
平成 2 8 年度原子力施設等防災対策等委託費（耐
津波設計・フラジリティ評価手法の整備に係る防潮
堤水理試験（漂流物影響，洗掘影響））事業

調査報告書

平成 2 9 年 3 月

京都大学

目次

第 1 章 事業概要	1
1-1 事業の目的.....	1
1-2 事業内容	1
第 2 章 津波通過波検定	2
2-1 試験の概要.....	2
2-2 試験条件	2
2-3 試験結果	7
2-4 シミュレーションの概要	14
2-5 解析条件	14
2-6 解析結果と試験結果の比較.....	15
2-7 通過波検定の検討結果のまとめ	24
第 3 章 津波波力特性の把握	25
3-1 試験の概要.....	25
3-2 試験条件	25
3-3 試験結果	31
3-4 シミュレーションの概要	41
3-5 解析条件	41
3-6 津波波圧の評価方法について	42
3-7 解析結果と試験結果の比較.....	45
3-8 解析結果のまとめ.....	68
第 4 章 漂流物影響の把握.....	69
4-1 試験の概要.....	69
4-2 試験条件	70
4-3 試験結果	76
4-4 シミュレーションの概要	102
4-5 解析条件	102
4-6 解析結果と試験結果の比較.....	104
4-7 解析結果のまとめ.....	124
第 5 章 洗掘影響の把握	125
5-1 試験の概要.....	125
5-2 試験条件	125
5-3 試験結果	129
5-4 シミュレーションの概要	142
5-5 解析条件	142
5-6 解析結果と試験結果の比較.....	143
5-7 解析結果のまとめ.....	153

第 6 章 護岸形状の影響の把握.....	154
6-1 試験の概要.....	154
6-2 試験条件	155
6-3 試験結果	159
6-4 シミュレーションの概要	168
6-5 解析条件	168
6-6 解析結果と試験結果の比較.....	170
6-7 解析結果のまとめ.....	188
第 7 章 今後の試験および解析の課題.....	190
付録 A 津波通過波検定試験.....	付-1
付録 B 津波波力特性の把握試験.....	付-39
付録 C 漂流物影響の把握試験	付-74
付録 D 洗掘影響の把握試験.....	付-122
付録 E 護岸形状影響の把握試験.....	付-136
付録 F 津波通過波検定解析	付-161
付録 G 津波波力特性の把握解析.....	付-201
付録 H 漂流物影響の把握解析	付-357
付録 I 洗掘影響の把握解析	付-389
付録 J 護岸形状影響の把握解析	付-395

第1章 事業概要

1-1 事業の目的

平成 25 年 7 月、新規制基準や関連する審査ガイドが施行された。また、平成 25 年 11 月改正の核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律では、「発電用原子炉施設の安全性の向上のための評価」を事業者に求め、「原子炉規制委員会で定める時期ごとに、当該発電用原子炉施設の安全性について、自ら評価をしなければならない」としている。さらに、平成 25 年 11 月策定の「実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」（以下「運用ガイド」という。）では、新規性基準を適用したプラントの安全性向上を評価することを求めており、評価方法の 1 つに「外部事象に係る確率論的リスク評価（PRA）」（以下「リスク評価」という。）が挙げられている。

このため、地震・津波に関するリスク評価の観点から、施設・設備の脆弱性に係る評価手法の高度化が必要である。

本事業は、耐津波設計・脆弱性評価手法の高度化に資することを目的に、防潮堤を対象とした水理試験を実施し、防潮堤の構造健全性に影響を与え得る津波漂流物による外力及び津波起因の洗掘現象を評価するために必要なデータを取得する。また、水理試験のシミュレーション解析を行い、解析手法の適用範囲を確認して解析手法を整備する。

1-2 事業内容

構造物の構造健全性に影響を与え得る津波起因の外力は、津波先端部の破砕などにより生じる衝撃的な圧力（段波波圧）や、それに続く津波により持続的に作用する圧力（持続波圧）といった津波波力だけでなく、漂流物が構造物に衝突することにより生じる力（漂流物衝突力）も構造物の健全性評価に影響を与え得る。漂流物衝突力について、いくつかの算定式が提案されているが、試験条件によりものが多く、試験データを拡充し、既往式の適用性を確認する必要がある。

また、東北地方太平洋沖地震での津波被害では、津波による流れにより構造物の周辺地盤が削り取られること（洗掘）で、構造物の沈降や傾斜の被害が多数発生した。河川内の流れを対象とした橋脚まわりの洗掘等については、洗掘深に係る推定式などが提案されているが、津波の流れを対象とした構造物まわりの洗掘に関する試験データの拡充が必要である。特に、比較的長い周期の波が作用する時の洗掘の影響について、適切に把握するための試験データの拡充が重要となる。

本事業では、漂流物影響の把握及び洗掘影響の把握に関する、水理試験及び水理試験のシミュレーション解析を実施し、防潮堤の脆弱性評価に必要な試験データを取得するとともに、解析手法を整備する。

第2章 津波通過波検定

2-1 試験の概要

津波波力特性の把握を目的に水理試験を行うのに先立ち、以下の 5 種類の津波を試験水槽内で再現し、流速、波高を 3 回計測するとともに、高速度カメラ画像計測を行う。

- ① 沖波波高で 7cm の孤立波
- ② 沖波波高で 15cm の孤立波
- ③ 潮流による津波（定常的な越流深が 1cm）
- ④ 潮流による津波（定常的な越流深が 3cm）
- ⑤ 長波（規則波で周期 5 s，波高 30cm）

なお、試験は京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー内に設置されている津波再現水槽で行い、海底地形勾配は 1/10（単純勾配），③，④については汀線に防潮堤模型（高さ 15cm）を設置して行う。

2-2 試験条件

(1) 試験水槽（津波再現水槽）

試験に用いた水槽は、長さ 45m，幅 4.0m，水深 0.8m の津波再現水槽である。図 2-2-1 に試験水槽の概要を示す。

(2) 計測機器設置位置

図 2-2-2 に試験に用いた計測機器及びその設置位置を示す。

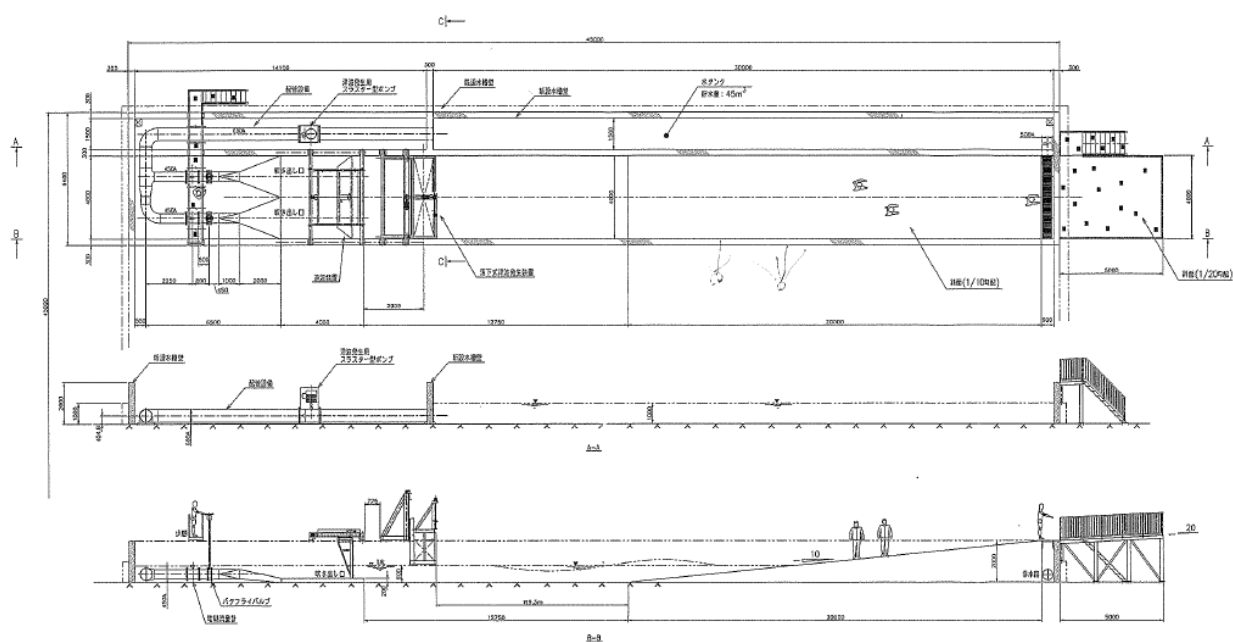
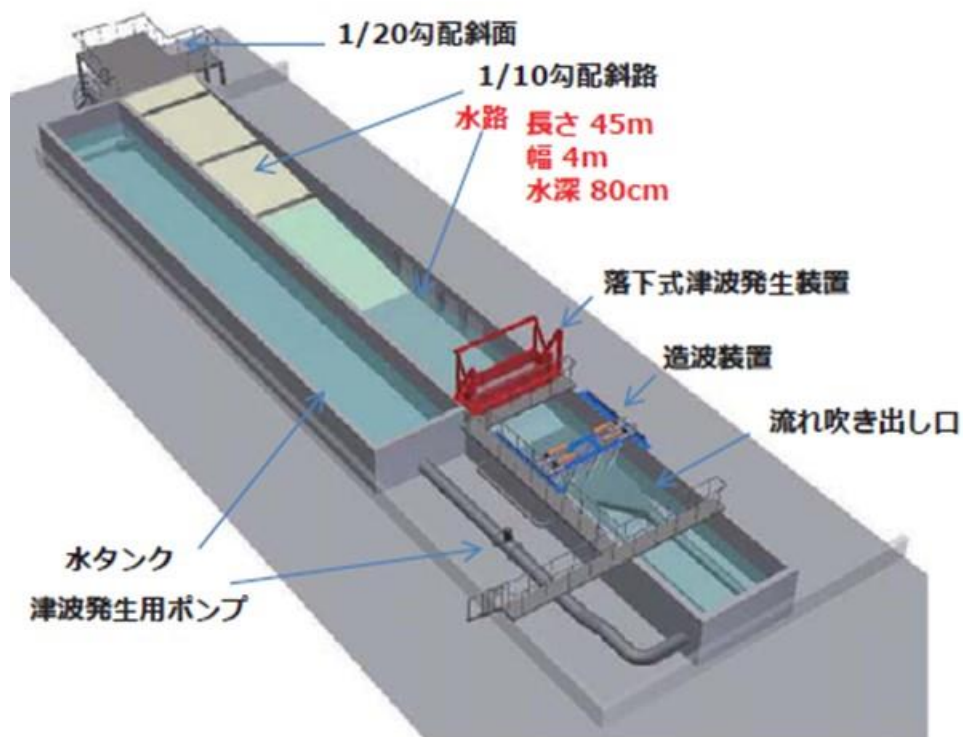


図 2-2-1 試験水槽（津波再現水槽）

(3) 予備試験

(3-1) 孤立波

- ・ 設定波高の変化（波高 5cm, 7cm）／波高減衰率

表 2-2-1 予備試験ケース（孤立波）

ファイル名 (*vlt)	設定波高	設定周期	試験時間	wave01	wave06	汀線部	陸上60cm	汀線-陸域 波高減衰率
				波高計		ビデオ		
kor01	2.0 cm	—	—	1.8 cm	2.9 cm	3.3 cm	2.2 cm	66.7 %
kor02	3.0 cm	—	—	3.0 cm	4.4 cm	4.8 cm	3.1 cm	64.6 %
kor03	5.0 cm	—	—	4.8 cm	6.8 cm	6.9 cm	4.7 cm	68.1 %
kor04	7.0 cm	—	—	6.9 cm	9.1 cm	10.3 cm	6.3 cm	61.2 %
kor05	9.0 cm	—	—	8.8 cm	10.6 cm	11.0 cm	7.0 cm	63.6 %
kor06	11.0 cm	—	—	10.9 cm	12.2 cm	12.3 cm	8.3 cm	67.5 %
kor07	13.0 cm	—	—	13.0 cm	13.1 cm	13.8 cm	9.0 cm	65.2 %
kor08	15.0 cm	—	—	14.8 cm	14.2 cm	15.5 cm	10.5 cm	67.7 %
kor09	18.0 cm	—	—	17.6 cm	15.5 cm	18.2 cm	12.8 cm	70.3 %
		—	—					

(3-2) 長 波

- ・ 設定波高の変化（波高 10cm, 14cm※）／波高減衰率

※汀線上で波高 30cm の波の設定を目指したが、汀線の手前（沖合）で碎波し、達成が困難と判断して、波高を再設定した。

表 2-2-2 予備試験ケース（長波）

ファイル名 (*vlt)	設定波高	設定周期	試験時間	wave01	wave06	汀線部	陸上60cm	汀線-陸域 波高減衰率
				波高計		ビデオ		
long01	4.0 cm	5.0 sec	—	4.0 cm	2.9 cm	3.2 cm	2.0 cm	62.5 %
long02	6.0 cm	5.0 sec	—	6.0 cm	3.2 cm	4.0 cm	2.3 cm	57.5 %
long03	8.0 cm	5.0 sec	—	7.8 cm	4.2 cm	5.1 cm	2.6 cm	51.0 %
long04	10.0 cm	5.0 sec	—	9.9 cm	4.9 cm	6.1 cm	3.1 cm	50.8 %
long05	12.0 cm	5.0 sec	—	11.9 cm	6.1 cm	6.5 cm	3.8 cm	58.5 %
long06	14.0 cm	5.0 sec	—	14.1 cm	7.1 cm	7.6 cm	5.1 cm	67.1 %
long07	16.0 cm	5.0 sec	—	16.2 cm	9.3 cm	9.7 cm	6.6 cm	68.0 %
		—	—					

(3-3) 越流波

- ・ 設定波高の変化（越流深 3cm）

表 2-2-3 予備試験ケース（越流波）

ファイル名 (*.vlt)	設定流量	設定周期	試験時間	wave01	wave06	汀線部 ビデオ		
				波高計				
cyou01	0.073 m ³ /s	—	720 sec	16.3 cm	15.6 cm	1.0 cm		
cyou02	0.080 m ³ /s	—	720 sec	17.0 cm	16.2 cm	1.3 cm		
cyou03	0.090 m ³ /s	—	720 sec	18.1 cm	17.2 cm	2.4 cm		
cyou04	0.100 m ³ /s	—	720 sec	18.8 cm	17.9 cm	3.3 cm		
cyou05	0.110 m ³ /s	—	720 sec	19.4 cm	18.4 cm	3.7 cm		
cyou06	0.070 m ³ /s	—	720 sec	16.0 cm	15.2 cm	0.9 cm		
		—	—					

（参考）越流波における越流水深と越流量の関係

$$Q = 0.490B (H+0.079)^{3/2}$$

ここに，Q：越流量（m³/s），B:水槽幅(=4m)，H：越流水深(m)

2-3 試験結果

(1) 孤立波

【設定波高の変化（波高 7cm, 15cm）／波高減衰率】

表 2-3-1 通過波試験ケース（孤立波）

ファイル名 (*.vlt)	設定波高 (沖波)	設定周期	試験時間	wave01	wave06	汀線部	陸上60cm	汀線-陸域 波高減衰率
				波高計		ビデオ		
case001	7.0 cm	—	—	7.0 cm	9.1 cm	9.5 cm	6.1 cm	64.2 %
case002	7.0 cm	—	—	7.0 cm	9.0 cm	9.5 cm	6.3 cm	66.3 %
case003	7.0 cm	—	—	7.1 cm	9.1 cm	9.7 cm	5.9 cm	60.8 %
case004	15.0 cm	—	—	15.1 cm	14.0 cm	16.2 cm	10.7 cm	66.0 %
case005	15.0 cm	—	—	15.1 cm	14.0 cm	16.1 cm	10.7 cm	66.5 %
case006	15.0 cm	—	—	15.1 cm	14.0 cm	16.0 cm	10.5 cm	65.6 %
		—	—					

【各ケースの波高，流速データ】

表 2-3-2 通過波試験測定結果（孤立波）

			測定結果 (片振幅波高)						
計測位置			沖波設定波高値	7.0cm			15.0cm		
			ケース名	case001	case002	case003	case004	case005	case006
			試験回数	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
入力波高値			cm	7.16	7.16	7.15	15.30	15.28	0.00
水位 (cm)	wave01	一様水深部 (X=1250cm)		7.0	7.0	7.1	15.1	15.1	15.1
	wave02	一様水深部 (X=850cm)		7.4	7.3	7.3	15.4	15.4	15.4
	wave03	一様勾配部 (1/10): (X=850cm)		7.8	7.6	7.6	15.7	15.7	15.8
	wave04	一様勾配部 (1/10): (X=450cm)		8.0	8.0	7.9	15.9	16.0	16.0
	wave05	一様勾配部 (1/10): (X=250cm)		9.1	9.1	9.0	16.8	16.8	16.9
	wave06	汀線部 (X=0cm)		9.1	9.0	9.1	14.0	14.0	14.0
	スケール汀線	汀線部 (X=0cm):ビデオ		9.5	9.5	9.7	16.2	16.1	16.0
	スケール60cm	陸域 (X=-60cm):ビデオ		6.1	6.3	5.9	10.7	10.7	10.5
流速 (cm/s)	velo04X	一様勾配部 (1/10): (X=450cm)		31.9	32.0	31.9	60.1	59.7	59.7
	velo06X	汀線部 (X=0cm)		101.7	101.8	100.4	156.1	157.2	156.5

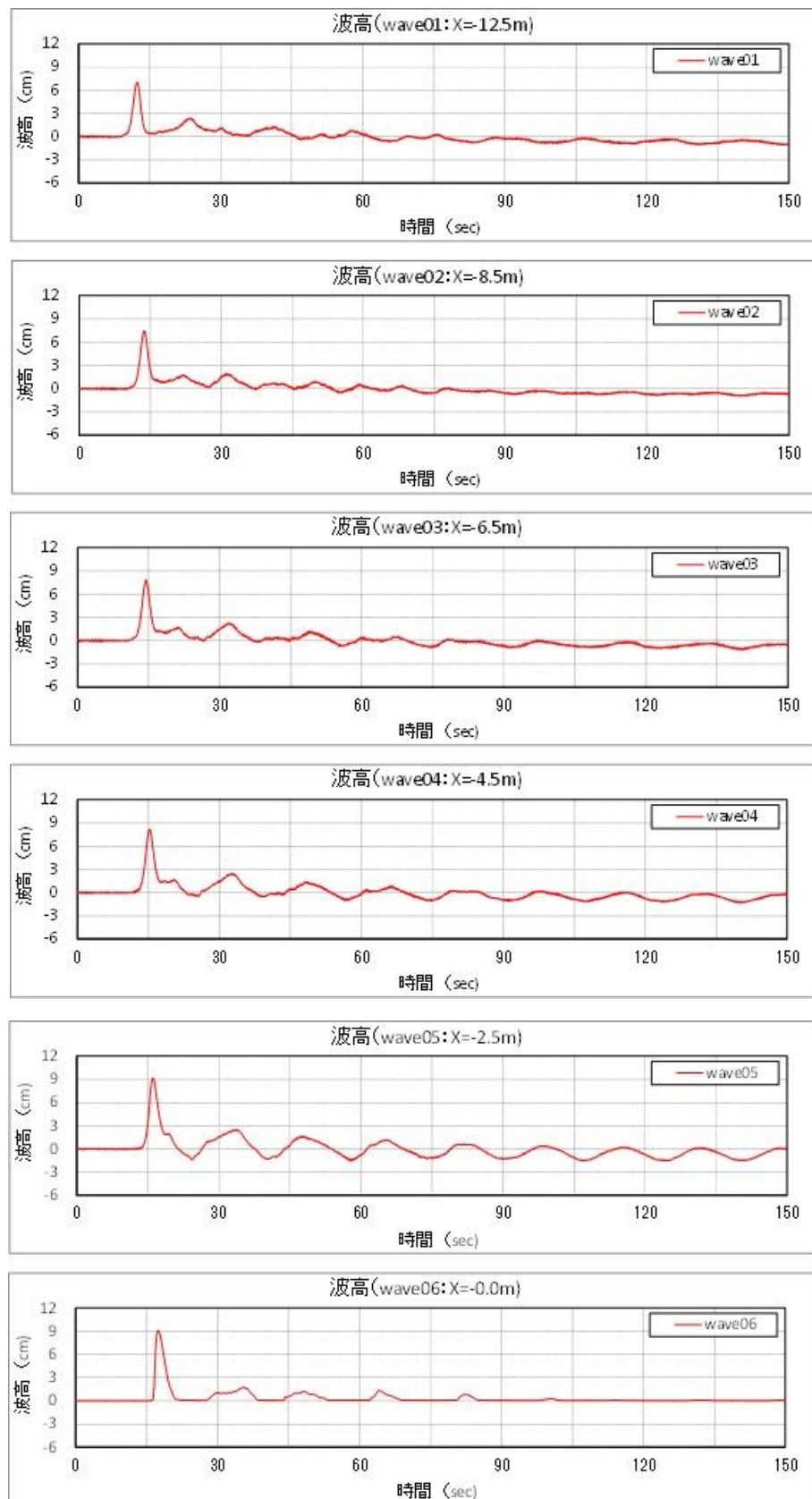


図 2-3-1 時系列波形図の一例【孤立波：沖波高 7.0cm】

(2) 長 波

【設定波高の変化（波高 7cm：汀線部）／波高減衰率】

表 2-3-3 通過波試験ケース（長波）

ファイル名 (*.vit)	設定波高 (汀線部)	設定周期	試験時間	wave01	wave06	汀線部	陸上60cm	汀線-陸域 波高減衰率
				波高計		ビデオ		
case007	7.0 cm	—	—	14.2 cm	7.1 cm	7.5 cm	5.0 cm	66.7 %
case008	7.0 cm	—	—	14.2 cm	7.9 cm	7.7 cm	5.1 cm	66.2 %
case009	7.0 cm	—	—	14.2 cm	7.5 cm	7.5 cm	5.1 cm	68.0 %
		—	—					

【各ケースの波高，流速データ】

表 2-3-4 通過波試験測定結果（長波）

		測定結果（波高：両振幅，水位：片振幅）						
計測位置		汀線部設定波高値	7.0cm					
		設定周期	5.0sec					
		ケース名	case007	case008	case009			
		試験回数	1回目	2回目	3回目			
入力値(片振幅)		cm	7.07	7.07	7.07			
			水位	波高	水位	波高	水位	波高
波高と 水位 (cm)	wave01	一様水深部 (X=1250cm)	7.7	14.2	7.7	14.2	7.7	14.2
	wave02	一様水深部 (X=850cm)	8.1	14.1	8.0	14.1	8.0	14.1
	wave03	一様勾配部 (1/10) : (X=650cm)	8.3	14.8	8.4	14.8	8.3	14.9
	wave04	一様勾配部 (1/10) : (X=450cm)	8.7	16.2	8.8	16.1	8.6	16.1
	wave05	一様勾配部 (1/10) : (X=250cm)	10.0	19.7	10.1	19.6	10.0	19.7
	wave06	汀線部 (X=0cm)	7.1	7.1	8.0	7.9	7.6	7.5
	スケール汀線	汀線部 (X=0cm) : ビデオ	7.5	—	7.7	—	7.5	—
	スケール60cm	陸域 (X=60cm) : ビデオ	5.0	—	5.1	—	5.1	—
流速 (cm/s)	velo04X	一様勾配部 (1/10) : (X=450cm)	47.7		37.4		37.1	
	velo06X	汀線部 (X=0cm)	164.8		168.6		168.0	

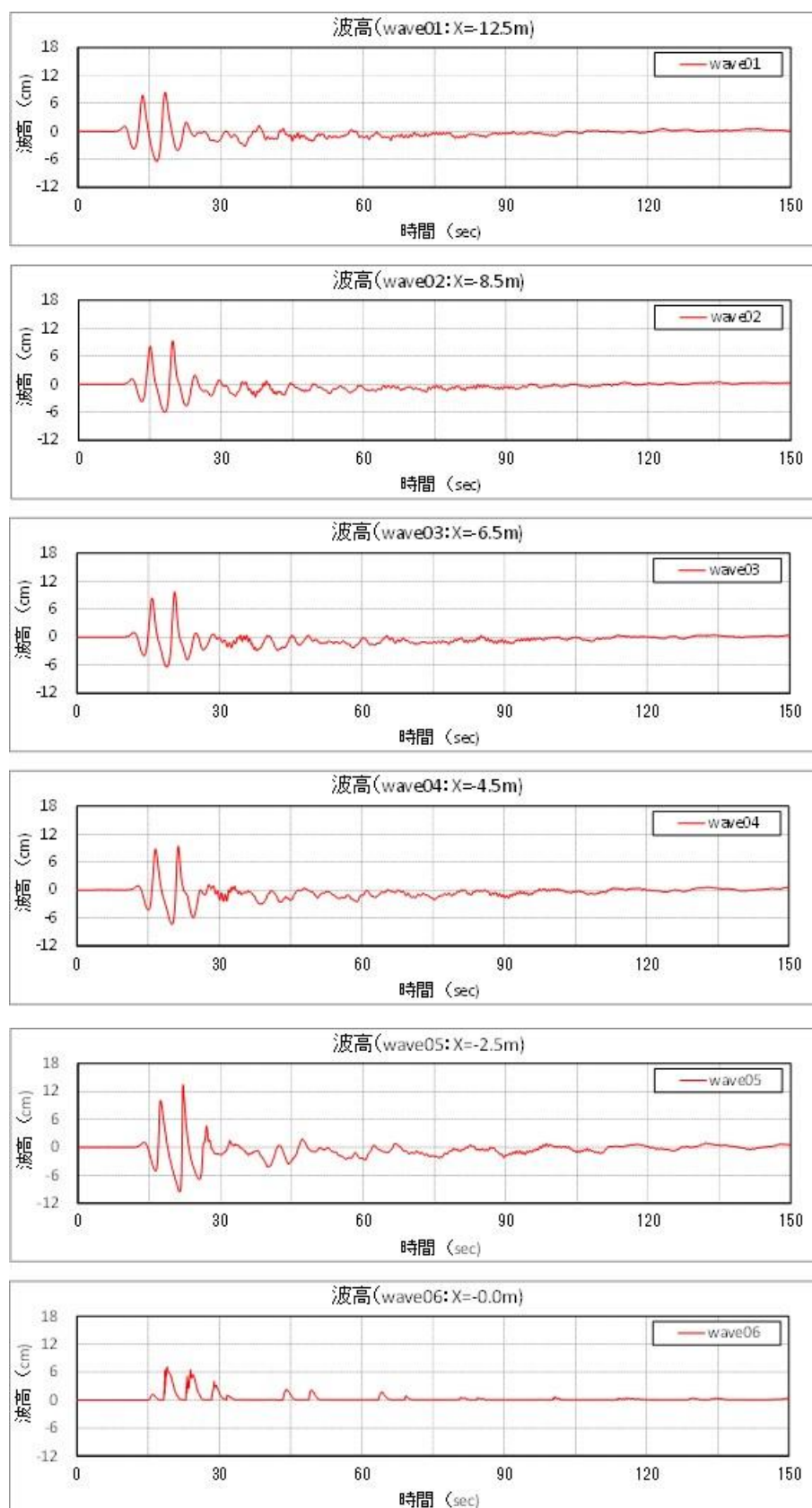


図 2-3-2 時系列波形図の一例【長波：汀線部波高 7.6cm】

(3) 越流波

(3-1) 堤体位置が汀線 0cm の場合

【設定波高の変化（越流深 1cm, 3cm）】

表 2-3-5 通過波試験ケース（越流波；汀線 0cm）

ファイル名 (* .vit)	設定波高 (越流水深)	設定周期	試験時間	wave01	wave06	防潮堤越流水深	汀線-陸域 波高減衰率
				波高計		汀線部ビデオ	
case010	1.0 cm	—	720 sec	16.3 cm	15.6 cm	1.0 cm	
case011	1.0 cm	—	720 sec	16.3 cm	15.6 cm	1.0 cm	
case012	1.0 cm	—	720 sec	16.4 cm	15.6 cm	1.0 cm	
case013	3.0 cm	—	720 sec	18.6 cm	17.7 cm	3.0 cm	
case014	3.0 cm	—	720 sec	18.6 cm	17.7 cm	3.0 cm	
case015	3.0 cm	—	720 sec	18.6 cm	17.7 cm	3.0 cm	
		—	—				

【各ケースの波高，流速データ】

表 2-3-6 通過波試験測定結果（越流波；汀線 0cm）

		測定結果（片振幅波高）						
計測位置		目標越流水深値	1.0cm			3.0cm		
		ケース名	case010	case011	case012	case013	case014	case015
		試験回数	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
入力流量		m ³ /s	0.073	0.073	0.073	0.096	0.096	0.096
水位 (cm)	wave01	一様水深部 (X=-1250cm)	16.3	16.3	16.4	18.6	18.6	18.6
	wave02	一様水深部 (X=-850cm)	16.7	16.6	16.7	19.0	19.0	19.0
	wave03	一様勾配部 (1/10) : (X=-650cm)	16.5	16.4	16.5	18.7	18.7	18.7
	wave04	一様勾配部 (1/10) : (X=-450cm)	16.1	16.1	16.1	18.4	18.4	18.4
	wave05	一様勾配部 (1/10) : (X=-250cm)	16.4	16.4	16.4	18.6	18.7	18.6
	wave06	汀線部 (X=0cm)	15.6	15.6	15.6	17.7	17.7	17.7
	スケール汀線	汀線部 (X=0cm) : ビデオ	1.0	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0
	スケール60cm	陸域 (X=-60cm) : ビデオ	—	—	—	—	—	—
流速 (cm/s)	velo04X	一様勾配部 (1/10) : (X=-450cm)	0.0	0.1	0.4	7.4	6.8	7.4
	velo06X	防潮堤越流位置 (X=0cm)	15.7	14.4	14.4	46.7	46.3	46.0

(3-2) 堤体位置が汀線－60cm の場合※

※汀線 0cm より 60cm 下げることにより，給水容量を増やさないと同等の越流水深を確保できないため，給水量の補正を行った．

【設定波高の変化（越流深 1cm，3cm）】

表 2-3-7 通過波試験ケース（越流波；汀線－60cm）

ファイル名 (*vit)	設定波高 (越流水深)	設定周期	試験時間	wave01	wave06	防潮堤越流水深 陸地0.6m	ビデオ	汀線－陸域 波高減衰率
case016	1.0 cm	－	720 sec	16.7 cm	16.0 cm		1.0 cm	
case017	1.0 cm	－	720 sec	16.5 cm	16.0 cm		1.0 cm	
case018	1.0 cm	－	720 sec	16.6 cm	16.1 cm		1.0 cm	
case019	3.0 cm	－	720 sec	18.9 cm	18.3 cm		3.0 cm	
case020	3.0 cm	－	720 sec	18.9 cm	18.3 cm		3.0 cm	
case021	3.0 cm	－	720 sec	18.9 cm	18.3 cm		3.0 cm	
		－	－					

【各ケースの波高，流速データ】

表 2-3-8 通過波試験測定結果（越流波；汀線－60cm）

		測定結果 (片振幅)						
計測位置		目標越流水深値	1.0cm			3.0cm		
		ケース名	case016	case017	case018	case019	case020	case021
		試験回数	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目
入力流量		m ³ /s	0.075	0.075	0.075	0.100	0.100	0.100
水位 (cm)	wave01	一様水深部 (X=1250cm)	16.7	16.5	16.6	18.9	18.9	18.9
	wave02	一様水深部 (X=850cm)	16.9	16.8	16.9	19.3	19.3	19.3
	wave03	一様勾配部 (1/10) : (X=650cm)	16.7	16.6	16.8	19.0	19.0	19.0
	wave04	一様勾配部 (1/10) : (X=450cm)	16.4	16.3	16.4	18.6	18.6	18.6
	wave05	一様勾配部 (1/10) : (X=250cm)	16.6	16.6	16.6	18.8	18.8	18.8
	wave06	汀線部 (X=0cm)	16.0	16.0	16.1	18.3	18.3	18.3
	スケール汀線	汀線部 (X=0cm) : ビデオ	—	—	—	—	—	—
	スケール60cm	陸域 (X=60cm) : ビデオ	1.0	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0
流速 (cm/s)	velo04X	一様勾配部 (1/10) : (X=450cm)	0.4	6.6	0.2	0.4	0.3	0.2
	velo06X	汀線部 (X=0cm)	17.3	16.5	17.1	48.8	51.7	51.7

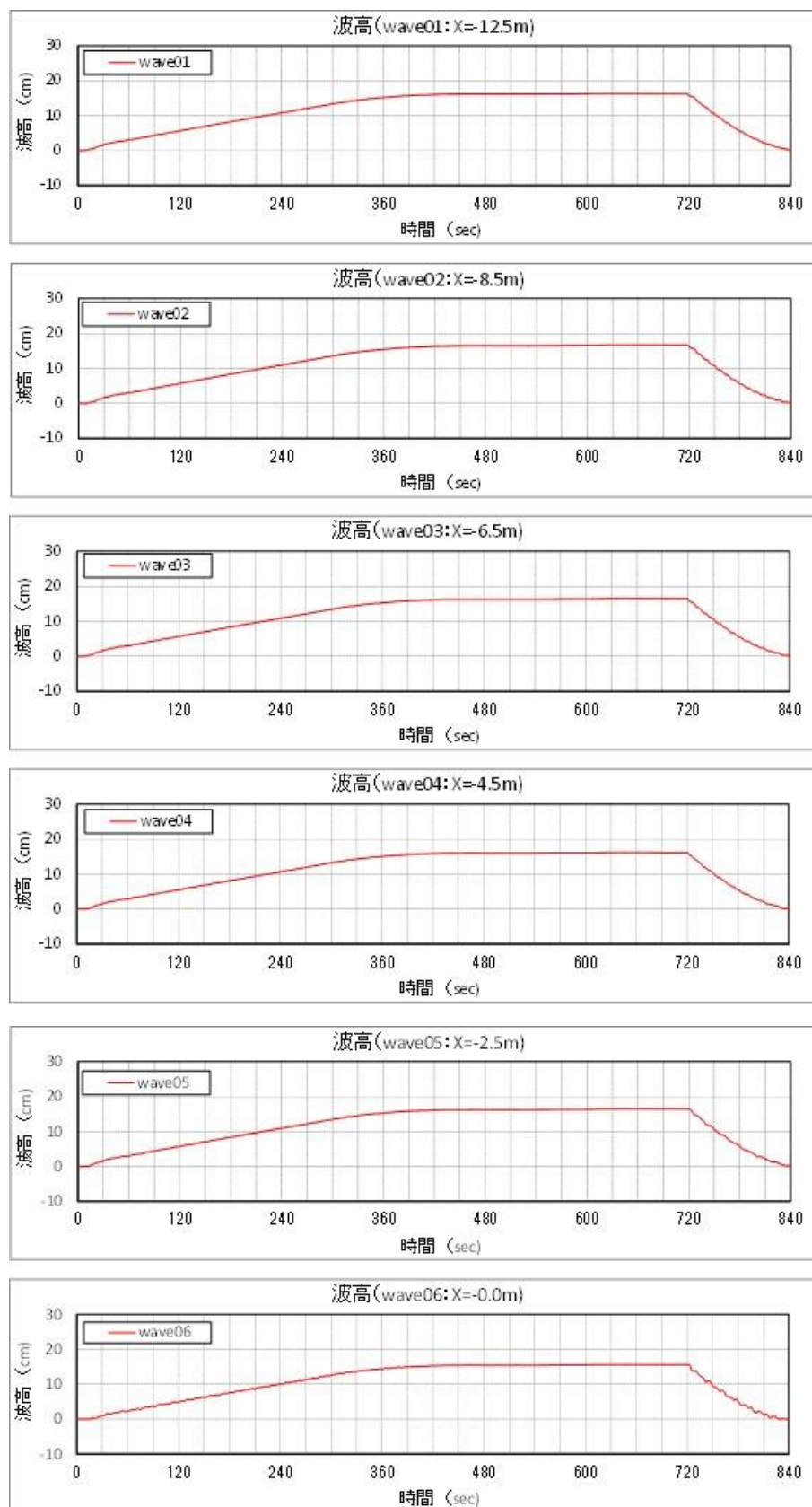


図 2-3-3 時系列波形図の一例【越流波：堤位置汀線 0cm，越流深 1.0cm】

2-4 シミュレーションの概要

通過波検定試験で用いられる 5 種類の津波を対象に、シミュレーション解析を行う。解析コードは、京都大学防災研究所で開発された完全 3 次元流体解析モデルを利用する。通過波検定試験で計測された流速、波高及び動画撮影された津波波形等を解析結果と比較することにより、それらの整合程度から解析手法の適用範囲を確認すると同時に、解析手法および評価手法を提案する。また、津波の変形状況等の解析結果に対しては、アニメーションによる可視化を行う。

2-5 解析条件

孤立波 2 ケース、越流波 2 ケース、長波 1 ケースの合計 5 ケースの解析を実施した。解析の入力波条件を表 2-5-1 に示す。また、図 2-5-1 には計測機器の設置位置を示す。

表 2-5-1 シミュレーション解析ケース一覧

ケース名	入力波種類	入力波波高	入力波周期	対象時間
case1	孤立波	7.0cm	—	30s
case2	孤立波	15.0cm	—	30s
case3	越流波	16.0cm (越流水深 1.0cm)	2000s	600s
case4	越流波	18.0cm (越流水深 3.0cm)	2000s	600s
case5	長波	7cm	5s	30s

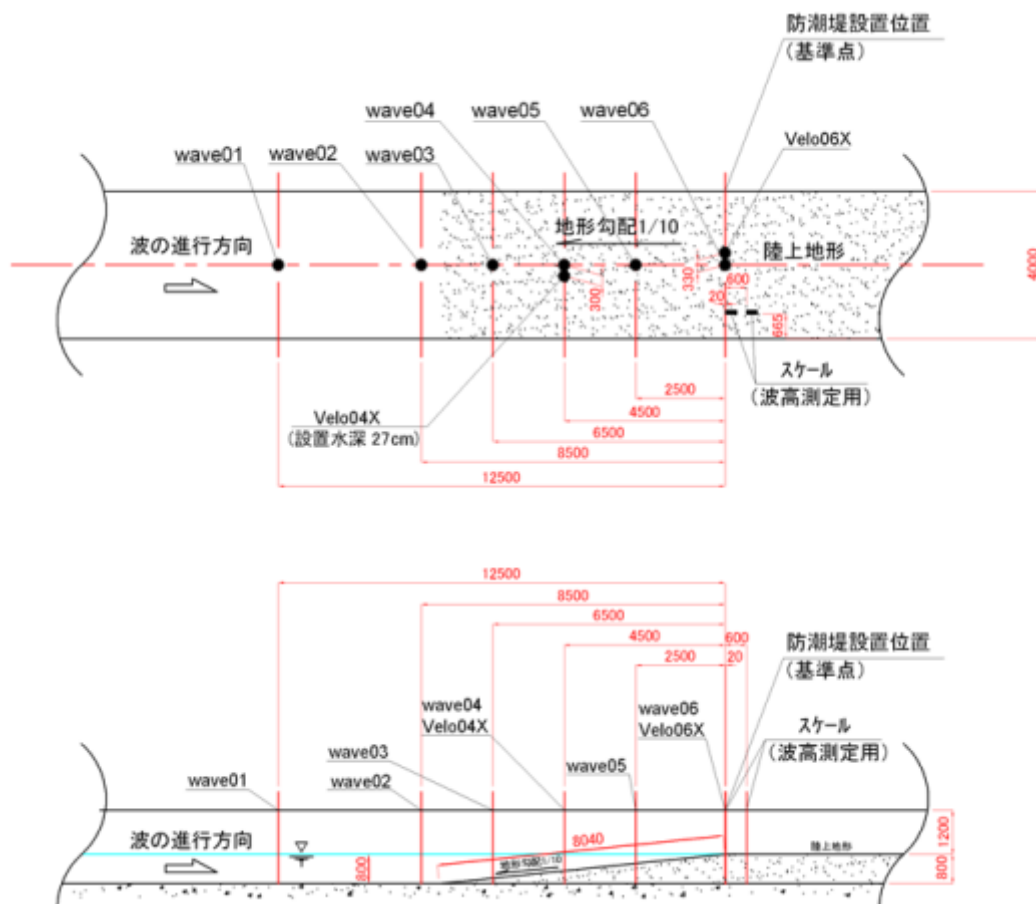


図 2-5-1 計測機器設置状況

2-6 解析結果と試験結果の比較

(1) 孤立波（波高 7cm, 15cm）

図 2-6-1～図 2-6-4 は、汀線からの距離 X_m (図 2-5-1 参照)に対応する孤立波 7cm,15cm における水位の時系列波形図を示し、解析結果を黒線と試験結果を赤線で示した図である。

また解析結果として、2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 F の図 F- 9～図 F- 16 に示す。

