圧密沈下量と圧密時間の 計算	108
4.3.1	圧密沈下量の算定	108
4.3.2	圧密時間の計算	111
4.4	実際の基礎地盤の圧密計算	114
4.4.1	多層地盤の圧密沈下量	

	の算定	114
4.4.2	多層地盤の圧密時間の 算定	116
4.4.3	施工荷重の漸増による 圧密度の補正	117
4.5	自然地盤における圧密の 諸現象	118
4.5.1	二次圧密	118
4.5.2	過圧密土および乱され た土の圧密	120
4.6	圧密試験	121
4.6.1	各荷重段階での圧密定 数	122
4.6.2	間隙比—圧密圧力曲線	125
	[演習問題]	128
5	土の強さ	130
5.1	土中の応力とモールの円	130
5.1.1	組合せ応力	130
5.1.2	モールの応力円	132
5.1.3	ポール	134
5.2	土の強度と変形	135
5.2.1	弾性係数とポアソン比	136
5.2.2	土の破壊と破壊規準	137
5.2.3	粘着力と内部摩擦角	139
5.3	せん断試験	140
5.3.1	一面せん断試験	141
5.3.2	一軸圧縮試験	143
5.3.3	三軸圧縮試験	145
5.3.4	ベーンせん断試験	149
5.4	砂質土のせん断特性	150
5.4.1	乾いた砂質土のせん断 特性	150
5.4.2	湿った砂質土のせん断 特性	153
5.5	粘性土のせん断特性	155

5.5.1	飽和粘性土のせん断特 性	155
5.5.2	飽和粘性土の強度の特 殊な性質	161
5.5.3	不飽和粘性土のせん断 特性	163
5.6	土のクリープとレオロジー	164
5.6.1	クリープ	164
5.6.2	レオロジー	165
	[演習問題]	167
6	土圧	170
6.1	ランキン土圧論	170
6.1.1	静止土圧	170
6.1.2	主動土圧	173
6.1.3	受働土圧	175
6.1.4	変形と境界の条件	178
6.2	クーロン土圧論	180
6.2.1	ボンスレの図解法	180
6.2.2	クルマンの図解法	182
6.2.3	クーロンの土圧公式	184
6.3	擁壁の設計	186
6.3.1	擁壁設計の手順	187
6.3.2	重力式擁壁の設計	188
6.3.3	逆T型擁壁および控え 壁式擁壁の設計	190
6.3.4	裏込めと排水設備	193
6.4	山止め板に働く土圧	195
6.4.1	山止め工の構造	195
6.4.2	深い切取りの山止め板 に働く側圧	196
6.4.3	山止め工事に伴う諸現 象とヒービング	197
6.5	地震時の土圧	199
6.6	地下埋設物に働く土圧	202
6.6.1	鉛直土圧の応力解析	202

6.6.2	水平土圧	205
	[演習問題]	206
7	斜面の安定	209
7.1	安定解析	209
7.1.1	土塊の移動の原因	209
7.1.2	安定解析の考え方	210
7.1.3	やわらかい粘土斜面の 破壊の型とその安定	213
7.1.4	層化した粘土斜面の安 定	217
7.1.5	引張りき裂	218
7.2	細片分割法	219
7.2.1	間隙水圧を考慮しない 解法	220
7.2.2	間隙水圧を考慮に入れ た解法	220
7.3	摩擦円法	225
7.4	複合すべりの解析	230
7.4.1	平面と平面の複合すべ り面	230
7.4.2	曲面と曲面の複合すべ り面	231
7.5	実際問題への適用と安全率	232
7.5.1	安定計算の適用例	233
7.5.2	安全率	235
7.6	盛土の安定	236
7.6.1	鉄道および道路の盛土	236
7.6.2	堤防	236
7.6.3	盛土の基礎	237
7.7	フィルタイプダム	240
7.8	オープンカット	243
7.9	地すべりと山くずれ	245
7.9.1	地すべり	245
7.9.2	山くずれ	246
7.9.3	落石	247

