

2. 透過型水制の設置による

偏流防止対策工の検討資料

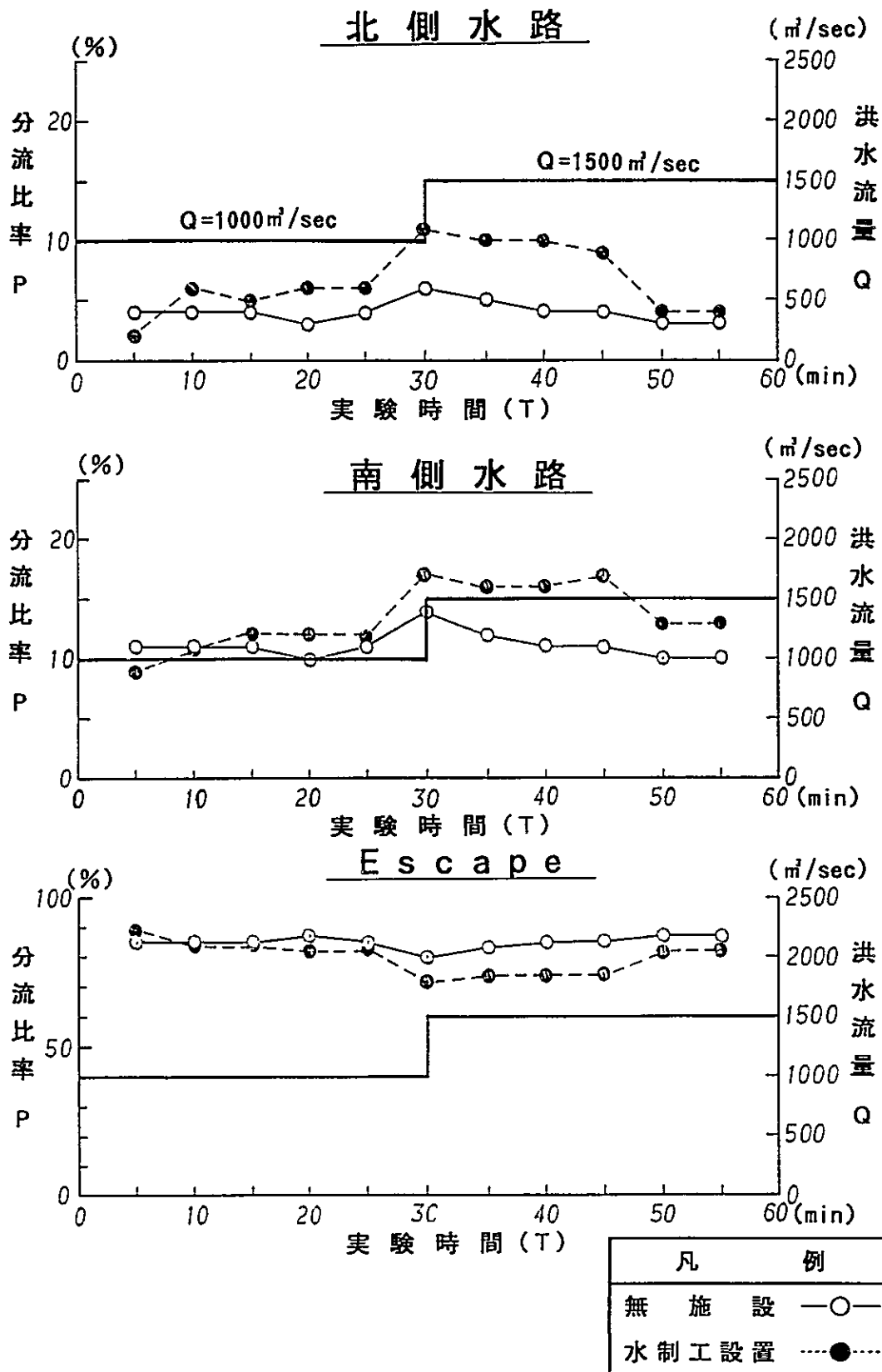


図-2 水制工の設置による分流比率の変化

3. 実験終了後計算結果

(移動床実験)

表— 1.1 變壓終了後計算結果 (CASE-4)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
断面	通水前 平均河床高	通水前 最高河床高	通水前 最低河床高	通水後 平均河床高	通水後 最高河床高	通水後 最低河床高	3-4	6-7	5-2	6-3	7-4	變動面積
M1*500	203.32	205.20	202.20	204.20	206.50	202.35	3.00	4.15	0.87	1.30	0.15	384.11
M1*600	202.79	204.31	202.00	203.71	205.75	202.05	2.31	3.70	0.92	1.44	0.05	434.04
M1*700	202.59	204.70	201.70	203.06	205.80	201.30	3.00	4.50	0.47	1.10	-0.40	235.31
M1*800	202.31	204.30	201.90	202.94	205.65	201.75	2.40	3.90	0.62	1.35	-0.15	339.01
M1*900	202.01	202.80	201.50	202.29	203.35	201.00	1.30	2.35	0.28	0.55	-0.50	164.09
M2*000	201.66	202.10	201.20	201.95	204.00	201.10	0.90	2.90	0.29	1.90	-0.10	188.08
M2*100	201.47	203.30	200.90	201.56	204.30	200.75	2.40	3.55	0.09	1.00	-0.15	60.05
M2*200	201.02	203.40	200.60	201.29	204.45	200.50	2.80	3.95	0.27	1.05	-0.10	200.76
M2*400	200.34	203.00	199.70	200.52	203.75	199.75	3.30	4.00	0.18	0.75	0.05	162.07
M2*500	199.91	202.90	199.20	199.93	204.00	199.30	3.70	4.70	0.02	1.10	0.10	21.15
M2*600	199.43	202.50	198.30	199.27	201.25	197.40	4.20	3.85	-0.17	-1.25	-0.90	-173.63
M2*700	198.96	201.70	198.30	198.82	200.00	198.40	3.40	1.60	-0.14	-1.70	0.10	-91.16
M2*800	198.47	198.90	198.20	198.42	199.60	198.15	0.70	1.45	-0.05	0.70	-0.05	-24.81
M2*900	198.14	198.60	197.80	197.80	198.30	197.35	0.80	0.95	-0.34	-0.30	-0.45	-137.93
M3*000	197.94	198.90	197.10	198.44	200.50	197.10	1.80	3.40	0.50	1.60	0.00	291.64
M3*100	197.63	198.47	196.80	197.61	198.55	196.35	1.67	2.20	-0.02	0.08	-0.45	-9.26
M3*200	197.13	197.80	196.20	196.51	197.90	195.25	1.60	2.65	-0.62	0.10	-0.95	-495.02
M3*300	196.64	197.54	195.90	195.73	197.65	193.30	1.64	4.35	-0.90	0.11	-2.60	-636.96
M3*400	196.10	197.14	195.40	194.87	197.50	192.30	1.74	5.20	-1.24	0.36	-3.10	-517.07

表—1.2 实验終了後計算結果(CASE-4)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
断面	通水前 平均河床高	通水前 最高河床高	通水前 最深河床高	通水後 平均河床高	通水後 最高河床高	通水後 最深河床高	3-4 最高河床高	6-7	5-2	6-3	7-4	变动面積
EO+000	198.40	199.80	197.84	198.03	198.95	196.55	1.96	2.40	-0.36	-0.85	-1.29	-201.79
EO+100	198.12	199.90	197.15	197.73	199.30	196.75	2.75	2.55	-0.39	-0.60	-0.40	-278.35
EO+200	197.58	199.30	196.80	196.81	198.20	195.30	2.50	2.90	-0.77	-1.10	-1.50	-553.69
EO+300	197.24	198.70	196.80	196.60	197.70	195.65	1.90	2.05	-0.64	-1.00	-1.15	-314.50
EO+400	196.76	198.00	196.20	195.94	197.35	194.80	1.80	2.55	-0.82	-0.65	-1.40	-477.58
EO+500	196.01	196.60	195.50	194.68	195.50	193.90	1.10	1.60	-1.33	-1.10	-1.60	-459.14

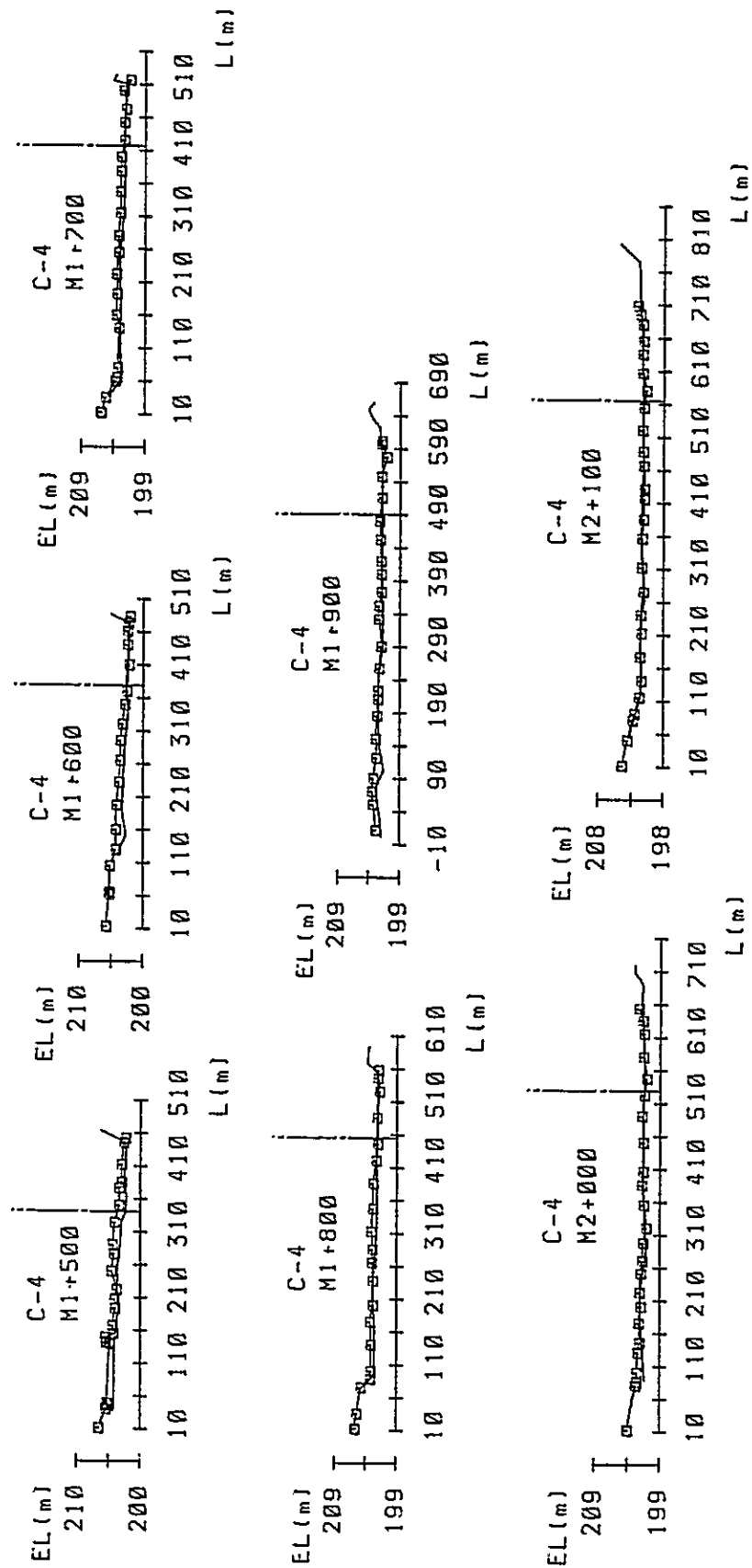
表—1.3 实验終了後計算結果 (CASE-5)