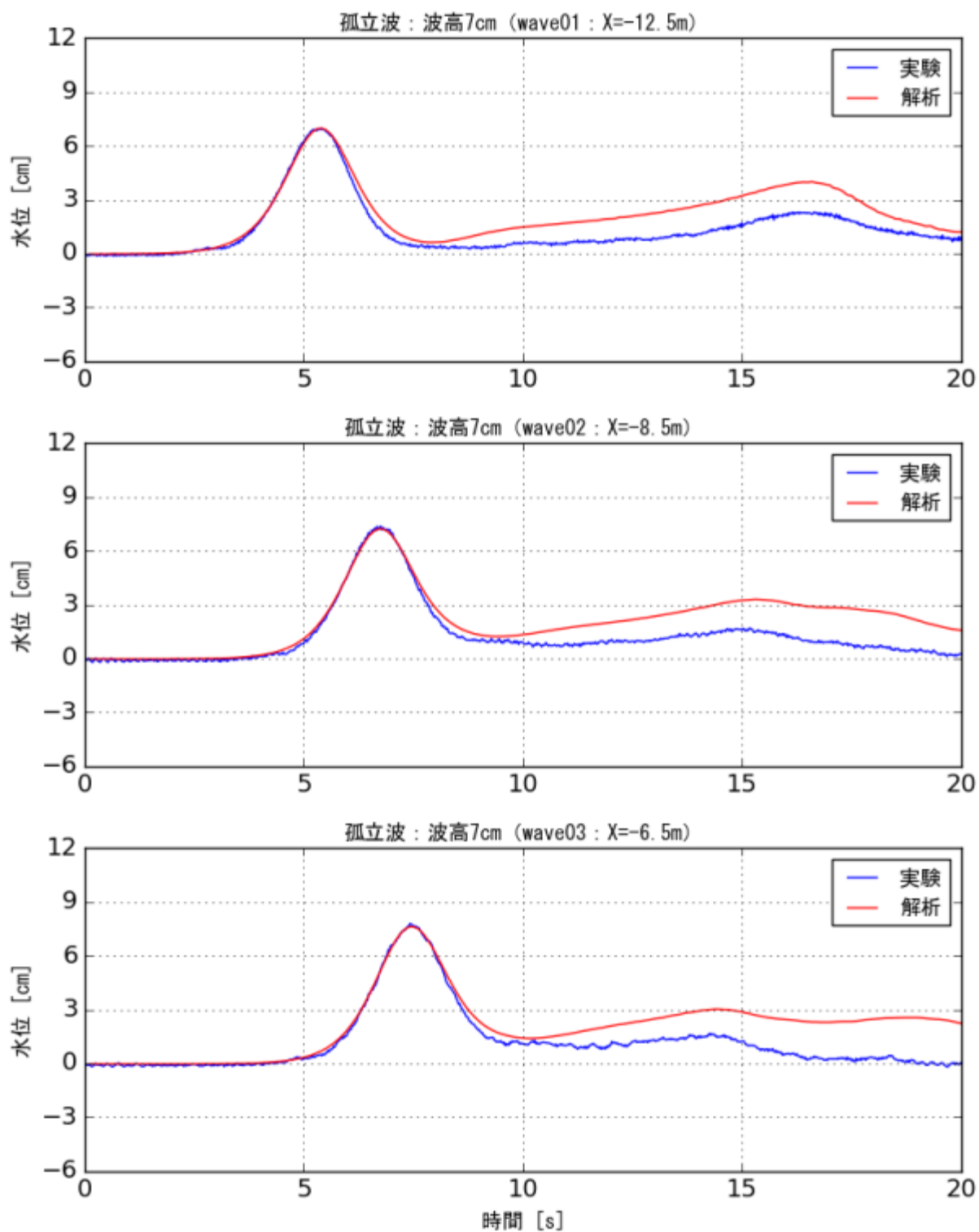


图 2-6-1 時系列波形图【孤立波：波高 7cm】

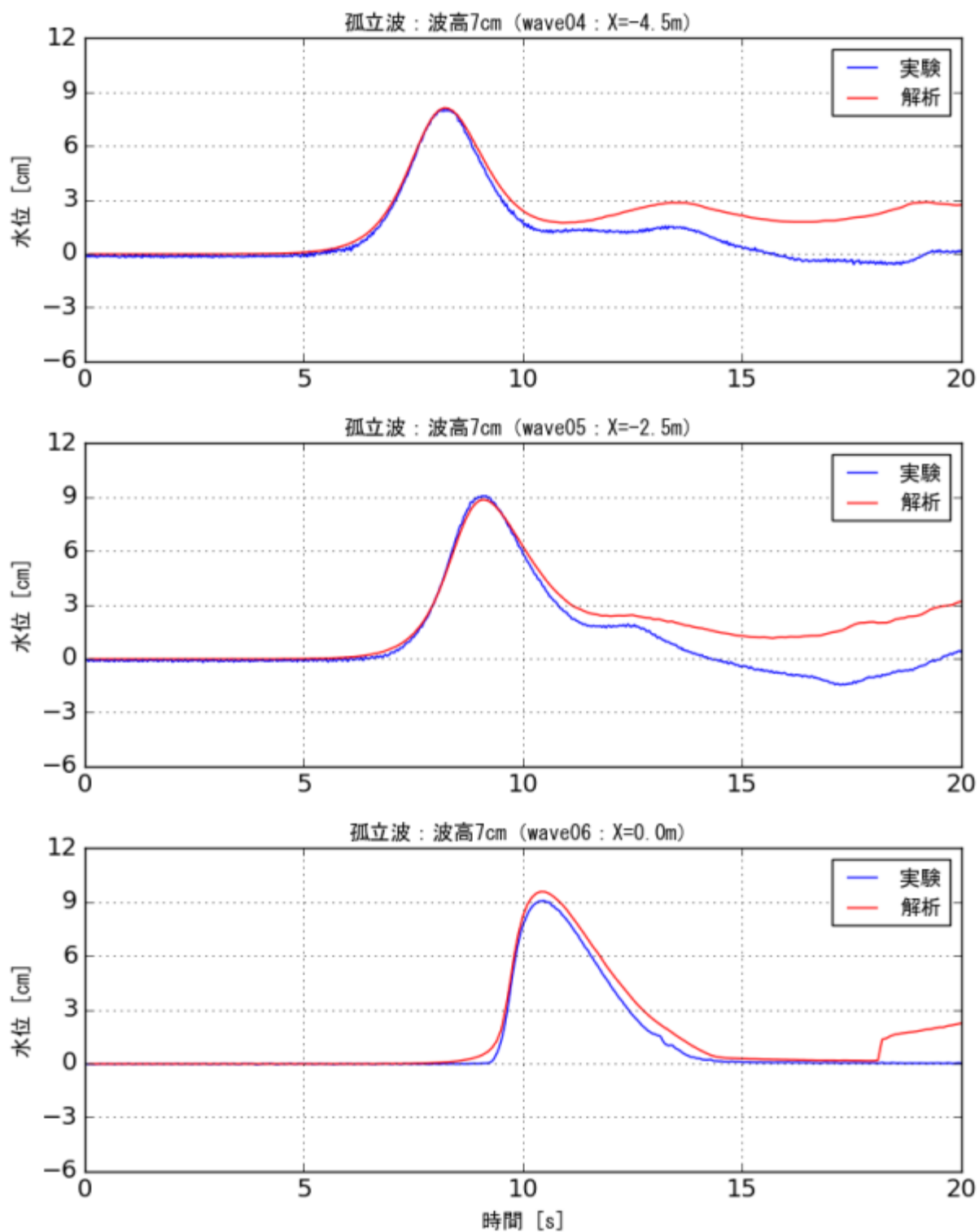


图 2-6-2 時系列波形图【孤立波：波高 7cm】

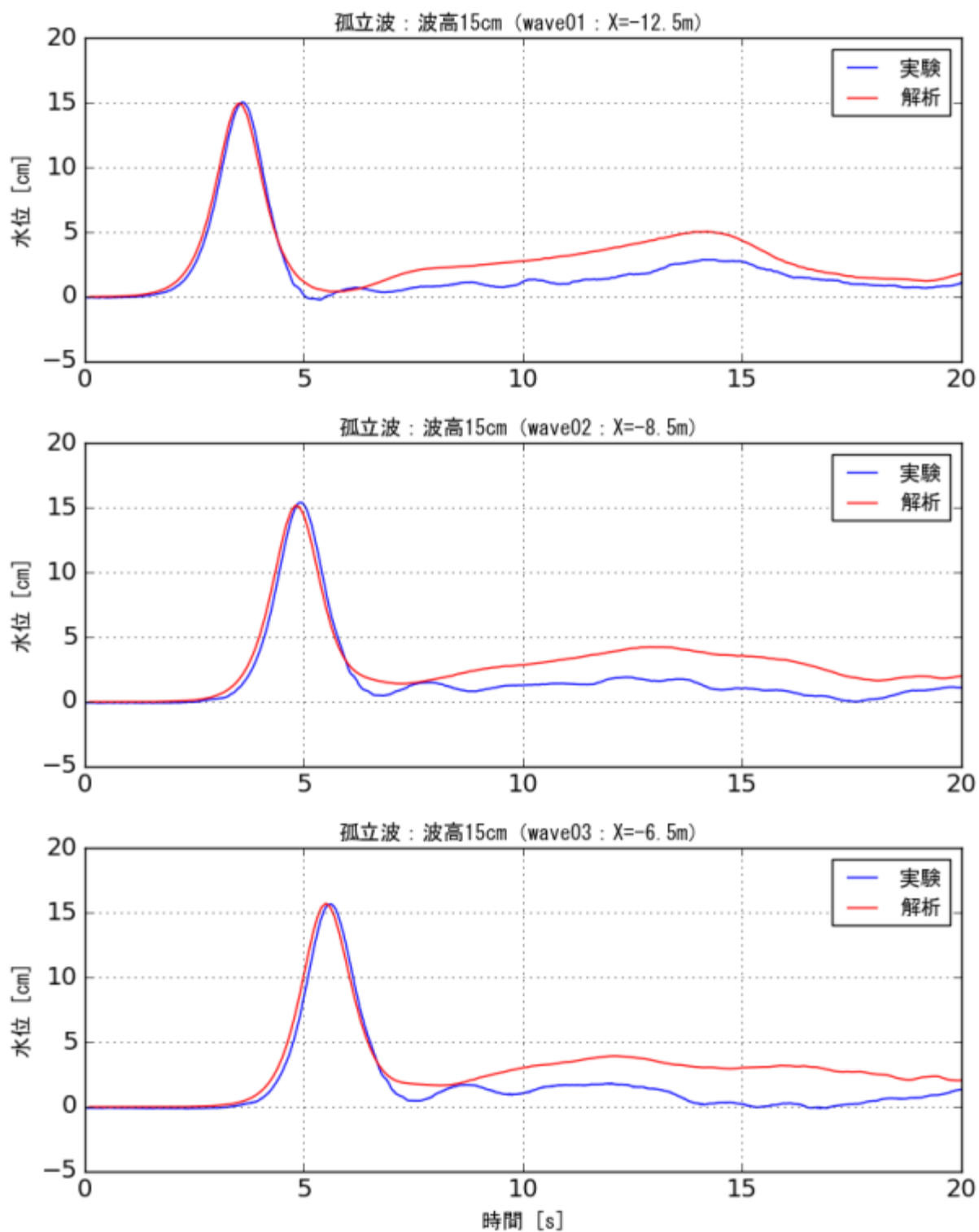


图 2-6-3 時系列波形图【孤立波：波高 15cm】

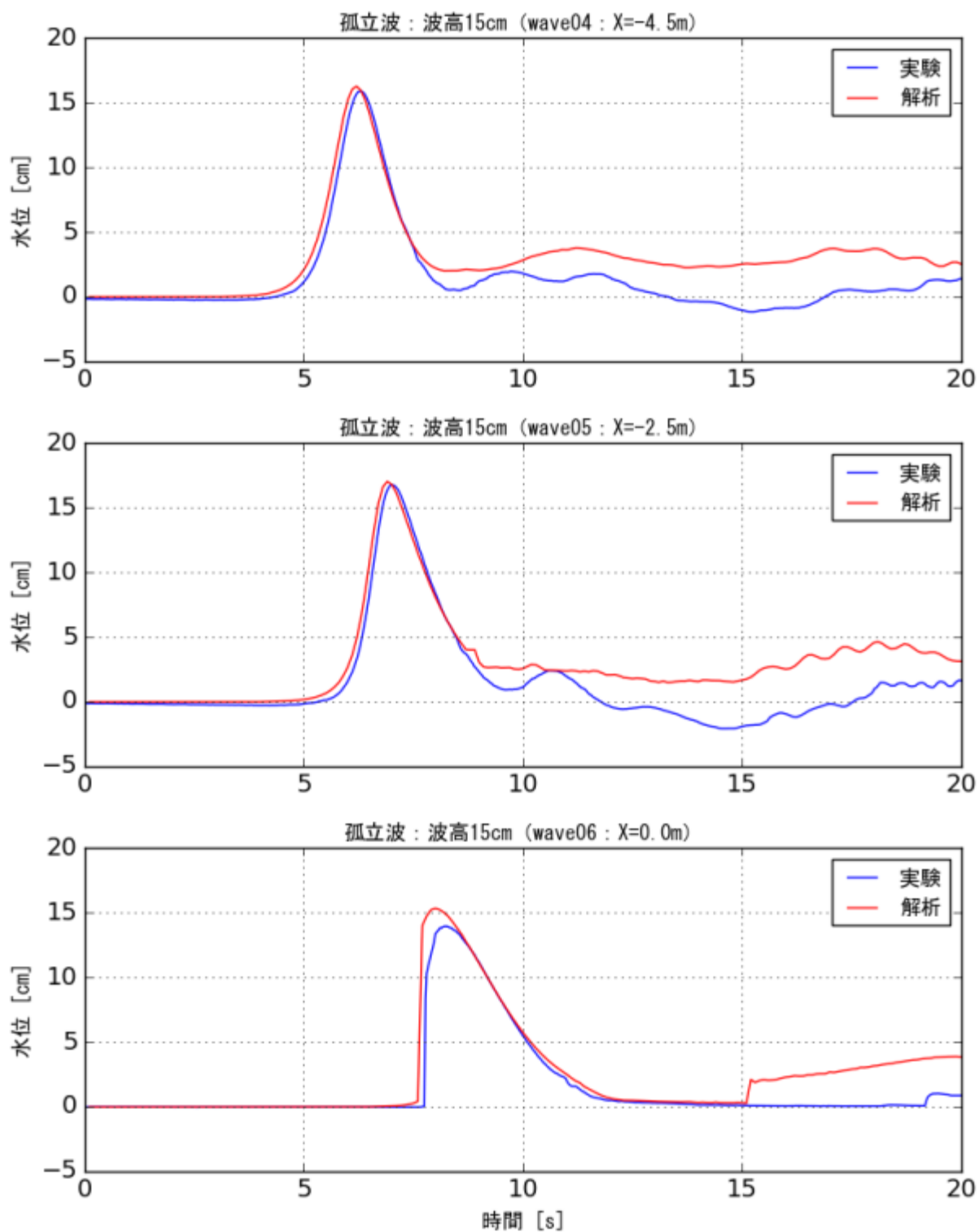


图 2-6-4 時系列波形图【孤立波：波高 15cm】

(2) 越流波（越流深 1cm, 3cm）

表 2-6-1 は汀線からの距離（計測位置）に対応した越流波（越流深 1 cm）における水位及び流速の試験結果と計算結果を比較した表である。また、図 2-6-5 は越流波（越流深 1 cm）における水位の空間分布を示す。

同様に、表 2-6-2 は汀線からの距離（計測位置）に対応した越流波（越流深 3 cm）における水位及び流速の試験結果と計算結果を比較した表である。また、図 2-6-6 は越流波（越流深 3 cm）における水位の空間分布を示す。

また解析結果として、2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 F の図 F- 25～図 F- 32 に示す。

表 2-6-1 水位および流速の比較【越流波：越流深 1cm】

	計測位置	試験結果	計算結果
水位	-12.5m	16.3cm	17.3cm
	-8.5m	16.7cm	17.3cm
	-6.5m	16.5cm	17.4cm
	-4.5m	16.1cm	17.5cm
	-2.5m	16.4cm	17.2cm
	0.0m	15.6cm	16.8cm
流速	-4.5m	0.0cm/s	1.5cm/s
	0.0m	15.7cm/s	40.0cm/s

試験：case10 の最大水位，計算：25.0 秒の水位および流速

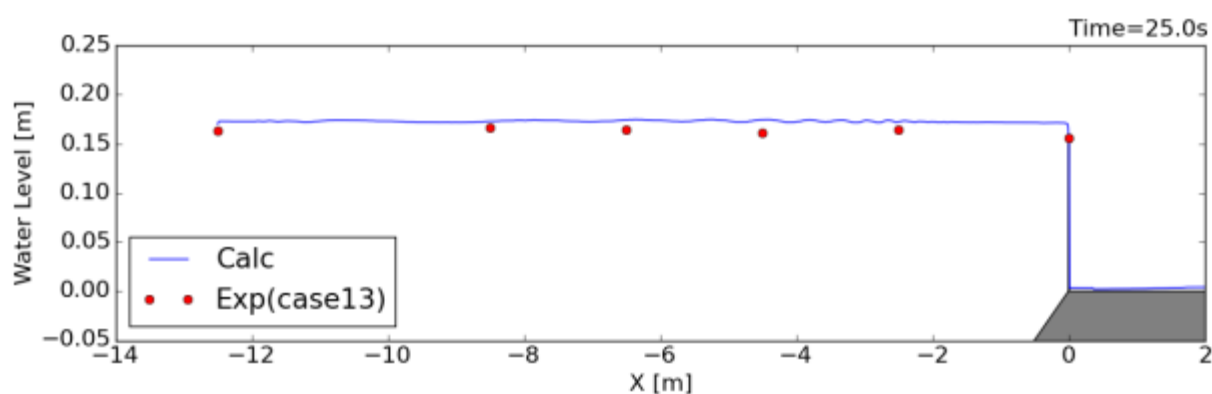


図 2-6-5 水位分布【越流波：越流深 1cm】

試験：case10 の最大水位，計算：25.0 秒の水位

表 2-6-2 水位および流速の比較【越流波：越流深 3cm】

	計測位置	試験結果	計算結果
水位	-12.5m	18.6cm	17.7cm
	-8.5m	19.0cm	17.8cm
	-6.5m	18.7cm	17.9cm
	-4.5m	18.4cm	18.0cm
	-2.5m	18.6cm	18.0cm
	0.0m	17.7cm	17.5cm
流速	-4.5m	7.4cm/s	2.7cm/s
	0.0m	46.7cm/s	44.4cm/s

試験：case13 の最大水位，計算：25.0 秒の水位および流速

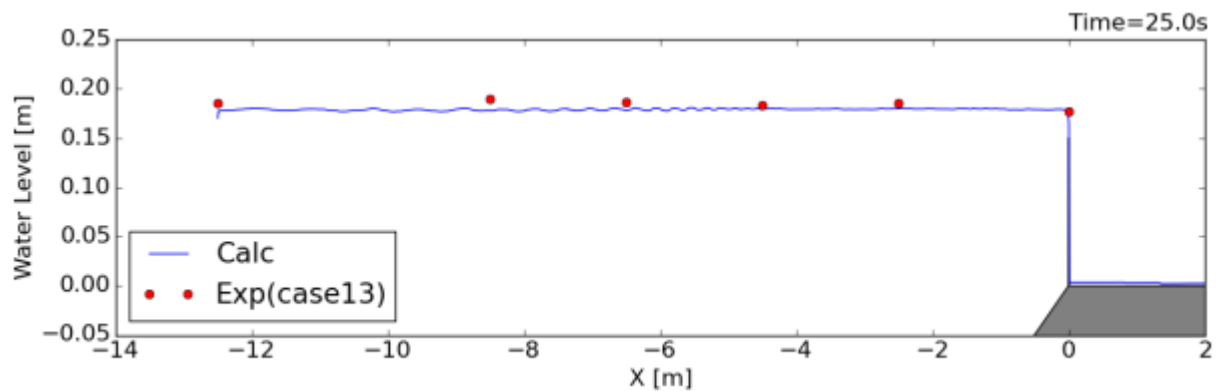


図 2-6-6 水位分布【越流波：越流深 3cm】

試験：case13 の最大水位，計算：25.0 秒の水位

(3) 長 波

図 2-6-7 及び図 2-6-8 は、汀線からの距離 X(m)(図 2-5-1 参照)に対応する長波（波高 14cm，周期 5 秒）における水位の時系列波形図を示し，解析結果を黒線と試験結果を赤線で示した図である。

また解析結果として，2 次元及び 3 次元流速スナップショットと 2 次元及び 3 次元圧力スナップショットを付録 F の図 F- 33～図 F- 40 に示す。

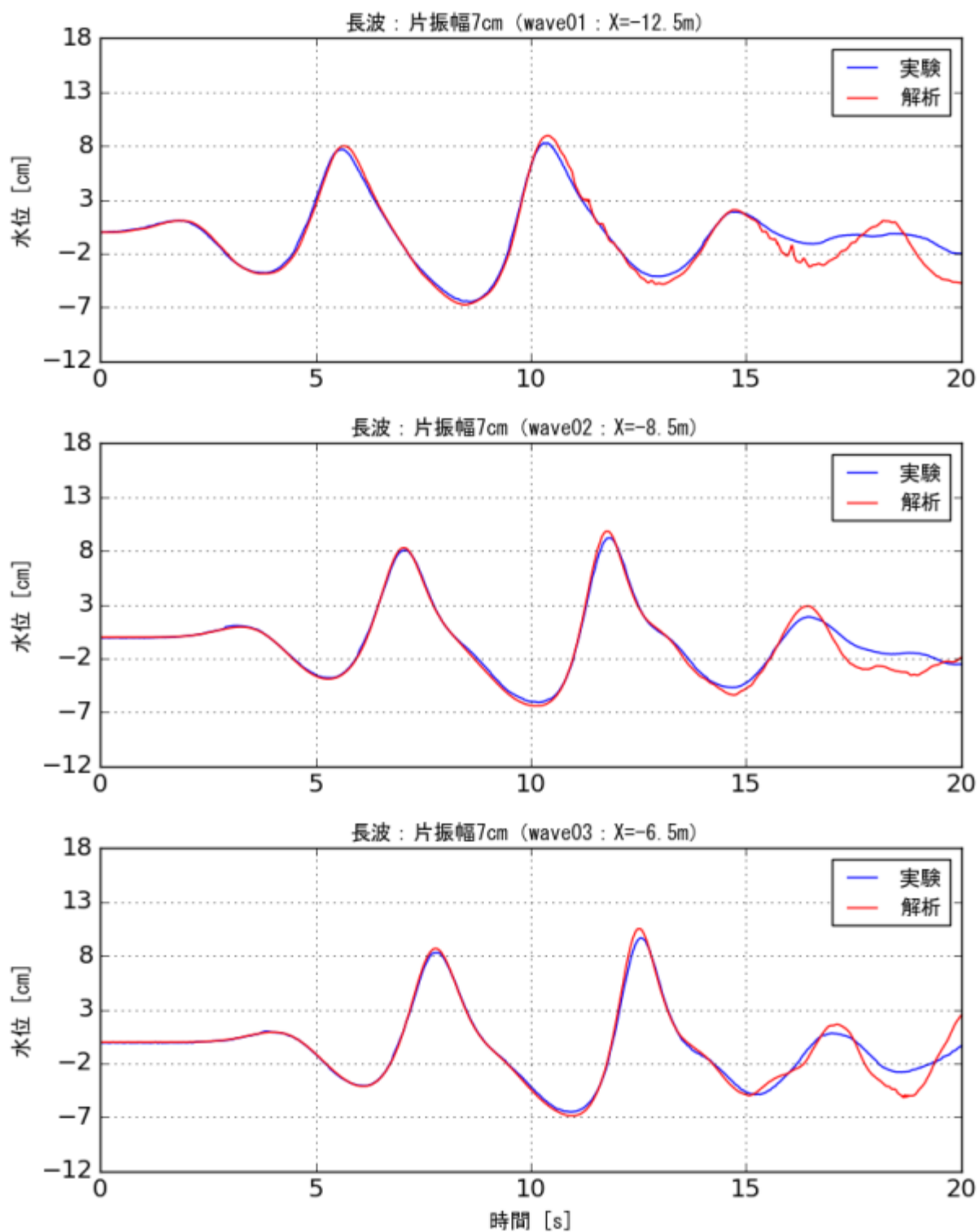


図 2-6-7 時系列波形図【長波：波高 14cm, 周期 5 秒】

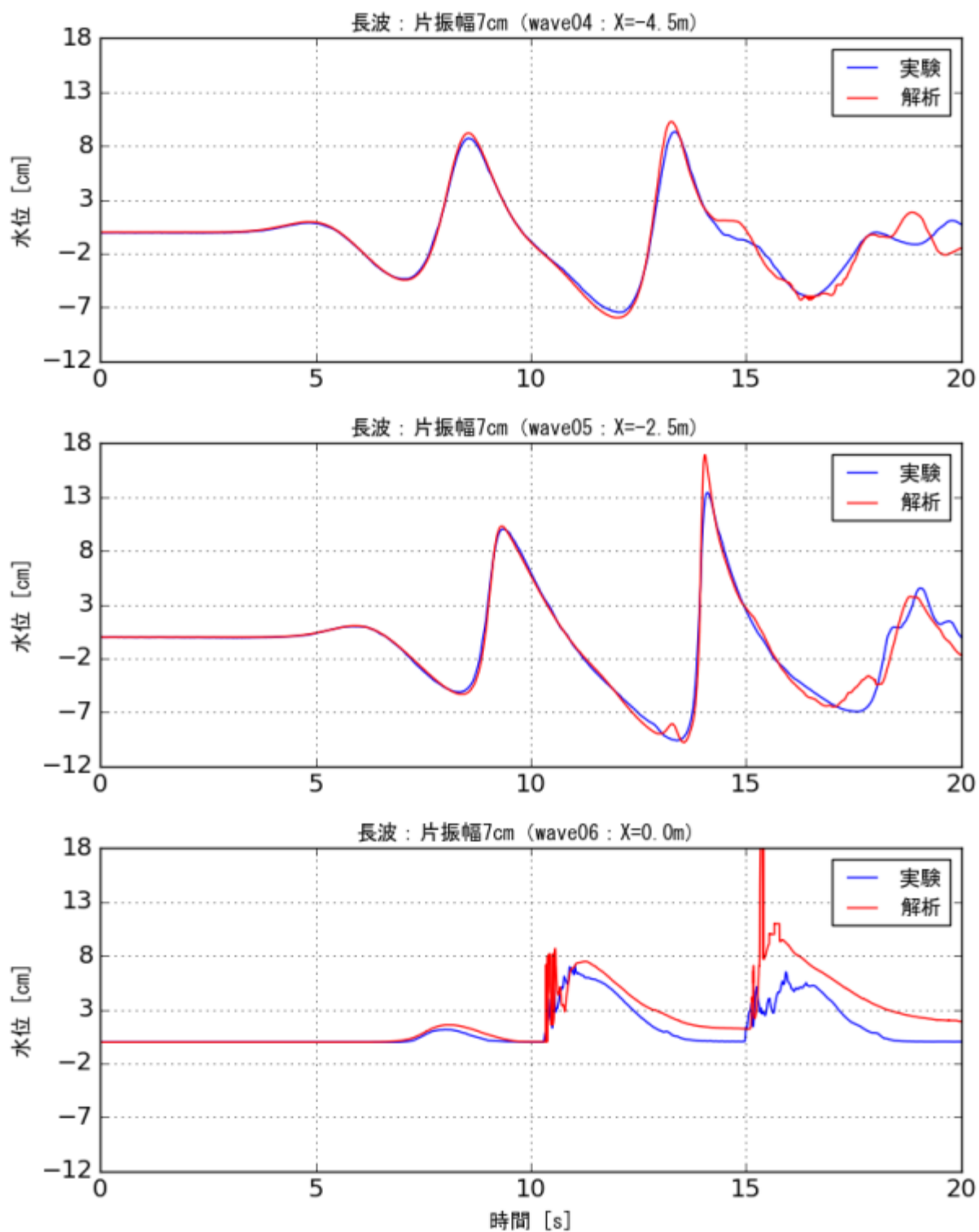


図 2-6-8 時系列波形図【長波：波高 14cm, 周期 5 秒】

2-7 通過波検定の検討結果のまとめ

水位時系列波形の数値計算結果と水理模型試験結果との比較について、沖合から砕波帯前面にかけての計算水位は孤立波・長波ともに水理模型試験における観測水位を高い精度で再現しており、入力波の精度としては十分であると考えられる。砕波後の計算水位と観測水位には差異があり、砕波後の流体の挙動は完全には再現されないことが確認できる。

第3章 津波波力特性の把握

3-1 試験の概要

津波波力を受ける防潮堤を対象とする水理試験を実施し、防潮堤（堤体模型）に作用する基本的な津波波力特性に関する試験データを取得する。試験の概要を図 3-1-1 に示す。地形は単純勾配（勾配 1/10）とする。

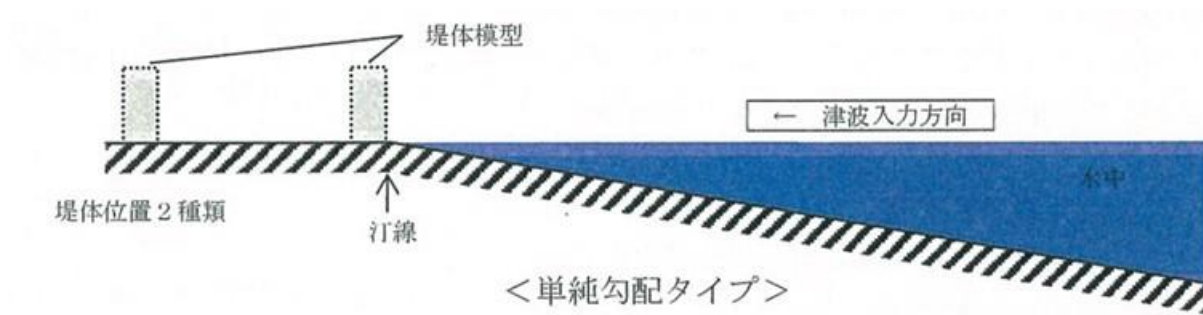


図-3.1.1 試験の概要図

3-2 試験条件

(1) 試験水槽

試験に用いた水槽は、長さ 45m、幅 4.0m、水深 0.8m の津波再現水槽である。図 3-2-1 に試験水槽の概要を示す。

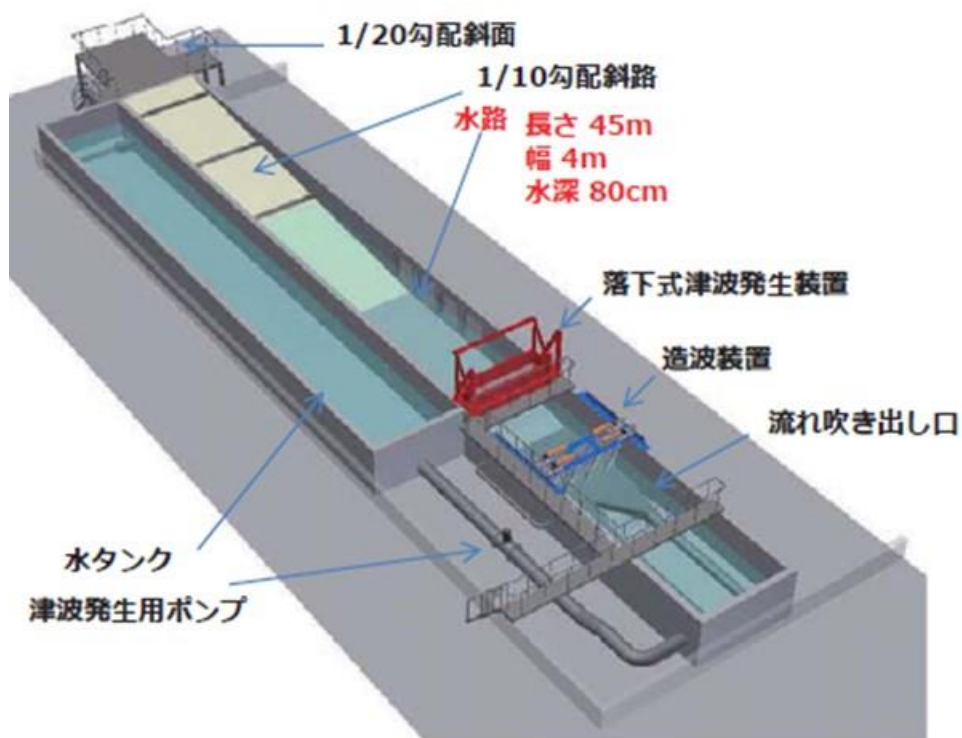


図 3-2-1 試験水槽（津波再現水槽）

(2) 試験ケース・試験条件

①孤立波試験ケース（波高：15cm）

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case2-1	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case2-2			2回目
Case2-3			3回目
Case2-10		②クランクあり	1回目
Case2-11			2回目
Case2-12			3回目
Case2-19	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case2-20			2回目
Case2-21			3回目
Case2-28		②クランクあり	1回目
Case2-29			2回目
Case2-30			3回目

※実験条件	
孤立波	
サンプリング周波数1000Hz	
サンプリング時間10秒	
入力津波	
0.153m	

②長波試験ケース（片振幅：7cm）

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case2-4	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case2-5			2回目
Case2-6			3回目
Case2-13		②クランクあり	1回目
Case2-14			2回目
Case2-15			3回目
Case2-22	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case2-23			2回目
Case2-24			3回目
Case2-31		②クランクあり	1回目
Case2-32			2回目
Case2-33			3回目

※実験条件	
長波	
サンプリング周波数1000Hz	
サンプリング時間10秒	
片振幅	
0.0707m	

③越流波試験ケース（越流水深：3cm）

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case2-7	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case2-8			2回目
Case2-9			3回目
Case2-16		②クランクあり	1回目
Case2-17			2回目
Case2-18			3回目
Case2-25	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case2-26			2回目
Case2-27			3回目
Case2-34		②クランクあり	1回目
Case2-35			2回目
Case2-36			3回目

※実験条件	
潮流津波	
サンプリング周波数100Hz	
サンプリング時間75秒	
流量	
防潮堤が汀線0cmのとき	
0.096m ³ /s	
防潮堤が汀線-60cmのとき	
0.1m ³ /s	



堤防位置①・平面形状①



堤防位置①・平面形状②



堤防位置②・平面形状①



堤防位置②・平面形状②

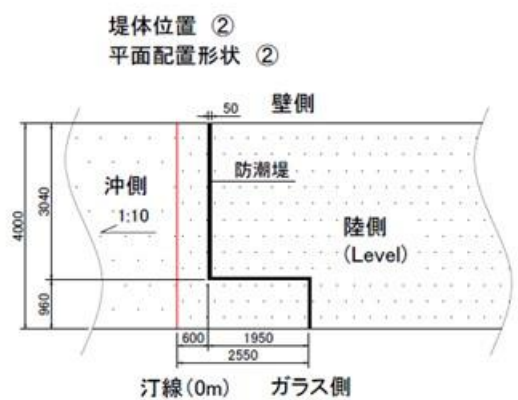
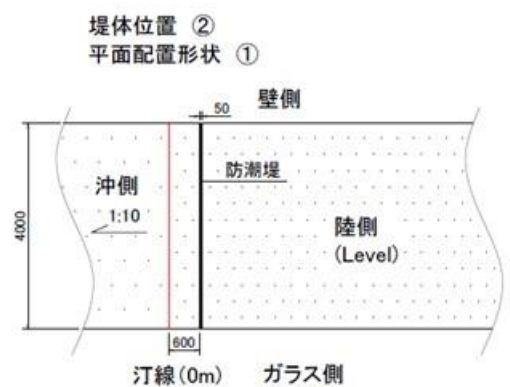
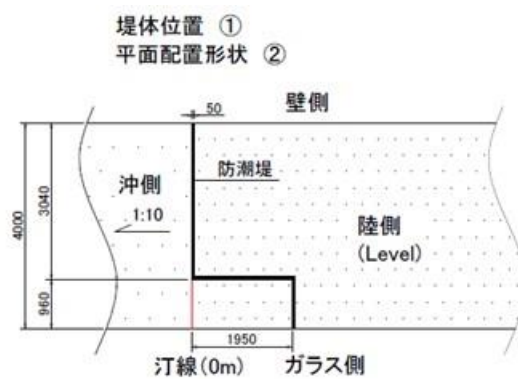
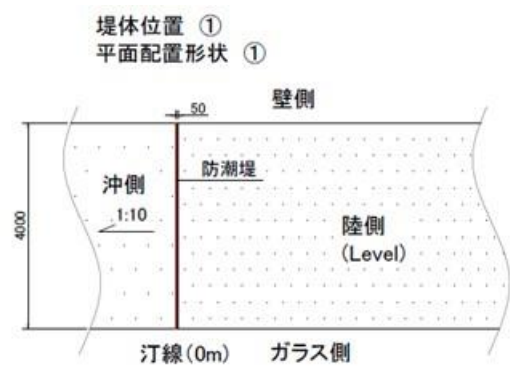


図 3-2-2 堤防設置位置・平面形状一覧

(3) 計測機器設置位置

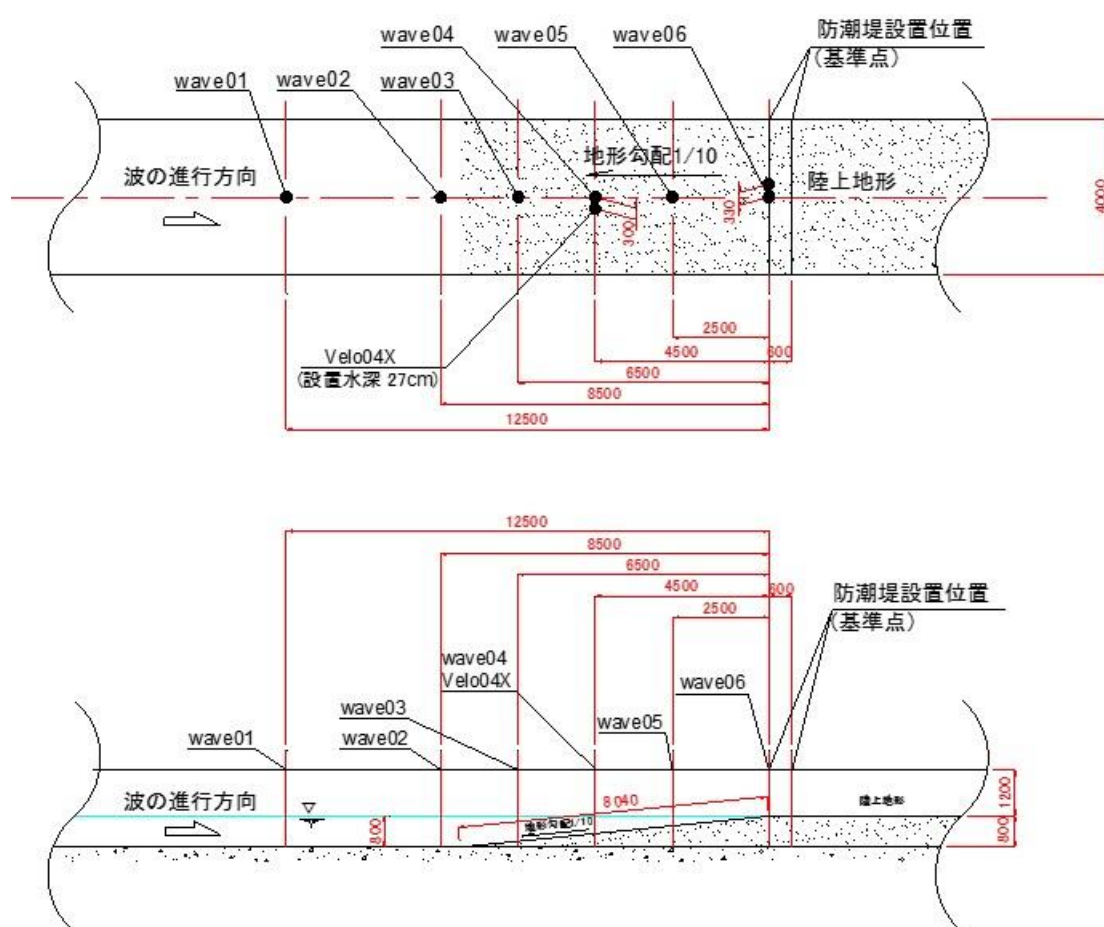


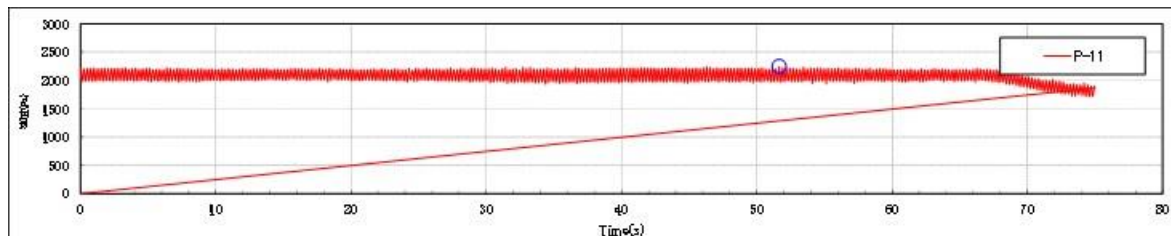
図 3-2-3 計測機器・設置状況

3-3 試験結果

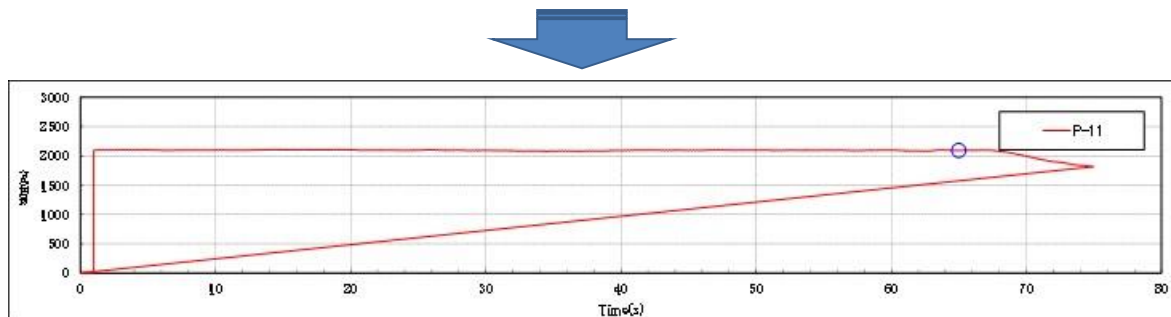
試験で得られた孤立波、長波、越流波それぞれの鉛直方向の波圧分布図を図 3-3-1～図 3-3-3に示す. 各図の波圧データは最大値であり3回の試行の平均を用いている. なお、波圧データはノイズと思われる振動成分の除去と、波圧計の空気中から水中に移行する際に発生するドリフト成分を除くため、以下の処理を行った.

