

わかり易い土木講座

17

土木学会編集

二訂版

海岸・港湾

合田良實

彰国社刊

まえがき

「わかり易い土木講座」の一巻として海岸・港湾編を書いてほしいとの依頼があったとき、私たちは「わかり易さ」について考えてみました。そして、もし、海岸工学および港湾工学がわかりにくいという声があるならば、その理由の一つは、取り扱う範囲が非常に広いので説明が十分に行き届かないためではないか、またもう一つは、基礎となる水理現象が数式で記述されるために取りつきにくい印象を与えるためではないか、と考えました。

そこで、この本では、次の二つの方針に従って執筆することになりました。

- (1) 取り扱う範囲を限定し、その代わり、十分に詳しく記述する。
- (2) 現象はできるだけ物理的に説明し、数式は実際に使用するもののみ
に限定する。

そうして、初めて海岸・港湾を学ばれる方にとって、取りつきにくいのは波浪と漂砂であろうと考えました。したがって、この本では、波浪と漂砂およびこれに関連する事項を重点的に取り上げています。このため、港湾計画、海象調査、あるいは岸壁の設計など重要な事項の幾つかについては、ほとんど触れることができませんでした。それらについては、著者らの不得意とするところでもあり、巻末の参考書一覧を参照のうえ、適当な参考書によって必要事項を補足していただくよう希望する次第です。

海岸水理、特に波浪の現象は数式の華麗な展開が可能な一つの例であり、理論解析が現象解明の一つの有力な手段となっています。したがって、波浪は、数式的取扱いを基礎にして解説されるのが通例ですが、「わかり易さ」に重点をおいて、できるだけ上記の(2)の方針にそって書いてみました。この試みがどれだけ成功したかは読者の御批判に待つよりはかありません。ただし、微小振幅波の理論は波浪理論の基礎であり、他の章を理解するうえにも有用と思われるので、第I編第7章にその理論展開を示しました。

一方、漂砂に関する事項については、理論解析的取扱いができるのはそのほんの一部にすぎません。そのうえ、現地と模型との間の普遍的な相似法則が見いだされていないため、現地観測や工事施工の過程で得られた経験がその基礎となっています。それだけに、学問あるいは工学としての定説が十分確立しておらず、人によって意見を異にする点が多くあります。この意見を異にする点を放置しては、いっそうわかりにくくなりますので、それについては著者の考えを強く押し出して書きました。したがって、独善的な個所も幾つかあると思いますが、それを御批判、あるいは、それをより正しい説を見いだすための足掛りとしてくだされば幸いに存じます。

1冊の本を書いて痛感することは、知識の狭さと能力の不足です。内容の不適切、表現の不正確のみならず、記述の誤りもあるのではないかと懸念いたします。読者諸賢の御批判と御寛容をお願いする次第であります。

なお、この本の素材となったのは、運輸省港湾技術研究所で毎年行なっている港湾技術者研修のテキストであります。使用を許可された港湾技術研究所に厚く御礼申し上げる次第です。また、各種の研究報告や出版物を参照し、それらから多数の図版を転載させていただきました。特に、土木学会発行の水理公式集と海岸保全施設設計便覧および日本港湾協会発行の港湾構造物設計基準からは、多くの貴重な図版および表を拝借致しました。転載を許可して下さった土木学会および日本港湾協会に深く感謝する次第であります。