断面	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	通水前 平均河床高	通水前 最高河床高	通水前 最深河床高	通水後 平均河床高	通水後 最高河床高	通水後 最深河床高	3-4	6-7	5-2	6-3	7-4	突加面積
M1+500	203.32	205.20	202.20	203.74	206.30	200.45	3.00	5.85	0.41	1.10	-1.75	182.74
M1+600	202.79	204.43	202.00	203.53	205.70	200.55	2.43	5.35	0.73	1.27	-1.65	345.71
M1+700	202.60	204.70	201.70	203.08	205.75	199.85	3.00	5.90	0.49	1.05	-1.85	246.45
M1+800	202.31	204.30	201.90	202.69	205.65	199.35	2.40	6.30	0.38	1.35	-2.55	205.04
M1+900	202.01	202.80	201.50	202.01	203.20	199.00	1.30	4.20	-0.00	0.40	-2.50	-2.39
M2+000	201.66	202.10	201.20	201.94	204.00	198.65	0.90	5.35	0.29	1.90	-2.55	184.41
M2+100	201.47	203.30	200.90	201.24	204.45	197.10	2.40	7.35	-0.23	1.15	-3.80	-158.88
M2+200	201.02	203.40	200.60	200.95	204.35	197.90	2.80	6.45	-0.07	0.95	-2.70	-53.65
M2+400	200.33	203.00	199.70	200.24	203.75	198.60	3.30	5.15	-0.09	0.75	-1.10	-77.96
M2+500	199.89	202.50	199.20	199.87	204.00	198.50	3.30	5.50	-0.02	1.50	-0.70	-18.66
M2+600	199.43	202.50	198.30	199.55	200.40	198.45	4.20	1.95	0.12	-2.10	0.15	125.84
M2+700	198.96	201.70	198.30	199.16	199.85	198.50	3.40	1.35	0.20	-1.85	0.20	128.76
M2+800	198.48	198.90	198.20	197.72	199.00	196.60	0.70	2.40	-0.75	0.10	-1.60	-349.79
M2+900	198.14	198.60	197.80	197.95	198.50	196.50	0.80	2.00	-0.19	-0.10	-1.30	-78.13
M3+000	197.63	198.21	197.10	197.64	198.60	196.00	1.11	2.60	0.01	0.39	-1.10	3.20
M3+100	197.62	198.43	196.80	197.32	198.50	195.45	1.63	3.05	-0.30	0.07	-1.35	-175.85
M3+200	197.13	197.80	196.20	196.33	197.55	194.50	1.60	3.05	-0.80	-0.25	-1.70	-638.10
M3+300	196.64	197.54	195.90	195.75	197.40	194.05	1.64	3.35	-0.89	-0.14	-1.85	-629.37
M3+400	196.16	197.18	195.40	194.37	197.30	190.40	1.78	6.90	-1.78	0.12	-5.00	-1573.03

表一 1.4 実験終了後計算結果 (CASE-5)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
断面	通水前 平均河床高	通水前 最高河床高	通水前 最深河床高	通水後 平均河床高	通水後 最高河床高	通水後 最深河床高	3 - 4	6 - 7	5 - 2	6 - 3	7 - 4	突加面積
EO+000	198.40	199.80	197.84	198.68	200.00	195.70	1.96	4.30	0.28	0.20	-2.14	156.68
EO+100	198.12	199.90	197.15	197.95	199.15	195.60	2.75	3.55	-0.16	-0.75	-1.55	-117.50
EO+200	197.58	199.30	196.80	197.17	199.90	193.75	2.50	6.15	-0.41	0.60	-3.05	-353.68
EO+300	197.31	199.10	196.80	196.78	199.30	191.75	2.30	7.55	-0.53	0.20	-5.05	-289.18
EO+400	196.76	198.00	196.20	195.82	197.00	191.50	1.80	5.50	-0.94	-1.00	-4.70	-544.67
EO+500	196.01	196.60	195.50	193.52	195.45	190.40	1.10	5.05	-2.49	-1.15	-5.10	-861.18

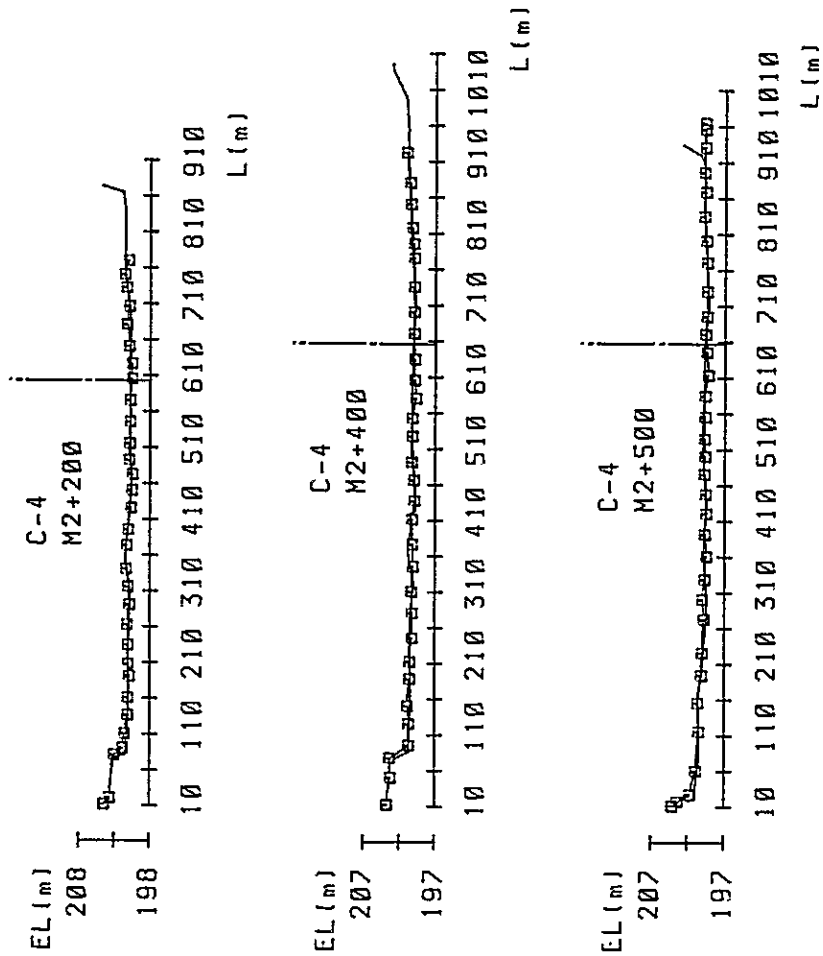
4. 河床高横断図（移動床実験）



凡 例

初期河床	—
河床高	—□—

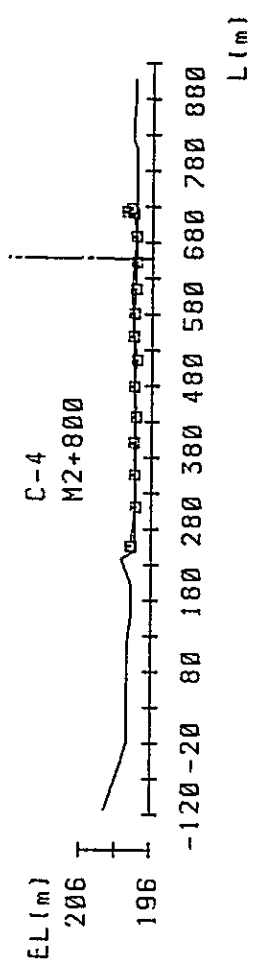
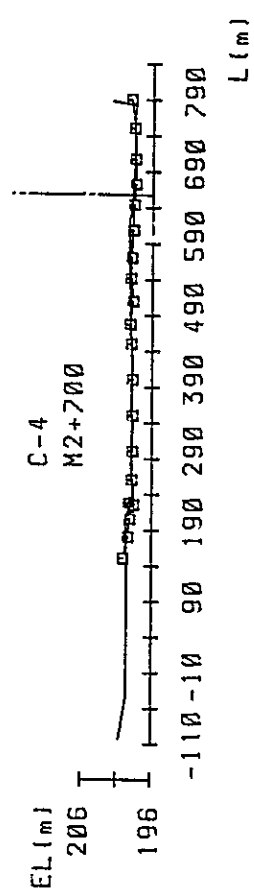
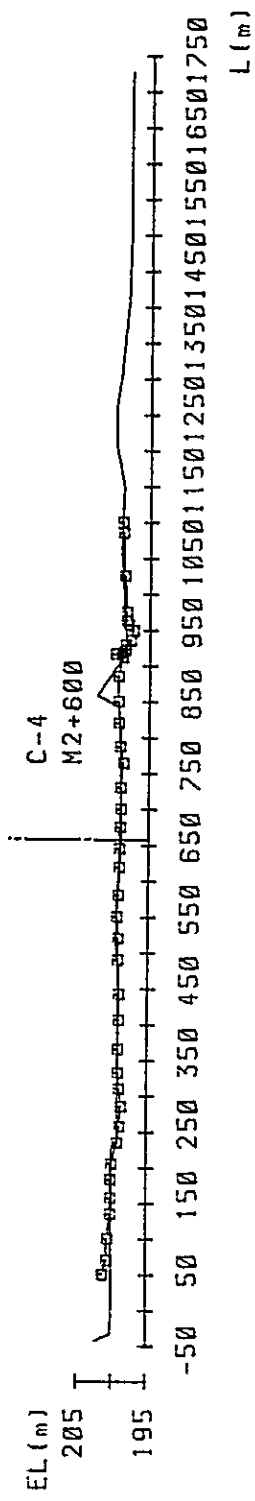
图-1.1 () 河床高横断 (CASR-4)