① 時系列データの移動平均 (スムージング)

(データ処理の一例)



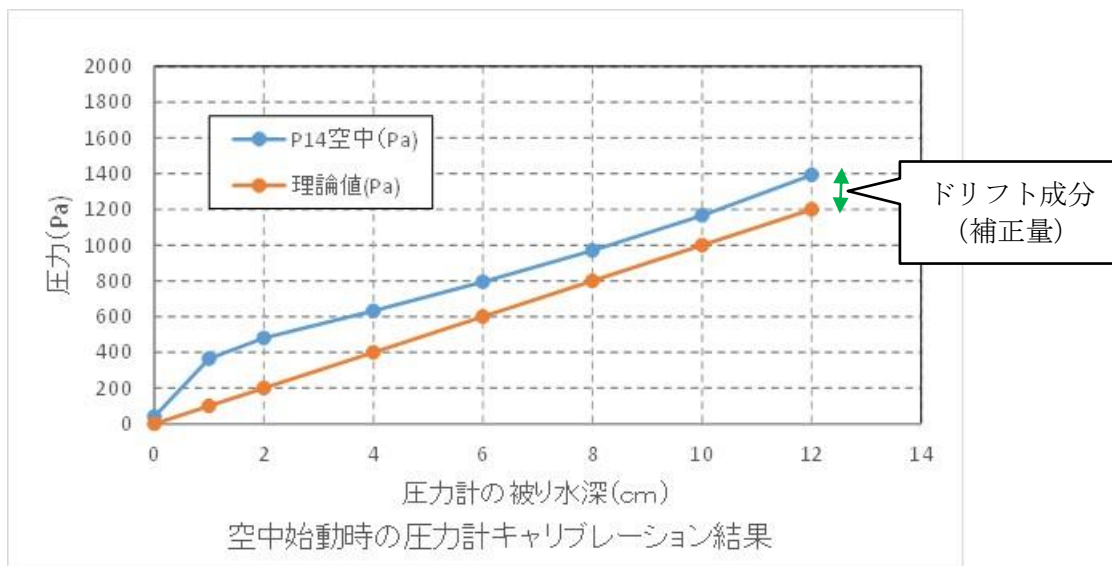
【処理前の時系列データ】



【移動平均処理後の時系列データ】

② 波圧計固有のドリフト成分の除去 (1台ずつのキャリブレーションによる)

(データ処理の一例)



また、孤立波、長波の波圧時系列データの一例を図 3-3-4 および図 3-3-5 に、孤立波、長波、越流波の代表的な流況を写真 3-3-1～3-3-3 に示す.

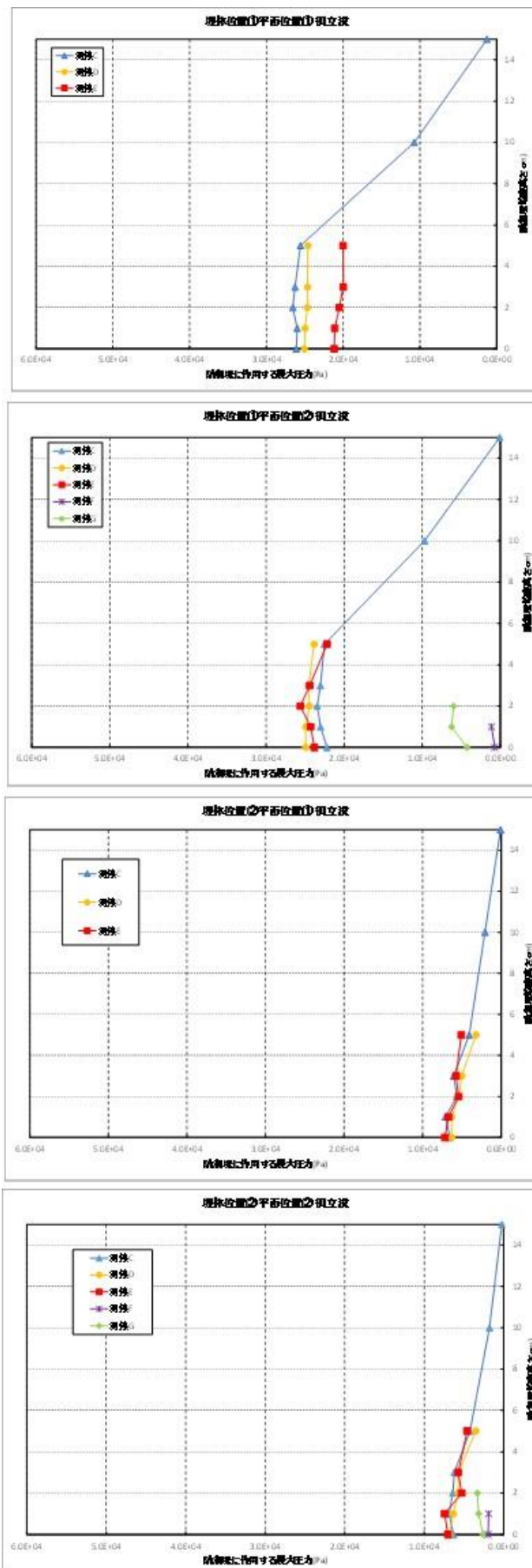


図 3-3-1 波圧分布比較図（孤立波）

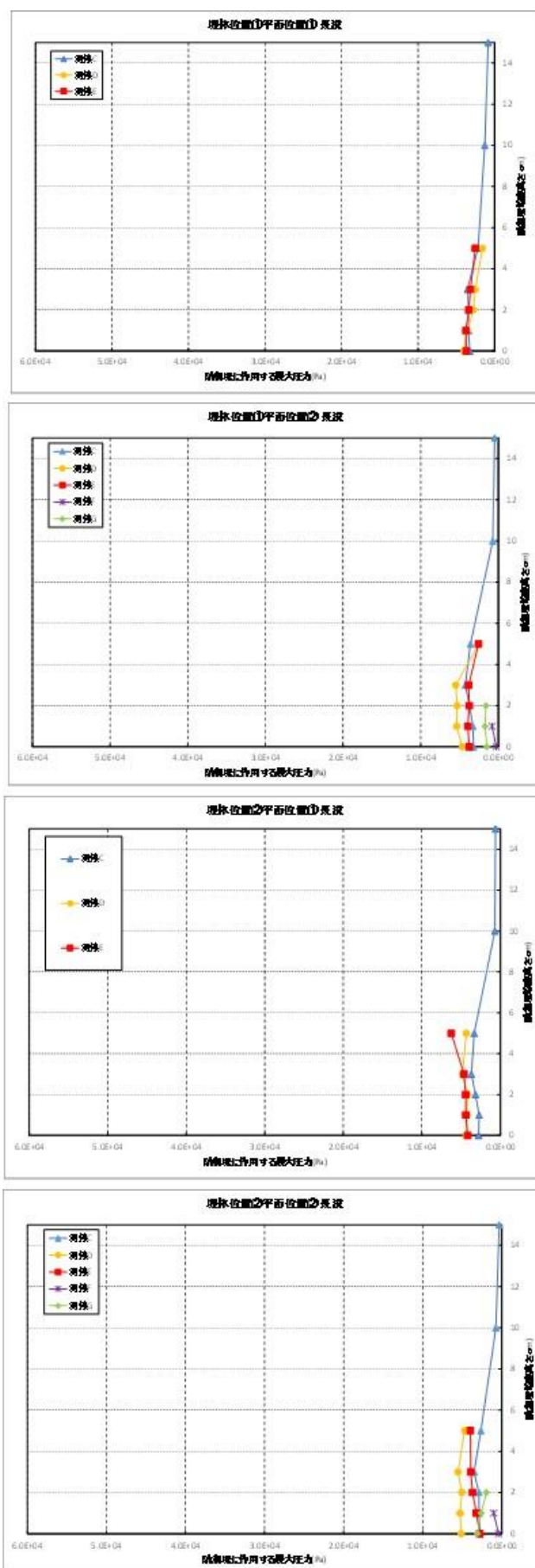


図 3-3-2 波圧分布比較図（長波）

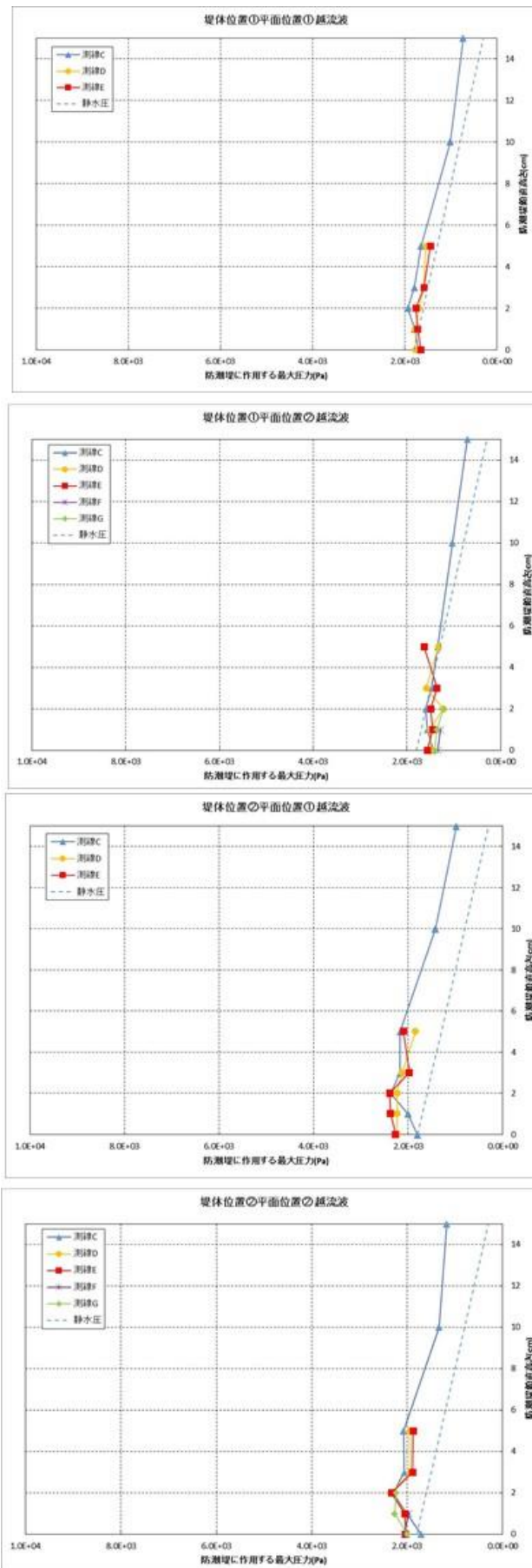
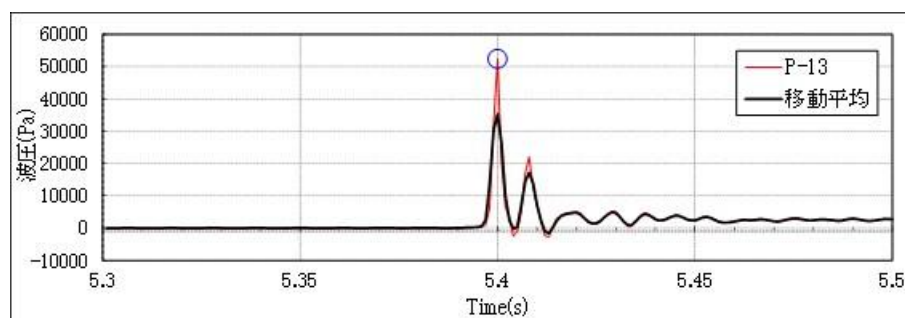
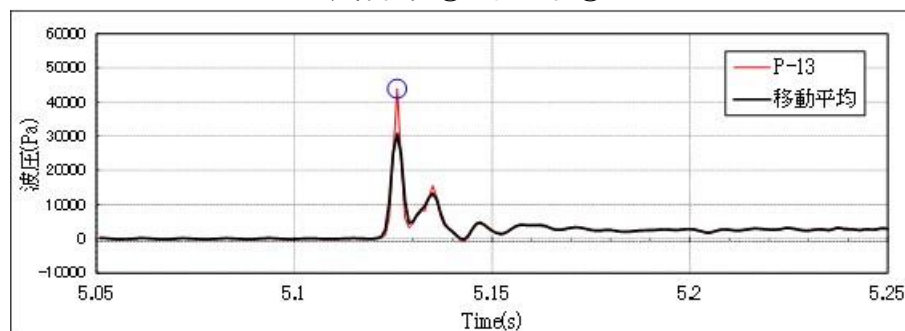


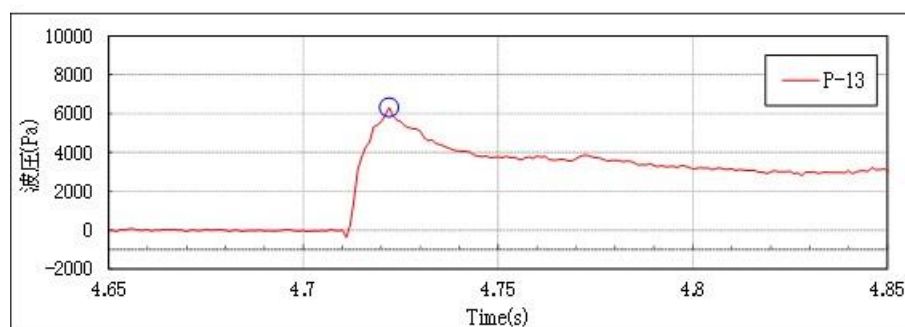
図 3-3-3 波圧分布比較図（越流波）



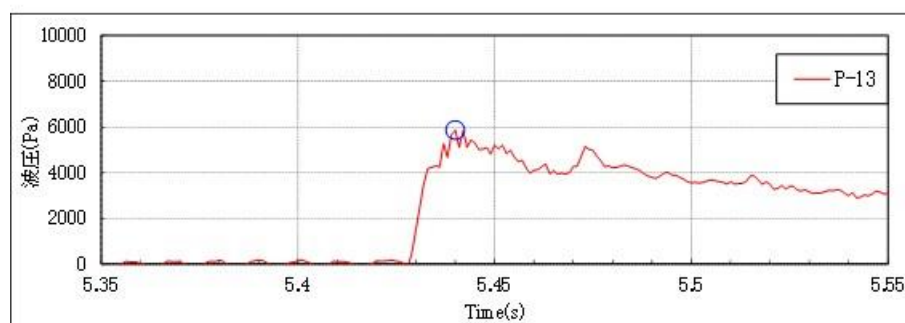
堤体位置①平面形状①



堤体位置①平面形状②

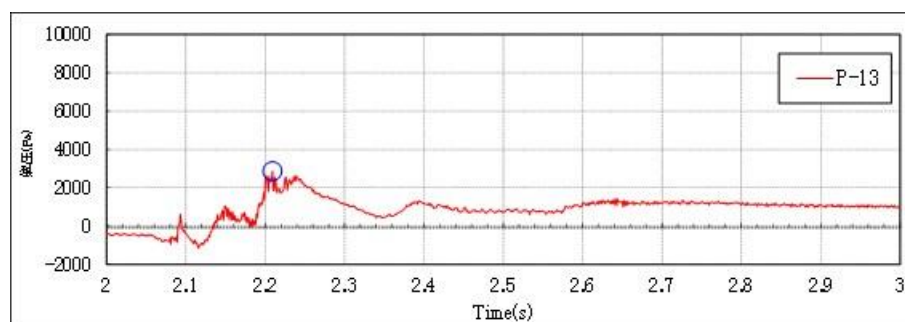


堤体位置②平面形状①

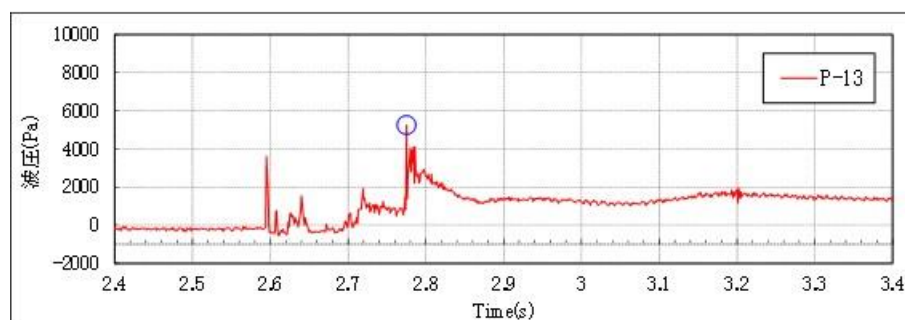


堤体位置②平面形状②

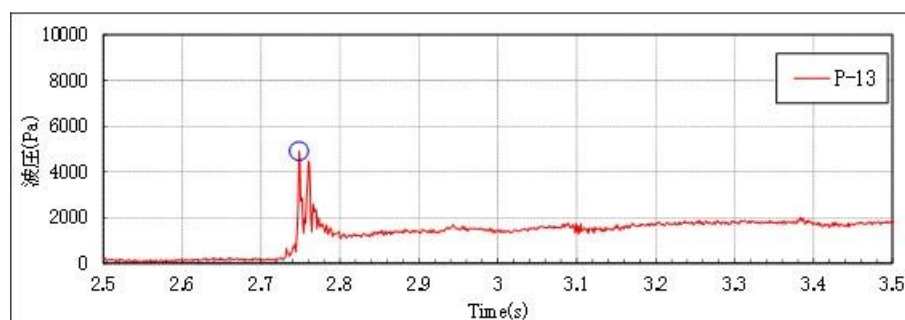
図 3-3-4 波圧時系列データの一例（孤立波，測点 P-13）



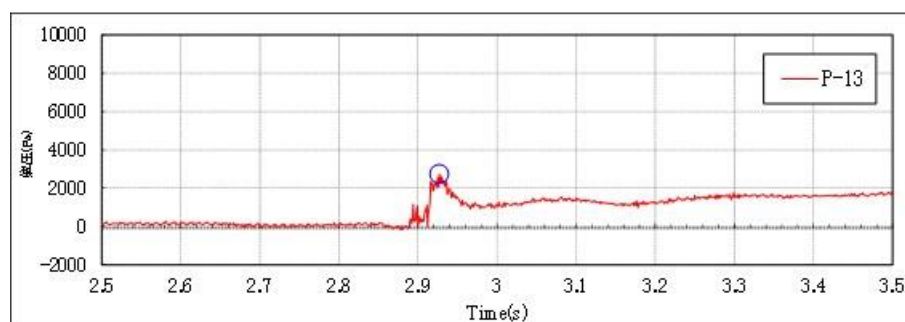
堤体位置①平面形状①



堤体位置①平面形状②

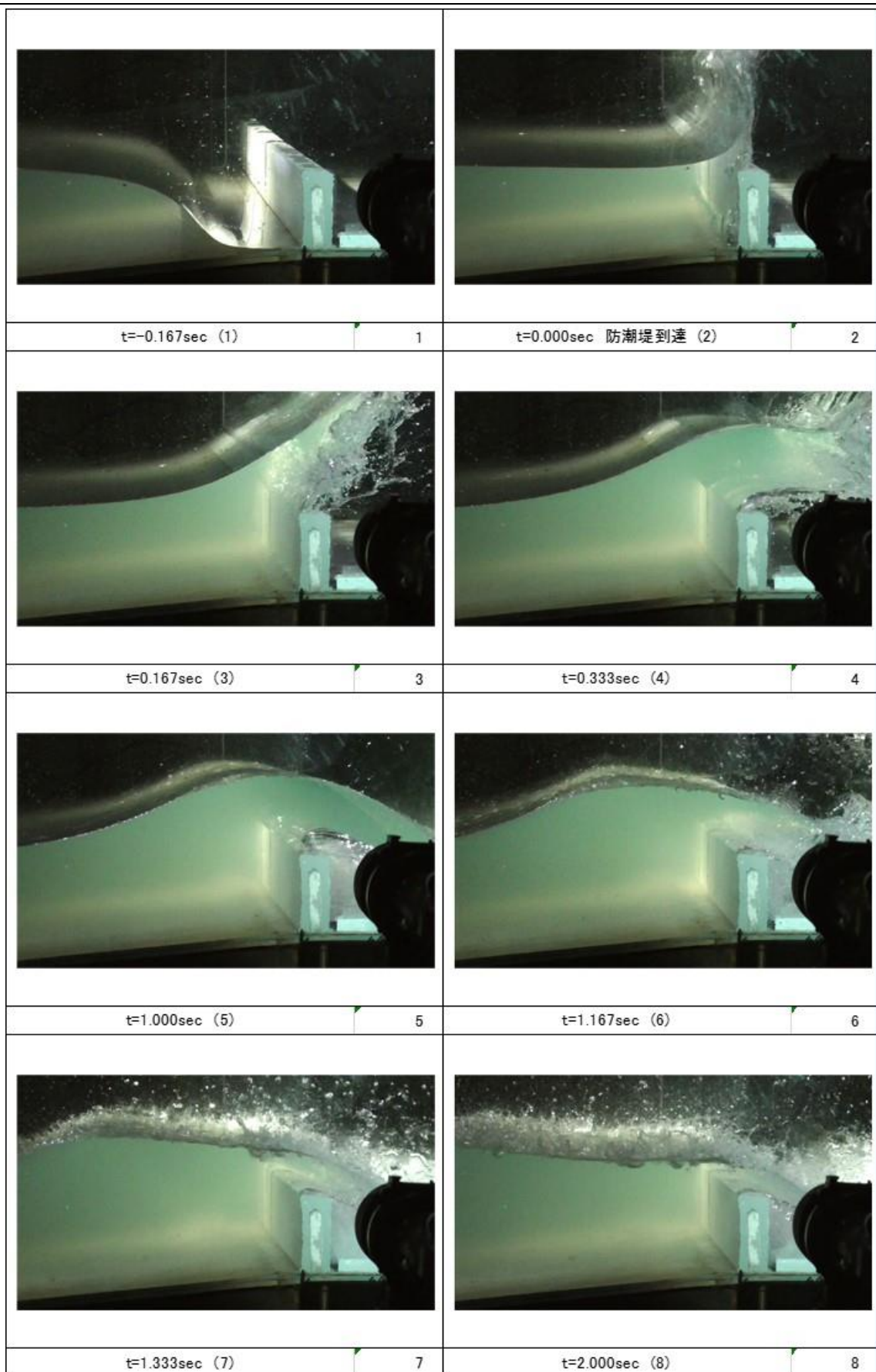


堤体位置②平面形状①



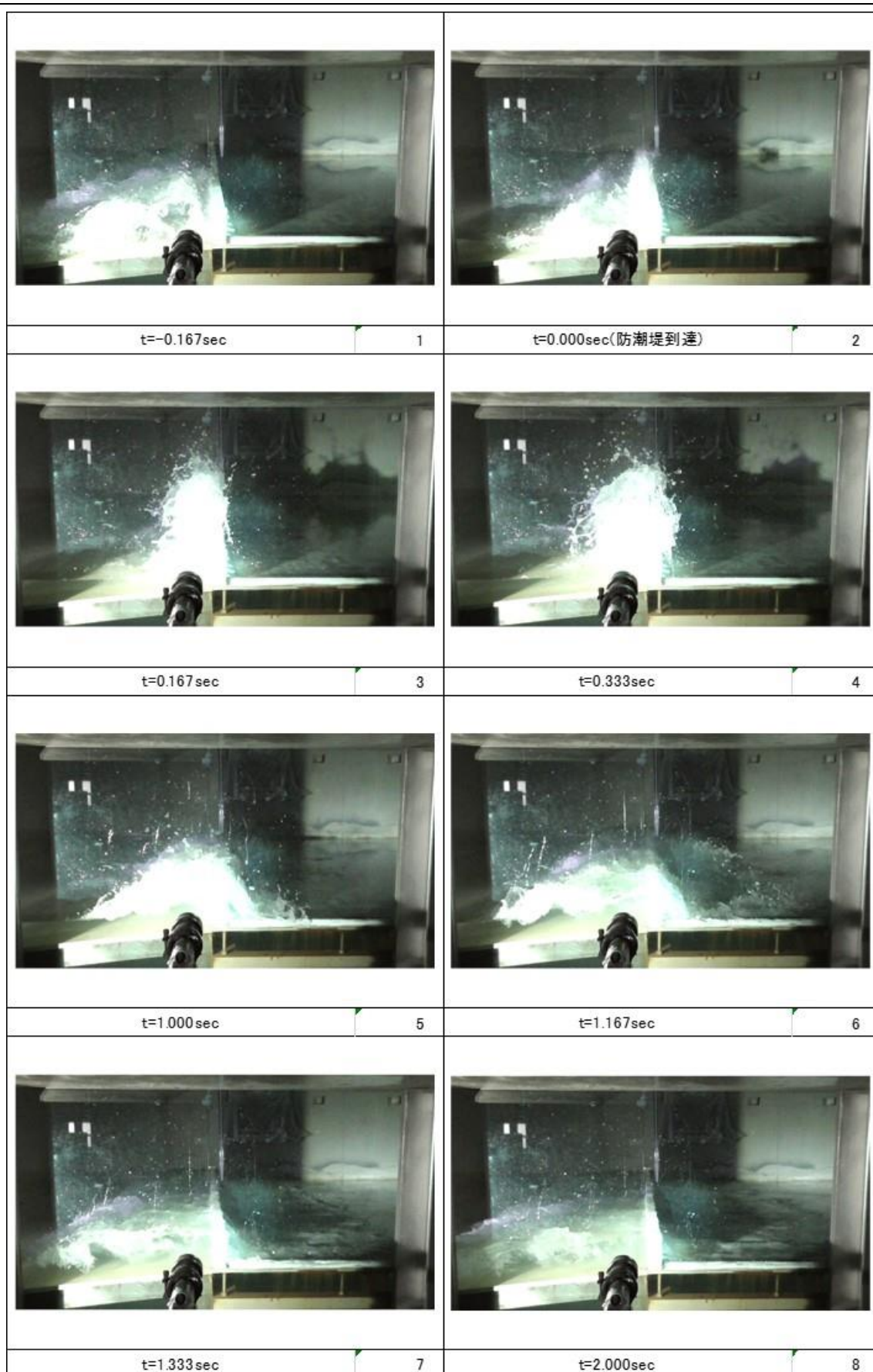
堤体位置②平面形状②

図 3-3-5 波圧時系列データの一部（長波，測点 P-13）



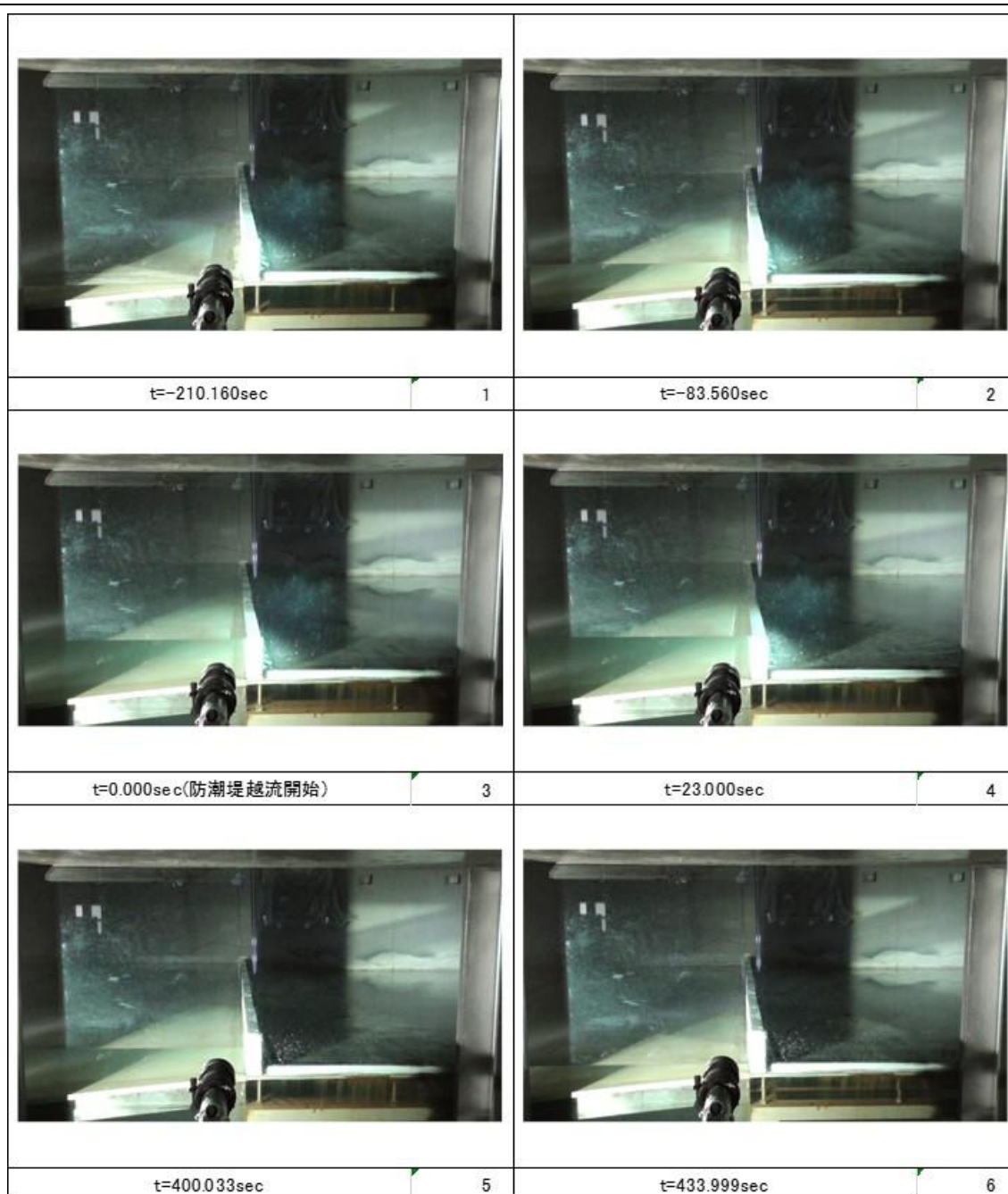
※波が防潮堤に到達した時間を0.000secとして表記

写真 3-3-1 ケース 2-1 流況 (孤立波 防潮堤 0 cm)



※波が防潮堤に到達した時間を0.000secとして表記

写真 3-3-2 ケース 2-6 流況 (長波 防潮堤 0 cm)



※波が防潮堤に到達した時間を0.000secとして表記

写真 3-3-3 ケース 2-7 流況 (越流波 防潮堤 0 cm)

試験計測で得られた波圧の特徴をまとめると、以下のようなものである。

- ・孤立波の条件で、防潮堤の位置が汀線 0cm と -60cm では波圧に大きな差異が生じる。これは汀線 0cm では碎波する瞬間の前面波形勾配がほぼ垂直に立った状態で防潮堤に衝突するため、衝撃的な圧力が作用しているのに対し、汀線 -60cm では、碎波後に防潮堤に衝突することに起因すると考えられる。

汀線 0cm では、碎波する瞬間の前面波形勾配がほぼ垂直に立った状態で防潮堤に衝突する際、波形と防潮堤の間に空気が閉じ込められ、閉じ込められた空気が衝撃的な圧力となって防潮壁に作用している（衝撃碎波圧；衝突時の動水圧に対し、数倍～十数倍に達するといわれている）と推定される。

このことは、波圧の時系列データで汀線 0cm での最大値付近の波形が短時間で急激に増加していることから、衝撃的な成分であることが窺われる（波圧の値も汀線 -60cm に比べ、1 オーダー異なる）。

- ・長波、越流波に関しては、堤体位置およびその平面形状の違いによる、波圧分布の顕著な傾向は見られないようである。

これらの波力特性に関する試験結果から、防潮堤の構造に対してもっとも厳しい条件となる入力津波は、防潮堤位置で巻き波の碎波点となり、衝撃碎波圧が作用する（今回の孤立波の条件の）ような波浪条件と考えられる。

なお、孤立波の条件での波圧時系列データには、ピーク波圧の後になんかなり大きな変動が生じているケースが見られた（図 3-3-6）が、これは防潮堤に衝突した入射波が上方に跳ね上がり、それが落下して水面や防潮堤背後に打ち込んだ際の衝撃圧が水塊を介して防潮堤前面の波圧計に記録されたと推定される（写真 3-3-4）。

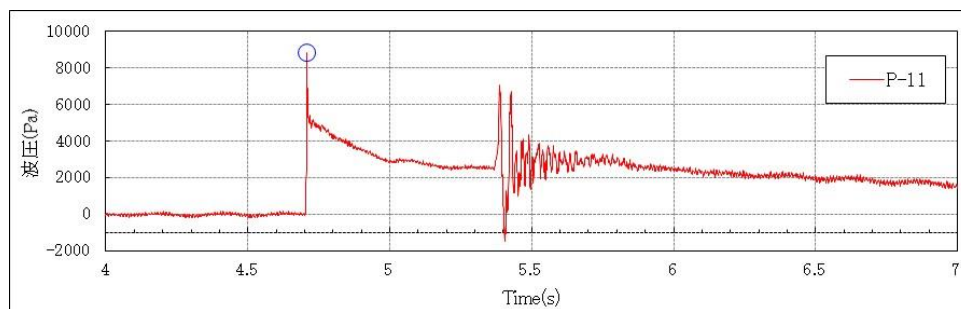


図 3-3-6 波圧時系列データの一例（孤立波，防潮堤-60 cm）

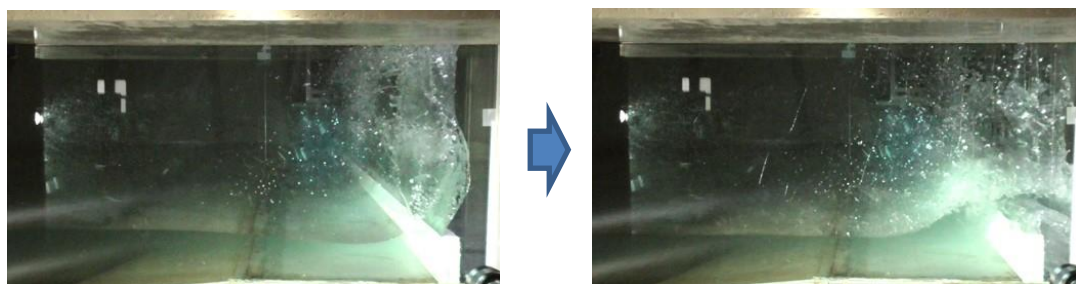


写真 3-3-4 流況の一例（孤立波，防潮堤-60 cm）

3-4 シミュレーションの概要

津波波力水理試験において実施した各試験条件を対象とするシミュレーション解析を行う。解析コードは、京都大学防災研究所で開発された完全3次元流体解析モデルを利用する。水理試験で計測された波高および流速、動画撮影された津波波形、構造物前面の波圧等を解析結果と比較することにより、それらの整合性および解析手法の適用範囲を確認するとともに、解析手法および評価手法を提案する。また、汀線近傍における津波の変形および構造物の越流状況について、アニメーションによる可視化を行う。

3-5 解析条件

入力波3条件（孤立波，越流波，長波），堤体位置2条件（汀線0cm，汀線-60cm），堤体形状2条件（クランクの有無）の合計12ケースの解析を実施した。波圧検定解析の解析ケースを表3-5-1に示す。

また、堤体前面に台形の障害物を配置した解析を1ケース実施し、障害物の有無が波力に与える影響を確認した。解析ケースを表3-5-2に示す（試験時の写真については、写真4-3-10 漂流物衝突試験流況（孤立波，防潮堤-60cm，小型船舶，障害物あり）を参照）。

表 3-5-1 シミュレーション解析ケース一覧

ケース名	入力波	堤体形状	堤体位置	解析時間
SW_flat_x0cm	孤立波	クランクなし	汀線 0cm	10s
SW_flat_x60cm	孤立波	クランクなし	汀線-60cm	10s
UF_flat_x0cm	越流波	クランクなし	汀線 0cm	150s
UF_flat_x60cm	越流波	クランクなし	汀線-60cm	150s
RW_flat_x0cm	長波	クランクなし	汀線 0cm	15s
RW_flat_x60cm	長波	クランクなし	汀線-60cm	15s
SW_clank_x0cm	孤立波	クランクあり	汀線 0cm	10s
SW_clank_x60cm	孤立波	クランクあり	汀線-60cm	10s
UF_clank_x0cm	越流波	クランクあり	汀線 0cm	150s
UF_clank_x60cm	越流波	クランクあり	汀線-60cm	150s
RW_clank_x0cm	長波	クランクあり	汀線 0cm	15s
RW_clank_x60cm	長波	クランクあり	汀線-60cm	15s

表 3-5-2 シミュレーション解析ケース一覧（障害物あり）

ケース名	入力波	堤体形状	堤体位置	解析時間
SW_flat_x60cm_obst	孤立波	クランクなし	汀線-60cm	10s

3-6 津波波圧の評価方法について

防潮堤に作用する津波波圧は図 3-6-1 に示すように、段波波圧と持続波圧がある。段波波圧は、最初に防潮堤に衝突する津波が与える継続時間の短い波圧のことである。一方、持続波圧は、段波波圧の後の継続時間の長い波圧のことであり、防潮堤には主に静的な波圧が加わる。防潮堤の設計に当たっては、このような 2 種類の津波波圧を考慮する必要がある。本検討では、試験および解析で得られる津波波圧を段波波圧と持続波圧に分類し、それぞれ比較を行った。

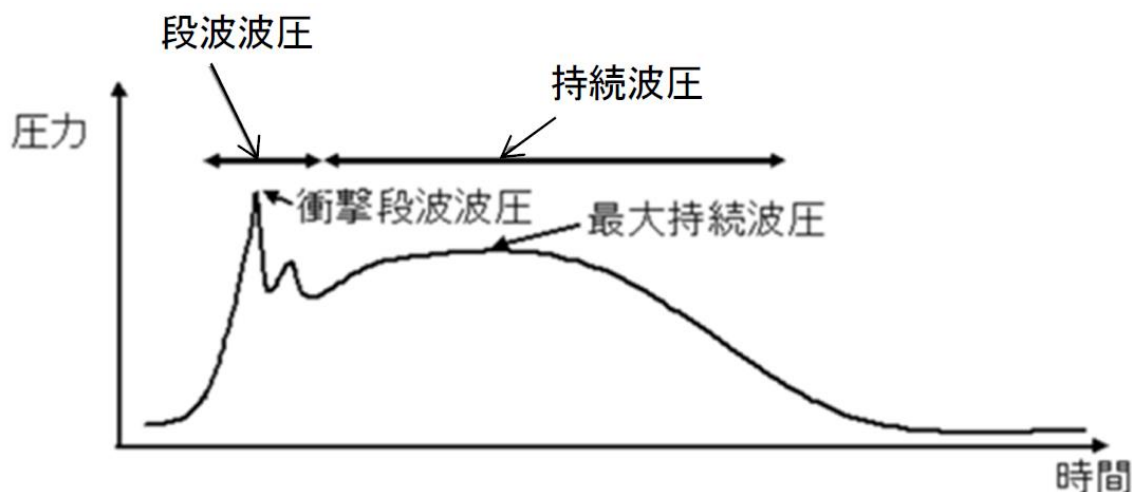


図 3-6-1 防潮堤に作用する津波波圧の模式図¹

孤立波、越流波、長波の波圧時系列の例を図 3-6-2～図 3-6-4 に示す。孤立波および長波については、津波が防潮堤に衝突した瞬間に段波波圧が生じ、その後持続波圧が生じており、図 3-6-1 の模式図と波形は似ている。一方、越流波は段波波圧が生じていない。そのため、本解析に置いては、孤立波および長波条件のケースは段波波圧と持続波圧に分類して評価し、越流波条件のケースは段波波圧と持続波圧に分類せずに評価する。

段波波圧と持続波圧を分類する時刻は、図 3-6-2 および図 3-6-4 の波圧時系列の波形より、波圧の立ち上がり時刻から 0.2 秒後までを段波波圧、0.2 秒後から 1.2 秒後までを持続波圧とする。なお、クランクありのケースについては、汀線からの距離別に波圧の立ち上がり時刻と定義する。

段波波圧の評価方法は、衝突の瞬間値が重要となるため、当該時刻間の最大値とする。一方、持続波圧の評価方法は、防潮堤に対して持続的に作用する圧力が重要とな

¹石田 暢生，森谷 寛，中村 英孝，飯島 亨，川内 英史：NRA 技術報告：防潮堤に作用する津波波圧評価に用いる水深係数の適用範囲について，原子力規制委員会，平成 26 年 12 月

るため、当該時刻間の中央値とするが、波圧の変動幅を確認できるように上下 1%を除いた波圧の範囲をエラーバーで示す。

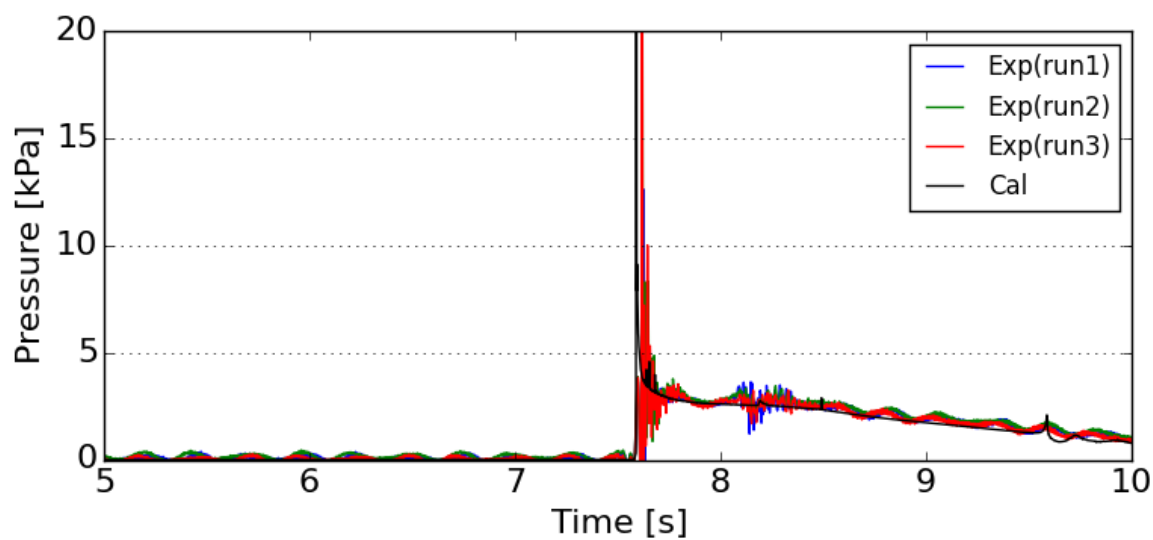


図 3-6-2 波圧時系列【孤立波，クランクなし，汀線 0cm，計測高さ 1.5cm】

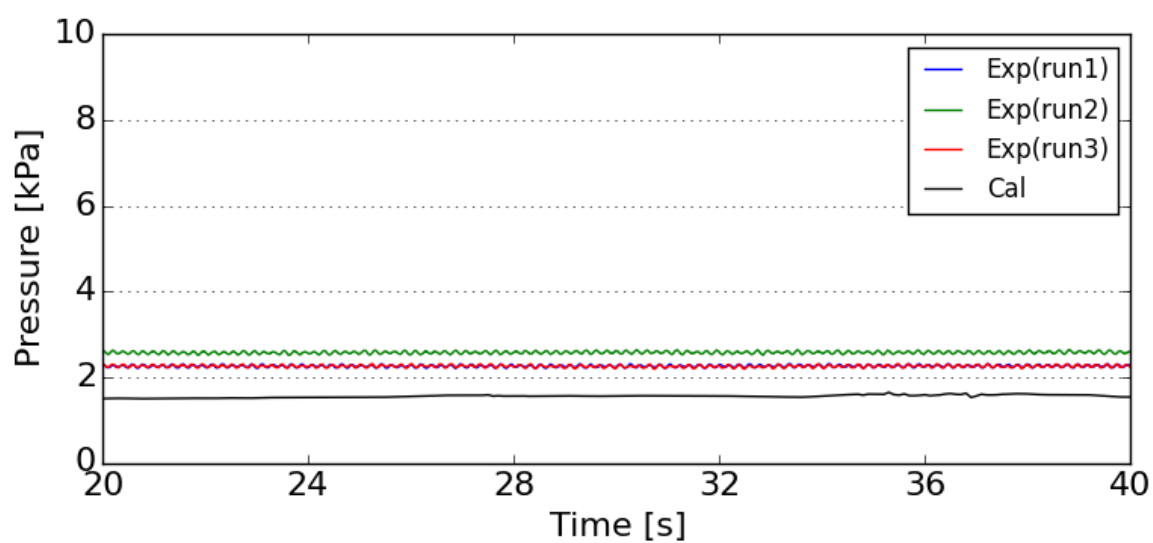


図 3-6-3 波圧時系列【越流波，クランクなし，汀線 0cm，計測高さ 1.5cm】

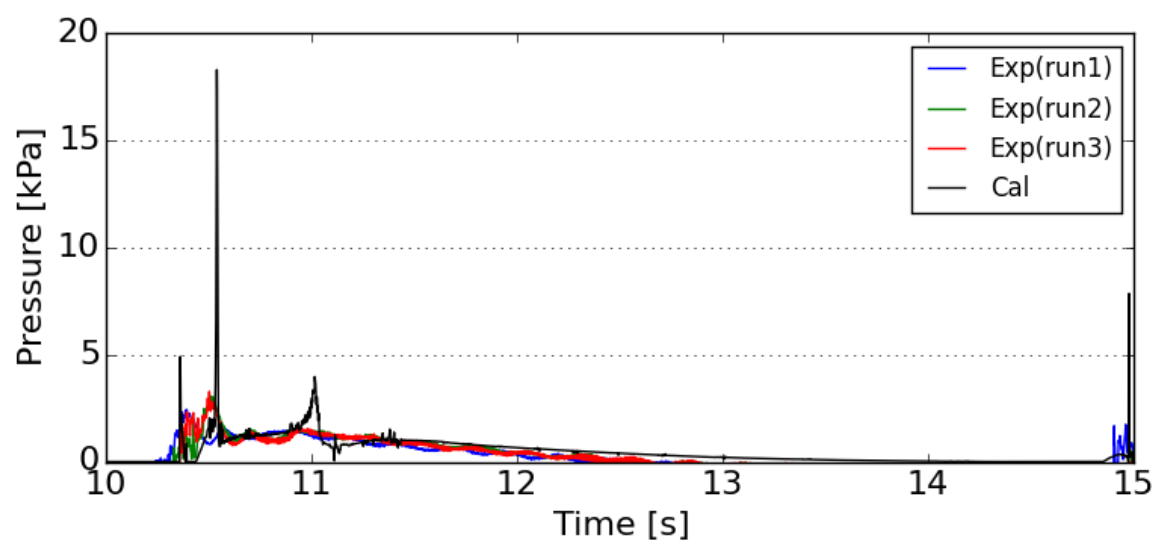


図 3-6-4 波圧時系列【長波，クランクなし，汀線 0cm，計測高さ 1.5cm】

3-7 解析結果と試験結果の比較

(1) SW_flat_x0cm (孤立波, クランクなし, 汀線 0cm)

図 3-7-1, 図 3-7-2 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す. また解析結果として, 2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 G の図 G-1~図 G-8, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G-9~図 G-15 に示す.