[演習問題]248

8 基礎251

8.1 概説251

8.1.1 基礎の分類および上部構造物との関連251

8.1.2 良好な基礎として必要な条件252

8.2 浅い基礎253

8.2.1 地盤の安定と支持力253

8.2.2 支持力公式255

8.2.3 地盤内の応力分布と沈下量261

8.2.4 地盤の許容支持力と載荷試験275

8.3 深い基礎279

8.3.1 杭の分類と設計手順279

8.3.2 杭の支持力公式282

8.3.3 杭の水平抵抗力290

8.3.4 その他の深い基礎296

[演習問題]301

9 地盤改良303

9.1 軟弱地盤303

9.2 軟弱地盤対策工法303

9.3 地盤改良工法の採用条件304

9.4 地盤改良の基本的考え方305

9.5 地盤改良工法307

9.6 圧密排水による地盤改良工法の解説309

9.6.1 ブレローディング工法309

9.6.2 サンドドレーン工法311

9.7 サンドドレーン工法による地盤改良の設計311

9.8 圧密排水工法における上載荷重316

10 土質調査と土質試験321

10.1 調査の手順322

10.2 土質調査の計画322

10.2.1 工事の種類と調査の内容322

10.2.2 調査地点の配置および深さ323

10.3 調査の手段327

10.4 土層状態の確認と土をサンプリングする方法328

10.5 ボーリング329

10.6 サンプリング330

10.7 サウンディング334

10.7.1 サウンディング装置の種類334

10.7.2 サウンディング方法の選択334

10.7.3 試験方法と試験から得られる指示値335

10.7.4 標準貫入試験337

10.7.5 その他のサウンディング装置の特長と用いられ方339

10.8 物理地下探査法342

10.9 土質試験342

索引347

1 地質と土質工学

土木構造物の規模が大きくなるにしたがい、その基礎となる土および岩盤の性質を的確にはあくすることが重要となり、また施工の方法も一段と工夫が望まれるようになるのは当然のことである。このような意味で、基礎構造物および土構造物などの設計施工に携わる土木技術者は、単に土に限らず、広く地質学的な知識を身につける必要がある。

たとえば、土質工学で扱う土は、地球表面上のきわめて薄い部分、せいぜい10~50m前後の深さまでであるが、これが岩盤力学まで拡張されると、この10倍すなわち、約100~500mの深さまでを研究の対象とするようになり、どうしても地質学の助けを借りなければならないようになる。もちろん、土質力学でも程度の差こそあれ、その土の成因および特性をよく知って工学的に活用するためには、多くの面で、地質学的な知識と考え方が必要である。

しかし、この章では、紙数も限られているので、主として土質工学に関係の深い、地質学のトピックスをとり上げて、その方面への関心を促すにとどめ、より詳しい点については、下記に示す

ような土木技術者のために執筆された地質の参考書その他を参考にされたい。

渡辺貫：地質工学 古今書院（1939）
 福富忠男：実用土木地質学 朝倉書店（1952）
 小貫義男：土地地質 森北出版株式会社（1958）
 田中治雄：土木技術者のための地質学入門 山海堂（1966）
 井尻・新堀：地学入門 築地書館（1963）

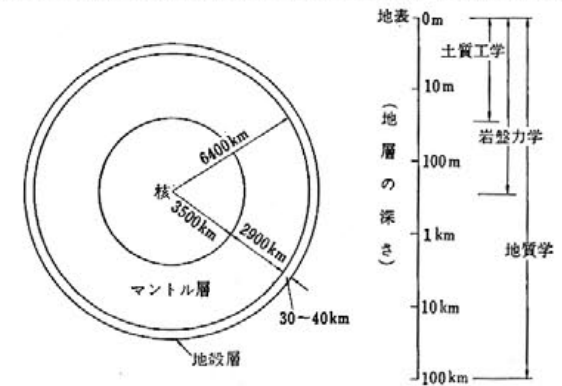


図 1.1 各専門分野と研究対象とする地層の深さ

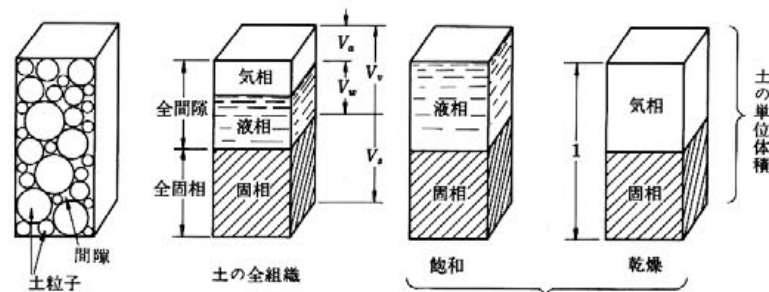
2 土の基本的性質および物理的性質

2.1 土の相構成

土は、いろいろな粒径をもった鉱物粒子の集合体で、それが骨組をなしている、そのすきまに水や空気ははいつている。すなわち、土は基本的に次の三つの相から成り立っている多孔質なかたまりである。