凡例

初期河床	— — — — —
河床高	— □ — — —

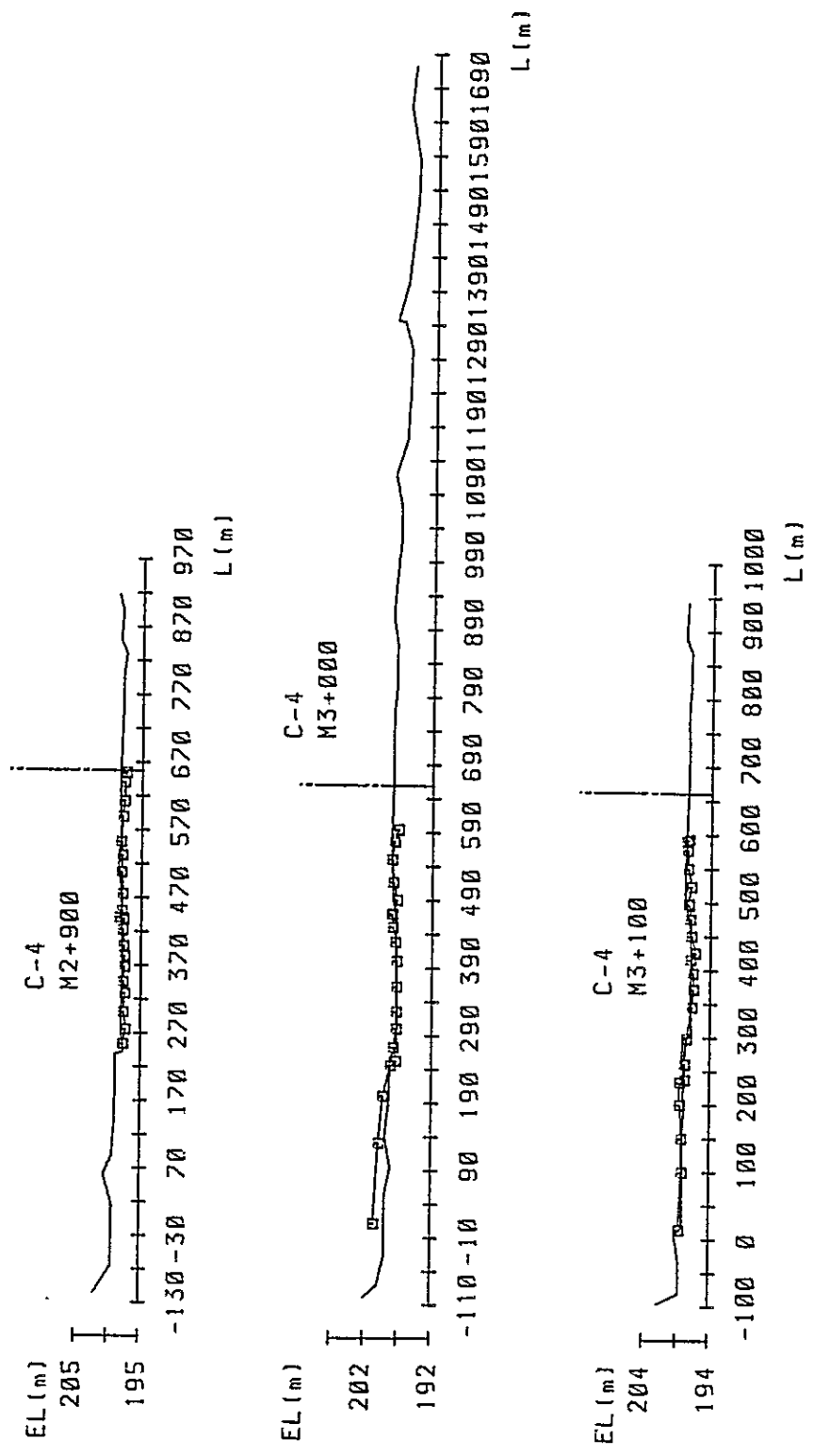
图-1.2 () 河床高横断 图 (CASE-4)



凡 例

初期河床	— — — — —
河床高	— □ —

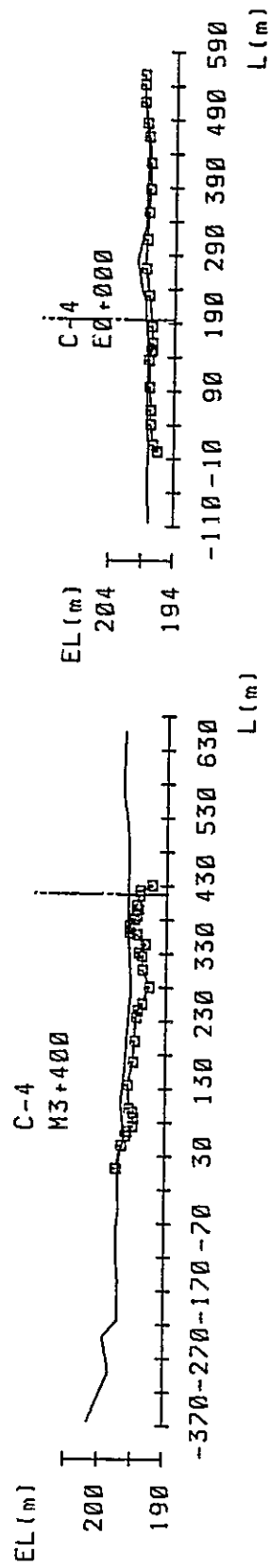
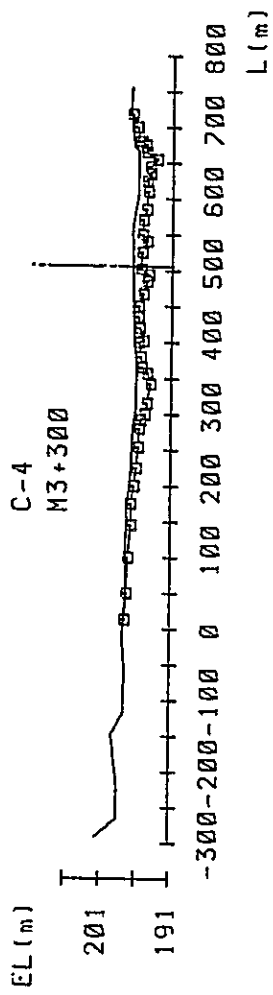
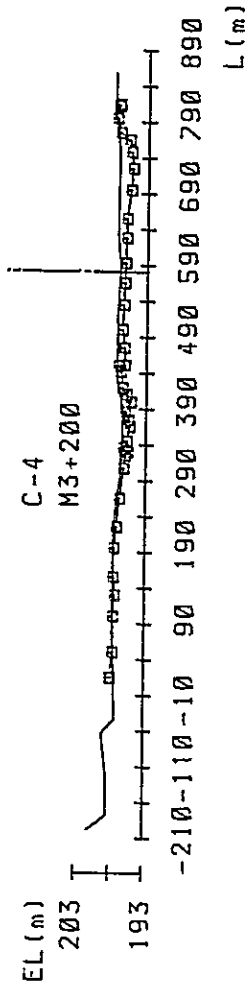
图-1.3 () 河床高横断面 (CASE-4)



D-59

图-1.4 () 河床高横断面图 (CASE-4)