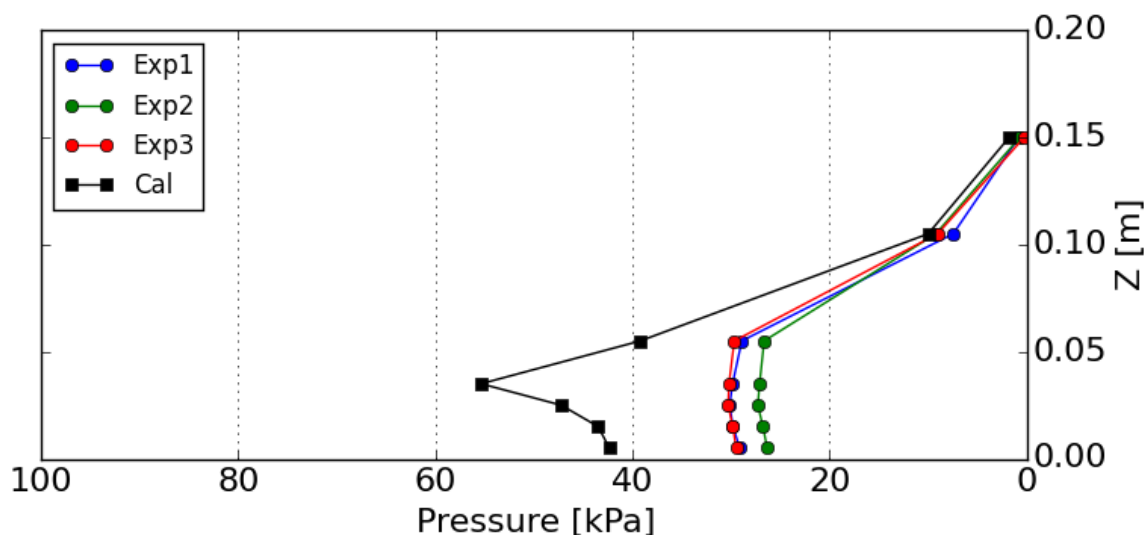


図 3-7-1 段波波圧の最大値【孤立波, クランクなし, 汀線 0cm】

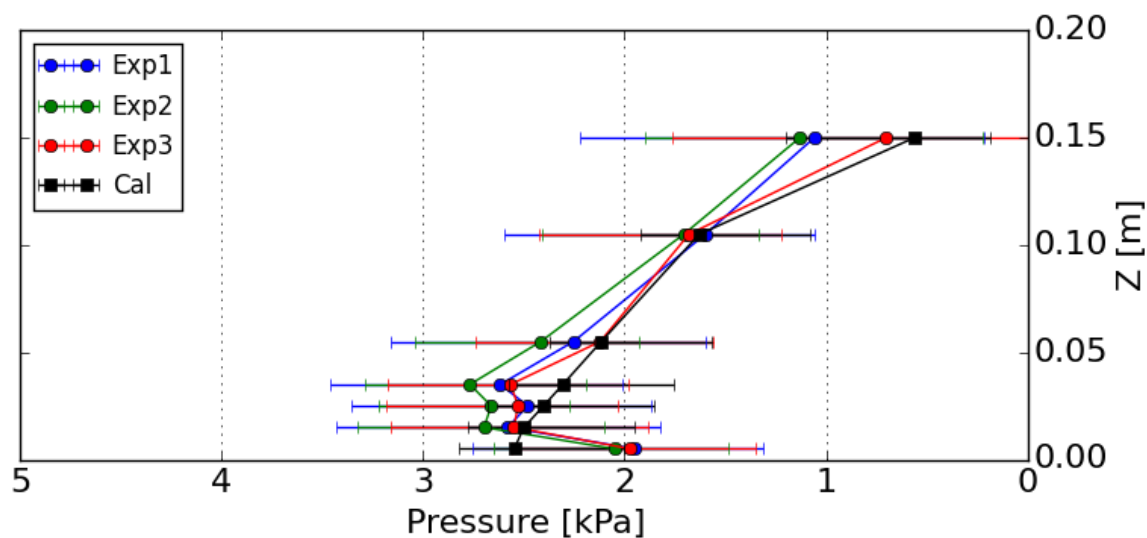


図 3-7-2 持続波圧の中央値【孤立波, クランクなし, 汀線 0cm】

(2)SW_flat_x60cm (孤立波, クランクなし, 汀線-60cm)

図 3-7-3, 図 3-7-4 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す. また解析結果として, 2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 G の図 G-1~図 G-8, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G-24~図 G-30 に示す.

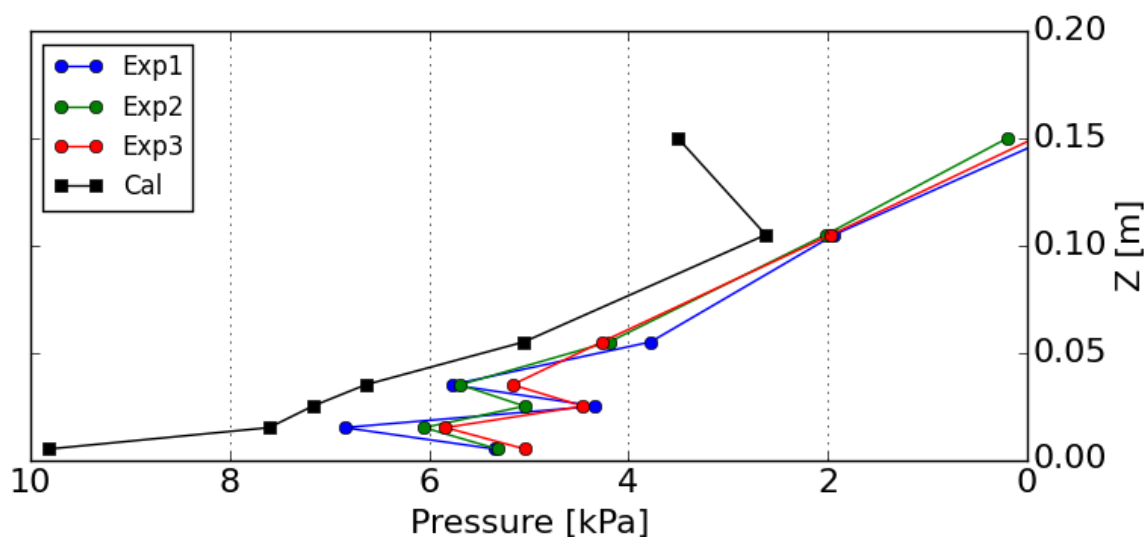


図 3-7-3 段波波圧の最大値【孤立波, クランクなし, 汀線-60cm】

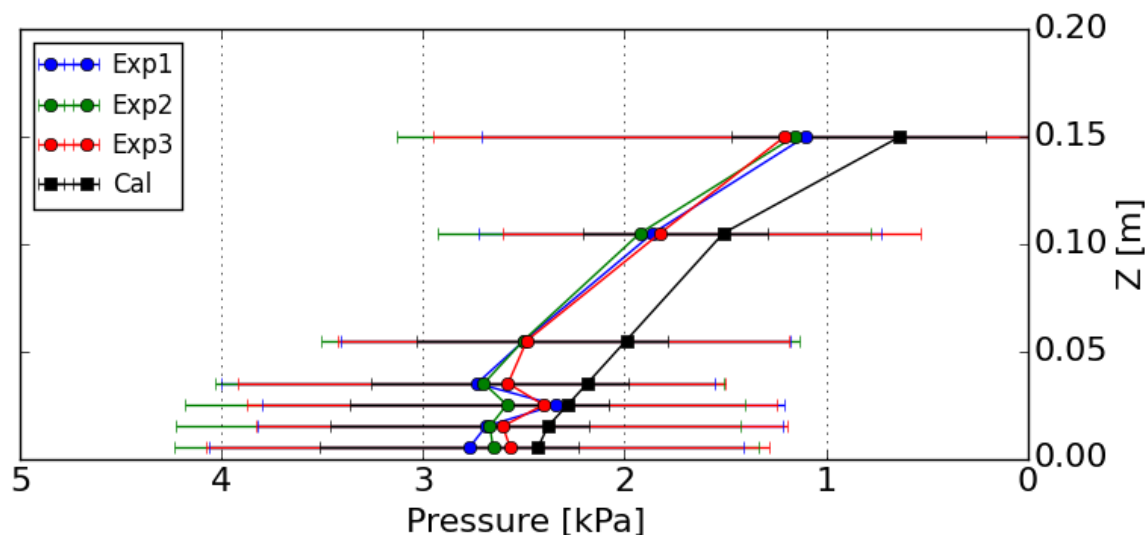


図 3-7-4 持続波圧の中央値【孤立波, クランクなし, 汀線-60cm】

(3)UF_flat_x0cm (越流波, クランクなし, 汀線 0cm)

図 3-7-5 に防潮堤前面における波圧の最大値の鉛直分布を示す. また解析結果として, 2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 G の図 G-31~図 G-38, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G-39~図 G-45 に示す.

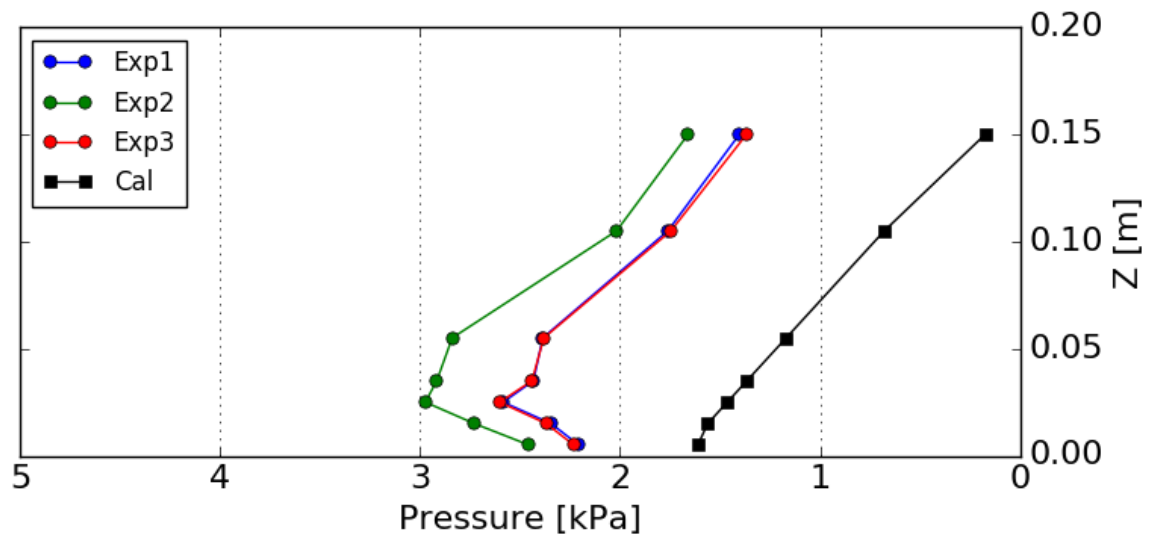


図 3-7-5 波圧の最大値【越流波, クランクなし, 汀線 0cm】

(4)UF_flat_x60cm (越流波, クランクなし, 汀線-60cm)

図 3-7-6 に防潮堤前面における波圧の最大値の鉛直分布を示す. また解析結果として, 2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 46~図 G- 53, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 54~図 G- 60 に示す.

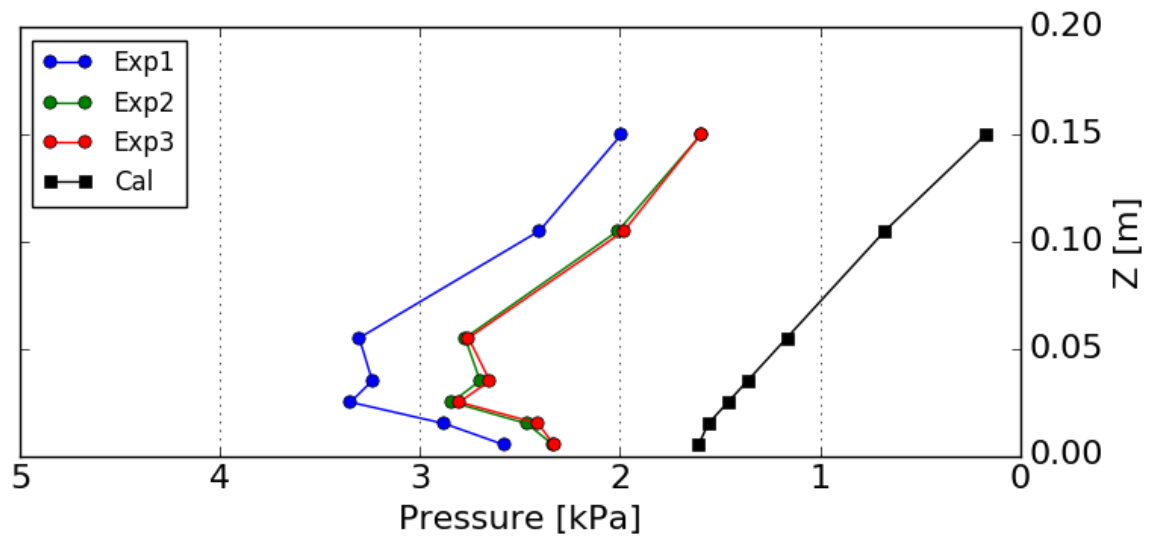


図 3-7-6 波圧の最大値【越流波, クランクなし, 汀線-60cm】

(5)RW_flat_x0cm (長波, クランクなし, 汀線 0cm)

図 3-7-7, 図 3-7-8 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す. また解析結果として, 2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 1～図 G- 68, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 69～図 G- 75 に示す.

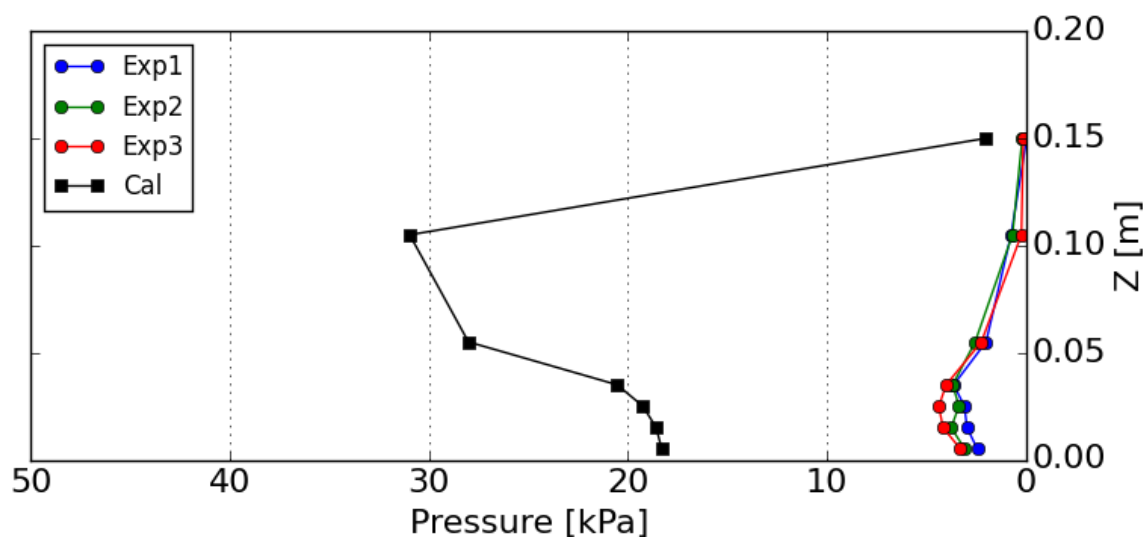


図 3-7-7 段波波圧の最大値【長波, クランクなし, 汀線 0cm】

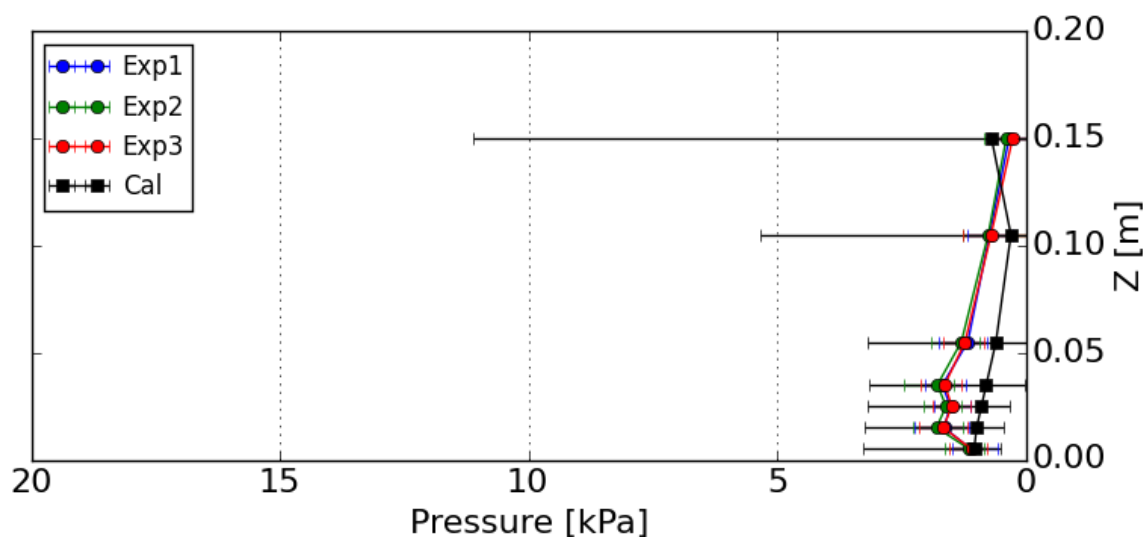


図 3-7-8 持続波圧の中央値【長波, クランクなし, 汀線 0cm】

(6)RW_flat_x60cm (長波, クランクなし, 汀線-60cm)

図 3-7-9, 図 3-7-10 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す. また解析結果として, 2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 76~図 G- 83, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 84~図 G- 90 に示す.

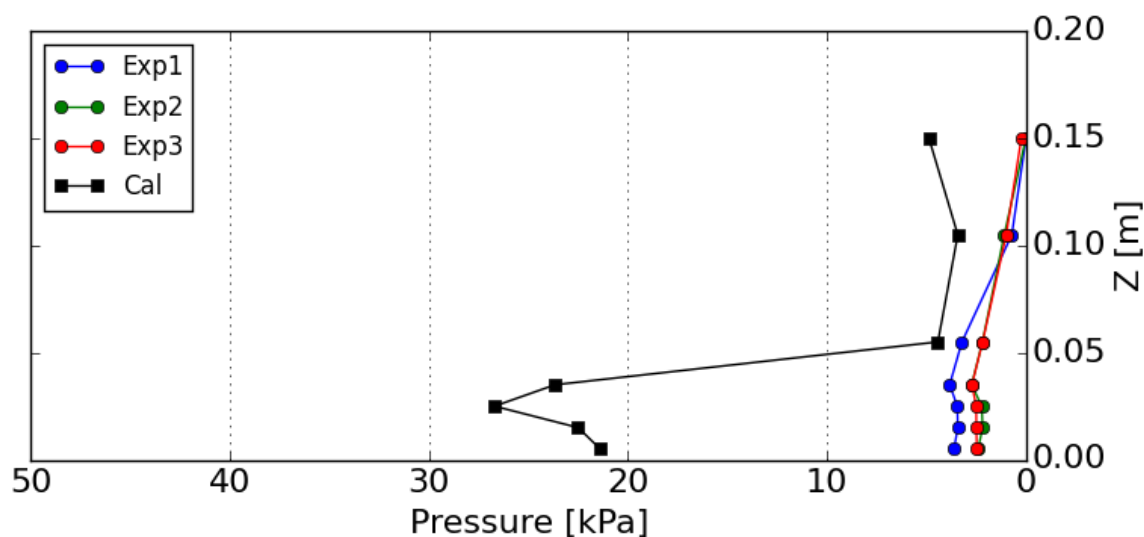


図 3-7-9 段波波圧の最大値【長波, クランクなし, 汀線-60cm】

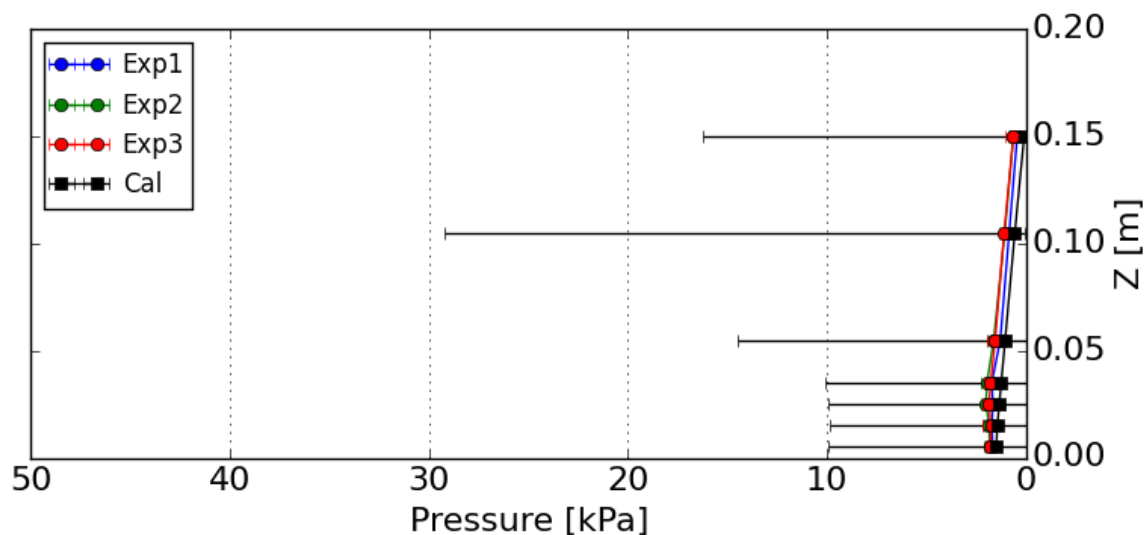


図 3-7-10 持続波圧の中央値【長波, クランクなし, 汀線-60cm】

(7)SW_clank_x0cm (孤立波, クランクあり, 汀線 0cm)

図 3-7-11～3-7-16 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の測線毎の鉛直分布を示す. 比較対象とした測線は, クランク形状の沖側前面である測線 C, 側面である測線 F, 陸側前面である測線 G の 3 測線である (図 3-2-4 を参照). また解析結果として, 2 次元及び 3 次元流速スナップショットと 2 次元及び 3 次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 91～図 G- 98, 3 測線の計測高さ別の防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 99～図 G- 110 に示す.

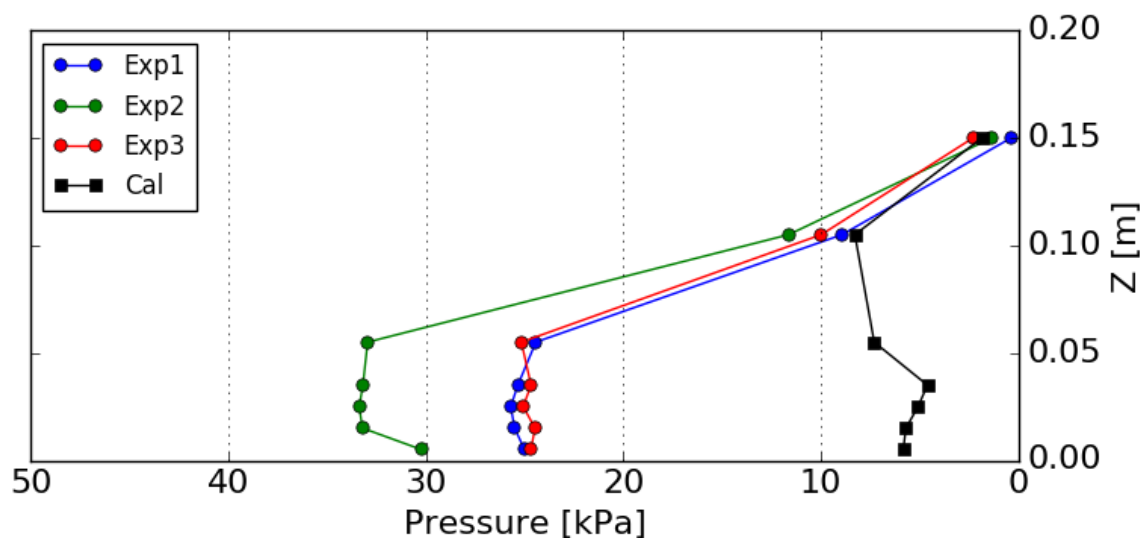


図 3-7-11 段波波圧の最大値【孤立波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 C】

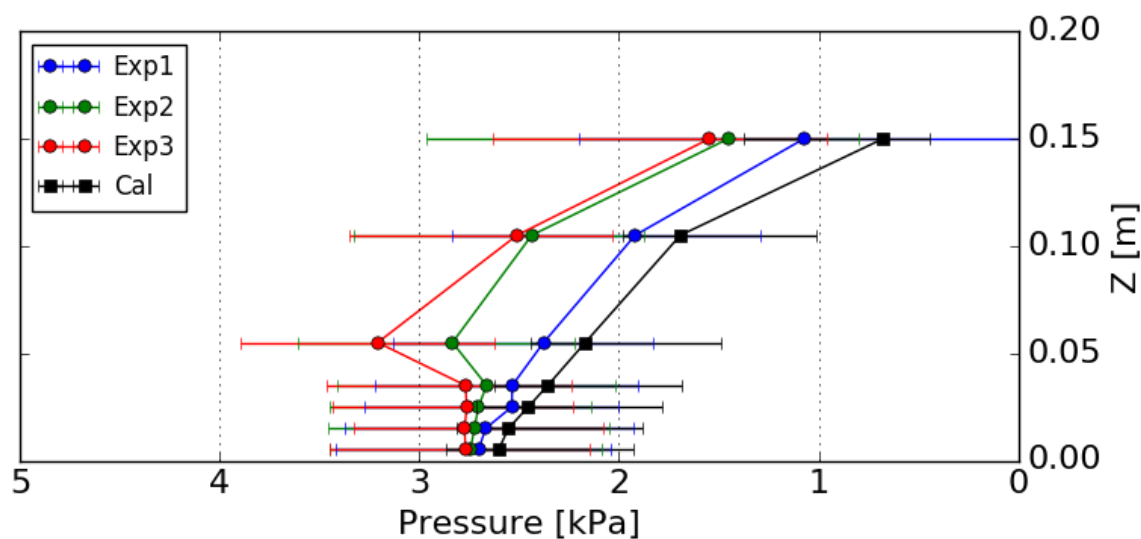


図 3-7-12 持続波圧の中央値【孤立波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 C】

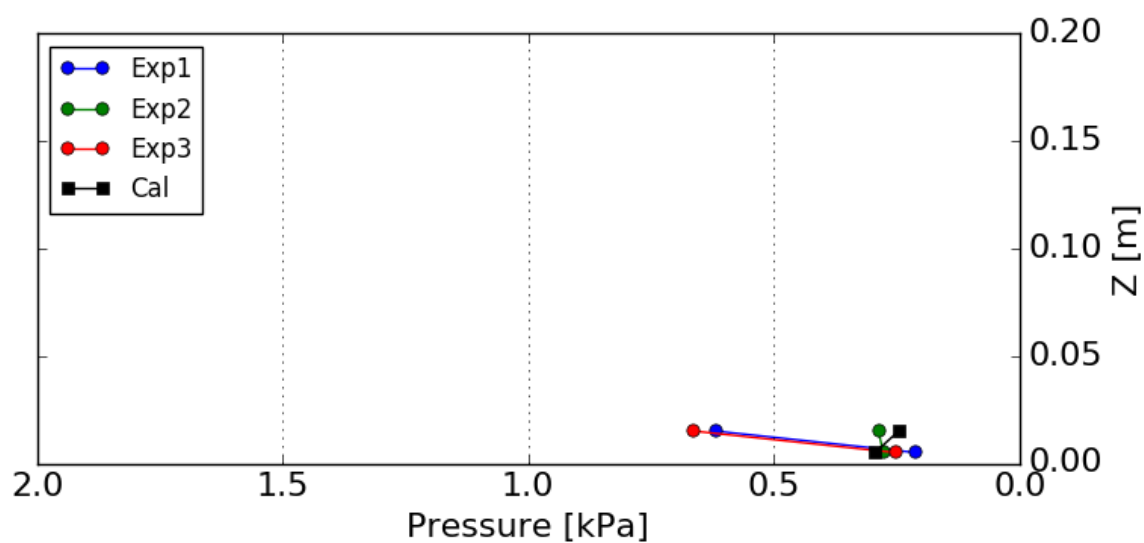


図 3-7-13 段波波圧の最大値【孤立波，クランクあり，汀線 0cm，測線 F】

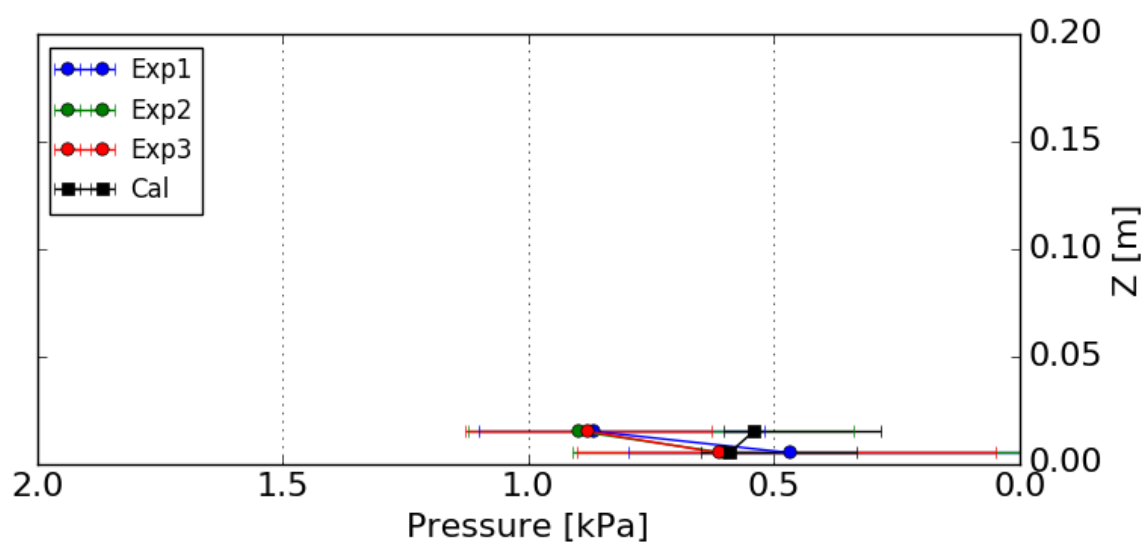


図 3-7-14 持続波圧の中央値【孤立波，クランクあり，汀線 0cm，測線 F】

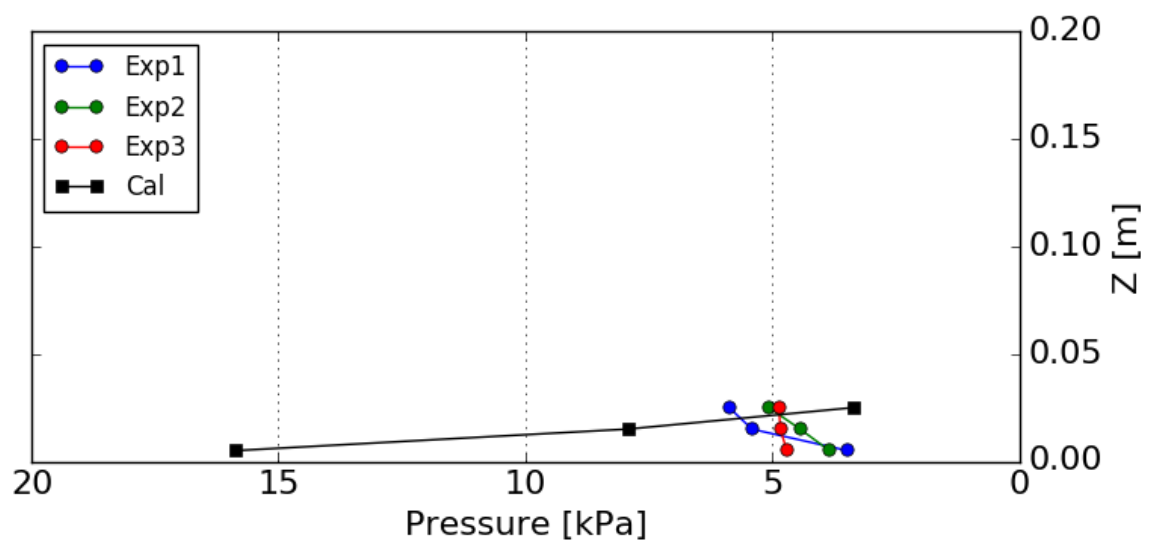


図 3-7-15 段波波圧の最大値【孤立波，クランクあり，汀線 0cm，測線 G】

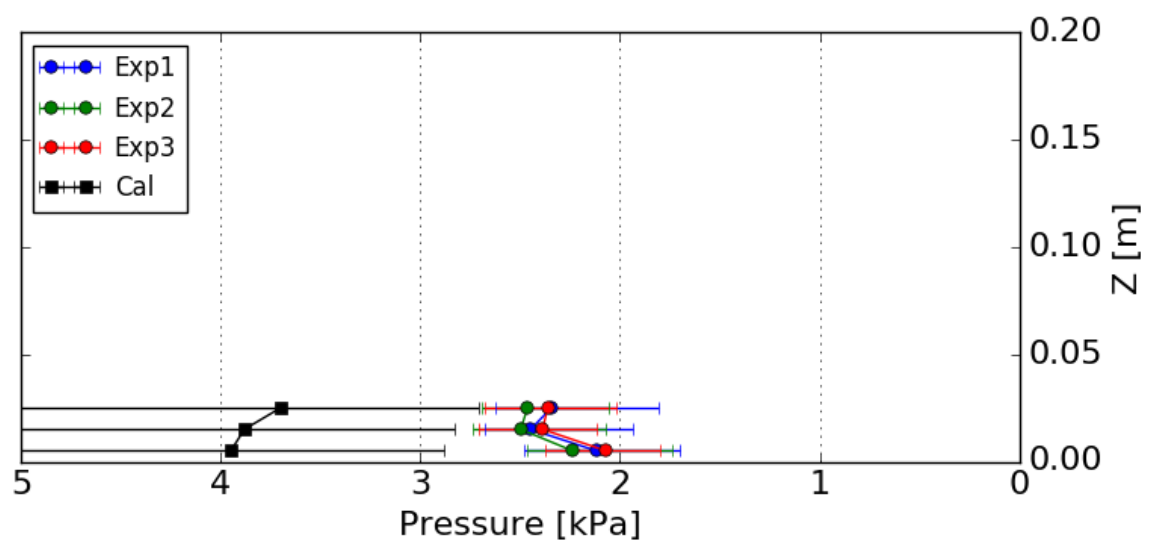


図 3-7-16 持続波圧の中央値【孤立波，クランクあり，汀線 0cm，測線 G】

(8)SW_clank_x60cm (孤立波, クランクあり, 汀線-60cm)

図 3-7-17～3-7-22 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の測線毎の鉛直分布を示す. 比較対象とした測線は, クランク形状の沖側前面である測線 C, 側面である測線 F, 陸側前面である測線 G の 3 測線である (図 3-2-4 を参照). また解析結果として, 2 次元及び 3 次元流速スナップショットと 2 次元及び 3 次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 111～図 G- 118, 3 測線の計測高さ別の防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 119～図 G- 130 に示す.