1971年10月

佐藤昭二・合田良實

目次

I 海岸と港湾の水理

1 総論	16	3 波浪の発生・発達とその性質	42	4.3 波の屈折	84	6 漂砂と海浜変形	130
1.1 海洋と海岸	16	3.1 波浪の統計的性質	42	4.3.1 水の波の屈折現象	84	6.1 海浜形状	130
1.1.1 海洋	16	3.1.1 有義波とその定義	42	4.3.2 実際の波の屈折の解析	87	6.1.1 漂砂と底質	130
1.1.2 海岸	16	3.1.2 波高の分布	43	4.4 波の回折	88	6.1.2 海浜の断面形状	130
1.1.3 海浜	17	3.1.3 周期の分布	46	4.4.1 水の波の回折現象	88	6.1.3 海浜の平面形状	134
1.2 沿岸の水理現象	18	3.2 スペクトルによる波浪の表示	47	4.4.2 波浪の回折図とその利用	89	6.2 海浜の底質とその分布	135
1.2.1 海面の上下運動	18	3.2.1 波浪の周波数スペクトル	47	4.5 換算沖波	92	6.2.1 底質粒度組成の表示	135
1.2.2 流れおよび漂砂	19	3.2.2 波浪の方向スペクトル	51	4.6 波の反射	93	6.2.2 岸沖方向の底質分布	136
2 波の基礎的性質	20	3.3 風波の発生と波浪推算法	54	4.7 砕波	94	6.2.3 沿岸方向の底質分布	138
2.1 海の波の分類	20	3.3.1 風による波の発生と発達	54	4.7.1 砕波の現象と砕波高	94	6.3 海岸近くの流れ	139
2.1.1 波の諸元	20	3.3.2 吹送時間と吹送距離	55	4.7.2 砕波による波高変化	97	6.3.1 海浜流系統	139
2.1.2 海の波の分類	20	3.3.3 波浪推算法の種類	56	4.7.3 砕波に伴う水位変化とサーフピーク	99	6.3.2 沿岸流とその分布	141
2.2 波長および波速	26	3.4 風の推定	58	4.8 波の減衰	101	6.4 波と流れによる底質の移動	147
2.3 波形および波頂高	27	3.4.1 風信記録の利用	58	5 潮汐、高潮、津波、長周期波	106	6.4.1 底質移動の概況	147
2.4 水粒子の運動および質量輸送	28	3.4.2 天気図による風の推定	59	5.1 潮汐	106	6.4.2 移動限界水深	148
2.4.1 微小振幅波理論における水粒子の運動	28	3.4.3 風域の決定	64	5.1.1 潮汐の現象	106	6.4.3 浮遊漂砂	151
2.4.2 水粒子の運動に及ぼす波高の影響	30	3.5 風波の推定法	67	5.1.2 潮汐の調和分解と潮位推算	108	6.4.4 前浜および後浜の底質移動	154
2.4.3 波による質量輸送	32	3.5.1 SMB法	67	5.1.3 潮汐の基準面	110	6.4.5 潮流によるサンドウェーブ	155
2.5 重複波	33	3.5.2 ウィルソン法	71	5.2 潮流	112	6.5 漂砂の方向と漂砂量	156
2.5.1 完全重複波	33	3.6 うねりの伝播とその推定	74	5.2.1 潮流の現象	112	6.5.1 漂砂の卓越方向の推定	156
2.5.2 斜め重複波	35	3.6.1 うねりの伝播とその性質	74	5.2.2 湾口および港口の潮流	113	6.5.2 沿岸漂砂量の推定	160
2.5.3 部分重複波	35	3.6.2 うねりの波高と周期の推定	75	5.3 高潮	116	6.6 海浜変形の原因とその予測	162
2.6 波のエネルギーおよびその輸送	36	4 波浪の伝播に伴う変形	79	5.3.1 高潮の現象	116	6.6.1 海浜変形の営力と抵抗力	162
2.7 水中圧力	38	4.1 波の変形の概要	79	5.3.2 高潮の計算	117	6.6.2 構造物建設による海浜変形	165
2.8 ラディエーション応力	40	4.2 浅水変形	81	5.4 津波	119	6.6.3 海浜変形の予測	168
		4.2.1 水深減少に伴う波高変化	81	5.4.1 津波の現象	119	6.7 漂砂に関連する海岸調査	171
		4.2.2 実際の波の浅水変形	82	5.4.2 津波の伝播と変形	120	6.7.1 海岸調査の要目	171
				5.5 長周期波	124	6.7.2 資料調査と海岸踏査	173
				5.5.1 副振動とサーフビート	124	7 微小振幅波理論とその誘導	178
				5.5.2 水面の共振現象	125	7.1 微小振幅波の速度ポテンシャル	178
						7.1.1 基本方程式と境界条件	178
						7.1.2 微小振幅の仮定	179