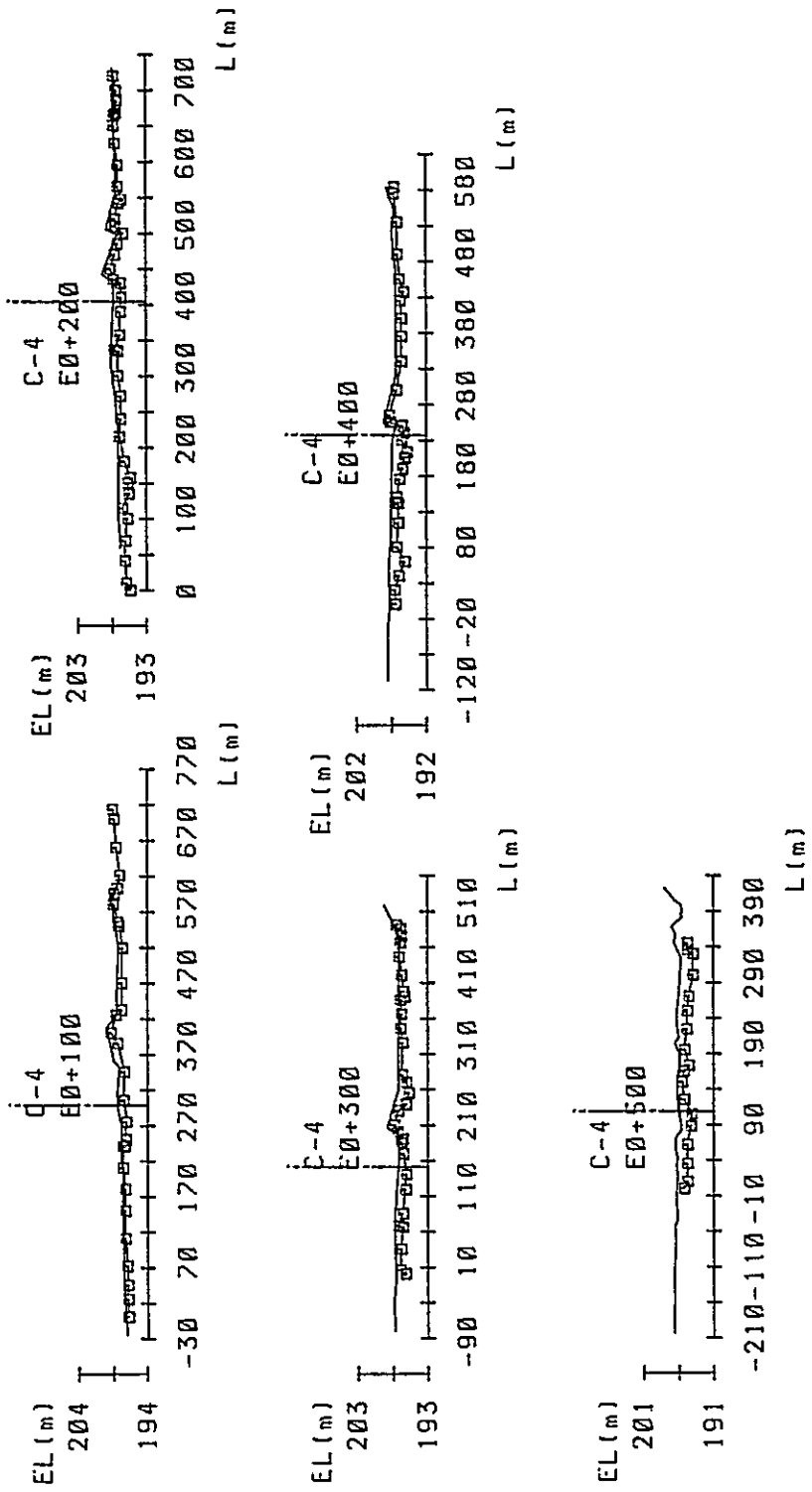
初期河床	例
河床高	—□—



凡例

初期河床	—
河床高	—□—

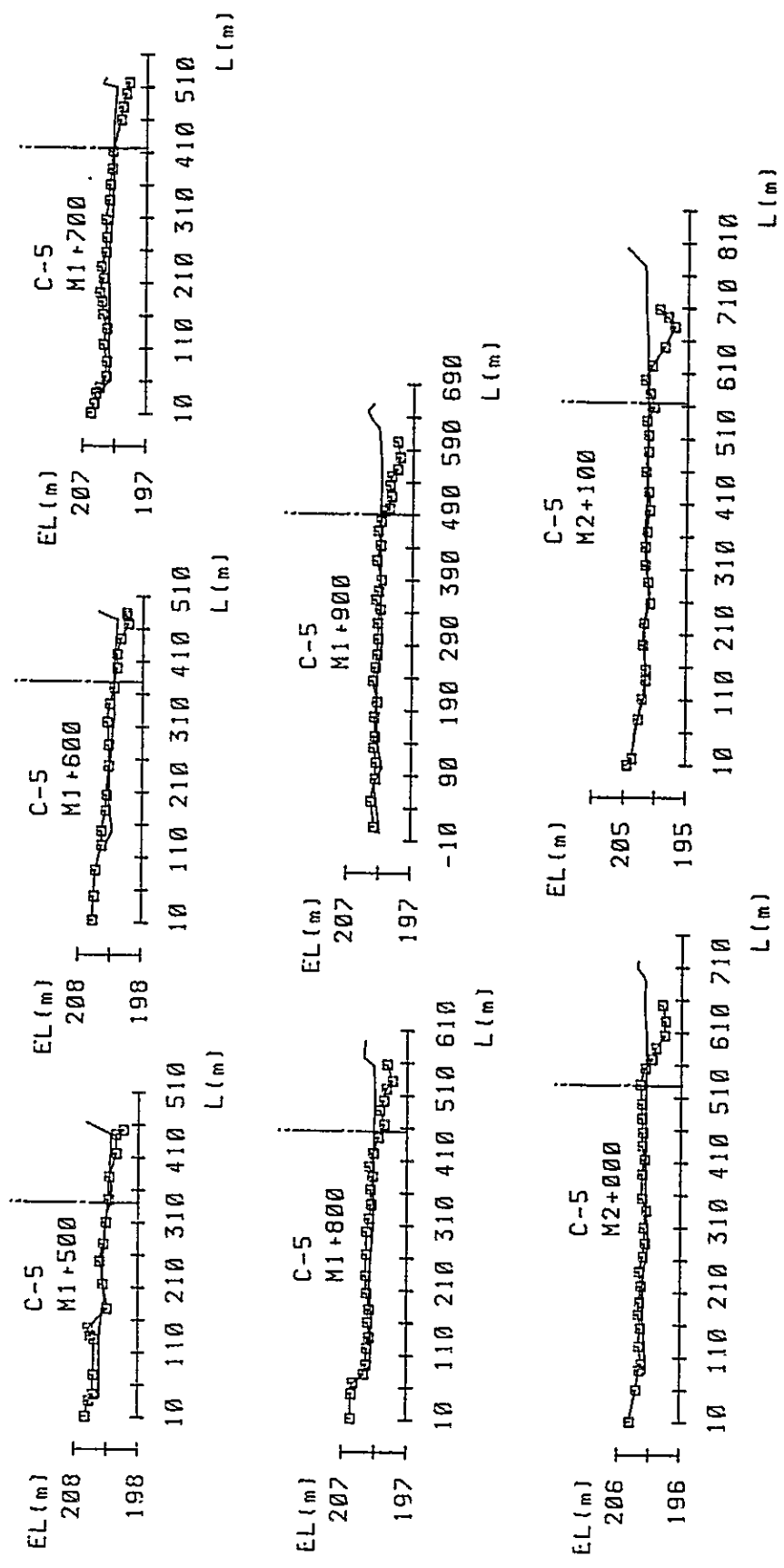
图-1.5 () 河床高横断 (CASE-4)



D-61

凡	例
初期河床	—
河床高	—□—

图-1.6 () 河床高横断 (CASE-4)

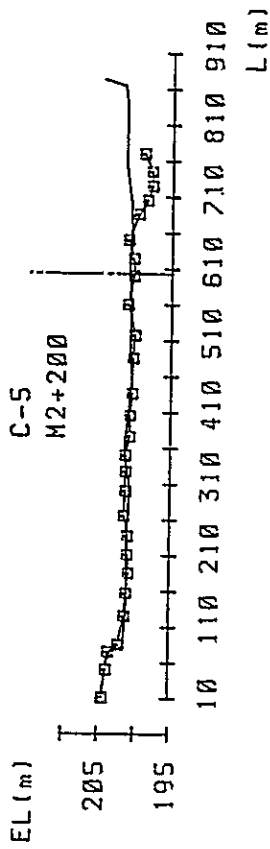


D-62

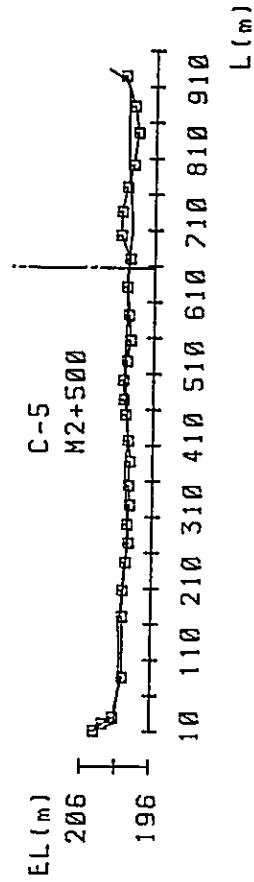
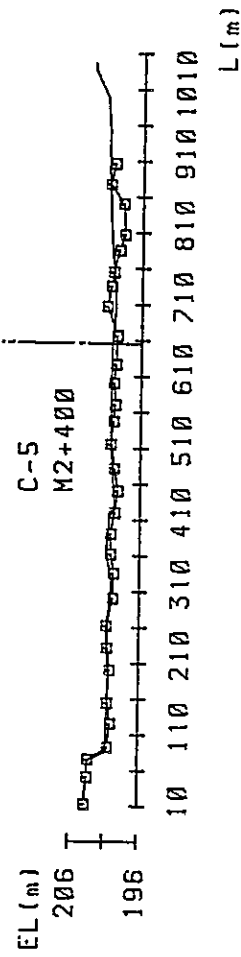
图-1.7 () 河床高横断面 (CASE-5)

初期河床	—
河床高	—□

凡例

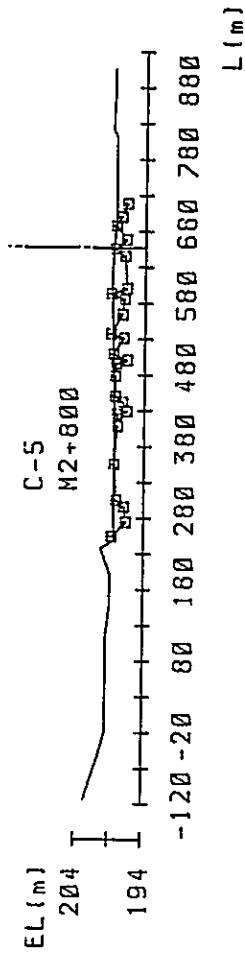
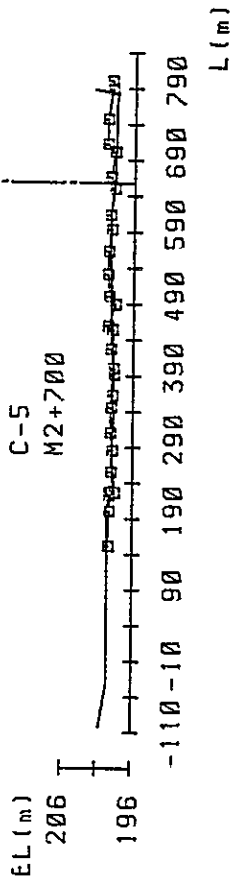
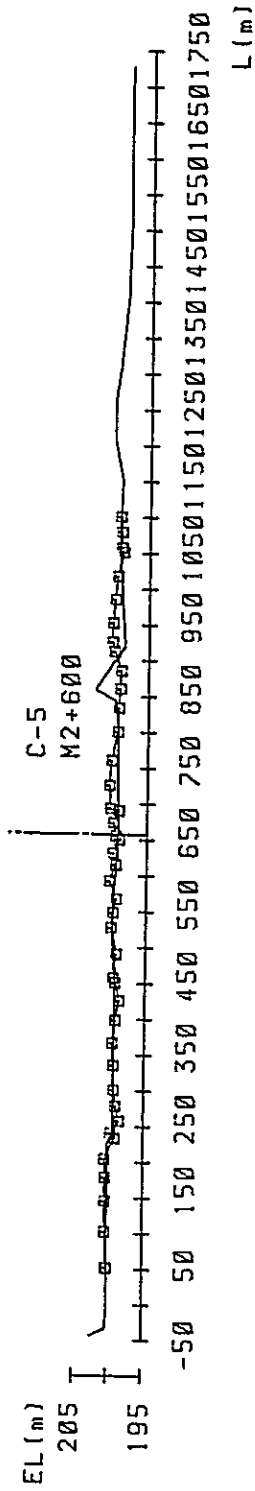


— D-63 —



初期河床	例
河床高	—□—

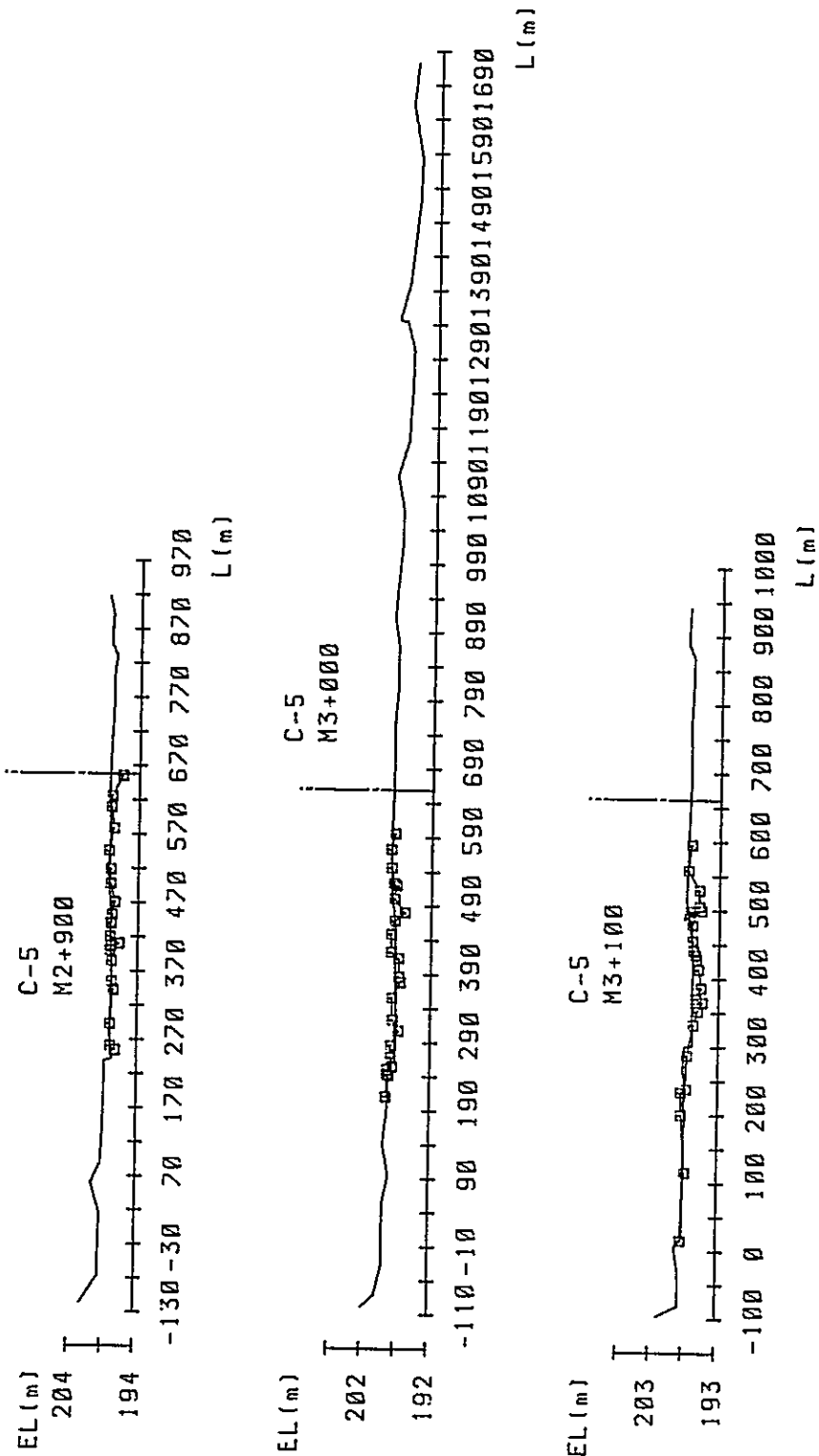
图-1.8 () 河床高横断 (CASE-5)