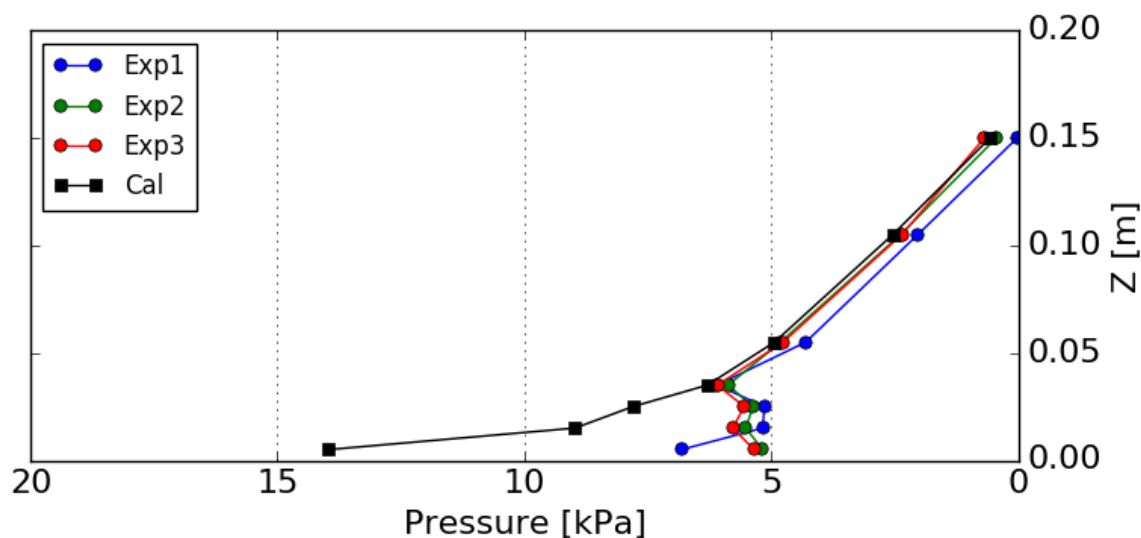


図 3-7-17 段波波圧の最大値【孤立波, クランクあり, 汀線-60cm, 測線 C】

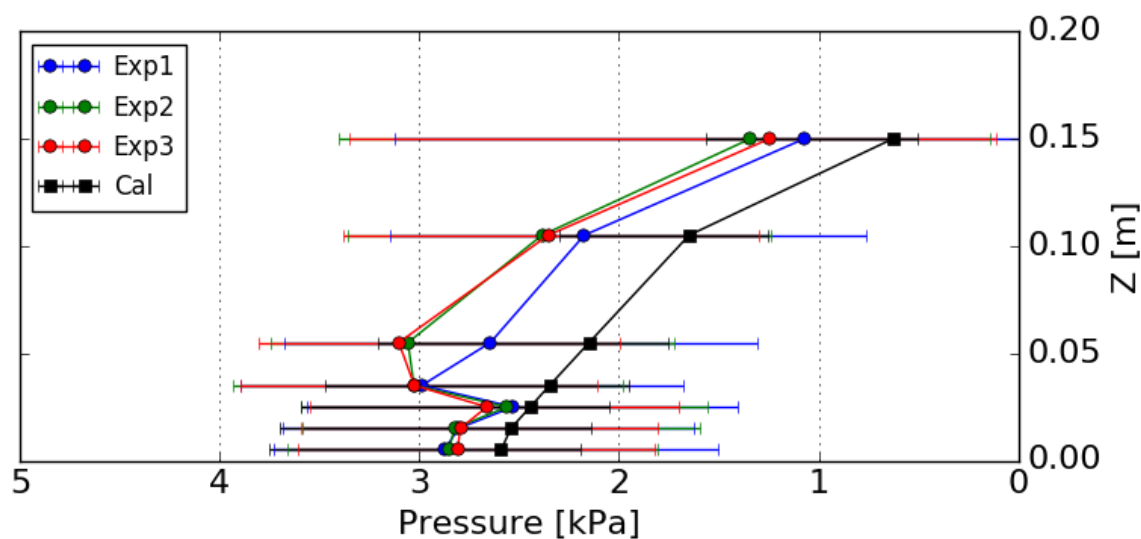


図 3-7-18 持続波圧の中央値【孤立波, クランクあり, 汀線-60cm, 測線 C】

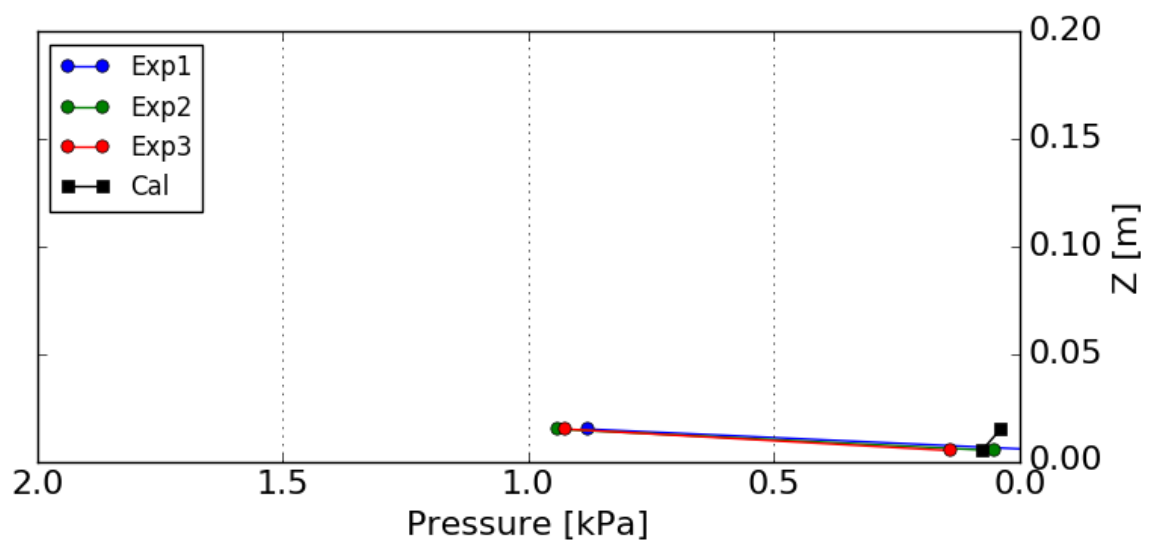


図 3-7-19 段波波圧の最大値【孤立波，クランクあり，汀線-60cm，測線 F】

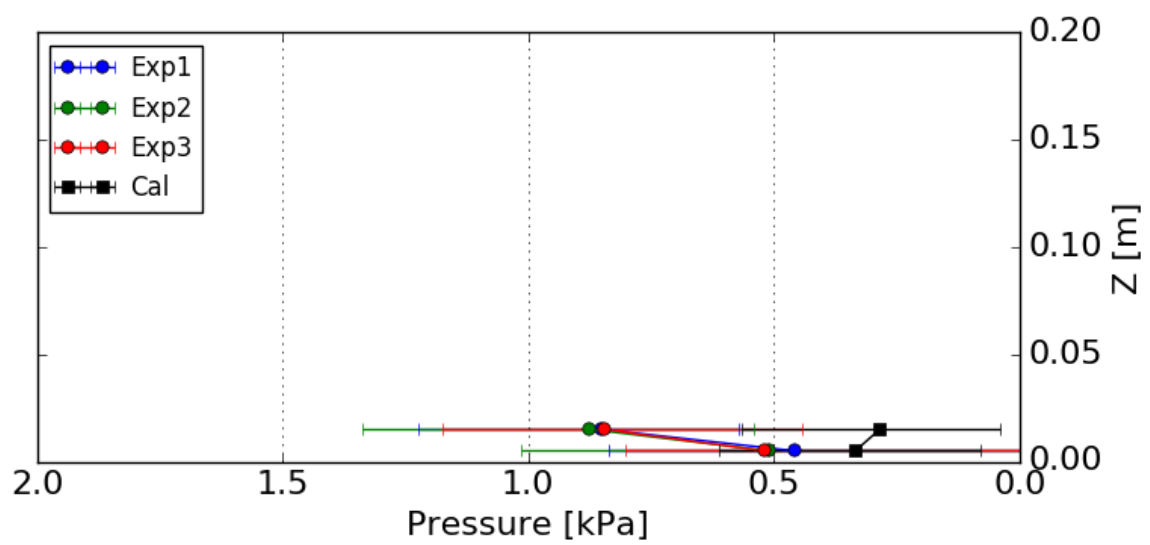


図 3-7-20 持続波圧の中央値【孤立波，クランクあり，汀線-60cm，測線 F】

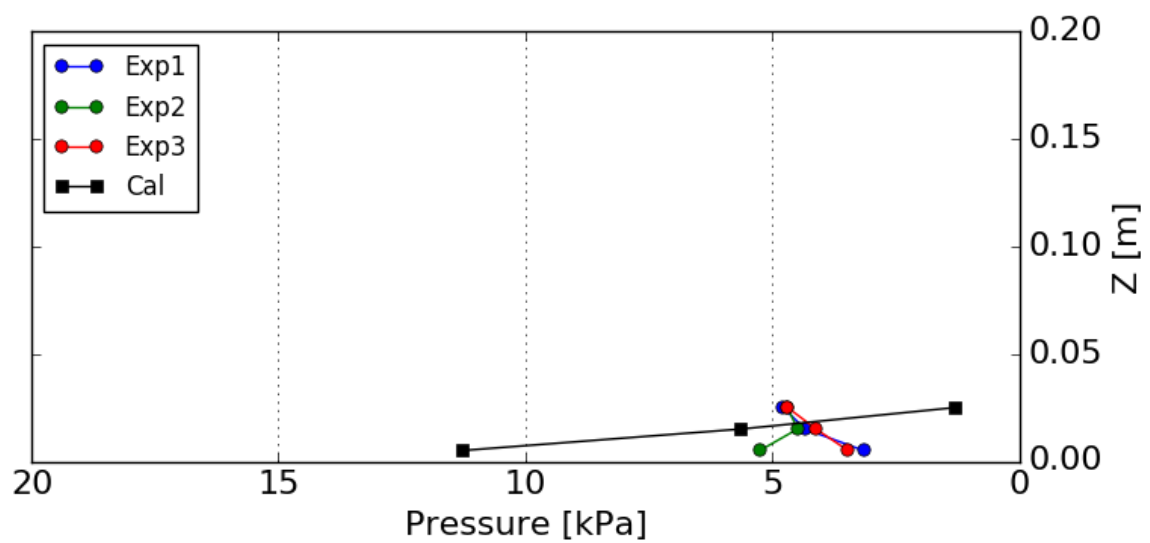


図 3-7-21 段波波圧の最大値【孤立波，クランクあり，汀線-60cm，測線 G】

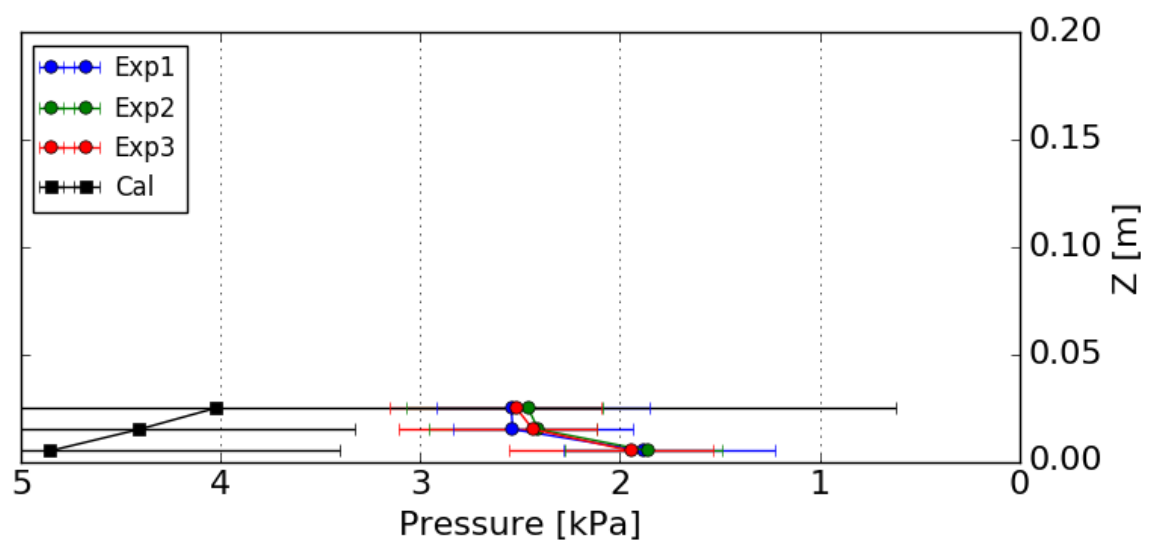


図 3-7-22 持続波圧の中央値【孤立波，クランクあり，汀線-60cm，測線 G】

(9)UF_clank_x0cm (越流波, クランクあり, 汀線 0cm)

図 3-7-23～3-7-25 に防潮堤前面における波圧の最大値の測線毎の鉛直分布を示す. 比較対象とした測線は, クランク形状の沖側前面である測線 C, 側面である測線 F, 陸側前面である測線 G の 3 測線である (図 3-2-4 を参照). また解析結果として, 2 次元及び 3 次元流速スナップショットと 2 次元及び 3 次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 131～図 G- 138, 3 測線の計測高さ別の防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 139～図 G- 150 に示す.

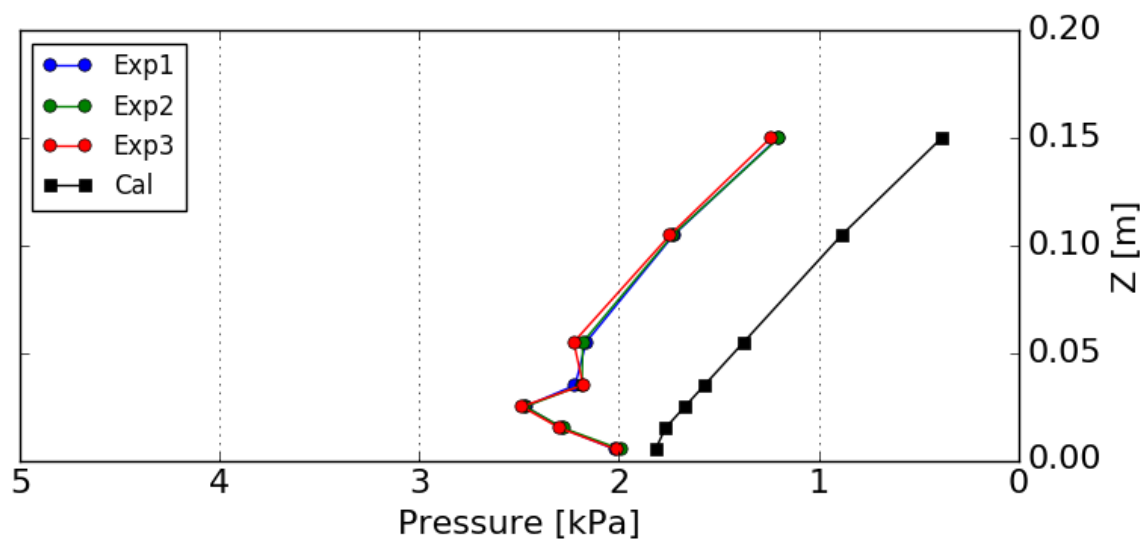


図 3-7-23 波圧の最大値【越流波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 C】

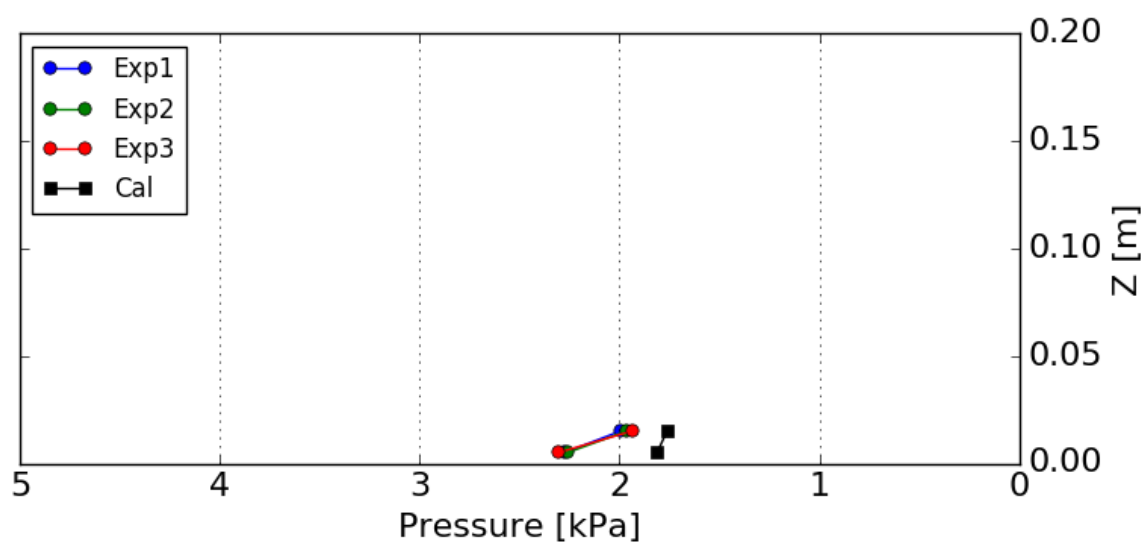


図 3-7-24 波圧の最大値【越流波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 F】

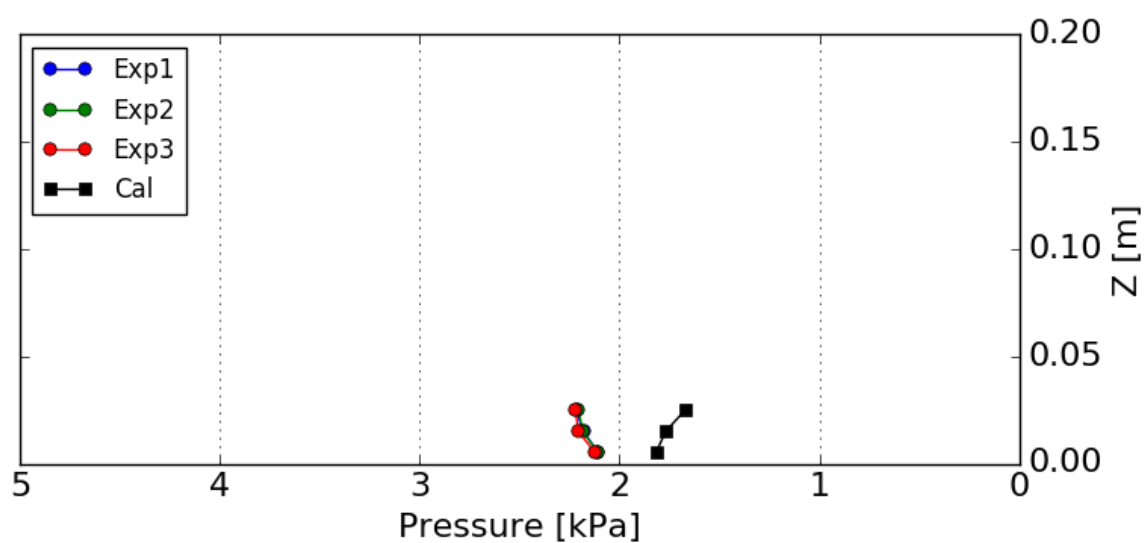


図 3-7-25 波圧の最大値【越流波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 G】

(10)UF_clank_x60cm (越流波, クランクあり, 汀線-60cm)

図 3-7-26～3-7-28 に防潮堤前面における波圧の最大値の測線毎の鉛直分布を示す. 比較対象とした測線は, クランク形状の沖側前面である測線 C, 側面である測線 F, 陸側前面である測線 G の 3 測線である (図 3-2-4 を参照). また解析結果として, 2 次元及び 3 次元流速スナップショットと 2 次元及び 3 次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 151～図 G- 158, 3 測線の計測高さ別の防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 159～図 G- 170 に示す.

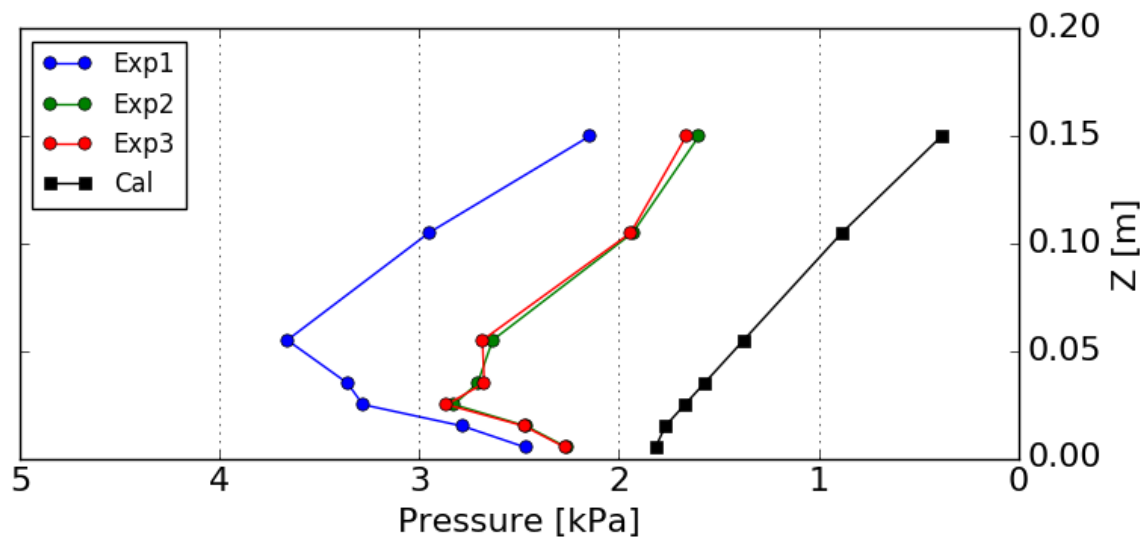


図 3-7-26 波圧の最大値【越流波, クランクあり, 汀線-60cm, 測線 C】

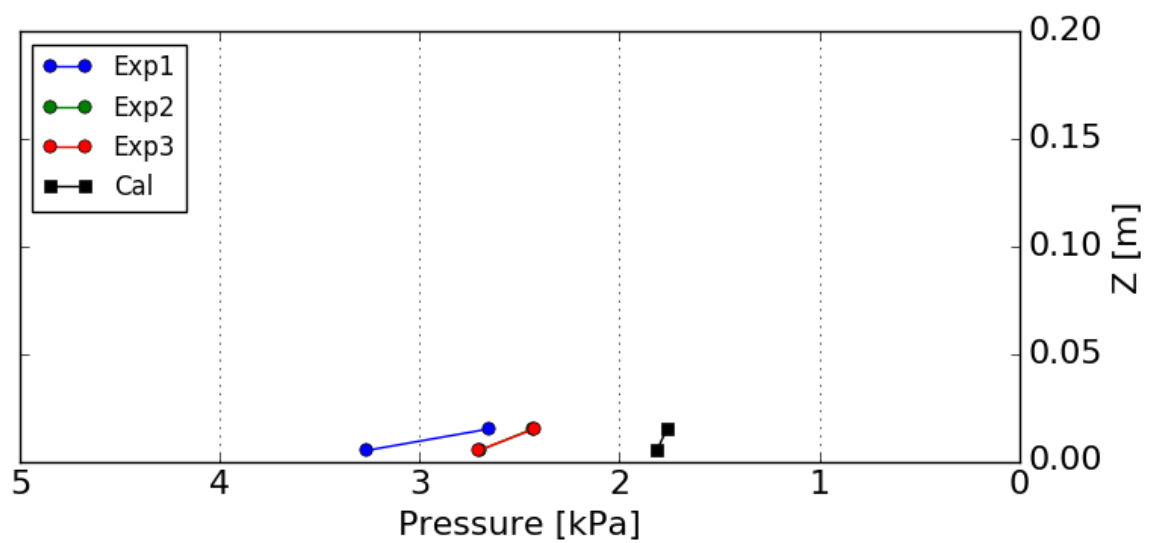


図 3-7-27 波圧の最大値【越流波, クランクあり, 汀線-60cm, 測線 F】

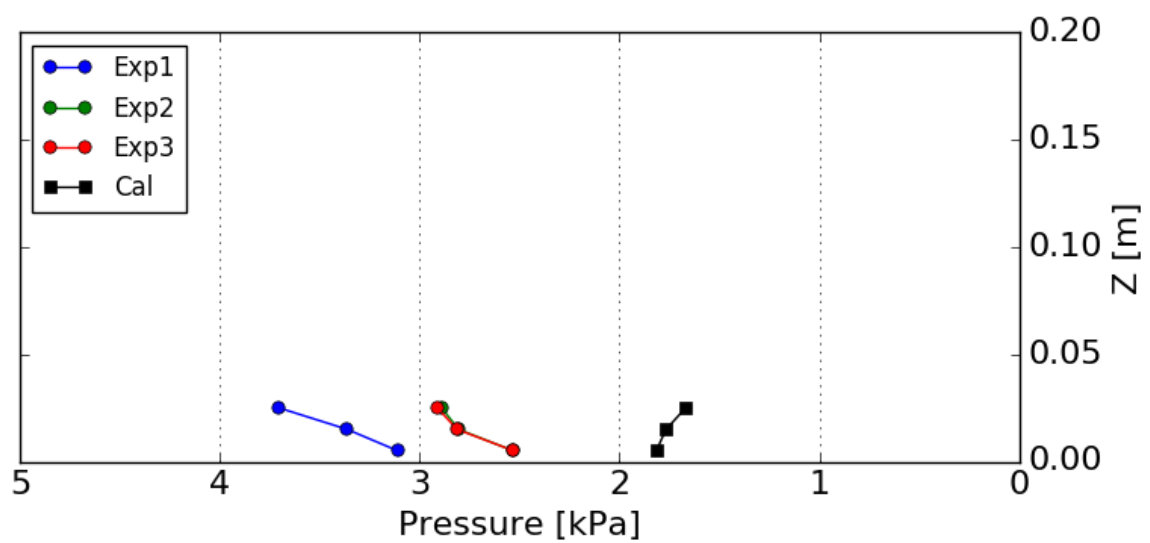


図 3-7-28 波圧の最大値【越流波, クランクあり, 汀線-60cm, 測線 G】

(11)RW_clank_x0cm (長波, クランクあり, 汀線 0cm)

図 3-7-29～3-7-34 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の測線毎の鉛直分布を示す．比較対象とした測線は，クランク形状の沖側前面である測線 C，側面である測線 F，陸側前面である測線 G の 3 測線である（図 3-2-4 を参照）．また解析結果として，2 次元及び 3 次元流速スナップショットと 2 次元及び 3 次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 171～図 G- 178，3 測線の計測高さ別の防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 179～図 G- 190 に示す．

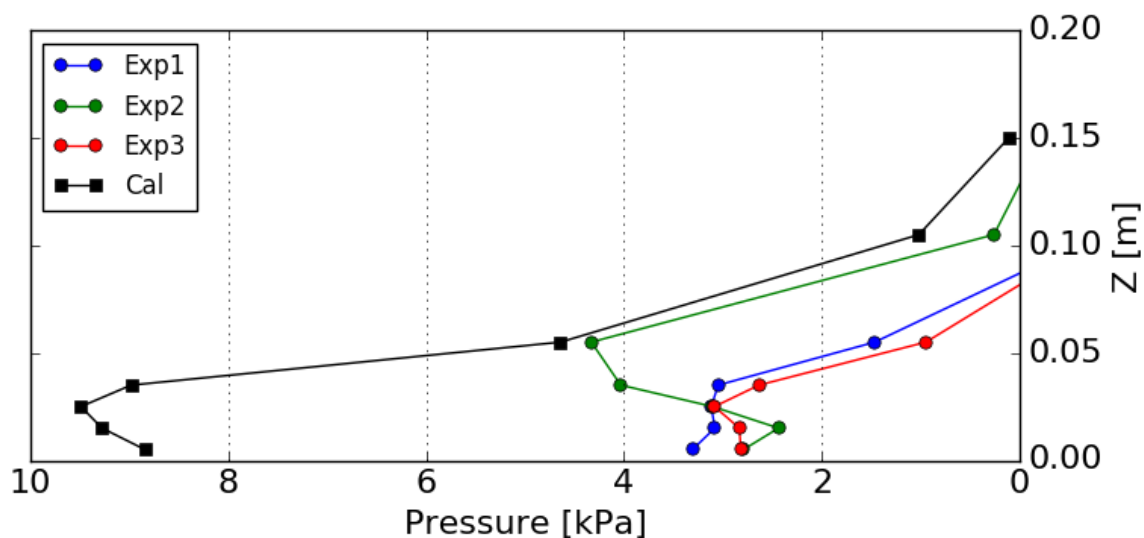


図 3-7-29 段波波圧の最大値【長波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 C】

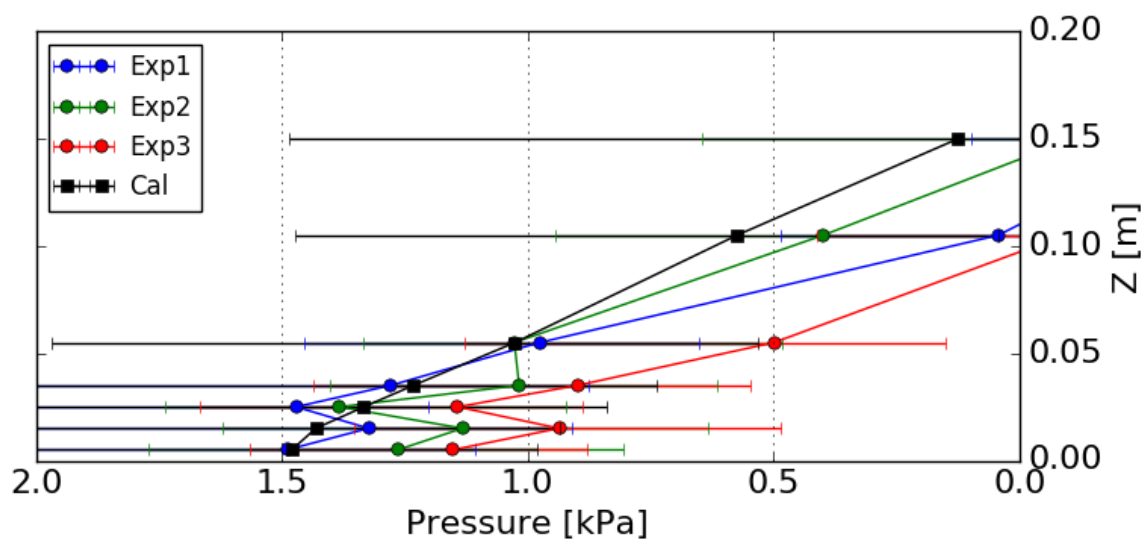


図 3-7-30 持続波圧の中央値【長波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 C】

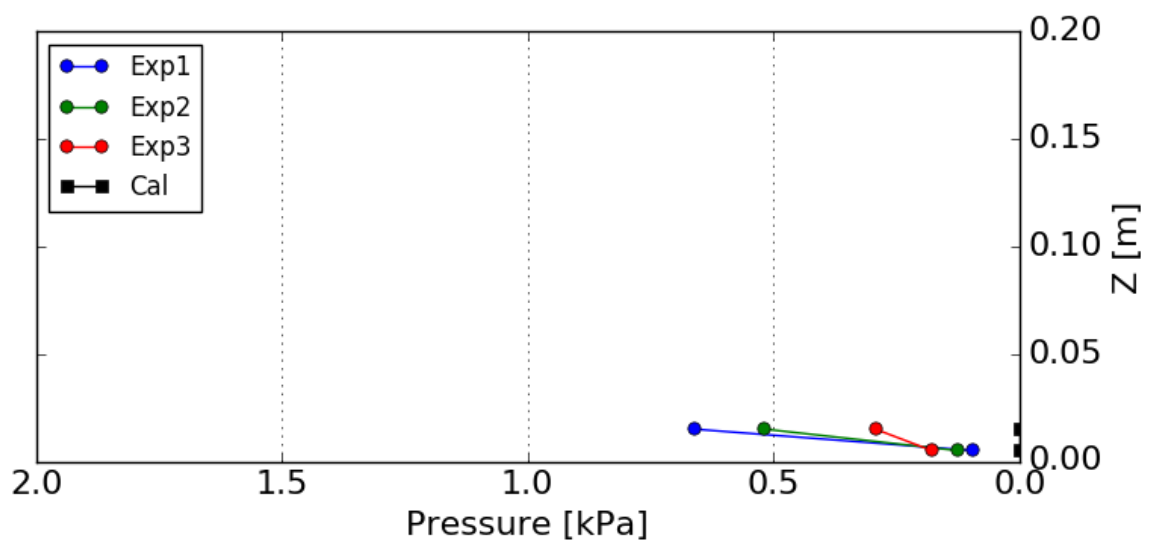


図 3-7-31 段波波圧の最大値【長波，クランクあり，汀線 0cm，測線 F】

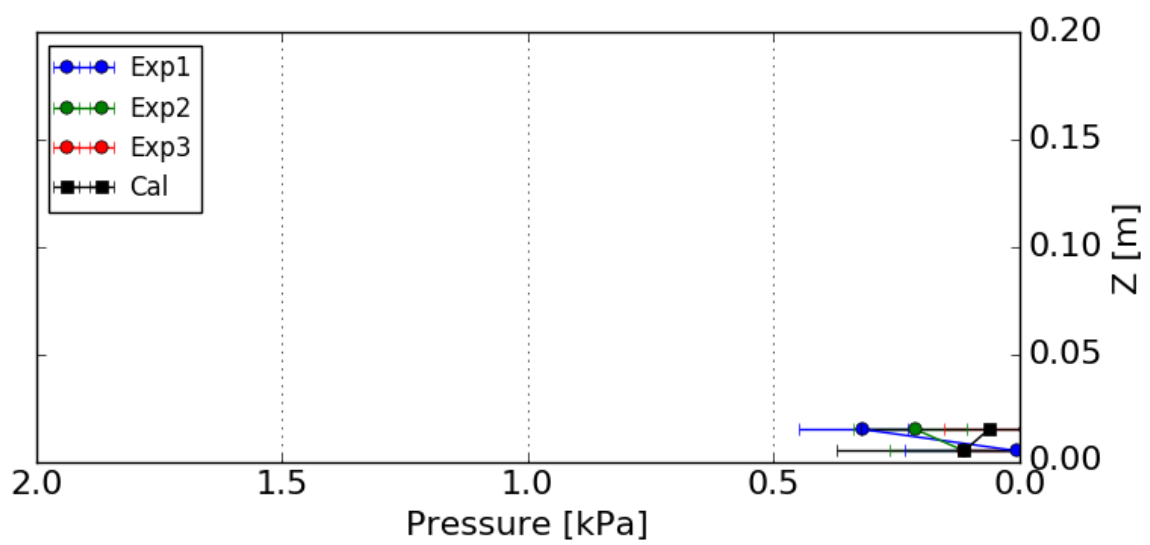


図 3-7-32 持続波圧の中央値【長波，クランクあり，汀線 0cm，測線 F】

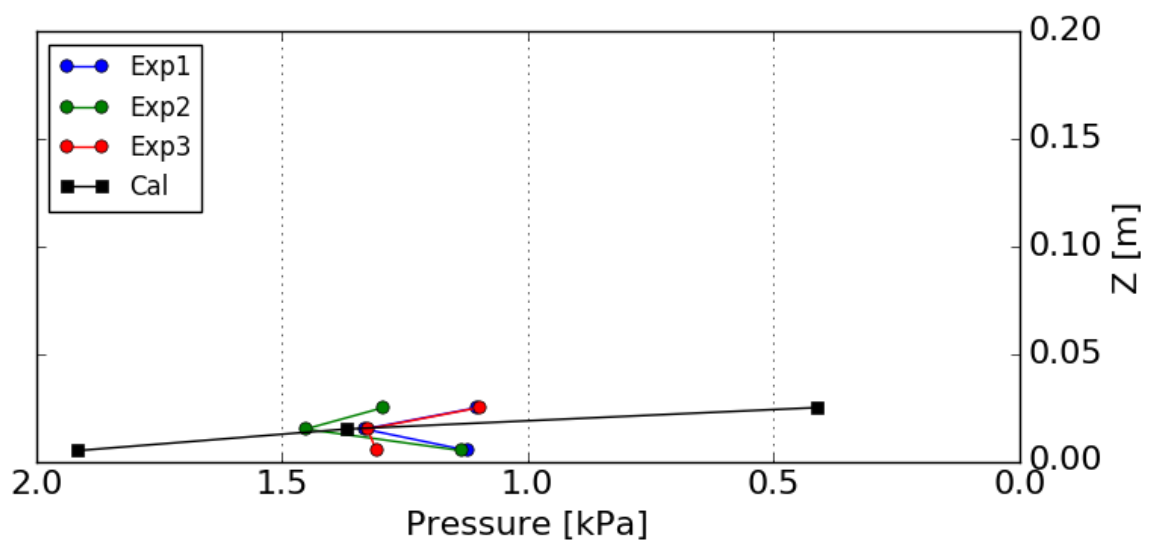


図 3-7-33 段波波圧の最大値【長波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 G】

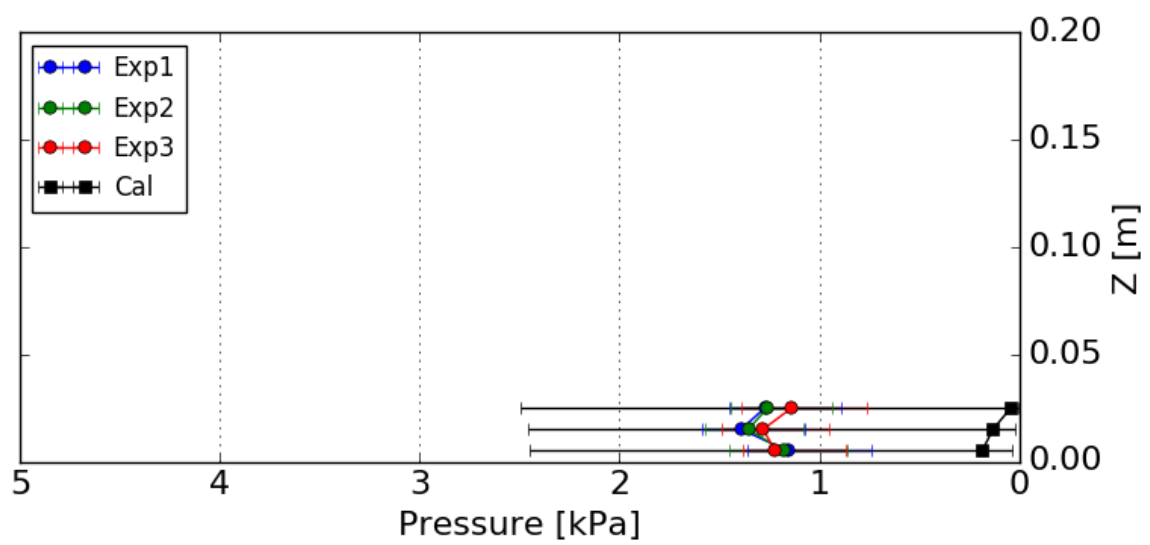


図 3-7-34 持続波圧の中央値【長波, クランクあり, 汀線 0cm, 測線 G】

(12)RW_clank_x60cm (長波, クランクあり, 汀線-60cm)

図 3-7-35～3-7-40 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の測線毎の鉛直分布を示す．比較対象とした測線は，クランク形状の沖側前面である測線 C，側面である測線 F，陸側前面である測線 G の 3 測線である（図 3-2-4 を参照）．また解析結果として，2 次元及び 3 次元流速スナップショットと 2 次元及び 3 次元圧力スナップショットを付録 G の図 G- 191～図 G- 198，3 測線の計測高さ別の防潮堤前面における波圧時系列グラフを図 G- 199～図 G- 210 に示す．