7.1.3	速度ポテンシャルの解	180
7.1.4	進行波の速度ポテンシャル	182
7.2	微小振幅波の諸性質	183
7.2.1	波速および波長	183
7.2.2	水粒子の運動	183

II 港湾施設および海岸保全

8	港湾概論	196
8.1	概説	196
8.1.1	港湾の発展	196
8.1.2	港湾の役割	200
8.2	海運と船舶	201
8.2.1	海運の意義	201
8.2.2	船舶のトン数	203
8.2.3	船舶の主要寸法	203
8.3	港湾の分類と行政	206
8.3.1	港湾の分類	206
8.3.2	港湾の管理運営	207
8.3.3	港湾施設の概要	208
8.4	港湾計画	210
9	港湾の施設	212
9.1	水域施設	212
9.1.1	航路	212
9.1.2	泊地	213
9.1.3	バースの長さおよび水深	215
9.2	外郭施設	215
9.2.1	概説	215
9.2.2	防波堤	217
9.2.3	防砂堤と導流堤	221
9.2.4	水門と閘門	222

7.2.3	水中圧力	185
7.3	群波と群速度	186
7.4	微小振幅波のエネルギー	187
7.5	ラディエーション応力	190
7.6	造波機による発生波の理論	191

9.3	係留施設	223
9.3.1	係留施設の分類	223
9.3.2	係留施設の概要	224
9.4	埠頭および埠頭施設	228
9.4.1	概説	228
9.4.2	埠頭の陸域施設	229
9.4.3	コンテナ埠頭	231
9.5	航行補助施設	232
9.6	臨港交通施設	233
10	防波堤および海岸堤防の設計	234
10.1	防波堤の配置計画	234
10.2	波力とその算定	236
10.2.1	波圧の現象	236
10.2.2	波圧の算定式	239
10.2.3	斜面被覆材の安定重量	244
10.3	防波堤の設計	246
10.3.1	天端高と伝達波高	246
10.3.2	直立部の安定性	247
10.3.3	混成堤基礎マウンドの設計	248
10.3.4	傾斜堤の設計	249
10.3.5	防波堤周辺の洗掘と対策	250
10.4	海岸堤防と護岸の設計	253
10.4.1	海岸堤防と護岸の種類	253

10.4.2	波の打ち上げ高と越波量	256
10.4.3	設計高潮位と設計波	262
10.4.4	天端高	263
10.4.5	堤防と護岸の構造細目	264

11	海岸の保全	269
11.1	概説	269
11.2	高潮・津波対策	269
11.2.1	高潮対策	269
11.2.2	津波対策	271
11.3	海岸侵食対策	272
11.3.1	海岸侵食の事例	272
11.3.2	海岸侵食対策の概要	274
11.3.3	堤防、護岸、および消波堤	274
11.3.4	突堤	275
11.3.5	離岸堤および人工リーフ	278
11.3.6	人工岬工法	279
11.3.7	人工海浜	280
11.3.8	サンドバイパス工法	282
11.4	港湾埋没とその対策	284
11.4.1	概説	284
11.4.2	砂浜海岸の港湾埋没とその対策	285