凡例

初期河床	——
河床高	—□—

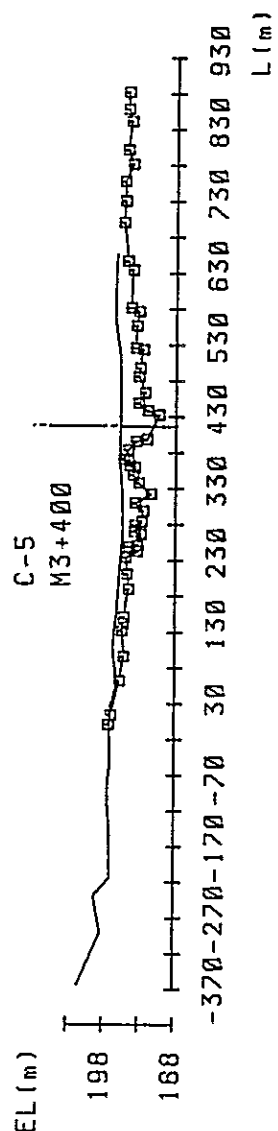
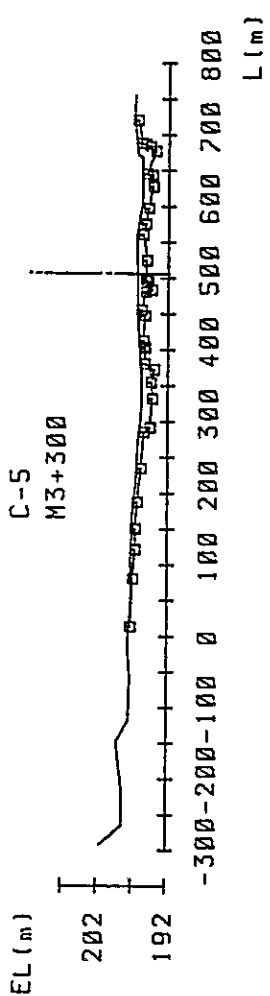
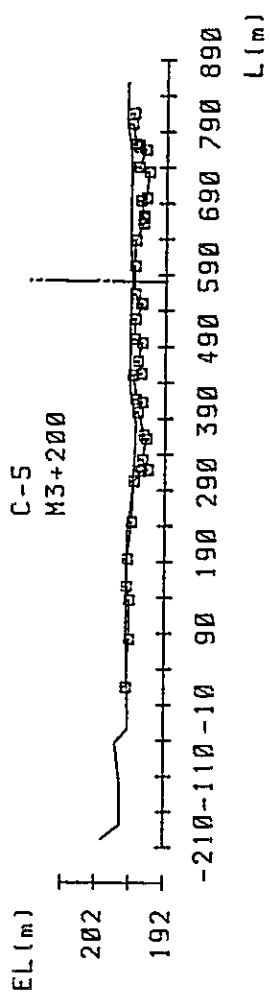
图-1.9 () 河床高横断 (CASE-5)



初期河床	— — — — —
河床高	— □ —

凡 例

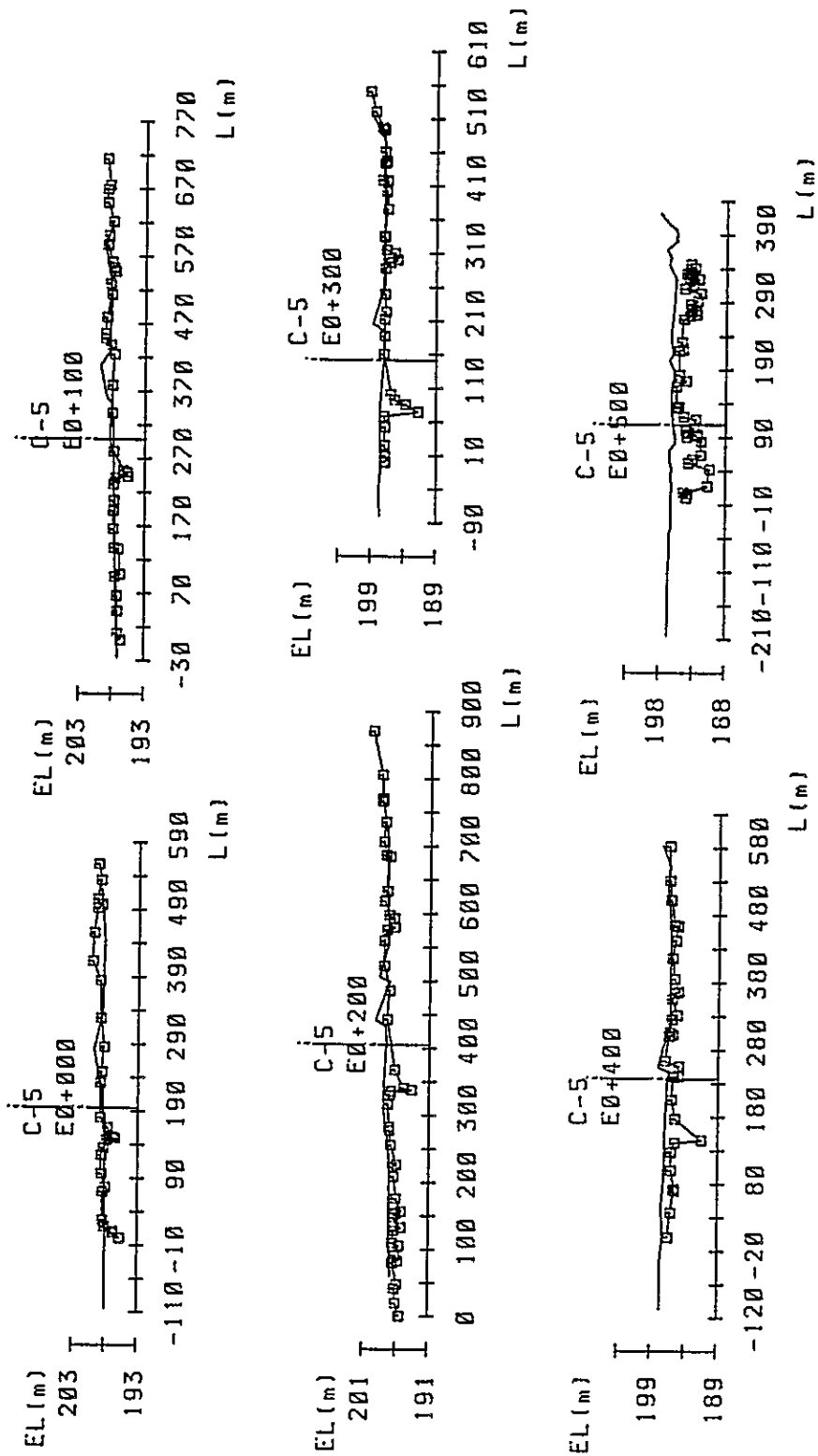
图-1.10 () 河床高横断面 (CASE-5)



D-66

图-1.11 () 河床高横断 (CASE-5)

凡	例
初期河床	— — —
河床高	— □ —



凡 例

初期河床	—
河床高	—□—

图-1.12 () 河床高横断 (CASE-5)

5. 洪水後の河床高縦断測定結果 (移動床実験)

表-2.1 (1) 一洪水終了後の導流堤沿いの河床高測定結果 (ケース5-1)

左より1				左より2			
模 型 値		実 物 値		模 型 値		実 物 値	
距 離	河 床 高	距 離	河 床 高	距 離	河 床 高	距 離	河 床 高
副ダム	0	0.00	198.20	副ダム	0	0.00	198.40
	20	10.00	197.70		1	0.50	197.80
	40	20.00	198.25		20	10.00	196.85
	60	30.00	197.45		47	23.50	198.30
	80	40.00	197.75		60	30.00	197.15
	85	42.50	196.75		100	50.00	197.45
	100	50.00	197.90		110	55.00	196.90
	134	67.00	196.80		120	60.00	197.95
	145	72.50	198.20		140	70.00	198.00
	160	80.00	196.75		200	100.00	197.10
	180	90.00	198.20		230	115.00	198.20
	202	101.00	198.00		295	147.50	198.15
	214	107.00	197.10		340	170.00	198.05
	240	120.00	197.00		400	200.00	197.90
	258	129.00	198.00		470	235.00	196.80
	280	140.00	197.90		500	250.00	197.35
	310	155.00	197.50		550	275.00	197.25
	325	162.50	197.65		600	300.00	197.10
					650	325.00	196.80
					700	350.00	196.65
					750	375.00	196.55
					810	405.00	196.40
					850	425.00	196.15
					900	450.00	195.80
					950	475.00	195.75
					1000	500.00	195.50
					1050	525.00	195.00
					1100	550.00	194.45
					1158	579.00	193.20

表-2.1 (2) 一洪水終了後の導流堤沿いの河床高測定結果(ケース5-1)