- (1) 固相 (solid phase) 鉱物粒子 (有機物を含むこともある) が構成している骨組の部分
- (2) 液相 (liquid phase) 土粒子間の間隙の一部あるいは全部を満たしている土中水
- (3) 気相 (gaseous phase) 間隙のうち水で占められていない部分で、ガスあるいは蒸気はいつている部分

液相と気相とが占める部分を間隙という。その間隙が水で満たされている場合 (飽和の状態) および水がまったくない場合 (絶乾の状態) における相構成は2相となる。これらの相構成をわかりやすくするために模式図で表わすと、図 2.1 のようである。



(a) 土粒子の集合状態 (b) 3相の土 (c) 2相の土

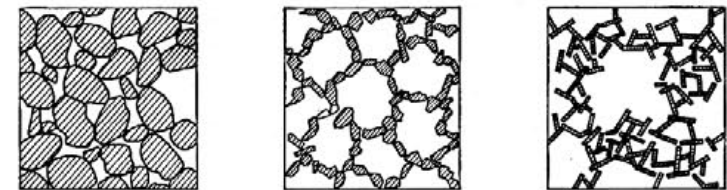
図 2.1 土の相構成

土質工学では、土の状態の判定や、また土の強さ、変形および圧力を考える際に、土の状態定数として各相相互の割合を知っておく必要のあることが多い。

各相相互の関係を表わすのに、体積割合として間隙比、間隙率および飽和度など、また、質量割合として含水量や密度など、いくつかの約束された表現がある。土質工学を学ぶにあたっては、まず、これらの基本的なことがらをよく理解しておく必要がある。

2.2 土の構造

前節で、鉱物粒子が骨格を形成し、その間隙にガスや水などがはいつていることを述べたが、その骨組をなす土粒子の配列の状態を土の骨格構造あるいは土の構造という。



(a) 単粒構造

(b) はちの巣構造

(c) 綿毛構造

図 2.2 土の構造の基本モデル

土の強さや圧縮性などの性質は、土の構造に関係が深い。たとえば堆積土をいったん乱すと、含水量や密度が変わらなくても、その土の強さがいちじるしく低減する。これは、もとの構造が壊されたことによって起こる性質の変化を示す好例である。

堆積土の構造を分類すると、基本的に次の三つの型に分けられる。

- (1) 単粒構造 (2) はちの巣構造 (3) 綿毛構造

これら構造の様式を変えるおもな因子は、土粒子の大きさと形状、土粒子界面の性質、土粒子の鉱物組成および堆積時の環境 (水の性質、流速など) などである。とくに粘土粒子の配列や方向性は、土粒子の鉱物組成や土粒子面の性質に影響されることが大である。

2.2.1 単粒構造

粒径が0.02mm以上といった比較的大きい粒子だけが集合してできている土の場合の構造である。いわゆる砂地盤や砂礫地盤などの粗粒土における構造である。このような構造の土を問題にするときは、個々の粒子の接触状態、間隙の量

単位体積当りの浸透力 $j = \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta x \Delta y \Delta z} \gamma_w h = \frac{h}{\Delta x} \gamma_w = i \gamma_w$ (kN/m³) (3.10)

が流れの方向（水平方向）に働く。

B. 鉛直方向の力の釣合い

MP面の下向き水圧： $\Delta x \Delta y \frac{1}{2}(h+z+z) \gamma_w$

NO面上向き水圧： $\Delta x \Delta y \frac{1}{2}(h+z+\Delta z+z+\Delta z) \gamma_w$

差引き $\Delta x \Delta y \Delta z \gamma_w$ だけの上向き水圧が働き、単位体積当りになおすと $-\gamma_w$ の浮力が作用することはよく知られている通りである。鉛直方向には水の流れはないとしたから浸透水圧は働かない。このほかにも鉛直方向には立方体 MNOP の土の重量 $\Delta x \Delta y \Delta z \gamma_t$ の力が下向きに働くから、これらのベクトル図を描くと図 3.8(b) のようになる。

地下水が水平左向きに流れる場合には (3.10) 式の浸透力 $i \gamma_w$ は、図 3.8(b) で左向きになり、地下水が鉛直上向き、あるいは下向きに流れる場合はこのベクトル $i \gamma_w$ はそれぞれ鉛直上方、あるいは下方を向く。このうち鉛直上向き流れの場合を例にとって次節に記述する。