11.4.3	河口港の埋没とその対策	288
11.4.4	シルテーションとその対策	290
12	海域環境の保全と環境創造	294
12.1	海域環境の課題	294
12.1.1	公害問題への対応	294
12.1.2	水質規制	294
12.1.3	アメニティへの高まり	297
12.2	海洋汚染の防除	297
12.3	快適な海岸環境の整備	298
12.3.1	緑地と公園	299
12.3.2	人工ビーチと緩傾斜護岸	299
12.3.3	親水性施設	300
12.3.4	マリナー	301
12.4	水質浄化と環境創造	302
12.4.1	概説	302
12.4.2	海水交換の促進	304
12.4.3	汚泥除去と覆砂	305
12.4.4	干潟・浅場の造成	305
12.4.5	エアレーション	308
12.4.6	藻場の造成	309
索引		312

ここに、 h_m は年間を通じての水深の平均値 (m)、 x は干潮汀線からの距離 (m) であり、 A は $0.125 \text{ m}^{1/3}$ とした。ただし、後にディーンは A は底質の粒径に依存するとして、たとえば粒径 0.3 mm に対しては $0.12 \text{ m}^{1/3}$ 、粒径 0.6 mm に対しては $0.20 \text{ m}^{1/3}$ の値を示している⁹⁾。なお、式(6.1)はブルン (Bruun) の平衡勾配式として知られており、人工養浜の設計や地球温暖化による海面上昇の影響評価に使用されることが多い。

また、シルベスターとスー (Silvester・Hsu) は沿岸砂州の頂部の水深の上限値として式(6.2)を示している⁵⁾。

$$h_c = 0.111x_c^{0.575} \quad (6.2)$$

ここに、 h_c はバー頂部の水深 (m)、 x_c は干潮汀線からのバー頂部の距離 (m) である。

6.1.3 海浜の平面形状

海浜の形状には、漂砂現象に起因する次のような特徴的な地形がある。

(1) **カスプ (beach cusp)**：砂浜海岸では、汀線が小さな波状の出入りを見ることが多い。この汀線の一つの突出部分をカスプといい、そこでは前浜勾配が急で、底質の粒径が大きい。また、日本ではこうしたカスプが連なる形状そのものもカスプと総称している。図 6.6 に示すカスプのスペンは、通常は $10\sim 60 \text{ m}$ 程度であるが、さらにスペンが数百 m の大きい波状出入りを形成することがある。これをメガ・カスプと呼ぶ。

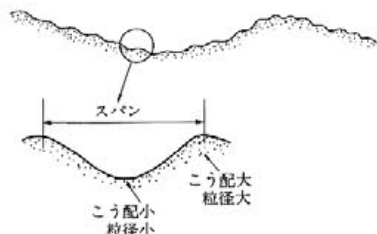


図 6.6 カスプ

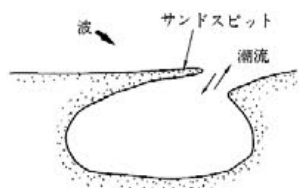


図 6.7 サンドスピット



図 6.8 トンボロと舌状砂州

(2) **サンドスピット (sand spit)**：入江や湾の入口には、図 6.7 に示すように砂州が細長く伸びた地形が見られることがある。これをサンドスピットあるいは砂嘴 (さし) という。漂砂が一定の方向から供給されることによって形成される地形であり、東京湾口の富津岬や宮津湾の天橋立がその代表例である。

(3) **トンボロ (tombolo)**：海岸からやや離れた島や岩礁などの背後の砂浜が前進して島などにつながった地形をいう (図 6.8)。島などの背後では波の回折現象によって波高が減少するため、周辺の高浜から底質が運ばれてきてそこに堆積する。北海道厚岸海岸の霧多布 (きりたっふ)、北海道の函館山につながる砂州などがその例である。砂浜が舌状に前進したものの未だ島につながっていない状態では、砂浜の前進部分を舌状砂州 (salient) という。神奈川県江ノ島背後の高浜はこの状態である。ただし日本では特に区別せず、後者もトンボロと呼ぶのが普通である。