左より3			左より4			左より5		
模型値	河床高	実物値	模型値	河床高	実物値	模型値	河床高	実物値
距離		距離		距離		距離		距離
副ダム	0	198.30	副ダム	0	198.30	副ダム	0	198.25
	20	1.966		1	1.966		1	1.933
	60	1.970		50	1.955		20	1.930
	100	1.971		100	1.952		50	1.941
	150	1.963		150	1.939		90	1.916
	200	1.953		200	1.937		100	1.890
	250	1.942		250	1.950		200	1.882
	300	1.929		300	1.953		210	1.899
	320	1.925		350	1.945		260	1.926
	346	1.989		400	1.947		300	1.876
	380	1.910		450	1.939		320	1.887
	430	1.902		500	1.944		370	1.902
	465	1.893		550	1.931		380	1.866
	491	1.916		600	1.939		415	1.868
	520	1.899		650	1.932		430	1.898
	570	1.906		700	1.923		473	1.889
	600	1.911		750	1.926		500	1.861
	643	1.918		800	1.918		550	1.856
	680	1.913		850	1.914		600	1.844
	720	1.914		900	1.902		650	1.839
	770	1.908		950	1.905		700	1.840
	800	1.898		1000	1.884		750	1.835
	850	1.912		1055	1.901		800	1.844
	900	1.907					850	1.839
	950	1.901					900	1.860
	1000	1.885					950	1.865
	1050	1.895					1000	1.906
	1100	1.909					1048	1.910
	1170	1.901						524.00
		195.05			195.05			195.50

表-2.2 洪水後の河床高縦断測定結果 (CASE-5-2)

断面	測 線			
	河床高①	河床高②	河床高③	河床高④
M1+500	201.60	200.00	200.25	203.55
M1+550	201.45	199.45	201.50	203.90
M1+600	200.15	199.25	202.75	202.70
M1+650	200.60	198.55	202.30	202.05
M1+700	—	199.05	201.75	202.30
M1+750	199.60	198.75	202.10	203.40
M1+800	199.10	197.80	202.50	203.20
M1+850	198.15	197.35	202.95	202.25
M1+900	197.35	197.15	201.20	201.95
M1+950	197.45	197.25	201.95	202.15
M2+000	197.25	197.20	201.80	201.55
M2+050	197.60	197.05	201.25	200.90
M2+100	197.26	197.10	201.90	200.75
M2+150	197.30	196.65	200.85	201.15
M2+200	197.15	196.60	201.05	201.05
M2+250	197.60	196.60	199.85	201.05
M2+285	198.15	196.70	200.05	200.60
M2+350	198.90	197.35	199.45	200.45
M2+400	199.10	197.30	199.90	200.45
M2+450	200.85	197.45	199.50	199.90
M2+500	198.85	197.85	199.40	199.85
M2+550	—	197.45	198.90	199.00
M2+600	—	198.05	198.25	198.90
M2+650	—	193.80	199.25	198.75
M2+700	—	196.00	199.05	198.65
M2+750	—	—	198.85	198.55
M2+800	—	—	197.50	197.95
M2+850	—	—	196.80	196.80
M2+900	—	—	196.85	195.95
M2+950	—	—	196.40	195.30
M3+000	—	—	196.40	194.75
M3+050	—	—	195.80	194.25
M3+100	—	—	194.25	194.60
M3+150	—	—	194.20	194.00
M3+200	—	—	193.10	193.30
M3+250	—	—	193.50	192.75
M3+300	—	—	193.15	193.10
M3+350	—	—	192.90	—
M3+400	—	—	—	192.95
M3+450	—	—	—	—
E0+000	—	—	—	—
E0+050	—	196.15	—	—
E0+100	—	195.55	—	—
E0+150	—	195.00	—	—
E0+200	—	195.15	—	—
E0+250	—	195.10	—	—
E0+300	—	194.80	—	—
E0+350	—	194.20	—	—
E0+400	—	193.40	—	—
E0+450	—	193.05	—	—
E0+500	—	190.50	—	—
E0+550	—	—	—	—

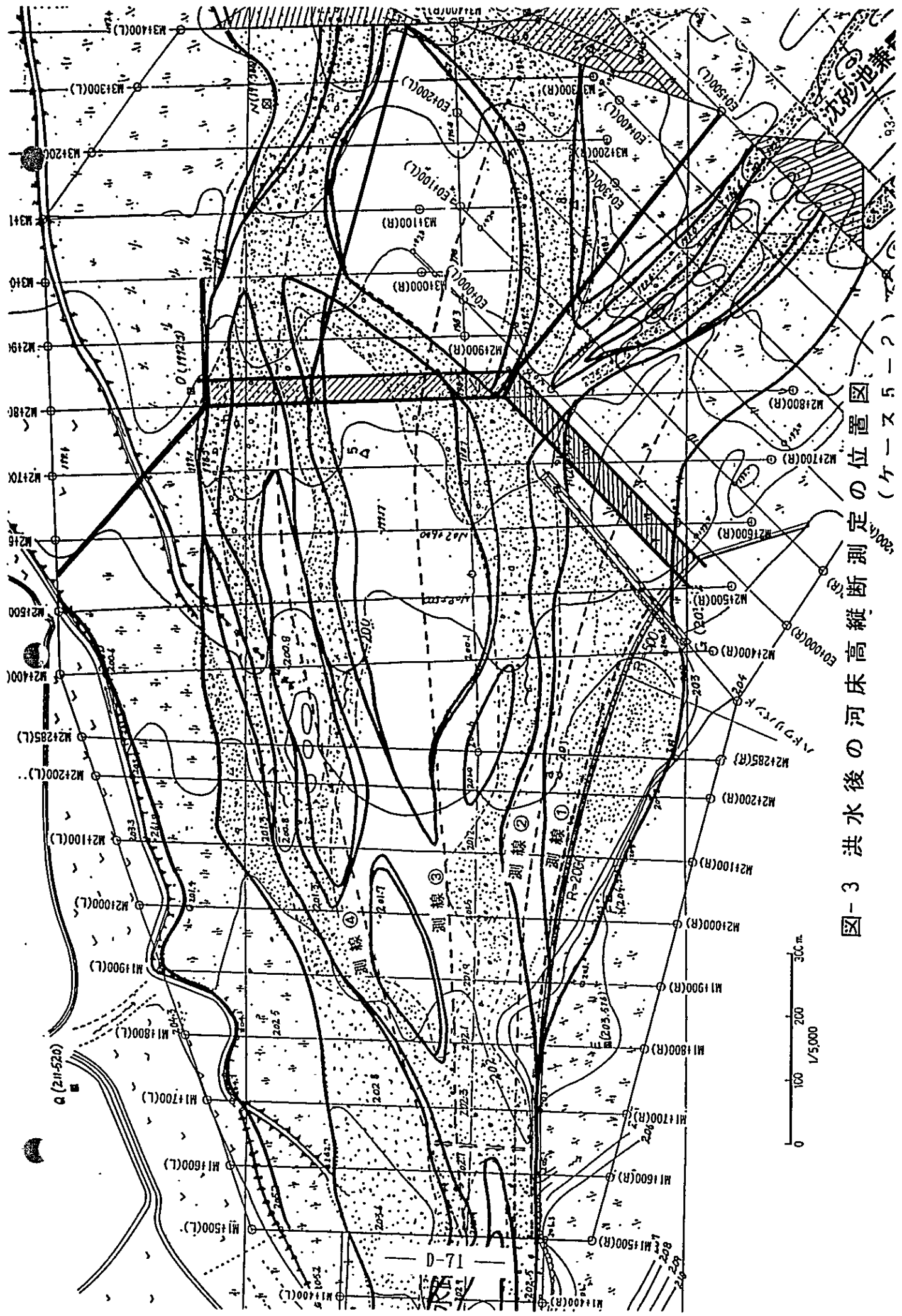


図-3 洪水後の河床高縦断面測定的位置図 (ケース5-2)

6. 各水路への分流量の時間的变化 (移動床実験)

表-3.1 各水路への分流量の時間的变化 (CASE-5-1)

流 量	実験時間	北 側 水 路		南 側 水 路		エ ス ケ ー プ	
		Q (m ³ /s)	P (%)	Q (m ³ /s)	P (%)	Q (m ³ /s)	P (%)
400	5	131	33	269	67	0	0
	10	138	15	489	52	301	33
1500	15	407	27	725	48	368	25
	20	429	29	697	46	374	25
	25	532	28	928	48	462	24
	30	596	24	1265	51	639	25
2500	35	————	————	————	————	————	————
	40	504	20	1206	48	790	32
	45	441	22	871	44	688	34
2000	50	512	26	863	43	625	31
	55	612	31	805	40	583	29
	60	316	31	424	41	284	28
1000	65	316	32	472	47	212	21
	70	323	32	416	42	261	26
	75	323	32	416	42	261	26
	80	326	33	414	41	260	26
	85	99	25	196	49	105	26
400	90	117	29	187	47	96	24
	95	121	30	181	45	98	25
	100	124	31	182	46	94	23
	105	124	31	182	46	94	23
	110	125	31	182	46	93	23

7. 流出土砂濃度の時間的变化 (移動床実験)

表-4.1 流出土砂濃度の時間的变化 (CASE-5-1)

流量	実験時間	北側水路	南側水路	エスケープ	各流量計	
400	5	<0.105> (0.138) 131	<0.036> (0.098) 269	0	<0.059> (0.236) 400	
	1500	10	<0.154> (0.212) 138	<0.126> (0.589) 468	<0.078> (0.234) 301	<0.114> (1.035) 907
		15	407	<0.080> (0.579) 725	<0.278> (1.022) 368	1500
		20	<0.076> (0.328) 429	<0.079> (0.550) 697	<0.207> (0.774) 374	<0.110> (1.652) 1500
2500	25	<0.064> (0.342) 532	<0.028> (0.257) 928	<0.398> (1.838) 462	<0.127> (2.437) 1922	
	30	<0.012> (0.074) 596	<0.052> (0.662) 1265	<0.279> (1.785) 639	<0.101> (2.521) 2500	
	35	-----	-----	-----	-----	
2000	40	<0.103> (0.518) 504	<0.029> (0.352) 1206	<0.242> (1.915) 790	<0.111> (2.785) 2500	
	45	<0.130> (0.575) 441	<0.028> (0.244) 871	<0.153> (1.053) 688	<0.094> (1.872) 2000	
	50	<0.138> (0.708) 512	<0.029> (0.253) 863	<0.033> (0.206) 625	<0.058> (1.167) 2000	
1000	55	<0.126> (0.769) 612	<0.021> (0.171) 805	<0.029> (0.170) 583	<0.056> (1.110) 2000	
	60	<0.110> (0.348) 316	<0.023> (0.098) 424	<0.033> (0.094) 284	<0.053> (0.540) 1024	
	65	<0.051> (0.162) 316	<0.007> (0.032) 472	<0.011> (0.024) 212	<0.012> (0.117) 1000	
	70	<0.089> (0.288) 323	<0.011> (0.045) 416	<0.025> (0.065) 261	<0.040> (0.401) 1000	
	75	<0.155> (0.501) 323	<0.011> (0.045) 416	<0.025> (0.064) 261	<0.061> (0.613) 1000	
		324	417	259	1000	
400	80	<0.106> (0.345) 326	<0.017> (0.069) 414	<0.026> (0.067) 260	<0.049> (0.487) 1000	
	81	303	419	263	985	
	83	176	378	167	721	
	85	<0.048> (0.048) 99	<0.005> (0.010) 196	<0.005> (0.005) 105	<0.016> (0.063) 400	
	87	111	195	94	400	
	90	<0.018> (0.021) 117	<0.006> (0.012) 187	<0.006> (0.006) 96	<0.010> (0.039) 400	
	91	127	174	99	400	
	93	122	180	98	400	
	95	<0.018> (0.022) 121	<0.006> (0.010) 181	<0.007> (0.007) 98	<0.010> (0.039) 400	
	97	122	180	98	400	
	100	<0.021> (0.026) 124	<0.011> (0.020) 182	<0.005> (0.005) 94	<0.013> (0.051) 400	
	101	124	182	94	400	
	103	123	184	93	400	
	105	<0.027> (0.033) 124	<0.008> (0.015) 182	<0.005> (0.005) 94	<0.013> (0.053) 400	
107	125	181	94	400		
110	<0.014> (0.018) 125	<0.008> (0.015) 182	<0.005> (0.005) 93	<0.010> (0.038) 400		