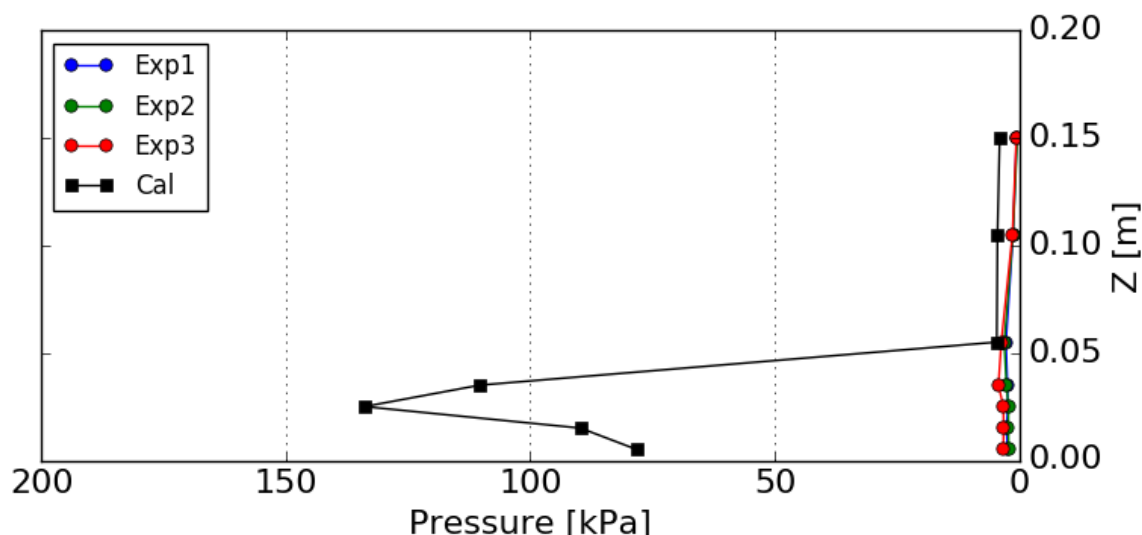


図 3-7-35 段波波圧の最大値【長波, クランクあり, 汀線-60cm, 測線 C】

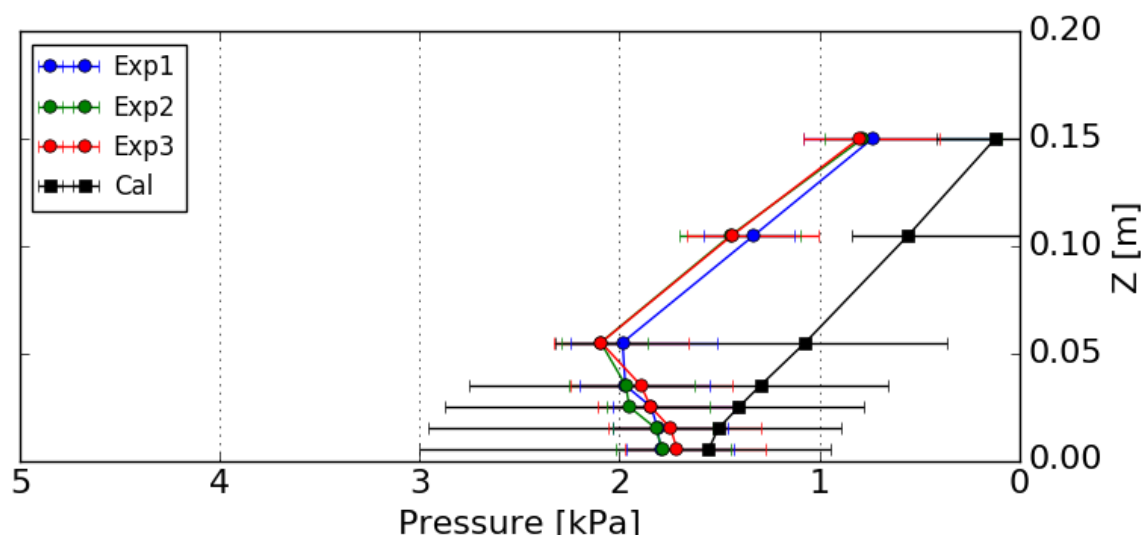


図 3-7-36 持続波圧の中央値【長波, クランクあり, 汀線-60cm, 測線 C】

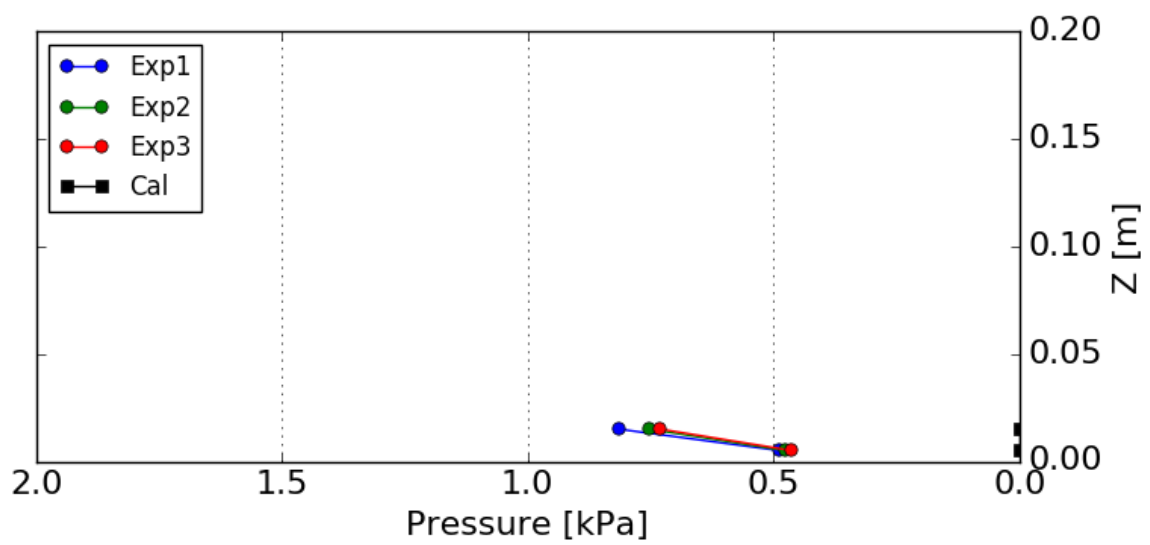


図 3-7-37 段波波圧の最大値【長波，クランクあり，汀線-60cm，測線 F】

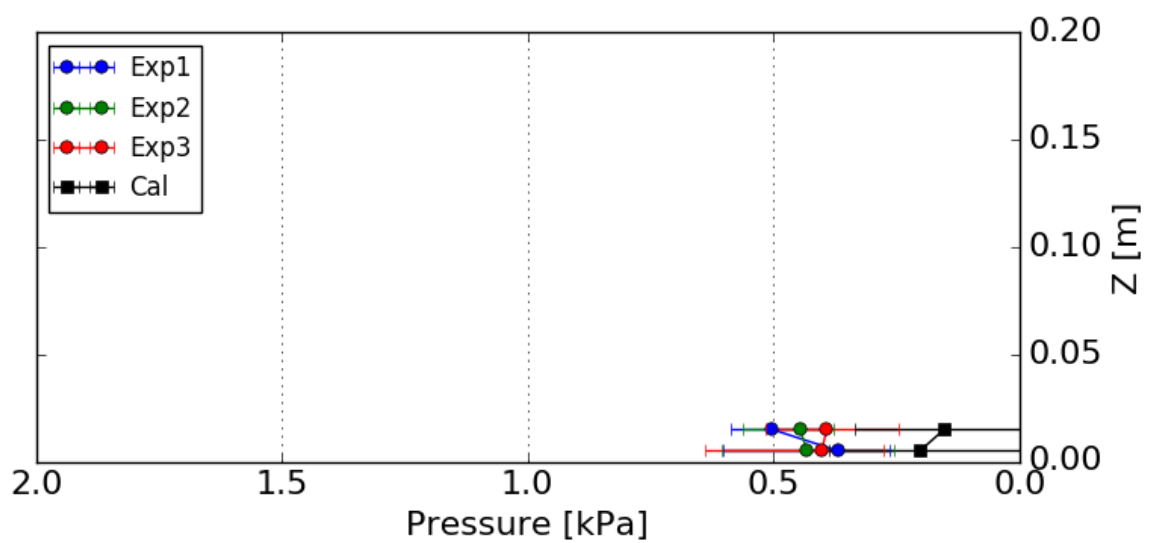


図 3-7-38 持続波圧の中央値【長波，クランクあり，汀線-60cm，測線 F】

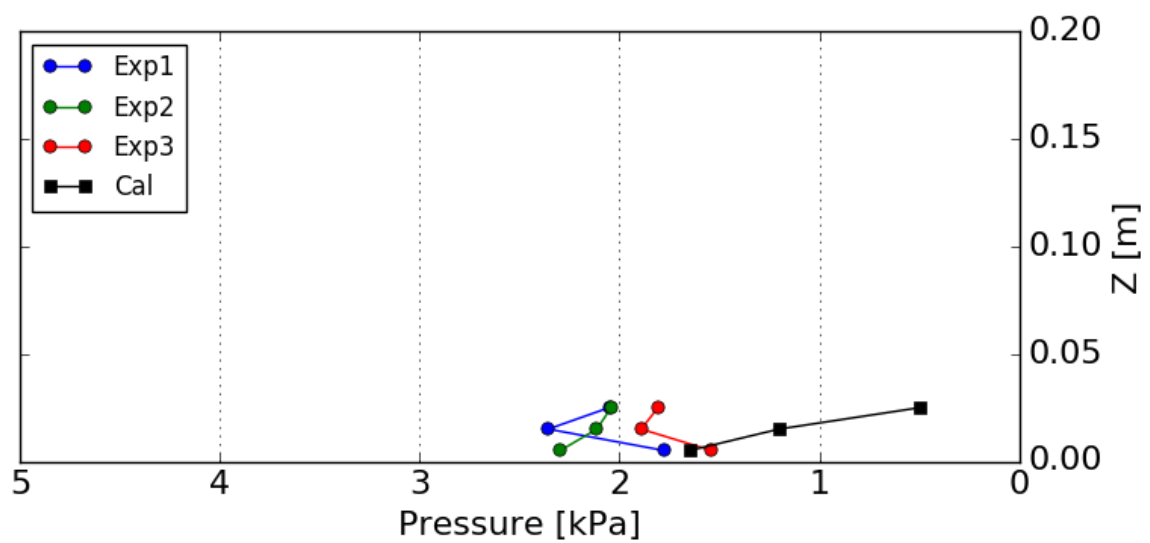


図 3-7-39 段波波圧の最大値【長波，クランクあり，汀線-60cm，測線 G】

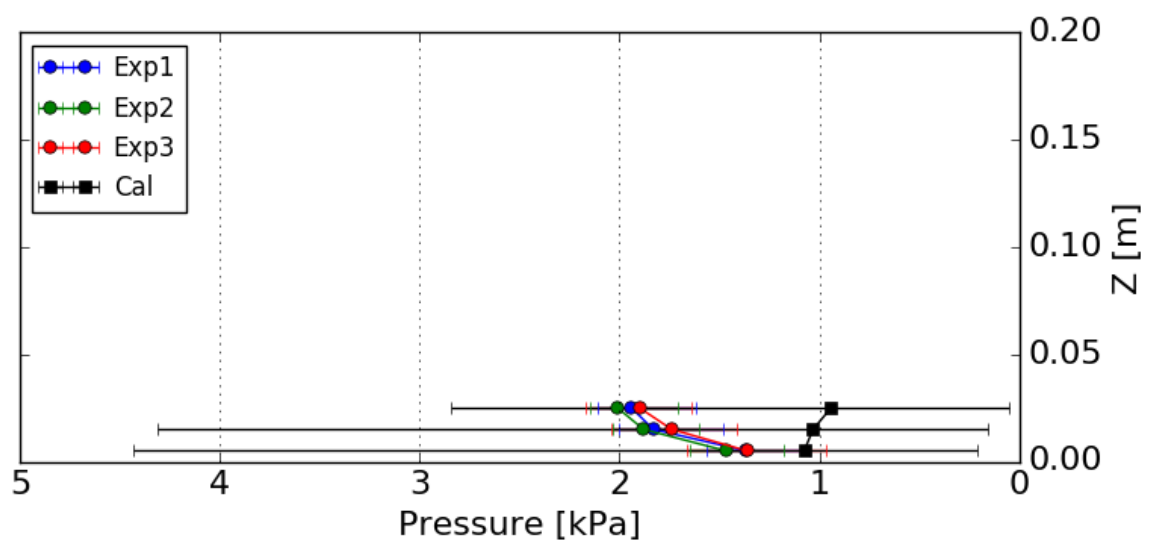


図 3-7-40 持続波圧の中央値【長波，クランクあり，汀線-60cm，測線 G】

(13)SW_obst (孤立波, クランクなし, 汀線-60cm, 障害物あり)

図 3-7-41 に防潮堤前面における段波波圧の最大値の鉛直分布を示す。図は赤線が障害物無し (SW_flat_x60cm) , 青線が障害物ありの解析結果である。堤体前面に障害物がある時, 無いケースと比較して最大波圧が大きくなった。本検討は解析結果同士の比較であるが, 今後, 実際の障害物を設置した場合の水理試験結果との比較を行い, 波圧の再現性の確認する必要があると考えられる。

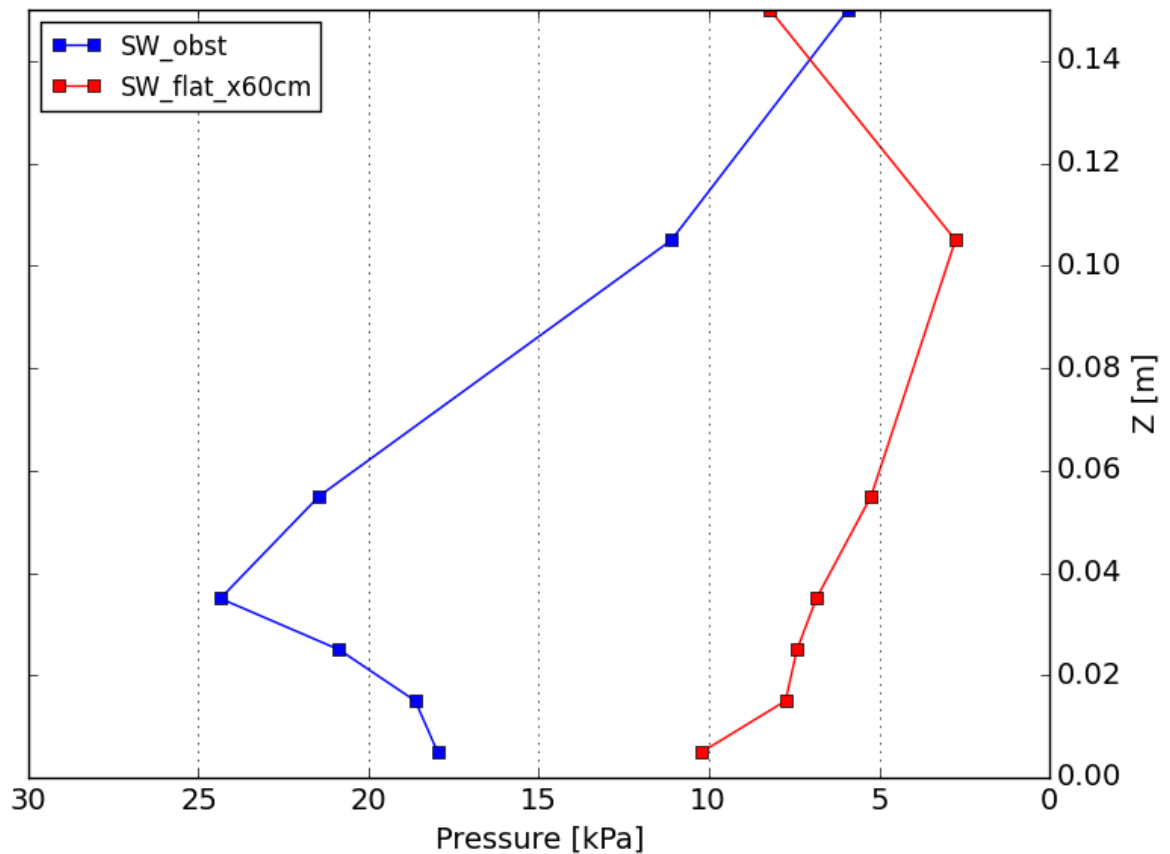


図 3-7-41 障害物の有無による衝撃波圧の最大値の比較

3-8 解析結果のまとめ

3-7 に示した津波波力の解析結果について、入射波別に結果を整理する。

(1)孤立波

衝撃波圧の最大値については、解析結果の方が過大となるケースが多く、また値が2倍以上異なるケースもある。最大値はスパイクノイズ的に突出した値であるため、正確に捕捉することが難しいと考えられる。

一方、持続波圧の中央値については、試験結果の方がやや過大なケースが多いが、試験と解析はほぼ同じ傾向を示している。ただし、汀線距離で比較すると汀線 0cm よりも汀線-60cm のケースが波圧の計測範囲がやや広い。汀線 0cm のケースは巻き波が直接衝突しているが、汀線-60cm のケースは波の本体よりも先端が早く到達しているため、若干波が乱れ始めていると考えられる。

(2)越流波

全体的には、試験、解析ともに静水圧分布に近い結果となった。水位が徐々に増加するタイプの入射波のため、クランクの有無や汀線位置の違いが波圧に与える差異はほとんど無い。

(3)長波

衝撃波圧の最大値については、全てのケースで解析結果の方が過大となった。この理由は、孤立波と同様に最大値の正確な捕捉が難しいためと考えられる。

一方、持続波圧の中央値についてははっきりした傾向は見られない。ただし、波圧の計測範囲は解析結果の方が広く、クランク無しの 2 ケースは特に堤体上部における波圧の計測範囲が広い。

第4章 漂流物影響の把握

4-1 試験の概要

津波再現水槽を用いて、漂流物が衝突する防潮堤を対象とした水理試験を実施し、防潮堤（堤体模型）に衝突する漂流物の衝突挙動に関する試験データを取得する。

用いる漂流物模型は、小型船舶や流木等を想定したものとする。また水理試験で流速、波高、波圧、衝突力を測定するとともに、高速度カメラ等を用いた動画撮影により、衝突速度、衝突姿勢を測定する。

【入力津波別による評価項目】（試験観察による）

① 孤立波

下記の入力波条件で、波前面に捉えられた漂流物が防潮堤に衝突する現象を対象とする。

- ・ 防潮堤が汀線位置では、巻き波による衝撃砕波圧が作用する条件
- ・ 防潮堤が汀線－60cm 位置、またはクランク形状の場合では、砕波後の砕け寄せ波の条件

※漂流物の挙動記録は、衝突後に漂流物が防潮堤を越える現象を含む。

② 長波

防潮堤の位置、形状に因らず、砕波後の砕け寄せ波の形状の場合について、入力波の前面に捉えられた漂流物が防潮堤に衝突する現象を対象とする。

※衝突後に漂流物が防潮堤を越える現象はほとんどない。

③ 越流波

入力波の特性から、浮遊物が防潮堤に衝突することは考えにくいことから、主に防潮堤を越流する現象（挙動）を対象とする。

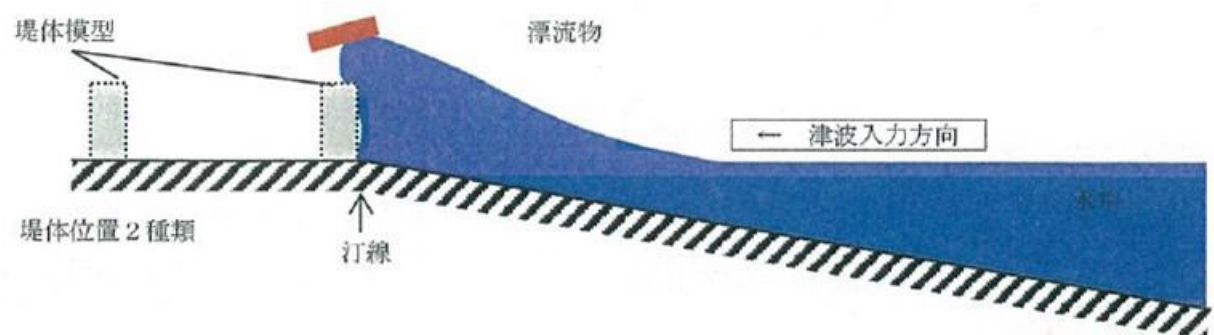


図 4-1-1 漂流物影響の把握試験のイメージ

4-2 試験条件

(1) 試験ケース・試験条件

①孤立波試験ケース (24 ケース)

漂流物影響実験ケース表(孤立波、漂流物; 小型船舶)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case3-1-1	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case3-1-2			2回目
Case3-1-3			3回目
Case3-1-10		②クランクあり	1回目
Case3-1-11			2回目
Case3-1-12			3回目
Case3-1-19	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case3-1-20			2回目
Case3-1-21			3回目
Case3-1-28		②クランクあり	1回目
Case3-1-29			2回目
Case3-1-30			3回目

漂流物影響実験ケース表(孤立波、漂流物; 流木)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case3-2-1	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case3-2-2			2回目
Case3-2-3			3回目
Case3-2-10		②クランクあり	1回目
Case3-2-11			2回目
Case3-2-12			3回目
Case3-2-19	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case3-2-20			2回目
Case3-2-21			3回目
Case3-2-28		②クランクあり	1回目
Case3-2-29			2回目
Case3-2-30			3回目

②長波試験ケース (24 ケース)

漂流物影響実験ケース表(長波、漂流物; 小型船舶)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case3-1-4	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case3-1-5			2回目
Case3-1-6			3回目
Case3-1-13		②クランクあり	1回目
Case3-1-14			2回目
Case3-1-15			3回目
Case3-1-22	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case3-1-23			2回目
Case3-1-24			3回目
Case3-1-31		②クランクあり	1回目
Case3-1-32			2回目
Case3-1-33			3回目

漂流物影響実験ケース表(長波、漂流物; 流木)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case3-2-4	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case3-2-5			2回目
Case3-2-6			3回目
Case3-2-13		②クランクあり	1回目
Case3-2-14			2回目
Case3-2-15			3回目
Case3-2-22	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case3-2-23			2回目
Case3-2-24			3回目
Case3-2-31		②クランクあり	1回目
Case3-2-32			2回目
Case3-2-33			3回目

③ 越流波試験ケース (24 ケース)

漂流物影響実験ケース表(越流波、漂流物; 小型船舶)				漂流物影響実験ケース表(越流波、漂流物; 流木)			
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case3-1-7	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目	Case3-2-7	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目
Case3-1-8			2回目	Case3-2-8			2回目
Case3-1-9			3回目	Case3-2-9			3回目
Case3-1-16		②クランクあり	1回目	Case3-2-16		②クランクあり	1回目
Case3-1-17			2回目	Case3-2-17			2回目
Case3-1-18			3回目	Case3-2-18			3回目
Case3-1-25	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目	Case3-2-25	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目
Case3-1-26			2回目	Case3-2-26			2回目
Case3-1-27			3回目	Case3-2-27			3回目
Case3-1-34		②クランクあり	1回目	Case3-2-34		②クランクあり	1回目
Case3-1-35			2回目	Case3-2-35			2回目
Case3-1-36			3回目	Case3-2-36			3回目

④ 障害物ありのケース (3 ケース)

上述の①～③のケースのうち、代表的な1条件【Case3-1-19～21（小型船舶，孤立波，汀線－60cm，クランクなし）】について，防潮堤前面に障害物を設置したケースを実施する（試行3回）。

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行
Case3-3-1	汀線 -60cm ②	①クランク なし	1回目
Case3-3-2			2回目
Case3-3-3			3回目

(2) 漂流物模型

前年度使用した模型を踏襲する.

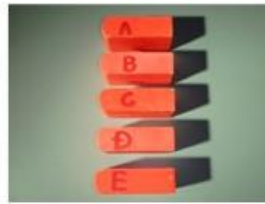
① 小型船舶模型



小型船舶

基本寸法 : 左図の通り

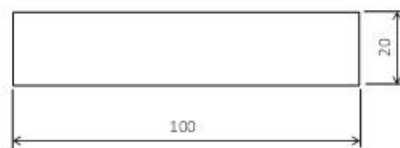
個体の質量 : A 0.080kgf (0.784N)
B 0.080kgf (0.784N)
C 0.080kgf (0.784N)
D 0.083kgf (0.813N)
E 0.080kgf (0.784N)



使用台数 : 堤体形状 直線: 3台
堤体形状 クランク: 4台

※防水塗装により、吸水による質量の変動はなし

② 流木模型



流木No.1～No.4

基本寸法 : 左図の通り

個体質量 : No.1 0.020kgf (0.196N)
No.2 0.019kgf (0.186N)
No.3 0.019kgf (0.186N)
No.4 0.019kgf (0.186N)



使用本数 : 堤体形状 直線: No.1～No.3
堤体形状 クランク: No.1～No.4

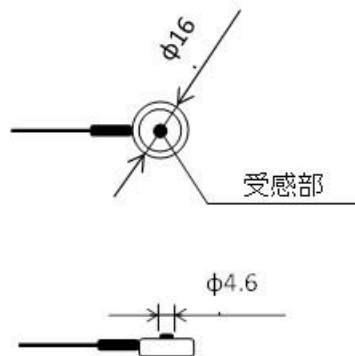
※防水塗装により、吸水による質量の変動はなし

(3) 衝突力測定機器

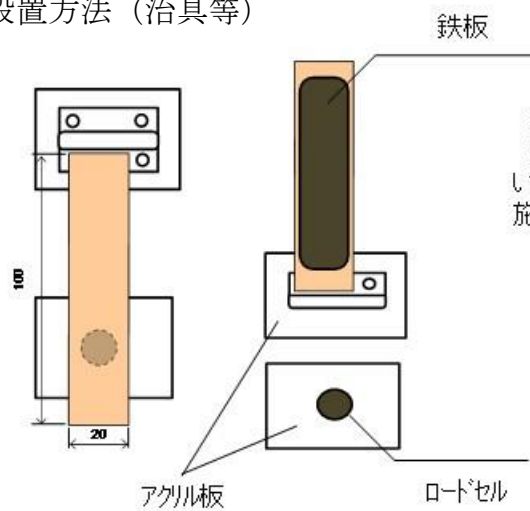
前年度使用した測定機器を踏襲する。ただしロードセルの定格容量を 100N→2KN に変更する。

① ロードセル仕様

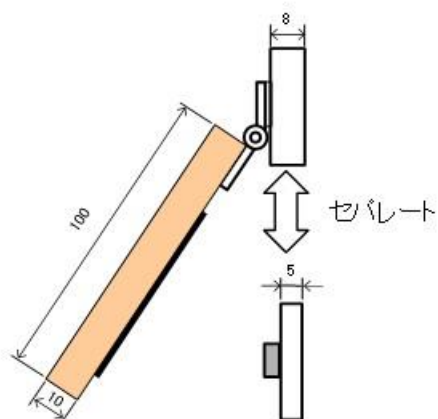
型式名	定格容量	固有振動数	製造元
LMB-A-2KN	2KN (203.9kgf)	約54kHz	株式会社 共和電業



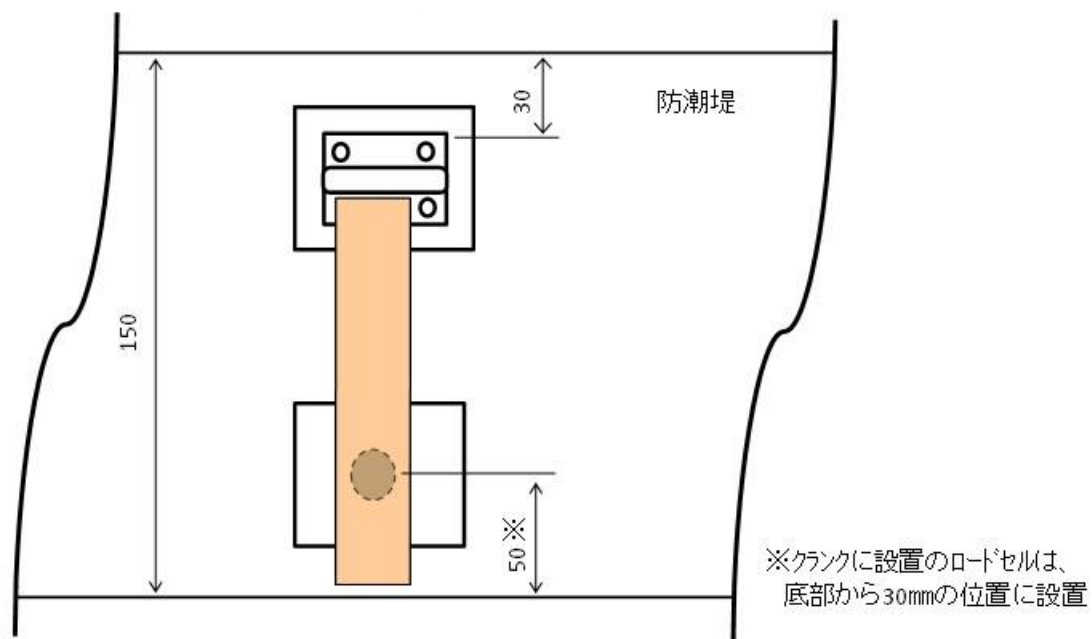
② 設置方法（治具等）



ロードセルの特性に踏まえて支持棒を設置
受感部に対して垂直な力が加わらないと加重を感測しない。あわせて支持棒とロードセルの間に鉄板を加える措置を施した。



③設置方法（防潮堤への設置）



（クランク手前）



（クランク奥）

ロードセル設置状況

④ データサンプリング

実験の種類	データサンプリング時間(s)	サンプリング周波数(Hz)	(sec)
孤立波	15	4,000	0.00025
長波	20	2,000	0.00050
越流波	600	100	0.01000

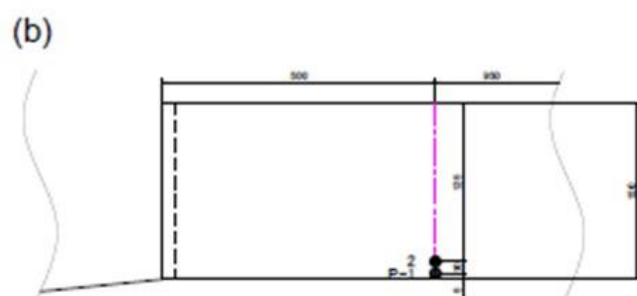
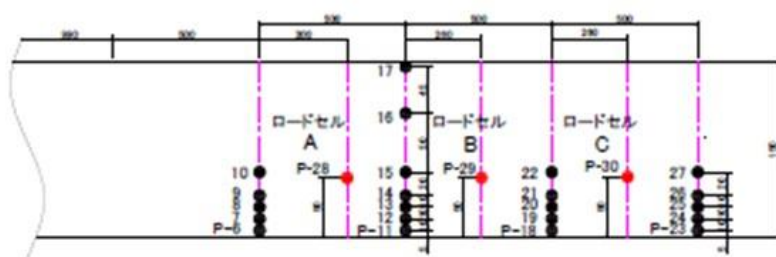
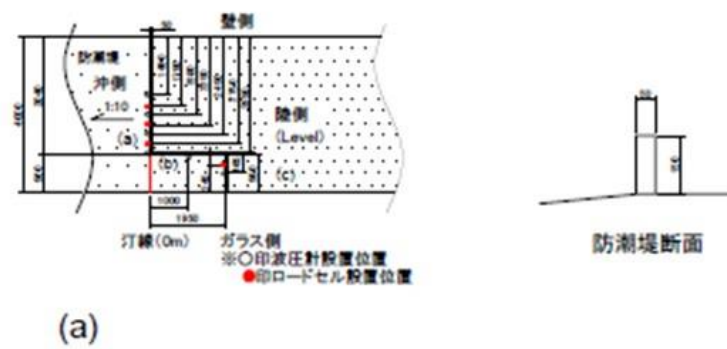


図 4-2-1 ロードセル取付け位置図

4-3 試験結果

試験を実施するに当たり、漂流物の初期設置箇所は、各試験条件において予備試験により衝突の確率の高い箇所を設定した上で実施した（概ね防潮堤直前～砕波点の間）。

(1)漂流物の衝突力

ロードセルによる衝突力サンプリングデータの一例を図 4-3-1 に、各ケースの衝突力測定結果を表 4-3-1、及び図 4-3-2～図 4-3-4 に示す。

これらの結果から、衝突力は（孤立波）＞（長波）であり、（小型船舶）＞（流木）の関係がある。つまり衝撃成分を除く作用波圧（ $\propto$ 波速）の大きな孤立波の方が大きく、質量のより大きな小型船舶（流木モデルの約 4 倍）の方が大きな値を示す。このことは、両漂流物がほぼ波速に追従して移動している（慣性力が大きい）ことの裏づけと解釈できる。

防潮堤前面に障害物を設置すると、漂流物（小型船舶）の衝突力は小さくなるが、防潮堤を越える越流度合いが増す。このときの防潮堤に作用する波圧は、障害物がない場合に比べ、障害物の陰影部になる堤脚部付近では減少するが、堤頂部付近では増加する。

(2)漂流物衝突時の角度

ビデオ画像解析から読み取った、漂流物衝突時の角度の一覧を表 4-3-2 に示す。なお、長波条件ではほとんどのケースで漂流物が崩れ波に巻き込まれ、角度読み取りには至らなかった。ここでいう“角度”は衝突時の移動ベクトルの角度ではなく、漂流物と防潮堤に直交する方向とのなす角度を示す。

この衝突時の角度と衝突力の関係を見た場合、図 4-3-4 の平均値では衝突時の鉛直角度が大きくなる汀線 0cm よりも、角度がほぼつかない汀線-60cmの方が、衝突力が大きくなる傾向がある（孤立波の場合）。また、長波の場合、砕波に巻き込まれているため漂流物の挙動と衝突力との因果関係は不明であるが、クランク前面よりもクランク後面の方が、衝突力が大きくなる傾向がある。

防潮堤に作用する漂流物による衝突力は、砕波形態により影響を受けると考えられるが、作用波圧のように砕波による衝撃的な成分が発生する場合に著しく大きくなるわけではなく、波の進行に伴う水平方向の慣性力にほぼ比例すると推察される（角度を持って衝突する場合は、水平成分がやや減少する）。

(3)画像解析による衝突力算定

ビデオ画像解析により衝突力を算定した結果を表 4-3-3～4-3-4 に示す。なお、表中の各ケース上段はビデオコマ数、下段が時間（衝突時を 0）を示し、衝突速度は直前の 10cm 間の移動時間を用いて算出した。なおグレーのハッチをかけた部分は、漂流物のトレースが困難で、波の移動速度の読み値を代用している。また衝突力は以下に示す式で算出した。

$$\text{衝突力 } F = MV/Dt \dots\dots\dots (1)$$

M : 漂流物の質量 (kg)

V : 衝突時の速度 (m/s)

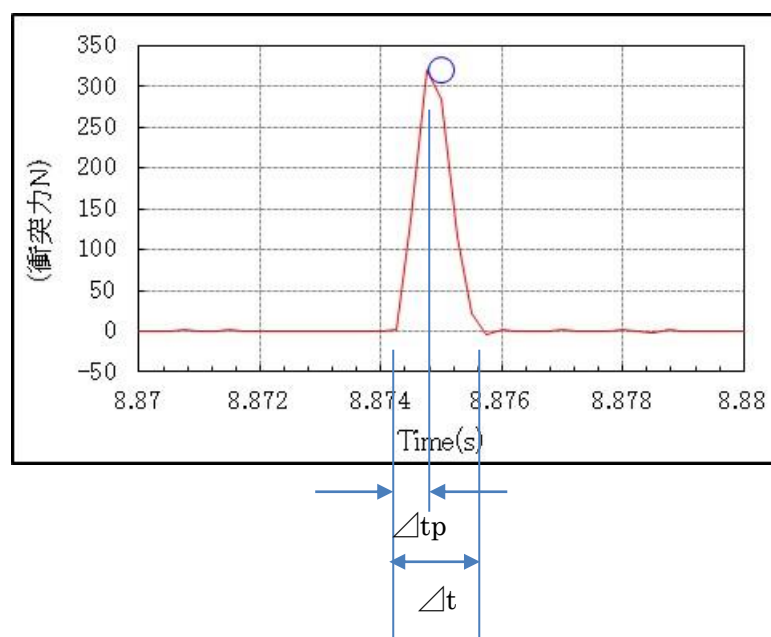
Dt : $0.1/\sqrt{40}=0.0158\text{s}$ ※1)

※1) 実物での作用時間は $Dt=0.1$ とされており，これを模型縮尺 1/40 相当で換算した値を用いた。

同表には，ロードセルによる計測値を併記し，これに合致するための逆算した Dt も示している。

これらの結果から，画像解析から算出した衝突力は何れもロードセルによる計測値よりかなり小さく，上述した作用時間を 1/13～1/80 にしないと両者の値は一致しない．このことから上式で仮定した作用時間が長過ぎ，今回の試験ではもっと短かったことが想定される．例えば，写真 4-3-1 に示すように漂流物衝突時の漂流物の動きから，映像撮影時間間隔 0.002s の間にも漂流物は動いており，0.01s を越える時間で衝突力が作用し続けていたとは考えにくい。

下図に，衝突力の時系列波形の一例を示す．作用時間として，力の変化した全時間 Δt と，当り始めからピーク値までの時間 Δt_p を計測した結果を図 4-3-1 に併記している．これらの平均的な値から $\Delta t=0.0015\text{s}$ ， $\Delta t_p=0.00075\text{s}$ とし，これを衝撃力の作用時間 Dt として用い，改めて(1)式に適用して算定を行った結果を表 4-3-5～4-3.7 に示す．このうち $Dt=\Delta t_p$ として算定した場合，ばらつきはあるものの衝突力がロードセルによる実測値と概ね同じオーダーの値となる．このことから，模型上の衝撃力作用時間は非常に短時間であることがわかった．なお，ばらつきの原因は主に画像解析による衝突速度の算定にある（特に長波の場合，漂流物が波に巻き込まれて精度良く算定できなかった）と考えられ，算定精度を上げるにはこの部分の精度向上が必要になる．



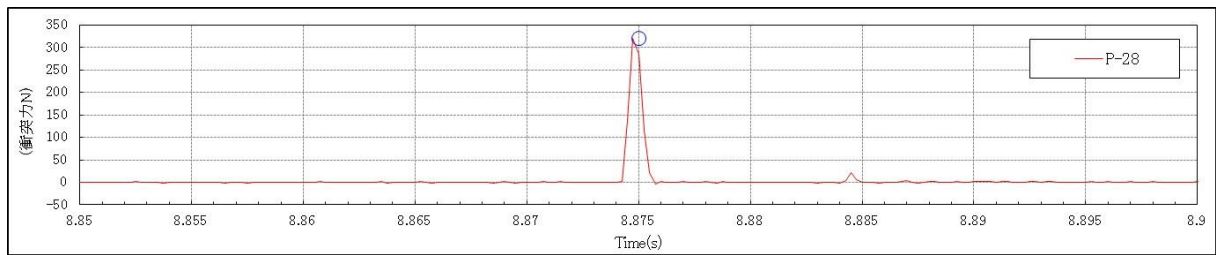
(4)流況

写真 4-3-2～4-3-10 に漂流物衝突試験時の流況を示す.

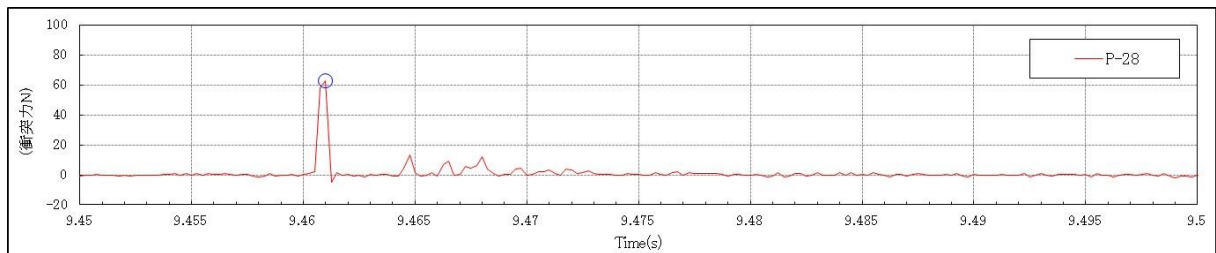
(5)漂流物の軌跡

各試験ケースの漂流物の軌跡を図 4-3-6～4-3-8 に示す. 長波条件では, 漂流物が防潮堤を超える頻度は低い, 孤立波条件ではを超える頻度が高い. また孤立波条件でも小型船舶の場合, 防潮堤が汀線 0cm から-60cm になると, 防潮堤を超える頻度が減少する傾向がある.

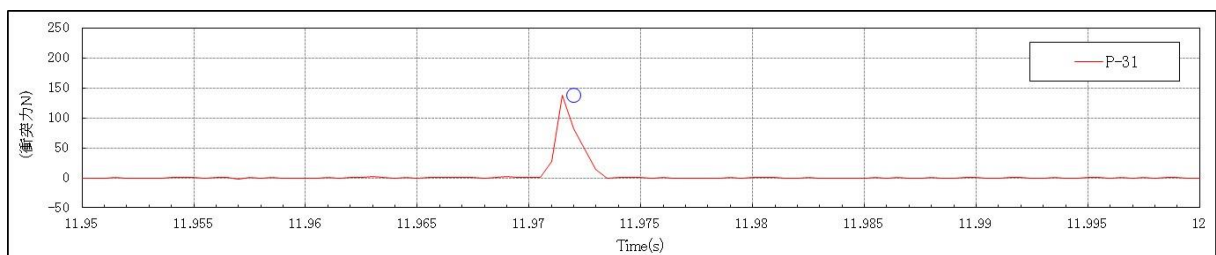
越流波条件では, 防潮堤にクランク形状を含む場合, クランクの奥側に漂流物が集まりやすく, そこから堤内に越流してくる頻度が高い. この現象は, クランク部以外の防潮堤前面では流速成分が小さくなるが, クランク部では奥に向けて流速成分が発生し, その分だけ水面が低くなる. その結果, クランク側に向けて水面勾配がつくため, 漂流物がそちらの方向に集まる, というメカニズムで説明できる.