なお沈降海岸などでは、岬と岬の間に延長 $100\sim$ 数百 m の円弧状の砂浜が存在することが多い。こうした岬あるいは岩礁突出部の間の凹んだ高浜は、**ポケットビーチ**と呼ばれている。ポケットビーチは高波のときでも侵食されることが少なく、安定しているのが特徴的である。

6.2 海浜の底質とその分布

6.2.1 底質粒度組成の表示

ある海岸の漂砂現象を明らかにするためには、底質の物理的性質、すなわち粒度組成、形状、丸味度、鉱物組成、比重、空隙率などを調べる必要がある。なかでも粒度組成の分析は欠かすことのできない調査項目である。

底質の粒度組成は一般にふるい分け試験によって分析され、図 6.9 に示すような粒径の重量加積曲線で表示される。縦軸は全重量に対するある粒径 (または、ふるい目の大きさ) 以下の粒子の重量百分率である。こうした粒径加積曲線から次のような底質の特性値が定義される。

(1) **中央粒径 d_{50}** ：累加百分率 50%

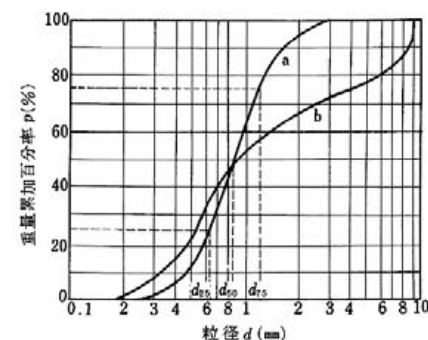


図 6.9 粒径加積曲線の例

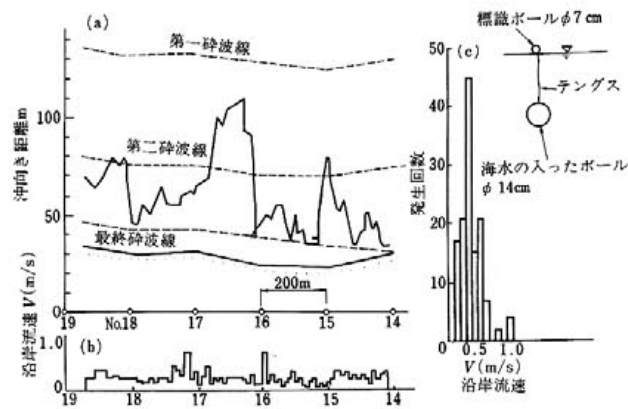


図 6.16 鹿島港海岸における沿岸流の実例 (佐藤・田中による)

たので、複数の流速計を設置して海浜流を連続して記録するようになってきている。

図 6.16 は、沖波有義波高 $H_0 = 0.9 \text{ m}$ 、周期 $T = 9.7 \text{ s}$ 、沖波と汀線とのなす角度 $\alpha_0 = 35^\circ$ のときの鹿島港海岸での観測結果の 1 例である¹⁷⁾。図の(c)中に示した海中のボールには海水を注入して比重を調整してあり、このボールは一定の深さを保ちながら流れに乗って移動する。これを砕波帯内に投入し、水面の標識ボールを視認することでボールフロートの位置を観測する。

図の(a)は、このボールフロートの目視観測結果である。汀線に平行に設けた基線の上に巻尺を張り、常に基線と直角方向にフロートを視認しつつ基線上を移動し、一定時間間隔で基線からフロートまでの距離を目測して求めたものである。フロートは、汀線の基準点 No. 16 と 17 の中間で大きく沖へ移動しており、また No. 15 や No. 18 の付近でも沖へ流出している。すなわち、これらの地点には離岸流があったことを示している。図の(b)は、(a)に基づいて各位置での海岸線方向の移動速度、すなわち沿岸流速を算出したものであり、(c)は汀線に沿って 10 m ごとに流速を読取り、度数分布を作成したものである。