3.3.2 ボイリング（噴砂現象）

土中で水の流れが上向きになる場合には、浸透水圧の向きも上向きに働く。浸透水圧が土の有効単位体積重量によって生ずる圧力より大きくなると土粒子をおし上げて土は水と共に噴出することになり、流動化に伴って地盤の支持力は失われる。この現象は一般にボイリングと呼ばれるが、とくに細砂やシルトから成る地盤で発生し

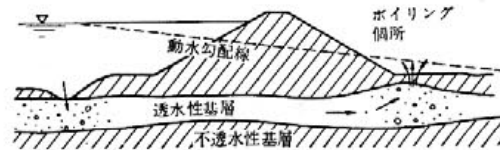


図 3.9 ボイリング現象の一例

やすいので、クイックサンドともいわれる。ボイリングは一時的な力の不均衡で起こる現象であるが、一度起こると地盤がゆるむので同じ個所が再び流動化する反覆性の傾向があり注意する必要がある。

いま、図 3.10(a) の MN 面において、上向き浸透水圧と飽和砂の圧力との釣合いを考えると、MN面の面積を A 、土の間隙比と比重をそれぞれ e, G_s とすると、

MN面に働く上向き水圧： $(h+L) \gamma_w A$

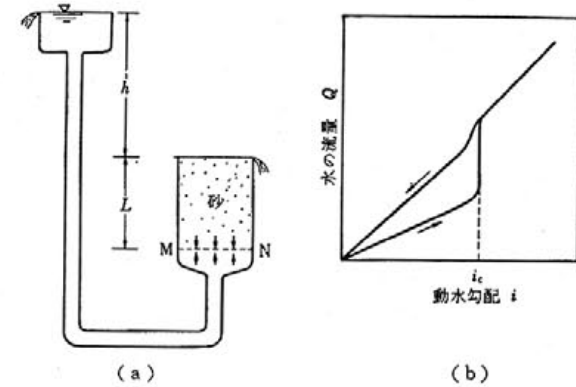


図 3.10 ボイリング現象の説明図

MN面に働く下向き水圧： $\frac{G_s+e}{1+e} L \gamma_w A$

したがって、次式のような場合にボイリングの発生する恐れがある。

$$(h+L) \gamma_w A \geq \frac{G_s+e}{1+e} L \gamma_w A$$

$$\therefore \frac{h}{L} \geq \frac{G_s-1}{1+e} \tag{3.11}$$

(3.11) 式の等号の場合の動水勾配 $\frac{h}{L} (=i_c)$ を限界動水勾配といい、図 3.10(b) にみるように、この動水勾配で砂を浸透して出てくる水の流量が急激に増加し、このとき砂も同時に噴出する。

いま砂の比重 $G_s=2.65$ 、間隙比を $e=0.65$ とすると、(3.11) 式の等号が成立つ場合は、

$$\frac{h}{L} (=i_c) = \frac{2.65-1}{1+0.65} = 1.0$$

となり、動水勾配=1 のとき、すなわち図 3.10(a) で砂厚 (L) とそれより上の水頭 (h) とが同じ値になると、ボイリングの危険があることがわかる。

3.3.3 フィルター

クイックサンド現象やボイリングを防ぐ方法の一つとして、図 3.11 のような押え盛土を

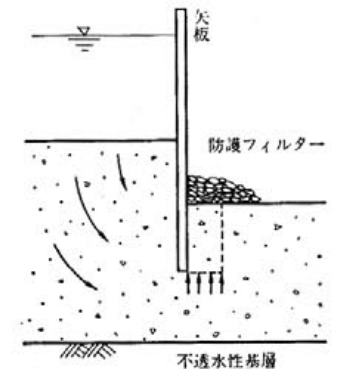


図 3.11 砂中の矢板に沿うボイリング

8.3.4 その他の深い基礎

A. ビヤ基礎

ビヤ基礎というのは、比較的その規模が大きく、かつ深い基礎のことである。杭基礎とのおもな相違は、寸法（杭の直径が50cmをこすとビヤと呼ぶことが多い）、およびその建設方法にある。杭は地表からそのまま打ち込むが、ビヤは大型であるため、ほとんど掘削しながら施工する。

ビヤをその工法で分類すると、図8.47のようになる。

ビヤ基礎 { 立て坑掘削……掘進にしたがい、支保工および巻き立をする深い掘削
ケーソン……掘進にしたがい、水、泥がはいらぬよう箱を使う工法

図8.47 ビヤ基礎の工法による分類

ビヤ基礎に使用する材料や工法は、加わる荷重、地下水の状態、主として荷重をささえる層の深度、建設規定、および器材の利用性などから決まる。また、ビヤが水中にはいる可能性があれば、流速・侵食を受ける深度および水や岩層の影響なども考えねばならない。