凡 例	
< >	土砂濃度 %
()	土砂量 m ³ /sec
	分流量 m ³ /sec

8 . 移動床実験の相似法則

8. 移動床実験の相似法則

移動床実験とは、流れや波による砂粒の運動が加わり、境界としての河床や海床の変化が存在する状態の実験をいう。固定床実験では、水路等の境界の初期条件を一定として、水位や流速および波などの水理量のみ注目するのに対して、移動床実験では流れや波による境界の変化、および相似条件としては固定床の相似法則に加えて、河床面と海床面の相似や流砂量の相似の問題が加わる。この場合、移動する砂粒や浮遊する砂粒は水流や波の運動機構に大きな影響を与えないものと仮定して考察を行う。

① 河床面の相似条件

移動床模型の場合に考慮すべき事項として、a)小規模河床波（砂れん）、b)移動床の粗度、c)中規模河床波、d)河床材料の粒度組成、e)限界掃流力、f)流砂量とその粒径、g)流砂型式（掃流砂、浮遊砂、Wash load）、h)上流からの供給砂量とその粒径、i)アーミング現象と固結度（耐侵食性）等がある。

河床材料の粒径や水深のスケールに規定される河床波（sand waves）を、一般に小規模河床波という。小規模河床形態は、Ripple、Dune、Flat、Antidune等に分類される。Rippleは主に粒径に規定されるスケールを有し、その形状と配置は3次元적이다。Duneは主に水深に規定されるスケールを有し、その形状と配置は2次元性が強い。RippleとDuneは流れの状態がLower regime（平均的に常流）であり、Antiduneはupper regime（平均的に射流）で生じる。また、Lower regimeとupper regimeのいずれのregimeにおいても、河床波が存続しえない条件があり、これをFlat（Lower regime flat bed、upper regime flat bed）と呼んでいる。

水理模型実験では、小規模河床形態に対する配慮は、移動床粗度や流砂量に関係するので重要である。Lower regimeとupper regimeの区別は、フルード数（限界フルード数 $Fr=1.0\sim 0.8$ ）でなされるので、フルード則を適用する限り特に問題はない。小規模河床形態に支配的な他の無次元量は、砂粒レイノルズ数 $Re^*=u*d/\nu$ 、無次元掃流力 $\tau^*=u_*^2/\{(\sigma/\rho-1)gd\}$ 、および水深径比 h/d と σ/ρ である。ここに、 $u_*=\sqrt{ghI}$ ：摩擦速度、 g ：重力加速度、 h ：水深、 I ：エネルギー勾配、 d ：粒径、 ν ：流水の動粘性係数、 σ ：砂礫の密度、 ρ ：水の密度である。この4つの無次元量のうち、特に最初の2つが重要とされる。

一般に、Rippleについては砂粒レイノルズ数が支配的と考えられ、 $Re^* < 10$ （ただ

し、掃流力 $\tau_0 >$ 限界掃流力 τ_c 。)の範囲ではRipple、 $Re_* > 20$ の範囲ではDune、 $10 \leq Re_* \leq 20$ の範囲ではRippleまたはDune、あるいはDune and Rippleが生ずるといわれている。砂粒レイノルズ数 Re_* が大きい場合には、例えば100程度以上の場合には Re_* の効果を無視しうようになるので、 τ_* と h/d の相似則によって河床材料の粒径を模型の幾何学的縮率に従って縮小して実験を行えば、おおよその見当として模型においてプロトタイプと同一の河床形態が生じ、フルードの相似則をも保存することができる。しかしながら、河川の下流部等では河床材料は細かく、模型縮尺どおりに縮尺すると Re_* が20以下となる。そのため、実際河道には発生していないRippleが模型河道に発生したりして、実際の河道と異なった河床形態になることがある。また、夏と冬とで実験結果が異なることがある。これは、水温によって Re_* が変化し、河床波の形態に変化が生じることがあるためと考えられる。このような場合には、河床抵抗は大幅に異なり、相似関係を成立させることが困難となる。

次に河床面の粗度について考えてみる。河床形態が模型と河道において一致しているとしても、sand wavesの形状までもが同時に一致するという保証はない。したがって、抵抗は必ずしも一致するとは限らない。しかし、河床形態が合っていれば粗度の関係は大差ない関係となっていると考えられるので、小規模河床形態を合わせることは重要な意義がある。そのため、模型においていたずらなRippleが発生しないような粒度分布を持つ実験砂を使用するか(ちなみに、平均粒径 $d_m > 0.6\text{mm}$ であれば通常の実験範囲ではRippleの発生はないといわれている)、比重が小さい河床材料を使用して、河床形態の相似性を保つ工夫がなされることがある。また、ひずみ模型とする場合もある。尚、ひずみ度が大きくなる場合には、安息角による制約と水平軸渦についての問題などを無視できなくなり、正しい実験結果をもたらさなくなるが、移動床の場合には固定床模型のように河床に粗度付けをして人為的に粗度係数を合わせるなどして、実験を行う必要が生じることがもある。尚、この場合他の面がある程度犠牲となることはやむを得ない。

小規模河床形態の現地量については十分な観測資料が得られていないため、多くの研究が実施されているが、その結果は未だ完結していない。しかし、実験計画を立てる場合には、小規模河床波の領域区分や主要無次元量の効果に関する定量的な評価を行い、河床波の形状特性と抵抗特性(摩擦抵抗係数の値)などを知る必要がある。

河床面の相似問題ではこの他にも種々あるが、2, 3の主なものについて以下に簡

単にふれておく。

まず、中規模河床形態の相似則については多くの研究があるが、小規模河床の問題以上に評価が固まっていない。しかし、おおよそ u^*/u^*c 、 B/h 、 R/d あるいは I_0B/h のような無次元量によって中規模河床形態は区分されうるとされており、フルード模型でない場合でも I_0B/h の条件により、中規模河床の平面形状の相似が得られることがある。

河床材料の粒度分布には一般に縦断変化があり、また滞と砂州では著しく異なるように平面分布及び鉛直分布も複雑である。一方、大きい洪水の直後には細粒分が増大して、平均粒径の縦断変化の度合いが減少するが、その後の時間経過とともに粗度の肥大化、均質化と平均粒径の縦断変化の度合いの増大が進行する。砂河川では比較的安定しているが、砂礫河川では河床材料の時間的、空間的分布が複雑であり、その実態を明確にすることは容易ではない。ところが、模型では繰り返し通水することもあり、河床材料として均質なものが便利である。混合粒径の水理特性は十分に解明されていないこともあり、通常は実験目的に応じて実験に使用する代表粒径を選んで実験を行っている。この場合、模型上の現象は代表粒径の河床材料で全ての現象を表現させることになり、河川と若干異なることがあるので留意する必要がある。

模型に使用する河床材料には、現地の平均粒径に見合ったほぼ均一な粒度分布を有する材料が用いられることが多い。この時の粒径は通常限界掃流力に対する相似条件をほぼ満たすように選定されている。しかし、河床材料の粒度が広く分布する河川の場合には、その平均粒径が限界状態になる流量は、ある程度大きい洪水であることが多い。したがって、模型ではそれに相当する流量以上の洪水が対象となり、それ以下の流量では河床は動かない。あるいは、動く場合には限定される。一方現地では、これ以下の流量で河床表面に存在する平均粒径より小さい粒径の河床材料は動いていることがある。このような場合で、現地の河川では複列蛇行が生じている時、模型では限界を少し超えた流量で単列蛇行、大きい洪水で複列蛇行、さらに大きい洪水で単列蛇行等と変化することがあるので注意しなければならない。それは、平坦河床から実験を始めた場合、河床が少し動いたところに流れが集まり、他の場所では砂が動かないために、そのまま蛇行が発達することがあるからである。これは、模型において細粒分をカットしているために生じる現象の一例である。

アーミング現象は、中小洪水の時に細粒分が吸い出され、表面に粗粒砂礫が残さ

れた結果、河床の表面の材料の移動性が減少する現象をいい、流水の掃流力に対して強化された表面の層をアーマコートと呼ぶ。混合粒径の移動床実験を行えば、アーマリング現象の相似条件は得られるものと考えられる。大洪水では、アーマコートは破壊される。

模型の縮尺を小さくすると、河床材料の粒径は小さくなる。粒径が小さくなると表面張力や粘性の効果が出てくることはすでに述べたとおりであるが、含水比が問題となることもある。また、ヘドロ層を想定すれば容易に理解されるように、河床材料の移動層の限界が不明確となって、河床面の定義が困難となることもある。例えば、石炭粉を用いて実験を行う時に問題となることがある。河床材料が細かい河道の模型実験は、そのためになりに困難となる。すなわち、細粒分の土砂の移動が支配的となる現象の再現性には問題が残っている。このことは、流量が小さい範囲の移動床実験には困難が伴うことを意味する。

② 河床変動の相似条件

固定床実験の場合は、ひずみ度に合わせて河床面を幾何学的に相似に作成しておけばよいが、移動床実験の場合は河床面が時間の経過につれて変形していく。この変形の過程において、形状や変形速度が実物と模型で同一でなければならない。この河床変形の時間縮尺は、フルード則により求めた水流の時間縮尺と異なり、その両方を同時に満足できないのが普通である。すなわち、両者の現象の時間スケールが異なる。しかし、流れの不定流効果があまり大きくなければ、河床変化の相似性より求めた時間縮尺を模型に使った方が、より実物の現象に合った結果を得ることが期待される。

この場合、1次元の河床流砂の連続条件

$$\frac{\partial z}{\partial t_s} + \frac{1}{1-\lambda} \frac{1}{B} \frac{\partial QT}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

より、流水に関する相似則を求めたのと同様な方法で

$$t_{s,r} = (1-\lambda)_r \cdot x_r \cdot h_r \cdot q_{\tau,r}^{-1} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

を得る。ここに、 λ : 空隙率、 QT : 全流砂量 (容積)、 q_{τ} : 単位幅当たりの流砂量 t_s : 流砂に対応する時間とし、流水に対応する時間 t と区別する。 q_{τ} は浮遊砂及び掃流砂を含んだ総流砂量としているが、細かい粒径の流砂からなる浮遊砂が(4.1)式のような形で模型範囲の河床変動に直接関与するか否かについてはなお議論のある