このように、現地海浜流は決して一様でなく、波の不規則性によって相当に変動しながら流れていく。また、沿岸砂州や海底地形の複雑な配置にも影響される。さらに、近年の定置型流速計による連続観測によって、海浜流には数十秒から数十分周期の長周期成分が相当の割合で含まれていることが知られており、長周期波の発生機構と併せた研究が進められている。

なお、沿岸流速の大きさは図 6.16 では平均で 0.5 m/s 程度であるが、大時化

のときには 3 m/s を超えることがあるといわれる。

C. 沿岸流の平均流速の推定

上に述べたように海浜流は不規則に変動するけれども、その流速の概略値を知りたいことが多い。その目的でこれまでも幾つかの推定公式が提案されており、本書の旧版でも紹介してきた。現時点では、ロングゲット・ヒギンズの基礎式を変形して現地観測値に適合させた式(6.7)が実用的と思われる。これはアメリカ陸軍工兵隊の海岸工学研究センターによるものである¹⁸⁾。

$$v = 20.7i\sqrt{gH_0} \sin 2\alpha_0 \tag{6.7}$$

ここに、 v は沿岸流の平均流速 (m/s)、 i は外浜の海底勾配、 H_0 (m) は砕波高、 α_0 は砕波線における入射角 (波峰線と汀線のなす角) である。

波浪条件として沖波のデータが与えられた場合には、それから砕波の諸元を推定しなければならない。4.7 節で述べたように、砕波は広い範囲にわたって生じるので、砕波点を 1 箇所特定することはできない。しかし、式(6.7)は規則波の考え方で現地データを整理して導かれたものなので、砕波点の水深 h_b は規則波の実験データに基づく図 6.17 を用いて推定するのがよい。ただし、砕波高 H_0 を規則波のデータから推定すると、砕波帯内の有義波高の最大値 $(H_{1/3})_{\text{peak}}$ を上回ってしまう。したがって、砕波高については図 4.19 で推定するのが適切

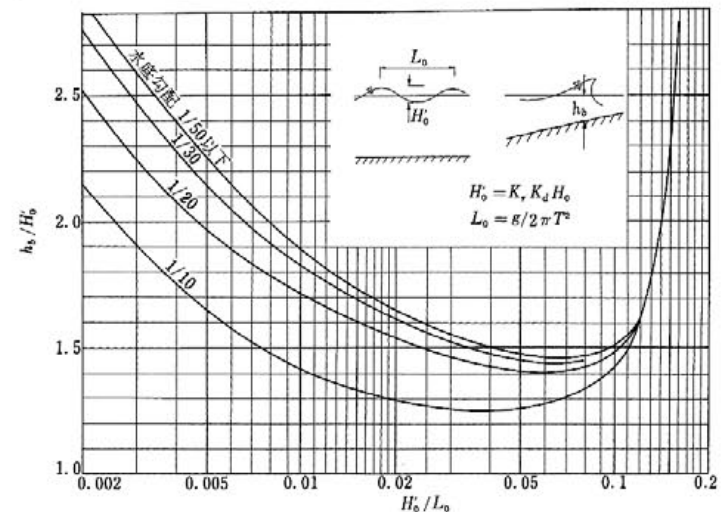


図 6.17 規則波の砕波水深と換算沖波波高の関係 (合田¹⁹⁾による)

10 防波堤および海岸堤防の設計

10.1 防波堤の配置計画

防波堤の配置は、周辺の地形や海岸線の形状で左右されるところが大きい。防波堤の長さや配置を決める際に考慮されるのは、次のような事項である。

- ① 港内を十分に静穏に保てること。
- ② 荒天時にも船が安全に入出港できること。
- ③ 漂砂を港内に巻き込むおそれがないこと。
- ④ 周辺の高浜変形を最小にとどめること。
- ⑤ 将来の港の発展を阻害しないこと。
- ⑥ 防波堤の建設費ができるだけ少ないこと。