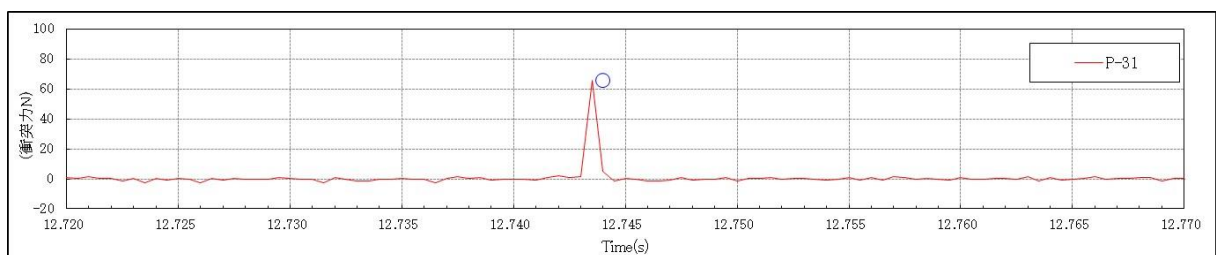
$\Delta t = 0.0015s$, $\Delta t p = 0.00075s$
(ケース 3-1-10 ; 孤立波, 小型船舶)



$\Delta t = 0.00075s$, $\Delta t p = 0.0005s$
(ケース 3-2-10 ; 孤立波, 流木)



$\Delta t = 0.0030s$, $\Delta t p = 0.0010s$
(ケース 3-1-13 ; 長波, 小型船舶)



$\Delta t = 0.0015s$, $\Delta t p = 0.0005s$
(ケース 3-2-13 ; 長波, 流木)

図 4-3-1 ロードセルによる衝突力サンプリングデータの一例

表 4-3-1 漂流物影響の各ケースの衝突力測定結果（孤立波、長波）

表 4-3-1 漂流物影響の各ケースの衝突力測定結果 (孤立波、長波)									
漂流物影響実験ケース表(孤立波、漂流物:流木)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突力(N)				水温 (℃)	
				P-28(1)	P-29(2)	P-30(3)	P-31(4)		
Case3-2-1	汀線 0cm ①	①クランク なし	1回目	81,039	50,721	37,746		24	
Case3-2-2			2回目	66,512	39,491	57,472			
Case3-2-3			3回目	72,295	55,375	54,164			
Case3-2-10	汀線 0cm ①	②クランク あり	1回目	62,884	58,211	63,191	51.881	25	
Case3-2-11			2回目	65,785	59,157	61,240			71.898
Case3-2-12			3回目	61,399	58,648	55,752			43.575
Case3-2-19	汀線 -60cm ②	①クランク なし	1回目	97,372	60,707	89,510		23	
Case3-2-20			2回目	94,215	76,894	76,524			
Case3-2-21			3回目	93,635	78,410	99,501			
Case3-2-28	汀線 -60cm ②	②クランク あり	1回目	108,038	72,707	72,890	78.478	21	
Case3-2-29			2回目	102,846	59,596	90,870			81.459
Case3-2-30			3回目	114,479	72,009	109,303			114.600
衝突力:最大衝突力の測定値									

漂流物影響実験ケース表(長波、漂流物:流木)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突力(N)				水温 (℃)	
				P-28(1)	P-29(2)	P-30(3)	P-31(4)		
Case3-2-4	汀線 0cm ①	①クランク なし	1回目	-	33,809	-		24	
Case3-2-5			2回目	-	26,388				
Case3-2-6			3回目	37,445	-	-			
Case3-2-13	汀線 0cm ①	②クランク あり	1回目	19,894	38,846	25,525	65.847	25	
Case3-2-14			2回目	70,550	-	-			54.580
Case3-2-15			3回目	85,913	-	20,983			50.728
Case3-2-22	汀線 -60cm ②	①クランク なし	1回目	46,513	28,966	23,608		23	
Case3-2-23			2回目	-	40,829	25,644			
Case3-2-24			3回目	-	59,165	32,384			
Case3-2-31	汀線 -60cm ②	②クランク あり	1回目	100,982	43,218	-	98.553	21	
Case3-2-32			2回目	64,062	15,790	49,996			45.446
Case3-2-33			3回目	11,502	25,086	30,773			61.893
衝突力:最大衝突力の測定値									

①孤立波実験ケース(24ケース)									
漂流物影響実験ケース表(孤立波、漂流物:小型船舶)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突力(N)				水温 (℃)	
				P-28(A)	P-29(B)	P-30(G)	P-31(D)		
Case3-1-1	汀線 0cm ①	①クランク なし	1回目	301,094	247,475	204,873		24	
Case3-1-2			2回目	337,478	252,678	226,424			
Case3-1-3			3回目	351,753	274,706	247,203			
Case3-1-10	汀線 0cm ①	②クランク あり	1回目	320,464	242,872	236,816	245,751	25	
Case3-1-11			2回目	291,728	262,482	267,796			274,656
Case3-1-12			3回目	321,769	256,356	233,756			223,250
Case3-1-19	汀線 -60cm ②	①クランク なし	1回目	356,518	210,686	252,141		23	
Case3-1-20			2回目	478,144	190,040	230,346			
Case3-1-21			3回目	279,565	175,103	369,719			
Case3-1-28	汀線 -60cm ②	②クランク あり	1回目	333,872	344,848	458,259	251,885	21	
Case3-1-29			2回目	424,799	351,777	421,767			229,807
Case3-1-30			3回目	436,605	285,845	342,607			256,436
衝突力:最大衝突力の測定値									

②長波実験ケース(24ケース)									
漂流物影響実験ケース表(長波、漂流物:小型船舶)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突力(N)				水温 (℃)	
				P-28(A)	P-29(B)	P-30(G)	P-31(D)		
Case3-1-4	汀線 0cm ①	①クランク なし	1回目	-	203,283	65,043		24	
Case3-1-5			2回目	138,387	115,712	220,888			
Case3-1-6			3回目	74,935	106,758	134,448			
Case3-1-13	汀線 0cm ①	②クランク あり	1回目	-	-	90,024	137,928	25	
Case3-1-14			2回目	211,783	-	78,110			128,325
Case3-1-15			3回目	144,968	-	120,047			165,683
Case3-1-22	汀線 -60cm ②	①クランク なし	1回目	42,604	-	157,345		23	
Case3-1-23			2回目	77,983	88,256	78,080			
Case3-1-24			3回目	-	54,944	-			-
Case3-1-31	汀線 -60cm ②	②クランク あり	1回目	46,325	37,701	40,742	165,527	21	
Case3-1-32			2回目	-	93,810	196,090			125,656
Case3-1-33			3回目	162,471	111,170	128,361			164,121
衝突力:最大衝突力の測定値									

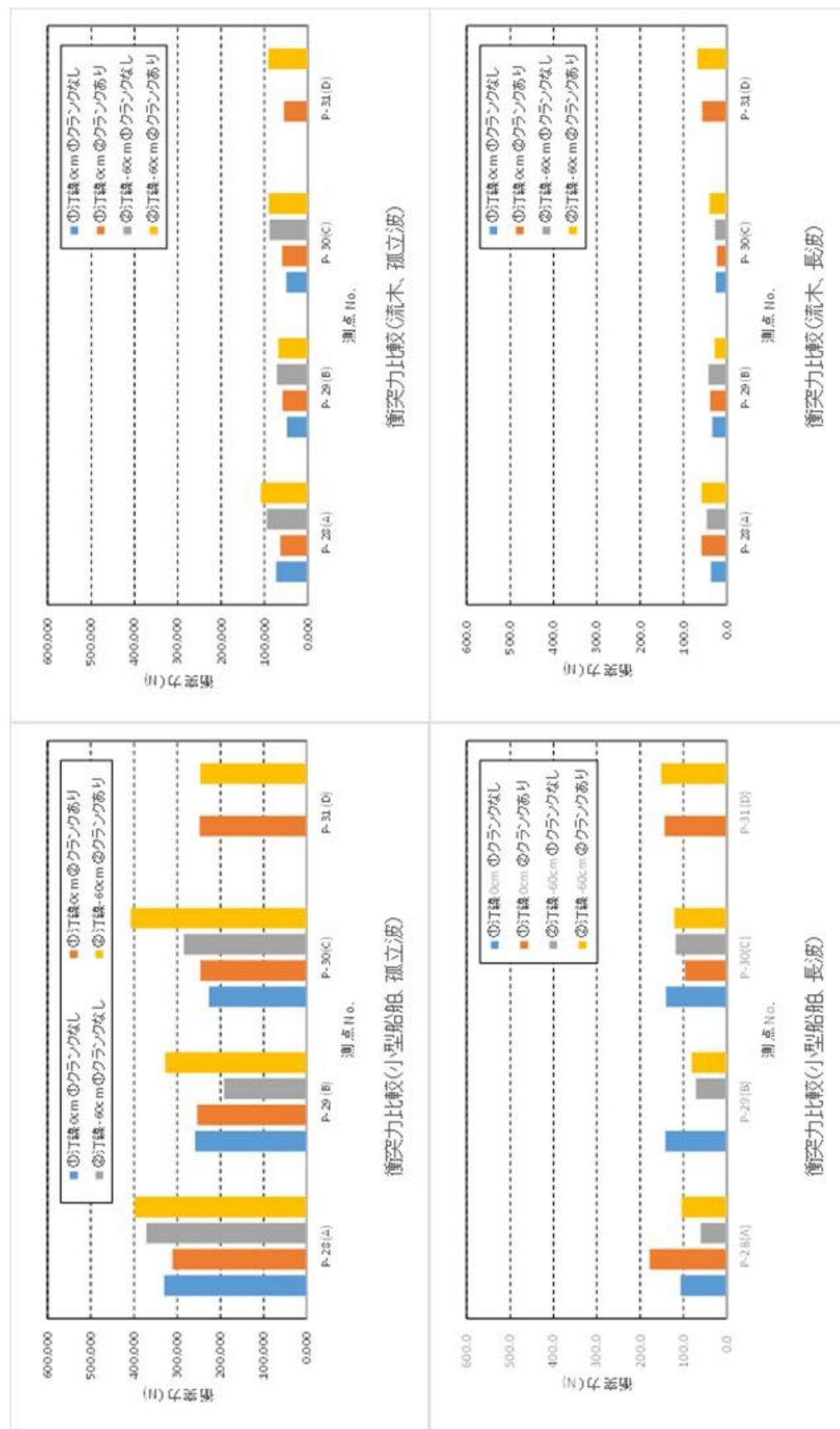


図 4-3-2 漂流物影響の各ケースの衝撃力測定結果（孤立波，長波）

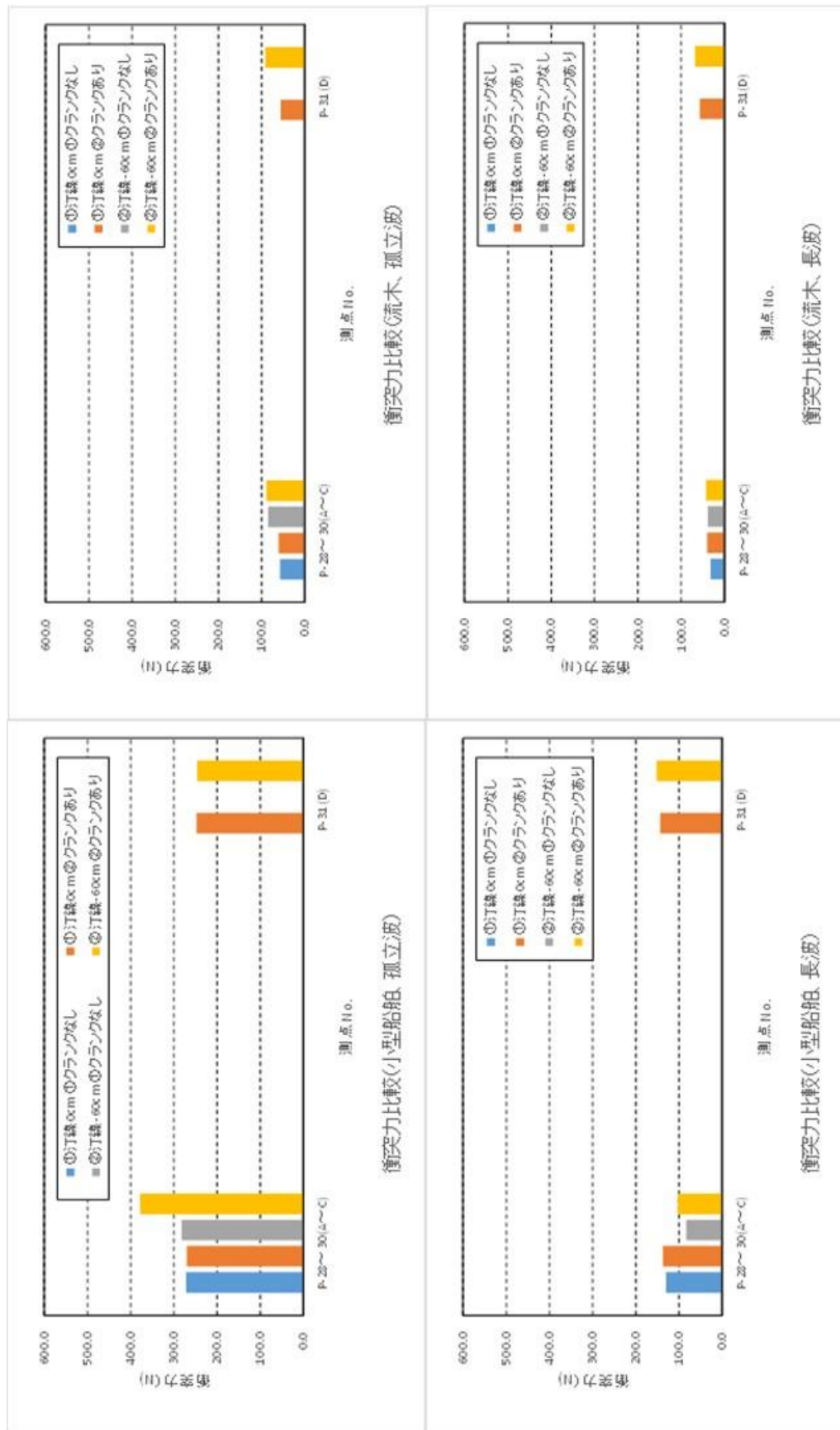


図 4-3-3 漂流物影響の各ケースの衝撃測定結果（防潮堤前面 3 測点の平均）

④障害物ありの実験ケース(3ケース)								
漂流物影響実験ケース表(孤立波、漂流物:小型船舶)								
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突力(N)				水温 (℃)
				P-28(A)	P-29(B)	P-30(C)	P-31(D)	
Case3-3-1	汀線 -60cm ②	①クランク なし	1回目	183.580	134.111	124.390		22
Case3-3-2			2回目	140.298	141.944	200.246		
Case3-3-3			3回目	49.675	119.410	170.518		
衝突力:最大衝突力の測定値								

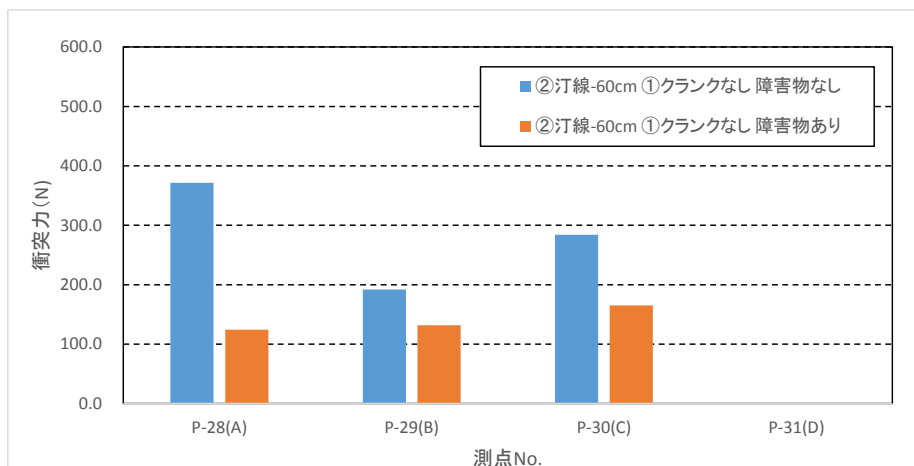


図 4-3-4 障害物の有無による衝突力の比較(小型船舶, 孤立波)

防潮堤に作用する最大波圧測定結果一覧表				
平面配置		①		
堤体位置		②障害物なし		②障害物あり
入力津波		孤立波case2		孤立波case3
測線C	測点11 (Pa)	6.5E+03		4.9E+03
	測点12 (Pa)	7.1E+03		4.5E+03
	測点13 (Pa)	5.7E+03		3.8E+03
	測点14 (Pa)	6.0E+03		4.2E+03
	測点15 (Pa)	4.1E+03		3.6E+03
	測点16 (Pa)	2.1E+03		4.9E+03
	測点17 (Pa)	1.4E+02		6.1E+03

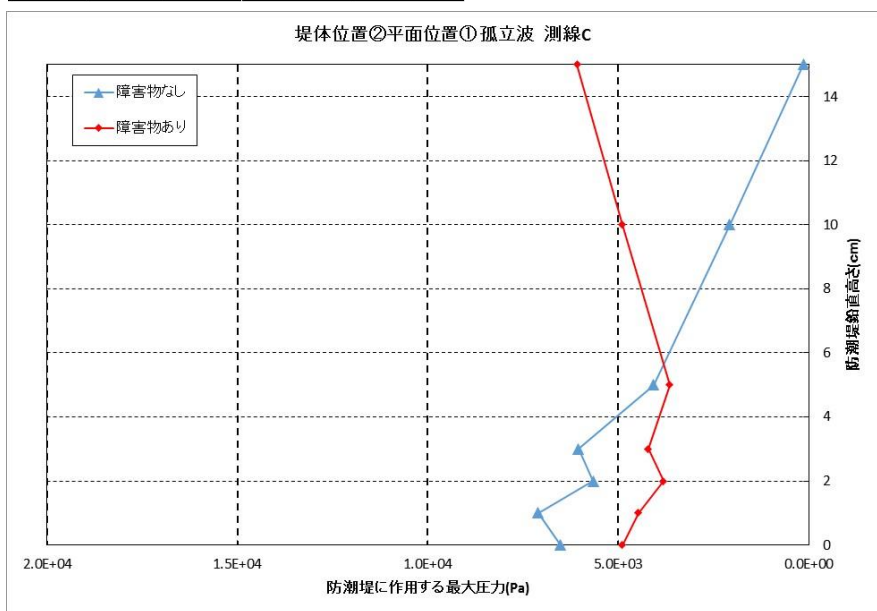


図 4-3-5 障害物の有無による作用波圧の比較(孤立波, 汀線-60cm, 測線C)

表 4-3-2 漂流物衝突時の角度一覧

漂流物衝突時の角度一覧表(孤立波、漂流物:小型船舶)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突角度(平面:°)			衝突角度(鉛直方向:°)			(平面:°)	(鉛直:°)
				a	b	c	a	b	c	d(クランク奥)	
Case3-1-1	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目	0.0	0.0	0.0	-	-	51.1		
Case3-1-2			2回目	5.0	5.0	0.0	-	-	49.0		
Case3-1-3			3回目	0.0	0.0	0.0	-	-	42.5		
Case3-1-10		②クランクあり	1回目	0.0	0.0	0.0	-	-	42.4	-2.0	2.3
Case3-1-11			2回目	0.0	0.0	0.0	-	-	44.7	-20.0	0.0
Case3-1-12			3回目	0.0	0.0	0.0	-	-	40.3	0.0	0.6
Case3-1-19	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目	-10.0	0.0	0.0	-	-	0.0		
Case3-1-20			2回目	0.0	0.0	0.0	-	-	5.7		
Case3-1-21			3回目	0.0	0.0	0.0	-	-	11.8		
Case3-1-28		②クランクあり	1回目	0.0	0.0	0.0	-	-	17.7	30.0	0.2
Case3-1-29			2回目	0.0	0.0	0.0	-	-	10.5	0.0	0.5
Case3-1-30			3回目	0.0	0.0	0.0	-	-	10.5	2.0	0.3

漂流物衝突時の角度一覧表(孤立波、漂流物:流木)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突角度(平面:°)			衝突角度(鉛直方向:°)			(平面:°)	(鉛直:°)
				a	b	c	a	b	c	d(クランク奥)	
Case3-2-1	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目	0.0	5.0	-3.0	-	-	63.1		
Case3-2-2			2回目	-3.0	5.0	0.0	-	-	63.4		
Case3-2-3			3回目	0.0	3.0	-3.0	-	-	68.5		
Case3-2-10		②クランクあり	1回目	0.0	0.0	0.0	-	-	51.4	-10.0	2.7
Case3-2-11			2回目	0.0	5.0	-20.0	-	-	55.5	0.0	1.5
Case3-2-12			3回目	10.0	5.0	5.0			57.3	-60.0	2.4
Case3-2-19	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目	3.0	-3.0	-1.0	-	-	3.0		
Case3-2-20			2回目	20.0	-5.0	5.0	-	-	2.0		
Case3-2-21			3回目	-3.0	10.0	3.0	-	-	9.9		
Case3-2-28		②クランクあり	1回目	5.0	-1.0	0.0	-	-	2.2	5.0	0.2
Case3-2-29			2回目	20.0	15.0	-10.0	-	-	5.3	2.0	0.0
Case3-2-30			3回目	2.0	5.0	3.0	-	-	2.3	3.0	1.0

漂流物衝突時の角度一覧表(長波、漂流物:小型船舶)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突角度(平面:°)			衝突角度(鉛直方向:°)			(平面:°)	(鉛直:°)
				a	b	c	a	b	c	d(クランク奥)	
Case3-1-4	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-1-5			2回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-1-6			3回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-1-13		②クランクあり	1回目	-	-	-	-	-	-	0.0	1.4
Case3-1-14			2回目	-	-	-	-	-	-	-20.0	5.0
Case3-1-15			3回目	-	-	-	-	-	-	0.0	0.1
Case3-1-22	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-1-23			2回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-1-24			3回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-1-31		②クランクあり	1回目	-	-	-	-	-	-	0.0	0.7
Case3-1-32			2回目	-	-	-	-	-	-	0.0	0.6
Case3-1-33			3回目	-	-	-	-	-	-	0.0	0.6

漂流物衝突時の角度一覧表(長波、漂流物:流木)

ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	試行	衝突角度(平面:°)			衝突角度(鉛直方向:°)			(平面:°)	(鉛直:°)
				a	b	c	a	b	c	d(クランク奥)	
Case3-2-4	汀線0cm ①	①クランクなし	1回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-2-5			2回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-2-6			3回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-2-13		②クランクあり	1回目	-	-	-	-	-	-	60.0	-
Case3-2-14			2回目	-	-	-	-	-	-	75.0	-
Case3-2-15			3回目	-	-	-	-	-	-	90.0	-
Case3-2-22	汀線 -60cm ②	①クランクなし	1回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-2-23			2回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-2-24			3回目	-	-	-	-	-	-		
Case3-2-31		②クランクあり	1回目	-	-	-	-	-	-	90.0	-
Case3-2-32			2回目	-	-	-	-	-	-	-75.0	-
Case3-2-33			3回目	-	-	-	-	-	-	-80.0	-

表 4-3-3 画像解析による衝突速度・衝突力の算定結果（孤立波）

漂流物影響の把握実験 画像解析による衝突力の算出(孤立波 汀線0cm)																
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 平面形状	漂流物	測定位置(cm)							衝突速度 (m/s)	衝突力F(N)		実測値から 逆算した Dt(sec.)		
				30	20	10(15)	0	-10	-20	-30		-40	-50		-60	計算値
Case3_1_3	15	①	小型船舶 C	1544	1578	1604	1628							10.549	351.753	0.0005
		①		0.168	0.100	0.048	0.000									
Case3_1_12	15	①	小型船舶 C	1962	1997	2025	2048							11.007	321.769	0.0005
		②	小型船舶 D (クランク部)	0.172	0.102	0.046	0.000									
						1535	1579							8.950	274.656	0.0005
						0.088	0.000									
Case3_2_3	15	①	流木 3	1931	1957	1985	2006							2.860	81.039	0.0006
		①		0.150	0.098	0.042	0.000									
Case3_2_12	15	①	流木 3	1948	1978	2014	2040							2.310	65.785	0.0006
				0.184	0.124	0.052	0.000									
		②	流木 4 (クランク部)			2422	2478							1.609	71.898	0.0004
						0.112	0.000									

漂流物影響の把握実験 画像解析による衝突力の算出(孤立波 汀線-60cm)																
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 平面形状	漂流物	測定位置(cm)							衝突速度 (m/s)	衝突力F(N)		実測値から 逆算した Dt(sec.)		
				30	20	10	0	-10	-20	-30		-40	-50(-45)		-60	計算値
Case3_1_21	15	②	小型船舶 C				1723	1744	1768	1794	1816	1840	1862	11.507	369.719	0.0005
		①					0.278	0.236	0.188	0.136	0.092	0.044	0.000			
Case3_1_30	15	②	小型船舶 C				1721	1758	1780	1796	1816	1838	1858	12.658	342.607	0.0006
		②	小型船舶 D クランク部				0.274	0.200	0.156	0.124	0.084	0.040	0.000			
												1995	2044	8.037	256.436	0.0005
												0.098	0.000			
Case3_2_21	15	②	流木 3				1664	1687	1703	1720	1728	1737	1763	2.310	99.501	0.0004
		①					0.198	0.152	0.120	0.086	0.070	0.052	0.000			
Case3_2_30	15	②	流木 3				1508	1536	1552	1566	1573	1579	1607	2.145	109.903	0.0003
							0.198	0.142	0.110	0.082	0.068	0.056	0.000			
		②	流木 4 クランク部									2321	2351	3.003	114.600	0.0004
												0.060	0.000			

表 4-3-4 画像解析による衝突速度・衝突力の算定結果（長波）

漂流物影響の把握実験 画像解析による衝突力の算出(長波 汀線0cm)														
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 平面形状	漂流物	測定位置(cm)										衝突速度 (m/s)
				30	20	10(15)	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	
Case3_1_6	片波 7	①	小型船舶 C	3967	3993	4019	4045							0.641
		①		0.156	0.104	0.052	0.000							
Case3_1_15	片波 7	①	小型船舶 C	2353	2389	2414	2434							1.852
				0.162	0.090	0.040	0.000							
		②	小型船舶 D			1903	1982							0.949
						0.158	0.000							
Case3_2_6	片波 7	①	流木 3	2166	2205	2230	2255							2.000
		①		0.178	0.100	0.050	0.000							
		①	流木 3	1737	1766	1790	1815							2.000
				0.156	0.098	0.050	0.000							
Case3_2_15	片波 7	②	流木 4			2047	2114							1.119
						0.134	0.000							

漂流物影響の把握実験 画像解析による衝突力の算出(長波 汀線-60cm)														
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 平面形状	漂流物	測定位置(cm)										衝突速度 (m/s)
				30	20	10	0	-10	-20	-30	-40	-45	-60	
Case3_1_23	片波 7	②	小型船舶 C				1429	1456	1481	1503	1532	1575	1656	0.926
		①					0.454	0.400	0.350	0.306	0.248	0.162	0.000	
Case3_1_33	片波 7	②	小型船舶 C				1953	1974	2008	2036	2059	2144	2223	0.949
							0.540	0.498	0.430	0.374	0.328	0.158	0.000	
		②	小型船舶 D クランク部									1795	1865	1.071
												0.140	0.000	
Case3_2_24	片波 7	②	流木 3				1579	1605	1631	1654	1673	1687	1713	1.923
		①					0.268	0.216	0.164	0.118	0.080	0.052	0.000	
		②	流木 3				1631	1655	1674	1706	1729	1758	1795	1.351
							0.328	0.280	0.242	0.176	0.132	0.074	0.000	
Case3_2_33	片波 7	②	流木 4 クランク部									1704	1741	1.351
												0.074	0.000	

漂流物影響の把握実験 画像解析による衝突力の算出(孤立波 汀線-60cm 障害物有り)														
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 平面形状	漂流物	測定位置(cm)										衝突速度 (m/s)
				40	30	20	10	0	-10	-20	-30	-35	-60	
Case3_3_33	15	②	小型船舶 C					734	752	760	768	783	863	1.563
		①						0.253	0.222	0.206	0.190	0.160	0.000	

表 4-3-5 漂流物影響の把握試験 画像解析による衝突力の算出（汀線 0cm）

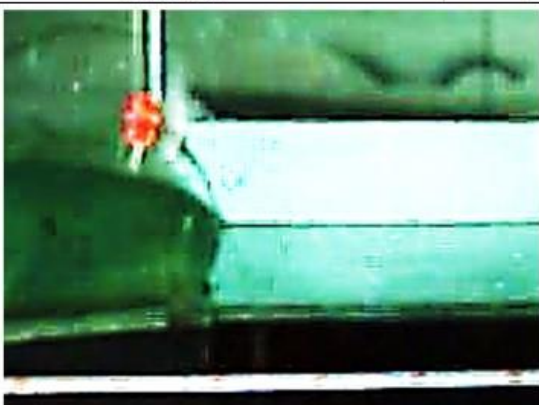
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置	漂流物	衝突速度 v(m/s)	質量 M(kg)	衝突力F(N)		
		平面形状				実測値	Dt = Δt	Dt = Δt_p
Case3_1_3	孤立波 15	①-①	小型船舶	2.08	0.080	351.75	111.11	222.22
Case3_1_12		①-②		2.17	0.080	321.77	115.94	231.88
		①-②		1.70	0.083	274.66	94.27	188.54
Case3_2_3		①-①	流木	2.38	0.019	81.04	30.13	60.25
Case3_2_12		①-②		1.92	0.019	65.79	24.33	48.67
		①-②		1.34	0.019	71.90	16.95	33.89
Case3_1_6	長波 片波 7	①-①	小型船舶	0.64	0.080	220.89	34.19	68.38
Case3_1_15		①-②		1.85	0.080	211.78	98.77	197.53
		①-②		0.95	0.083	165.68	52.51	105.01
Case3_2_6		①-①	流木	2.00	0.020	37.45	26.67	53.33
Case3_2_15		①-②		2.00	0.020	85.91	26.67	53.33
		①-②		1.12	0.019	65.85	14.16	28.33

表 4-3-6 漂流物影響の把握試験 画像解析による衝突力の算出（汀線-60cm）

ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置	漂流物	衝突速度 v(m/s)	質量 M(kg)	衝突力F(N)		
		平面形状				実測値	Dt = Δt	Dt = Δt_p
Case3_1_21	孤立波 15	②-①	小型船舶	2.27	0.080	369.72	121.21	242.42
Case3_1_30		②-②		2.50	0.080	342.61	133.33	266.67
		②-②		1.53	0.083	256.44	84.65	169.30
Case3_2_21		②-①	流木	1.92	0.019	99.50	24.33	48.67
Case3_2_30		②-②		1.79	0.019	109.90	22.59	45.19
		②-②		2.50	0.019	114.60	31.63	63.27
Case3_1_23	長波 片波 7	②-①	小型船舶	0.93	0.080	78.08	49.38	98.77
Case3_1_33		②-②		0.95	0.080	128.36	50.63	101.27
		②-②		1.07	0.083	164.12	59.26	118.51
Case3_2_24		②-①	流木	1.92	0.020	32.38	25.64	51.28
Case3_2_33		②-②		1.35	0.020	30.77	18.02	36.04
		②-②		1.35	0.019	61.89	17.10	34.20

表 4-3-7 漂流物影響の把握試験 画像解析による衝突力の算出（障害物あり）

ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置	漂流物	衝突速度 v(m/s)	質量 M(kg)	衝突力F(N)		
		平面形状				実測値	Dt = Δt	Dt = Δt_p
Case3_3_33	15	②-①	小型船舶	1.56	0.08	170.518	83.33	166.67

ケース3_1_12 (孤立波 防潮堤 0cm 波高15cm)					
					
2コマ前 2046		1コマ前 2047			
					
防潮堤到達 2048		1コマ後 2049			
					
2コマ後 2050					

※ビデオ撮影は 1/500s で実施

写真 4-3-1 漂流物衝突時の挙動の一例 (孤立波, 防潮堤 0cm, 小型船舶)



写真 4-3-2 漂流物衝突試験流況 (孤立波, 防潮堤 0cm, クランクあり, 小型船舶)



写真 4-3-3 漂流物衝突試験流況（孤立波，防潮堤-60cm，クランクあり，小型船舶）

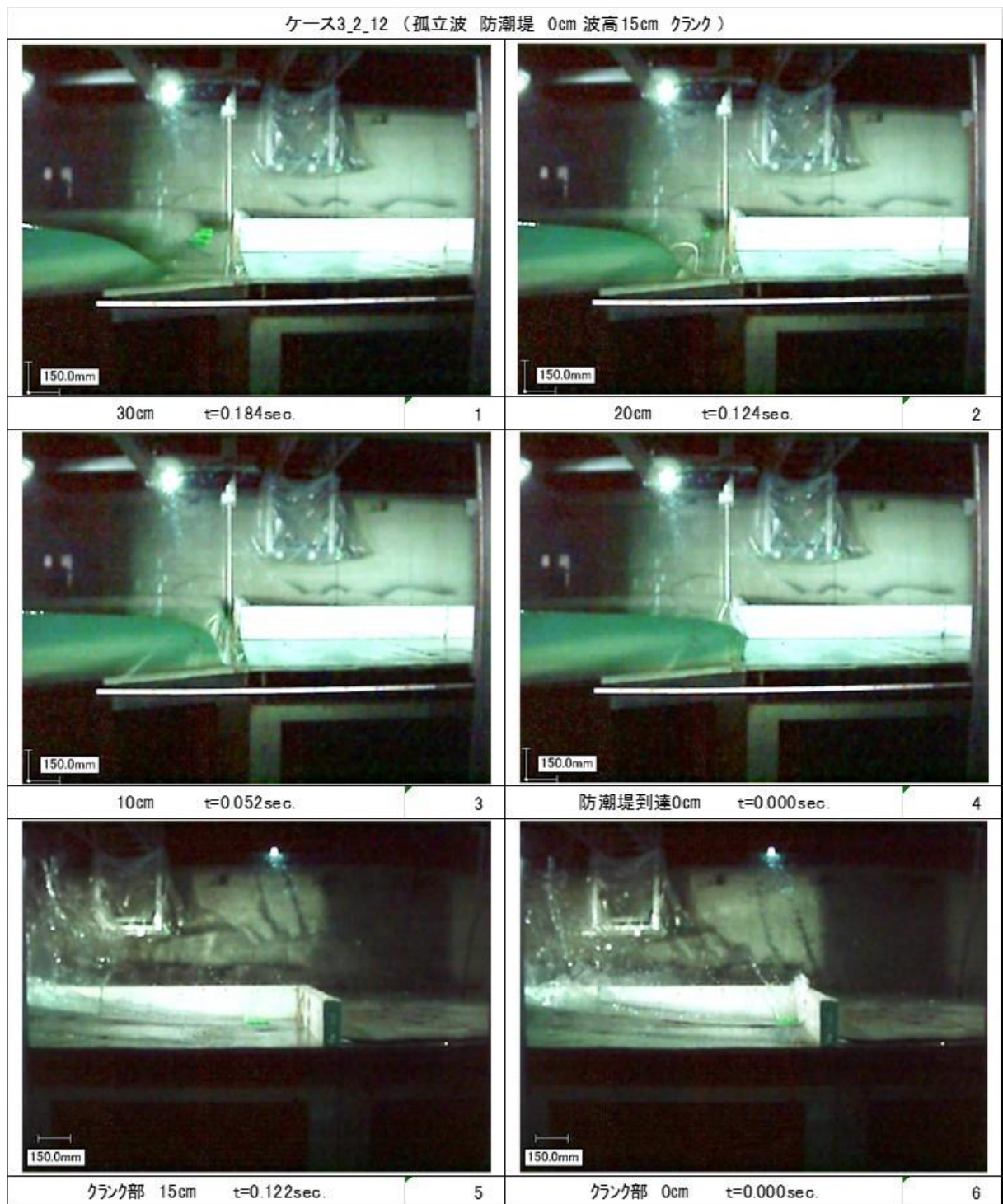


写真 4-3-4 漂流物衝突試験流況 (孤立波, 防潮堤 0cm, クランクあり, 流木)



写真 4-3-5 漂流物衝突試験流況 (孤立波, 防潮堤-60cm, クランクあり, 流木)



写真 4-3-6 漂流物衝突試験流況 (長波, 防潮堤 0cm, クランクあり, 小型船舶)



写真 4-3-7 漂流物衝突試験流況 (長波, 防潮堤-60cm, クランクあり, 小型船舶)



写真 4-3-8 漂流物衝突試験流況 (長波, 防潮堤 0cm, クランクあり, 流木)



写真 4-3-9 漂流物衝突試験流況 (長波, 防潮堤-60cm, クランクあり, 流木)



写真 4-3-10 漂流物衝突試験流況（孤立波，防潮堤-60cm，小型船舶，障害物あり）

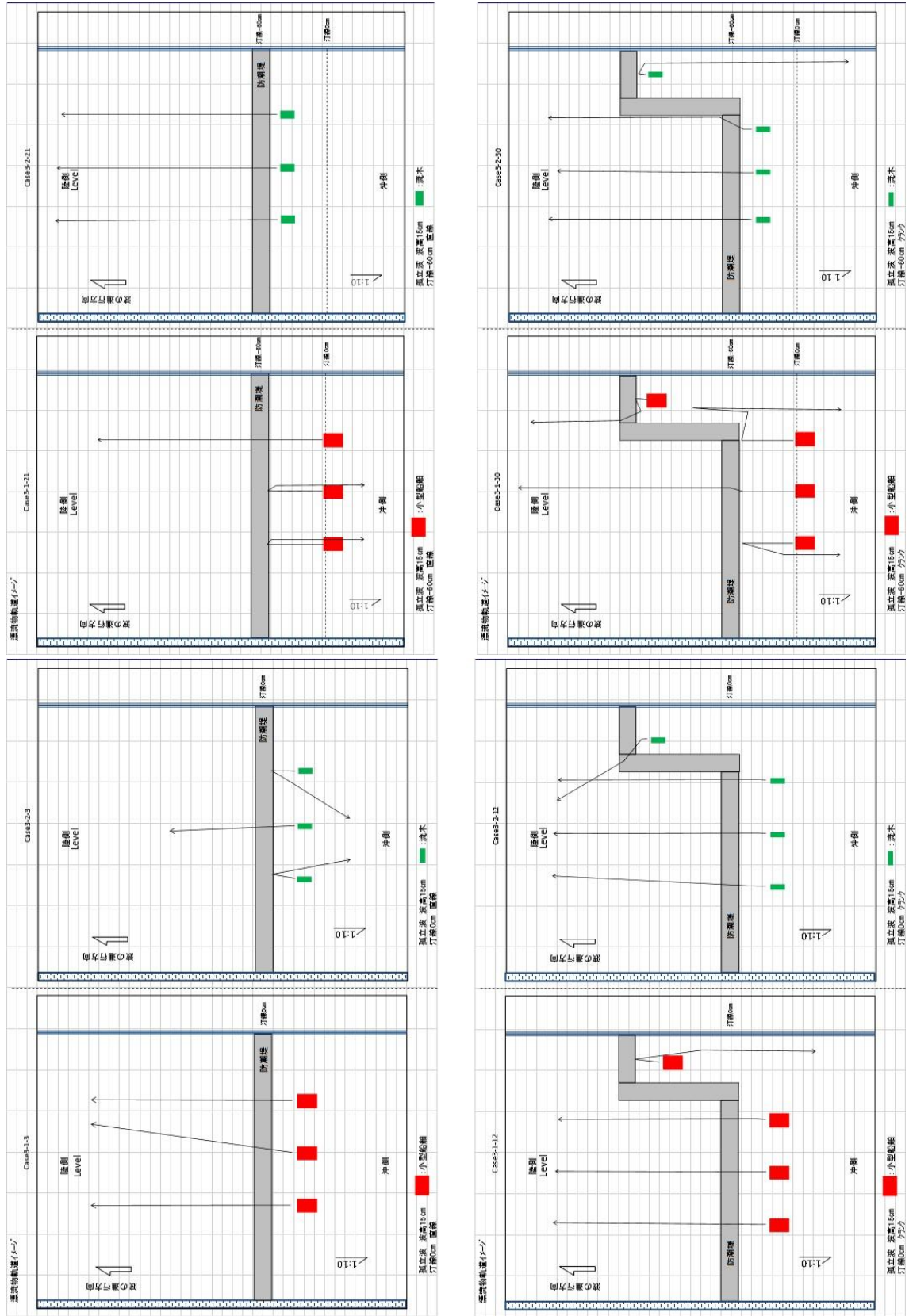


図 4-3-6 漂流物の軌跡（孤立波）

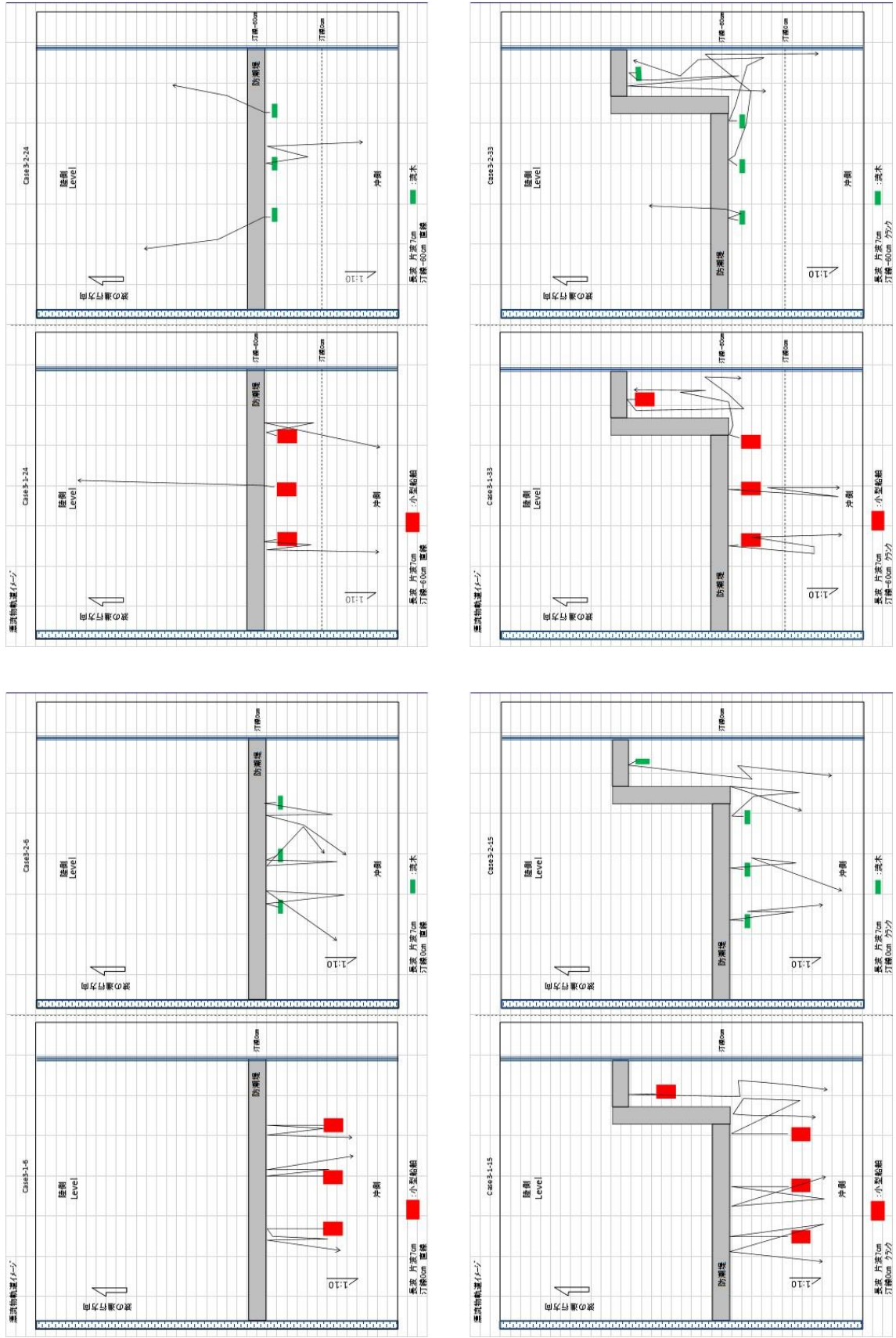


図 4-3-7 漂流物の軌跡（長波）

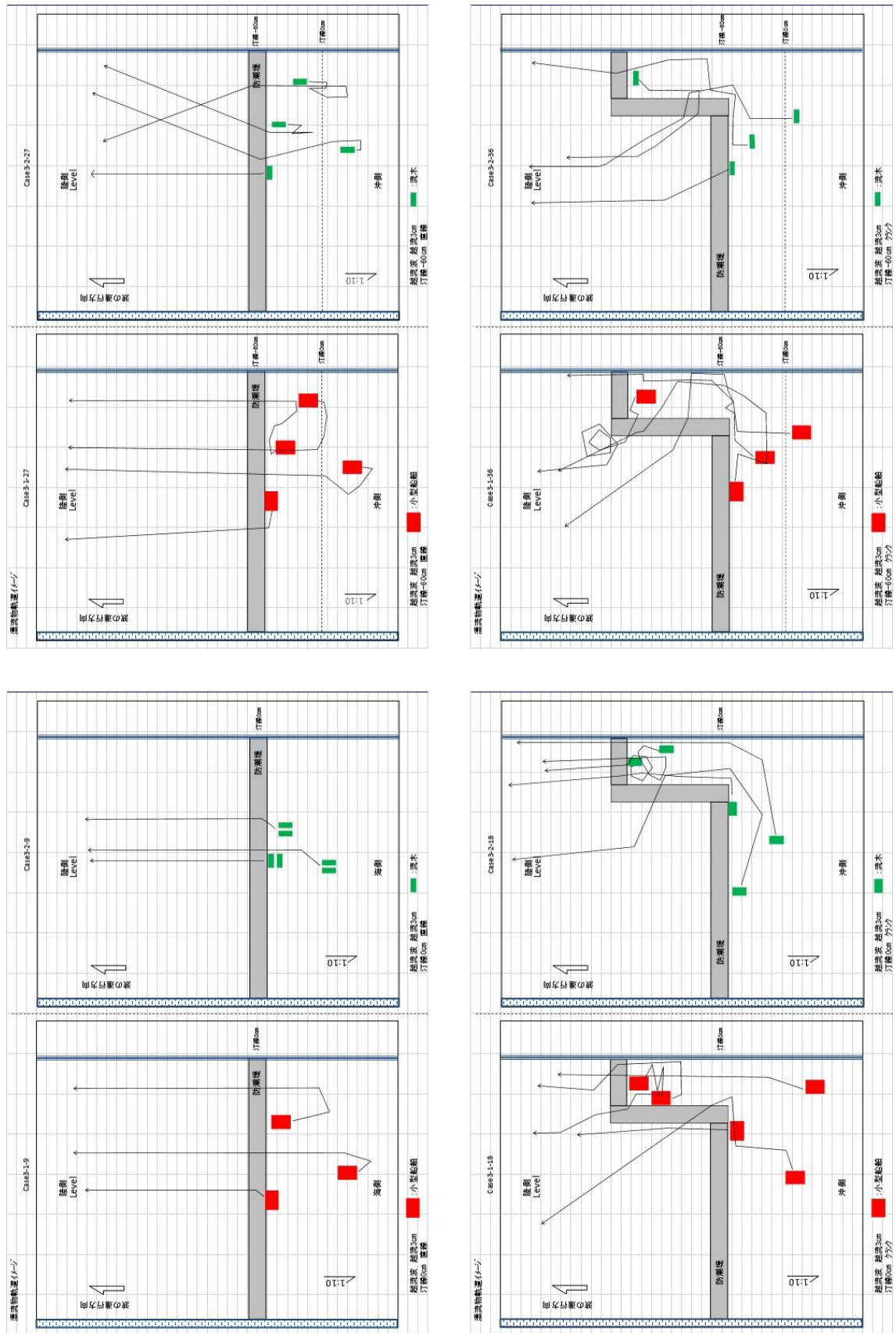


図 4-3-8 漂流物の軌跡（越流波）

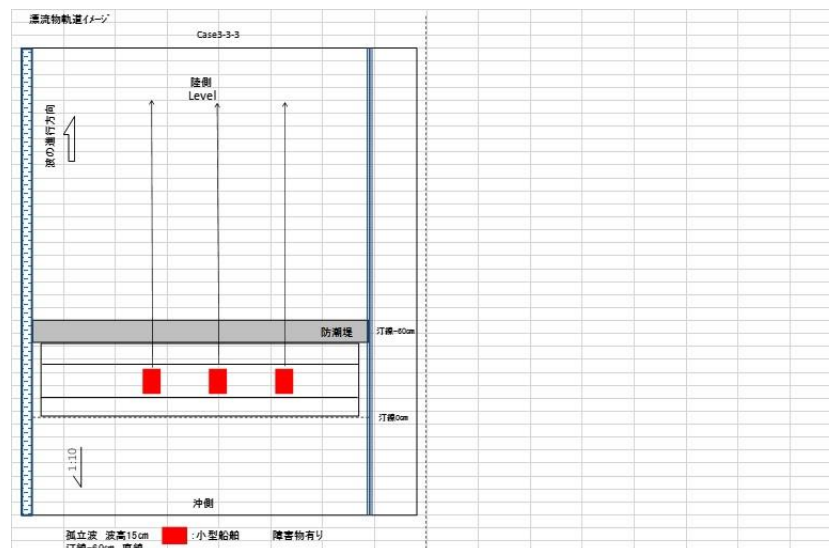


図 4-3-9 漂流物の軌跡（孤立波，障害物あり）

4-4 シミュレーションの概要

漂流物影響の把握のための水理試験で実施した各試験条件を対象とするシミュレーション解析を行う。解析コードは、京都大学防災研究所で開発された完全3次元流体解析モデルを利用する。水理試験で計測された漂流物の挙動および構造物への衝突力を解析結果と比較することにより、それらの整合性および解析手法の適用範囲を確認するとともに、解析手法および評価手法を提案する。また、漂流物の挙動について、アニメーションによる可視化を行う。