ところである。しかし、ここではこのような議論は避けて、数ある流砂量公式の中で、仮に掃流砂量に対して佐藤・吉川・芦田公式を、また掃流砂量に浮遊流砂量をも考慮した公式としてBrown 公式とを対象にして検討してみる。

佐藤・吉川・芦田公式（土研公式）は、掃流砂量 q_B を与えるもので

$$q_B = \frac{\phi \cdot F(\tau_0 / \tau_c)}{(\sigma / \rho - 1) g} u_*^3 \dots\dots\dots (4.3)$$

である。ここに、 u_* : 摩擦速度、 σ : 土砂の比重、 ρ : 水の比重、 ϕ : n の関数として与えられる定数、 F : τ_0 / τ_c の関数として与えられる定数、 τ_0 : 掃流力 τ_c : 限界掃流力を表す。

したがって、 $q_{B,r}$ は前述と同様にして、

$$q_{B,r} = \frac{\phi_r \cdot F_r \cdot h_r^3}{(\sigma_s / \rho - 1) r x_r^{3/2}} \dots\dots\dots (4.4)$$

となる。一方、Brown 公式の場合には、

$$q_T = \alpha \frac{u_* \beta}{g^2 (\sigma_s / \rho - 1)^2 d_m} \dots\dots\dots (4.5)$$

である。ここで、 α および β は定数であり、Brown 公式では $\alpha=10$ 、 $\beta=5$ である。 d_m は平均粒径とするが、本来ならば掃流砂と浮遊砂を同一の平均粒径で表すことは困難であろう。Brown 公式の場合も同様にして、

$$q_{T,r} = \frac{1}{(\sigma_s / \rho - 1) r^2 d_{m,r}} \cdot \frac{h_r \beta}{x_r \beta^{1/2}} \dots\dots\dots (4.6)$$

を得る。以上の結果、河床変動に対応する時間縮尺 $t_{s,r}$ は(4.2) 式の $q_{T,r}$ に、(4.1) 式の $q_{B,r}$ または(4.6) 式の $q_{T,r}$ を代入することにより得られる。

流砂現象の相似らとって、その他の重要な要素として移動限界付近の現象と浮遊流砂による河床変動がある。河床材料の移動限界付近の流砂の相似には、その河床材料の限界掃流力が大きな影響力を有することは否めない。したがって、その地点の掃流力 τ_0 と限界掃流力 τ_c の比 τ_0 / τ_c が指標として重要であり、この τ_0 / τ_c が実物と模型の上で同じならば、流砂条件はほぼ相似と考えてよいであろう。次に、浮遊している土砂の運動には砂粒の沈降速度 w_0 と流速 u の比が重要な要因となる。浮遊砂による堆積現象が重要な場合には、模型と現地で w_0 / u が同一であることが望ましい。また、掃流砂量と浮遊砂量の比が同一となることも必要条件であるが、 w_0 / u

はこの条件を満たす一つの重要な指標でもある。

③ 河川移動床相似の問題点

移動床模型におけるフルード則に基づく水の流れでは、小規模河床波による局所的な流れの現象と抵抗則の相似による水位や流速の差違、および渦や拡散現象などのうちレイノルズ則の影響を受ける範囲内の現象等を除いて、流れの相似条件は満たされていると考えられる。模型による流れに関する実験結果の近似度を上げるためには、粗度ができるだけ一致するように模型の縮尺および河床材料を選定する必要があるが、レイノルズ則の効果を除くことも問題となる。後者については、固定床実験についても同様であるが、レイノルズ数を限界値より大きくして乱流状態として実験を行えば、一般には Re の効果はほとんど無視しうるといわれている。しかし、レイノルズ数を十分大きくして実験を行っても、間欠的に渦が発生するような場合には、渦による混合・拡散などに未だ十分な説明が行われていないところがあるので、相似律についても未解決な部分が残されている。

移動床実験では境界が可変であり、また粗度が主として河床波に支配されて定められ、水位の調整が自由にできないので、種々のひずみが入る。その主なものを列挙すると次のようである。すなわち、a)鉛直方向と水平方向の縮尺が異なる幾何形状ひずみ、b)縦断勾配が水平と鉛直縮尺比と異なる勾配ひずみ、c)粒径の縮尺と鉛直縮尺あるいは水平縮尺と異なる粒径ひずみ、d)砂粒の水中密度比が異なる密度比ひずみ、e)砂粒の沈降速度比と流速比が異なる沈降速度ひずみ、f)砂粒の沈降に要する時間比と河床変動比と異なる時間ひずみ、g)掃流砂量と浮遊流砂量比または全流砂量比と異なる流砂量ひずみ等がある。移動床実験では避けがたいものであるが、これらの諸ひずみの影響を小さくする工夫を行って実験を実施するのがよい。

移動床模型は河道のある区間を切り取って水と砂を流し、実物の河道の現象を近似させる。ところが、河道にはそれぞれ個性があり、かつ変化と変動がある。そこで、この切り取った模型において、このような実物の河川の特性を反映させることが重要である。これは大変に難しいことでもある。

模型に現れる現象を実物に適用しうる河床変動スケールの時間は、模型の上下流において与える条件の信頼性による。通常、河道や外力の変化が大きい場合には予測不能と考えられ、よほど安定した河道でない限り、数十年先の河道の状態を模型実験に

よって推定することは困難である。模型においては、条件を一定としておけば通水時間とともに河床に変化が起こり、やがて動的あるいは静的な平衡状態に達することがある。しかし、実物では模型に対応する時間が明確でなく、また模型のような条件が一定となることはない。実物では、流量の発生は確率論的および時系列論的であり、流砂運動は決定論的、確率論的および時系列論的な現象が入りまじる。このような流量と供給土砂量の条件が過去の資料によって推定可能な年数の範囲が対象としうる年数であるといえる。しかも、その判断には河川に関する十分な経験が必要とする。尚この時河床掘削や構造物の築造などの人為的な変化を模型実験の中で十分反映させることが必要である。

模型では、河床材料としてはほぼ均一な砂を用い、細粒分をカットした材料を使用することが多い。この時の問題点を列挙すると次のようである。a)河道の縦断勾配が変化している時、b)現地の河道の河床材料の組成は平面的にも、また深さ方向にも変化している。この状態は時間的にも変化するが、特に大洪水の後や大規模な掘削の後は大幅に変化する。しかし、実験ではこのような現象を追跡しえない。c)アーマコートが異なる、d)小規模河床波の相似が得にくい、e)砂州や砂礫堆の伝播速度の相似条件が不明である。すなわち、河道の状態の時間変化の意味の吟味が必要である、f)模型の河床材料の限界掃流力にそうとうする流量以上が模型で対象となるが、河川ではこれ以下の流量が生起し、かつ河床変動が生じている、g)大きい時間スケールの河床低下や河床上昇の現象を模型の上で再現させることが容易でない、h)構造物の強度や変形、砂州や高水敷の固結度および植生の効果などの相似条件が難しい、i)構造物周辺では繰り返し洗掘を受け、アーミング現象が発達し、あるいは対策工の効果が加わって現地では模型ほど掘れないことが多いが、このような状況の相似条件を得ることは容易ではない、j)流量の生起は上流の改修やダム築造などにより変化する、k)土砂の供給量は山腹の状況の改善、ダム貯水池、砂防ダム、砂利採取、護岸の建設および土砂調節能力のある自然河道の改修などによって変化し、その粒度組成は大幅に変化することがある。l)流砂型式の相似条件が未解決である。

次に、移動床の河床材料として、比重が小さい材料が用いられることがある。軽い材料を用いる理由は、模型の底質材料の粒径が 0.2mm程度以下になると粘性の影響が顕著になり、また模型をひずめて底質材料の粒径が大きい砂を用いると中規模河床形態の相似条件が崩れることなど、相似条件上の不都合を改善するためである。例えば、

粒径を小さくする代わりに、底質材料の比重を小さくすることによって移動状況に関する相似条件を改善させるものである。この場合に、石炭粉を用いた時の流砂型式と流砂量および小規模河床波の発生と発達の特徴が問題となる。時間縮尺は、この結果に基づき定められる。そして、その次の段階では、中規模河床形態の特性に関する検討も必要となる。ここで、石炭粉の水理特性にふれておく。通常使用される石炭粉の特性値として、平均粒径 $d_m=0.27\text{mm}$ 、比重 $\sigma_s=1.58\text{g/cm}^3$ の石炭粉について掃流流砂量と流量の関係を調べた実験によると、無次元掃流力 τ_* が0.8付近で小規模河床形態がRippleからFlatの状態に変化し、それとともに流砂量が急増することが砂の場合と異なっていることがわかった。同様に、流量係数 $\psi(=u_m/u_*)$ も小規模河床波の変化に伴って急変するが、この原因には流砂型式の違いの影響もあるものと考えられる。

移動床実験で、実験者が最後まで自信を持ってないのが時間縮尺の取り方である。移動床実験結果の定量判断および不定流実験などが実験目的の対象とされる場合には、時間縮尺の決め方が重要である。一般に、非定常性が強く貯溜が問題となる場合にはフルード則から定められる時間縮尺 t_r を重視する必要があるが、河床変動に重点が置かれる場合には流砂の関係から求められる $t_{s,r}$ が意義を持つ。ただし、 $t_{s,r}$ は採用する流砂関数によってかなり異なった計算結果となる。ただし、模型における流砂特性は多くの場合に2次元的な基礎実験の範囲内であるのでよく把握されている。模型河床材料として砂を用いる場合には、例えば佐藤・吉川・芦田公式、石炭粉の場合には浮遊が含まれているのでBrown公式等の適合性のよいことが確かめられている。したがって、河川の現地における流砂関数が実測等によって把握されている場合には、 $t_{s,r}$ の精度を相当高めることができる。しかしながら、現地と模型とで流砂関数が異なる場合には、一般に流量の関数となる。

移動床実験では水位が合わないのはやむを得ないこととして、主として河床変動に注目することが多いが、水位についてもその最高値などに対する要請が強い。水位・時間曲線に対する影響要素としては、 t_r によらないときに貯溜、砂れんの発達による粗度の変化（通常、減水期に模型水位が高い）、粗度変化に伴う流砂量の変化、補給砂量の不適および流砂関数の不適による河床変動量の相違、流量変化に伴う $t_{s,r}$ の変化等があり、これらを考慮しておくことが必要である。

以上のように、移動床実験には多くの問題があり、相似条件のみに限定しても未解

決の問題が山積している。そのため、実用的には検証実験の重要性が認識される。

また、実験は目的とする現象に応じて方法が異なるものである。言い換えると、問題点が多いただけに個々の場合に応じた工夫が必要ということである。最後に、移動床の模型実験を実施する場合に、特に強調されなければならないことがある。それは、模型範囲だけの現象の理解と認識だけでは不十分であり、その川全体を一つの生きたシステムとしてとらえ、その中での位置づけが不可欠である。