(1) ビヤ基礎の支持力と沈下 ビヤは、その先端支持力と、周面のせん断抵抗でささえられる大型のフーチングであるから、支持力や沈下を考慮するにあたっては、これらに対する検討が必要である。

先端支持力は、普通のフーチングに根入れ土圧が加わるとして計算すればよい。周面の抵抗は、周面摩擦として知られているが、量的には小さいものである。粘性土の粘着力は、乱さない土のせん断試験で求め、砂質土の摩擦抵抗は、(ビヤに対する土圧)×(摩擦係数)で求めればよい。この土圧は、静止土圧を採用すべきである。

ビヤ基礎の沈下量も、だいたいフーチングの沈下量計算法を応用すればよいので、砂質土では載荷試験を行って推定し、粘性土の沈下量はウェスターガード(8.13)式から $d\sigma_v$ を求め、接触沈下量と圧密沈下量を合計して求める。

(2) 立て坑掘削 簡単なものは浅掘りの井戸と同じで、人力や大きなオーガーで掘り、井筒を組みながら掘進する。所定の深さまで掘削し終われば、これをコンクリートで埋める。オープンウェルは、地下水位より上のかたい粘性土には適するが、7mより深くなると切りばりなしには施工できない。

立て坑掘削の一例として、図8.48に古くから用いられている深礎地業の工法略図を示す。

(a) 定規井筒を基準にして掘削し、掘った土は、三脚やぐらに取り付けたバケットで坑外に搬出する。

(b) 支持地盤に達したら支持力を測定し、所要の大きさに掘り広げる。

(c) 底部へコンクリートを打ち込み、大きい礎段をつくる。

(3) ケーソン(潜函) ケーソン工法は、地上または地中につくった構造物を、その下の土を掘削しながら自重により沈下させ、地中に基礎をつくるもので、オープンケーソン工法とニューマチックケーソン工法とがある(図8.49参照)。

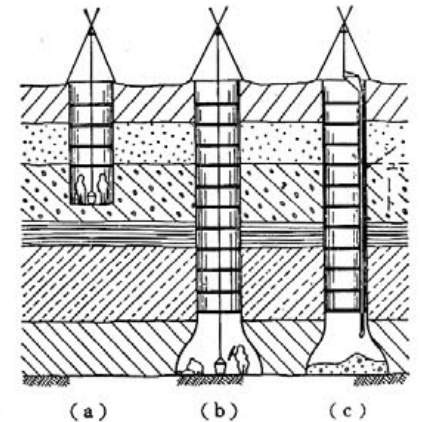


図8.48 深礎地業工法の略図

オープンケーソンは先端に刃先を有する函で、岩盤に達するまで排水しないのが普通であり、橋脚の建設によく用いられる。

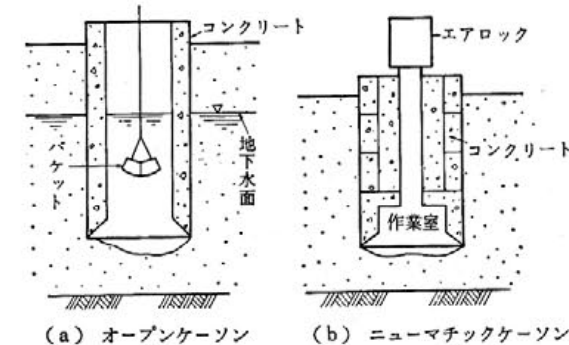


図8.49 各種ケーソン工法の略図

ニューマチックケーソンは、オープンケーソンでは施工が困難な場合に用いられる。気密な天井、壁を用い、圧さく空気を送り込んで作業室の気圧を高めて、水や泥のはいるのを防ぎながら掘削する。ロックから作業

室への出はいり、圧力の調整、およびケーソン病の問題など、ニューマチックケーソンの使用にあたっては、多くのむずかしい問題があるから、経験のある技術者がその設計・施工を企画しなければならない。

B. アースアンカー

アンカーというのは横方向の力あるいは上向きの力に対抗するように設計された特殊な深い基礎である。ドックの床版や地下室の床など揚圧力を受ける構造物の浮き上り防止、山止め壁のタイバック、および鉄塔基礎の引抜き力に対抗する