最初の港内静穏度は、二つの観点で評価される。一つは常時の波浪に対する年間の荷役稼働率であり、船舶が日数にして95~97.5%以上、港内で停泊あるいは係留が可能であることが要件である。荷役が可能な条件は船の大きさや波の周期によっても変わるが、係留施設前面の有義波高0.3~1.0m以下が一つの目安である。もう一つは、異常時であっても有義波高を0.5~1.5m以下に抑えることである。こうした静穏度は、波浪の出現確率に基づき、波の回折・屈折などの波浪変形計算や水理模型実験によって検討され、それによって防波堤配置の良否が判断される。

②の船舶の安全出入港は、港口の位置と方向が一つの決め手である。また、大型船対象の港湾では、ストップングディスタンスが十分に取れることも必要である(9.1節参照)。港口を横切る潮流が強いと操船が困難になるので、流速2ノット以下が望まれる。

③の漂砂に関しては、まず対象海岸における漂砂の方向と沿岸漂砂量を知らなくてはならない。防波堤の先端は、少なくとも移動限界水深よりも深くなくてはならない。さらに、沿岸漂砂が著しく多い港(図6.31のマドラス港参照)では、上手側の砂の堆積を考慮する必要がある。

また、④は6.6.2節に述べたように、砂浜海岸に漂砂を建設すると、周辺海岸の変形が避けられない。海浜変形を予測し、影響が最小になるような配置を選ぶとともに、海浜変形を防止する措置を講じておかなければならない。なお、港に

隣接して河口が開いているところでは、河川流下土砂を航路・泊地に招き入れないように港口の位置と向きを考える。

⑤として港の将来の発展性を考慮すると、防波堤はできるだけ水面を広く囲むように配置することが望まれる。ただし、⑥の建設費を考えると浅い等深浅線に沿って伸ばすのがよいこともある。また、静穏度を高めるためには港口を狭めるほうがよいが、それでは船の安全入出港に支障をきたす。上述の①~⑥の要件をすべて同時に満足することは必ずしも容易でなく、総合的な判断を迫られるのである。

図10.1は防波堤の配置例を模式的に示したものである。(a)と(b)は砂浜海岸の掘込港湾に多い形である。内港部分に反射波を呼び込まないためには、AおよびB部は自然海浜として残すか、あるいは消波護岸とすることが望ましい。

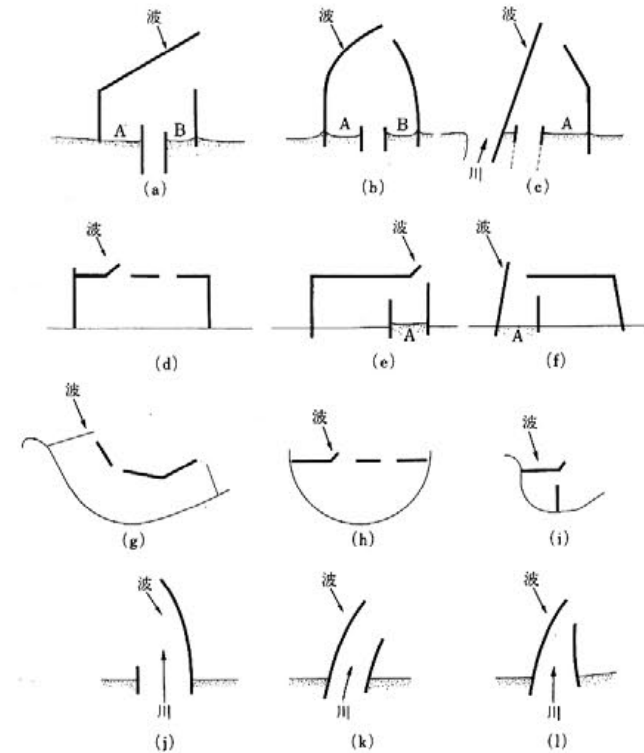


図10.1 防波堤配置の模式図