4-5 解析条件

(1)解析モデル

漂流物の挙動については、漂流物を模した粒子に対して津波を作用させる粒子追跡モデルを用いて表現する。粒子には、初期座標（3次元）、表面積（3次元）、及び質量を持たせる。粒子追跡モデルを以下に示す。

◆粒子の座標更新

$$p'_x = p_x + (Fd_x + Fi_x) \frac{dt^2}{W}$$

$$p'_y = p_y + (Fd_y + Fi_y) \frac{dt^2}{W}$$

$$p'_z = p_z + (Fd_z + Fi_z) \frac{dt^2}{W} + (Vb - Vf)dt$$

ここに、 $p_{x/y/z}$ ：移動前の粒子座標、 $p'_{x/y/z}$ ：移動後の粒子座標

$Fd_{x/y/z}$ ：抗力、 $Fi_{x/y/z}$ ：慣性力、 dt ：時間刻み、 W ：粒子質量

Vb ：浮上速度、 Vf ：自由落下速度

◆抗力（数式はX方向について示すが、YおよびZ方向も同一の式を用いる。）

$$Fd_x = \frac{C_D \rho A_{yz} U_x |U_x|}{2}$$

ここに、 C_D ：抗力係数（1.0）、 ρ ：水の密度、 A_{yz} ：粒子の断面積

U_x ：水の流速

◆慣性力（数式はX方向について示すが、YおよびZ方向も同一の式を用いる。）

$$Fi_x = C_M \rho V \frac{U_x - U_{px}}{dt}$$

ここに、 C_M ：慣性力係数（2.0）、 V ：粒子の体積、

U_{px} ：移動前の粒子移動速度

◆浮上速度（粒子が水中にある時のみ，考慮する．）

$$Vb = \sqrt{\frac{2gL_z}{C_d}}$$

ここに， L_z ：粒子の Z 方向サイズ

◆自由落下速度（粒子が空中にある時のみ，考慮する．）

$$Vf = gt_{air}$$

ここに， t_{air} ：粒子が空中にいる累積時間

(2)解析ケース

入力波 3 条件（孤立波，越流波，長波），堤体位置 2 条件（汀線 0cm，汀線-60cm），堤体形状 2 条件（クランクの有無）の合計 12 ケースの解析を実施した．解析ケースの一覧を表 4-5-1 に示す．

表 4-5-1 シミュレーション解析ケース一覧

ケース名	入力波	堤体形状	堤体位置	解析時間
PT_SW_flat_x0cm	孤立波	クランクなし	汀線 0cm	10s
PT_SW_flat_x60cm	孤立波	クランクなし	汀線-60cm	10s
PT_UF_flat_x0cm	越流波	クランクなし	汀線 0cm	130s
PT_UF_flat_x60cm	越流波	クランクなし	汀線-60cm	130s
PT_RW_flat_x0cm	長波	クランクなし	汀線 0cm	15s
PT_RW_flat_x60cm	長波	クランクなし	汀線-60cm	15s
PT_SW_clank_x0cm	孤立波	クランクあり	汀線 0cm	10s
PT_SW_clank_x60cm	孤立波	クランクあり	汀線-60cm	10s
PT_UF_clank_x0cm	越流波	クランクあり	汀線 0cm	130s
PT_UF_clank_x60cm	越流波	クランクあり	汀線-60cm	130s
PT_RW_clank_x0cm	長波	クランクあり	汀線 0cm	15s
PT_RW_clank_x60cm	長波	クランクあり	汀線-60cm	15s

4-6 解析結果と試験結果の比較

(1) PT_SW_flat_x0cm (孤立波, クランクなし, 汀線 0cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-1～4-6-2 に示す. 漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し, 漂流物同士の衝突は考慮していない.

次に, 試験と解析における漂流物速度を図 4-6-3 に示す. 解析結果については, 初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した.

また, 津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H-1～図 H-2 に示す.

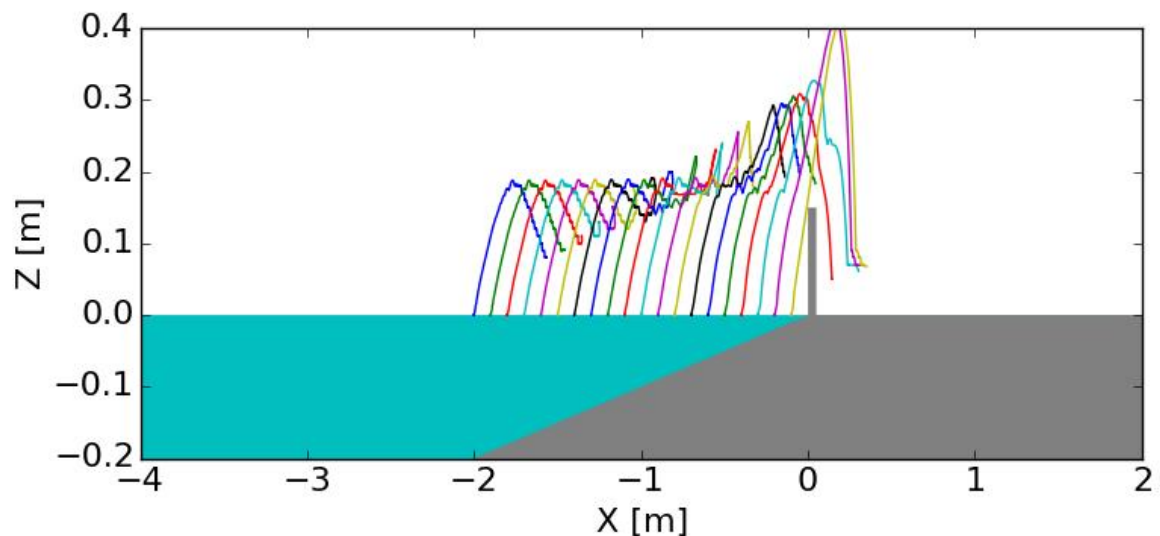


図 4-6-1 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクなし, 汀線 0cm, 小型船舶型】

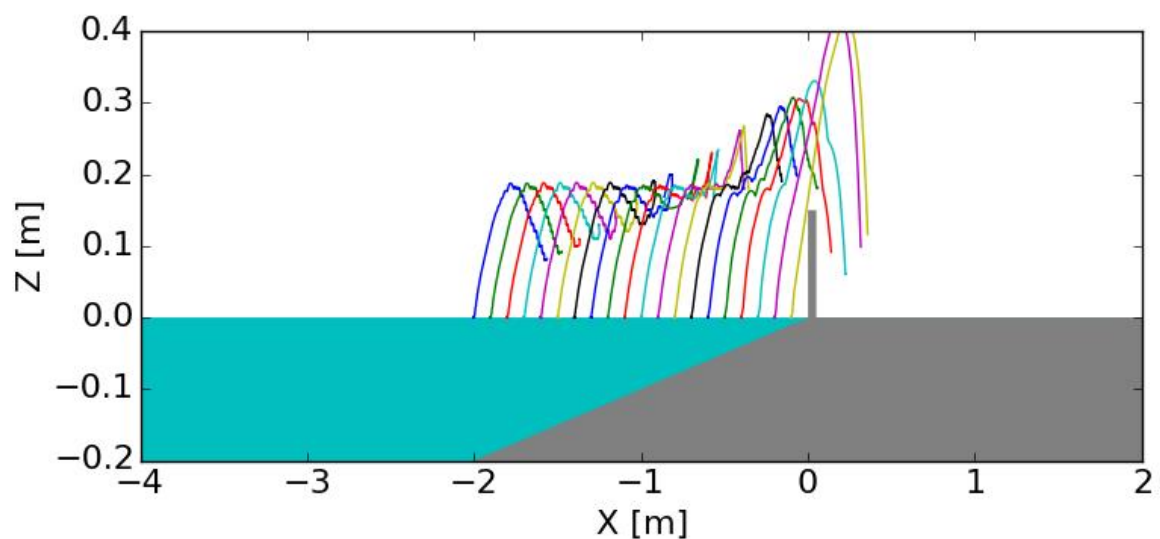


図 4-6-2 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクなし, 汀線 0cm, 流木型】

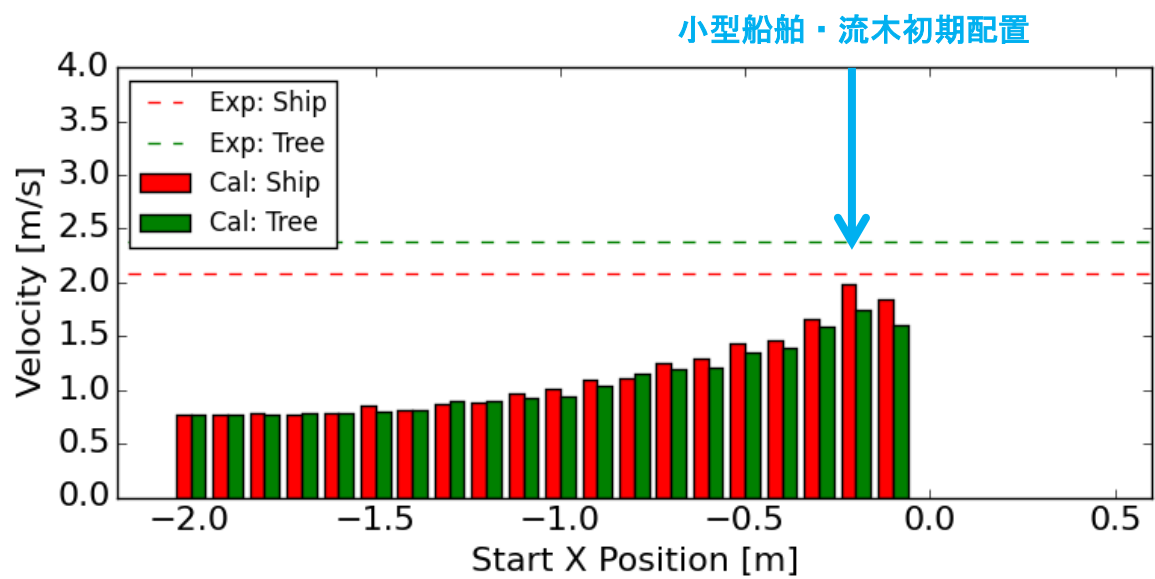


図 4-6-3 漂流物速度の比較【孤立波，クランクなし，汀線 0cm】

(2)PT_SW_flat_x60cm (孤立波, クランクなし, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-4～4-6-5 に示す. 漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し, 漂流物同士の衝突は考慮していない.

次に, 試験と解析における漂流物速度を図 4-6-6 に示す. 解析結果については, 初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した.

また, 津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 3～図 H- 4 に示す.

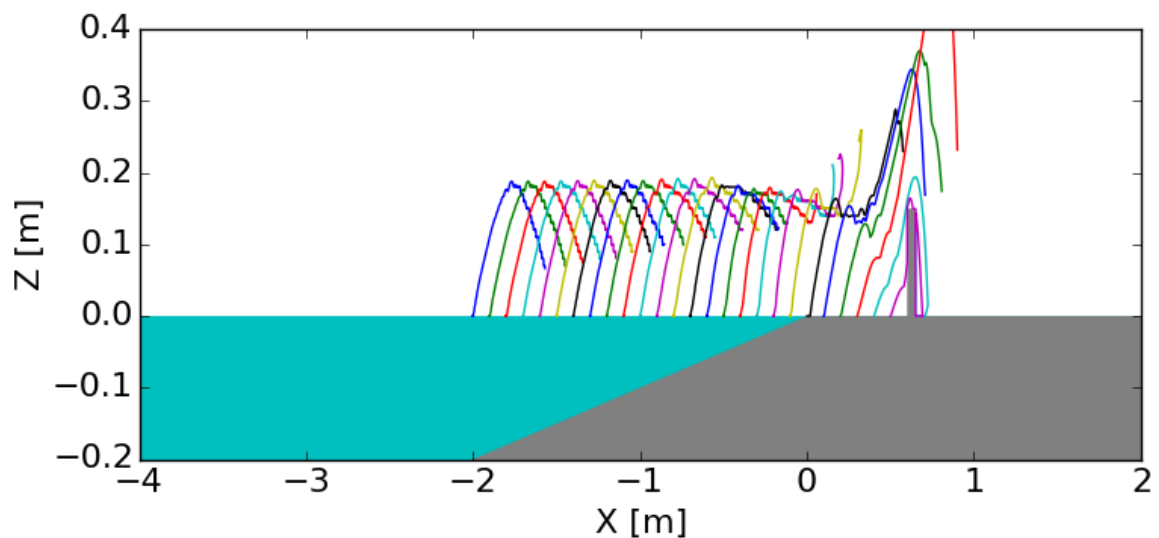


図 4-6-4 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクなし, 汀線-60cm, 小型船舶型】

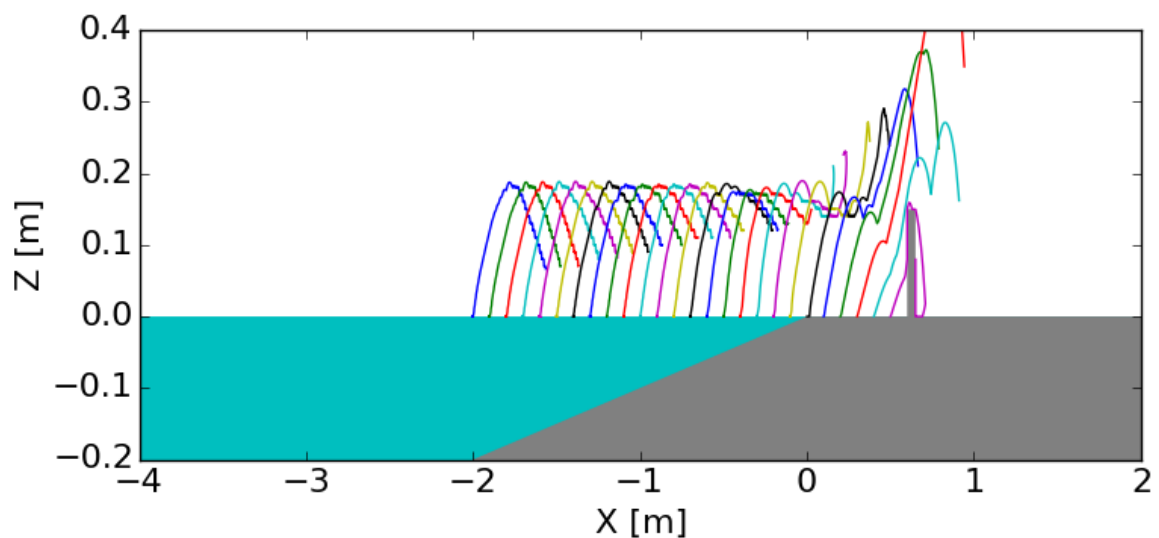


図 4-6-5 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクなし, 汀線-60cm, 流木型】

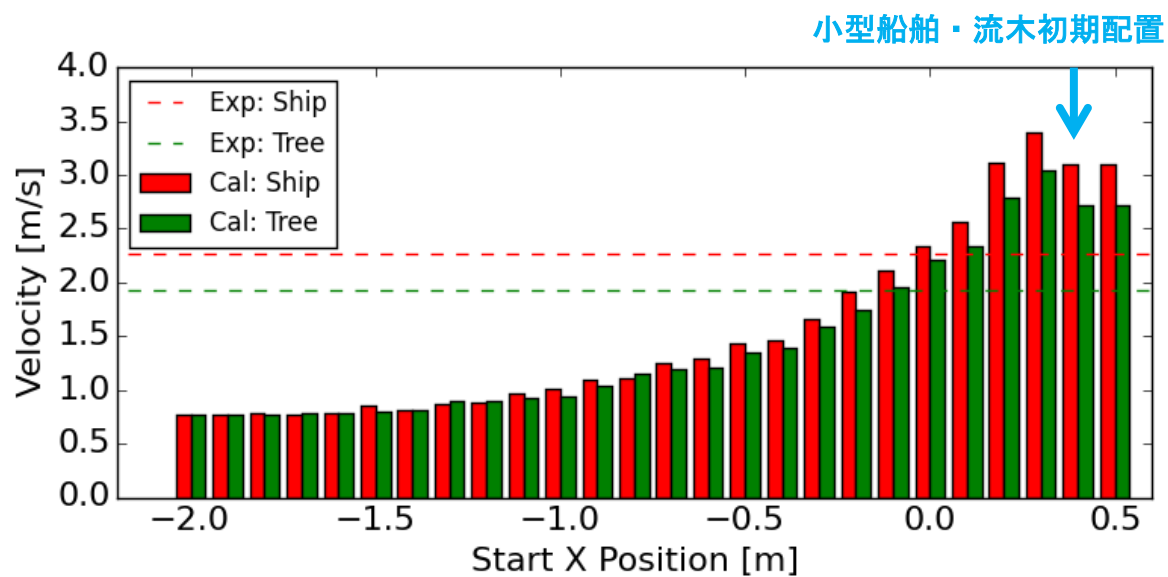


図 4-6-6 漂流物速度の比較【孤立波，クランクなし，汀線-60cm】

(3)PT_UF_flat_x0cm (越流波, クランクなし, 汀線 0cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-7～4-6-8 に示す. 漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し, 漂流物同士の衝突は考慮していない.

また, 津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 5～図 H- 8 に示す.

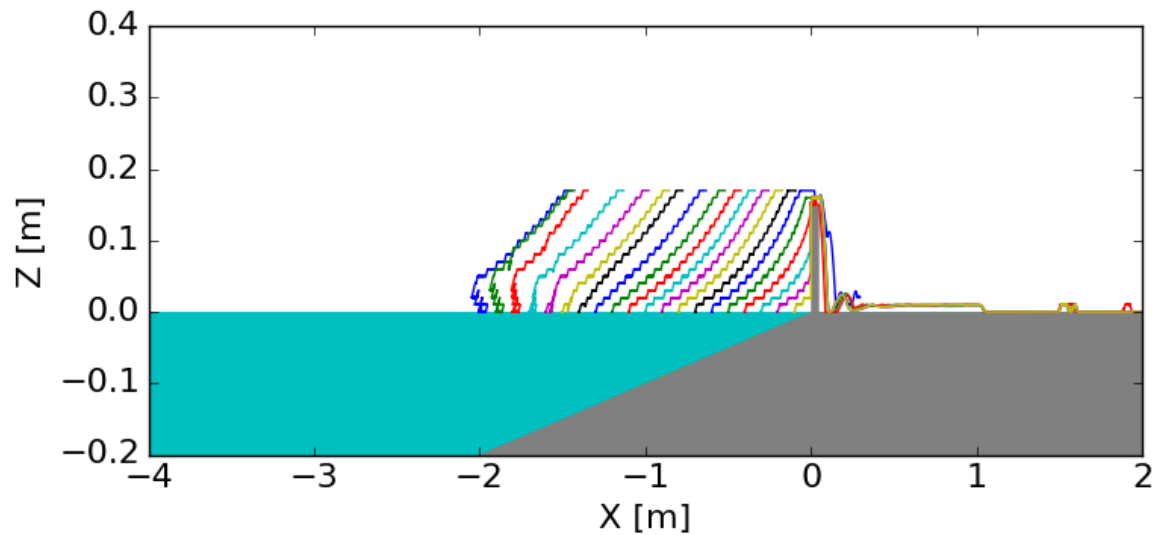


図 4-6-7 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクなし, 汀線 0cm, 小型船舶型】

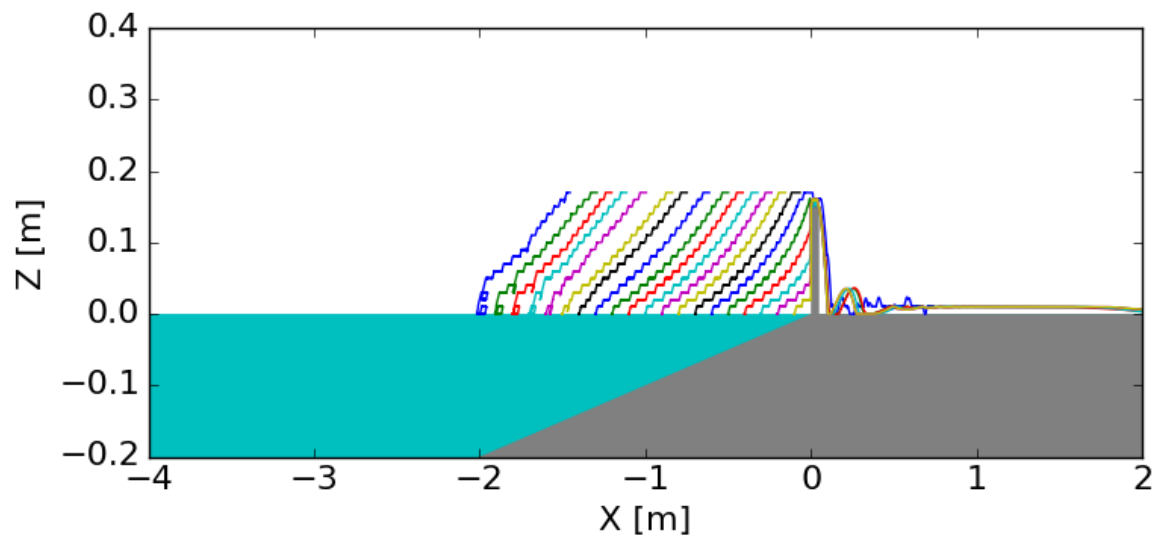


図 4-6-8 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクなし, 汀線 0cm, 流木型】

(4)PT_UF_flat_x60cm (越流波, クランクなし, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-9～4-6-10 に示す. 漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し, 漂流物同士の衝突は考慮していない.

また, 津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 9～図 H- 12 に示す.

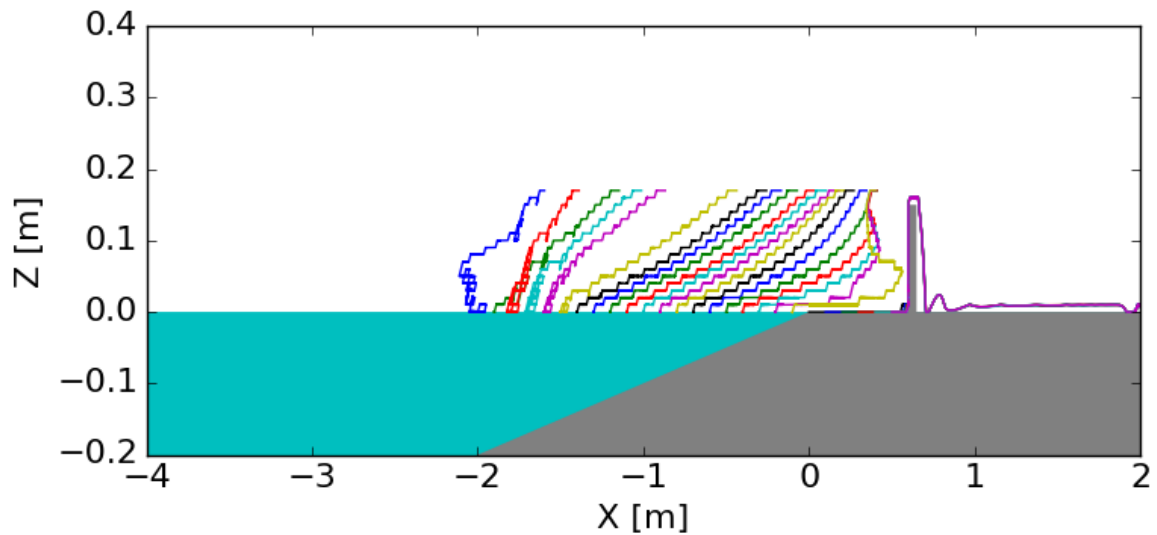


図 4-6-9 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクなし, 汀線-60cm, 小型船舶型】

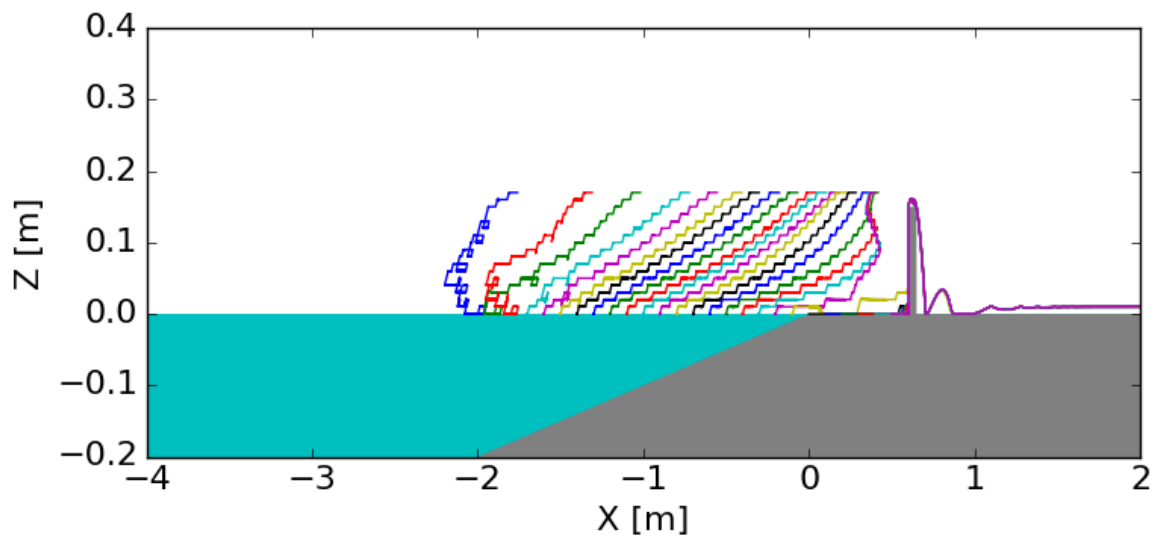


図 4-6-10 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクなし, 汀線-60cm, 流木型】

(5)PT_RW_flat_x0cm (長波, クランクなし, 汀線 0cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-11～4-6-12 に示す。漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し、漂流物同士の衝突は考慮していない。

次に、試験と解析における漂流物速度を図 4-6-13 に示す。解析結果については、初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した。

また、津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 13～図 H- 14 に示す。

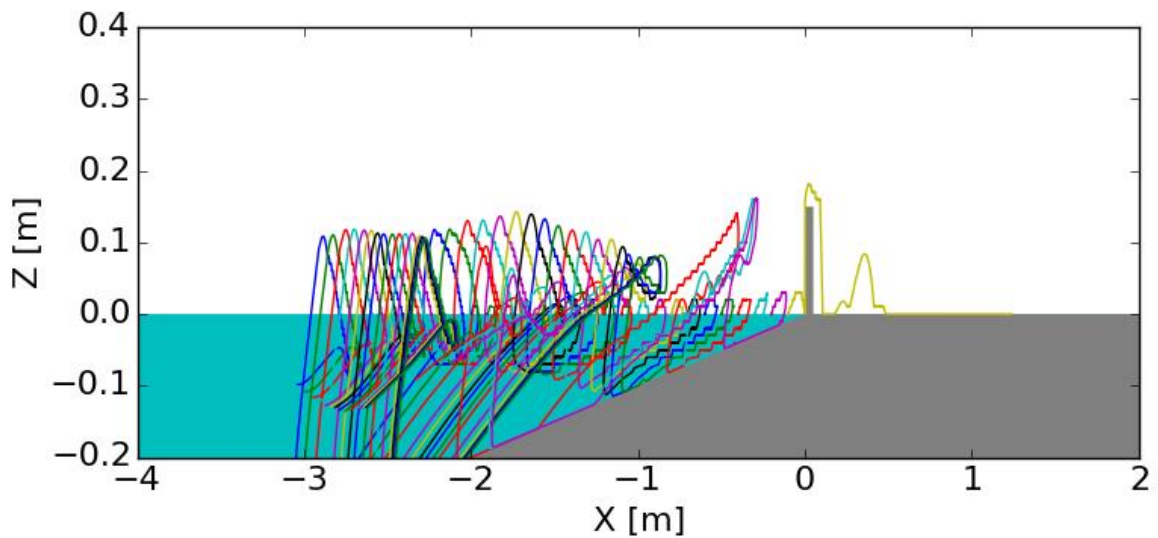


図 4-6-11 漂流物の移動軌跡【長波, クランクなし, 汀線 0cm, 小型船舶型】

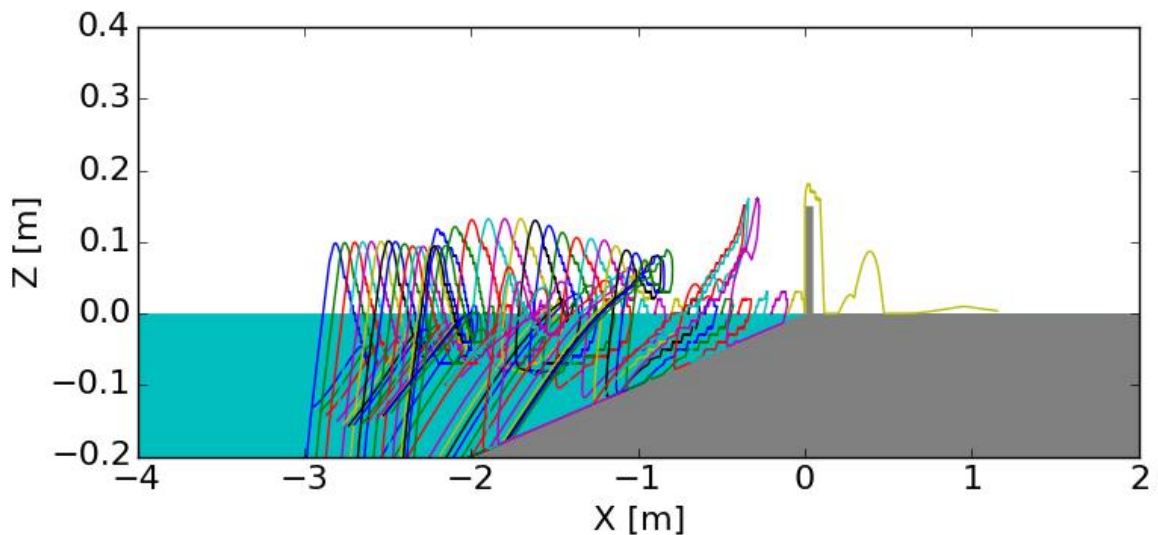


図 4-6-12 漂流物の移動軌跡【長波, クランクなし, 汀線 0cm, 流木型】

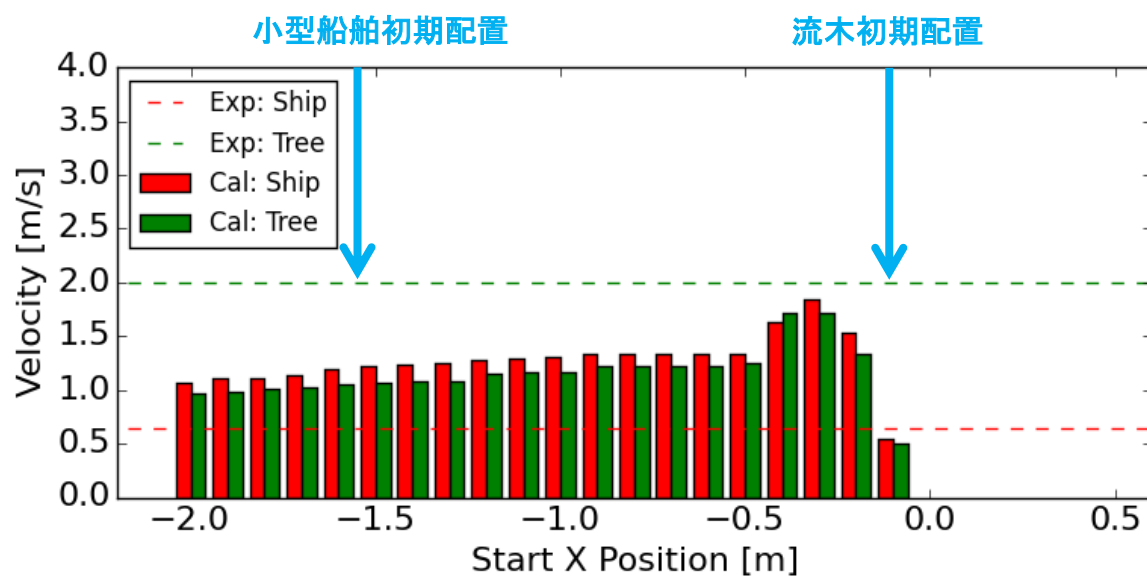


図 4-6-13 漂流物速度の比較【長波, クランクなし, 汀線 0cm】

(6)PT_RW_flat_x60cm (長波, クランクなし, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-14～4-6-15 に示す。漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し、漂流物同士の衝突は考慮していない。

次に、試験と解析における漂流物速度を図 4-6-16 に示す。解析結果については、初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した。

また、津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 15～図 H- 16 に示す。

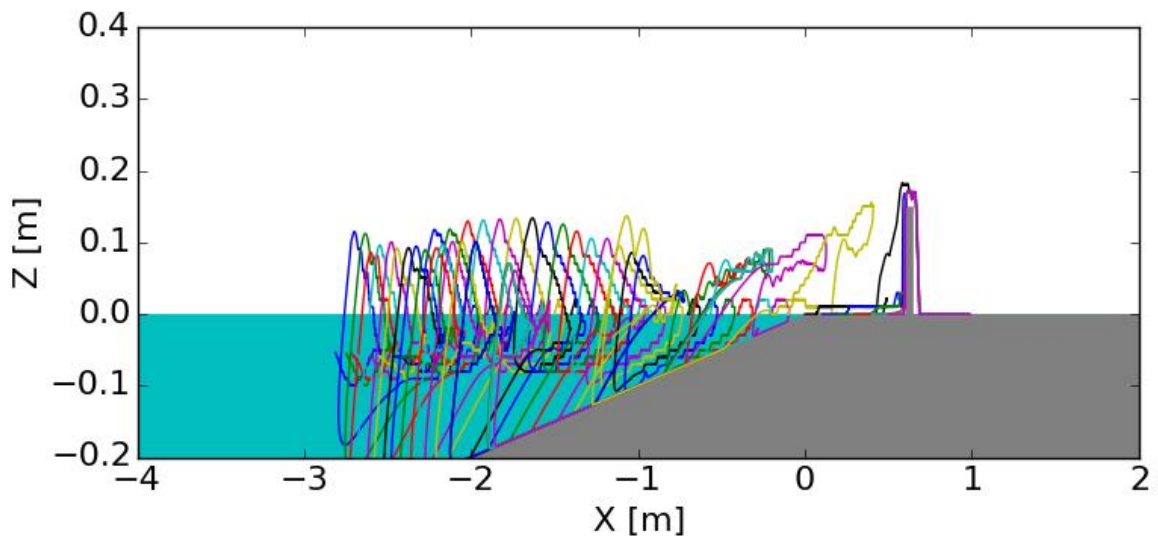


図 4-6-14 漂流物の移動軌跡【長波, クランクなし, 汀線-60cm, 小型船舶型】

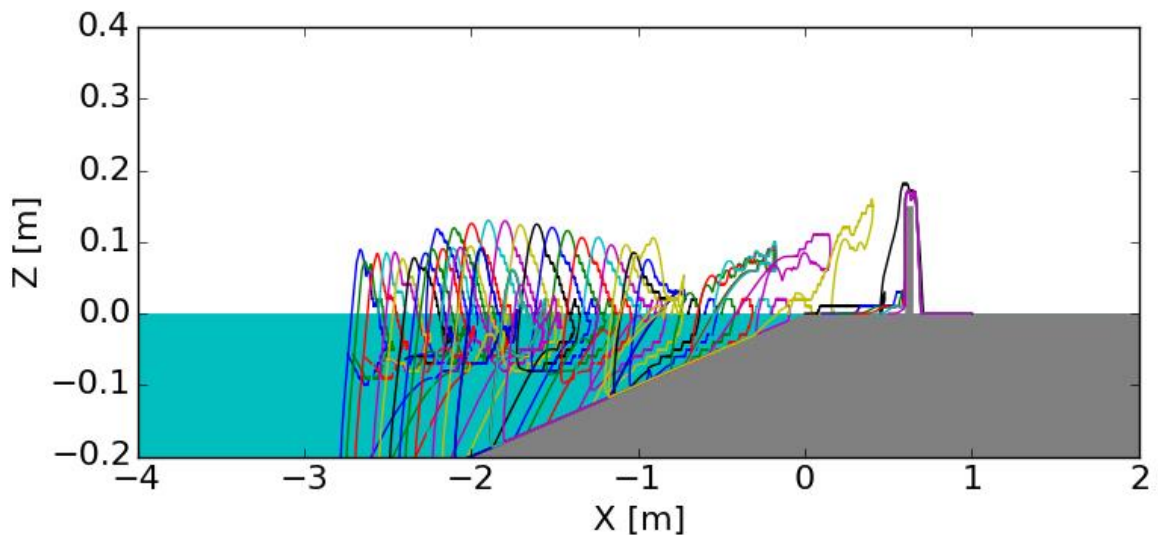


図 4-6-15 漂流物の移動軌跡【長波, クランクなし, 汀線-60cm, 流木型】

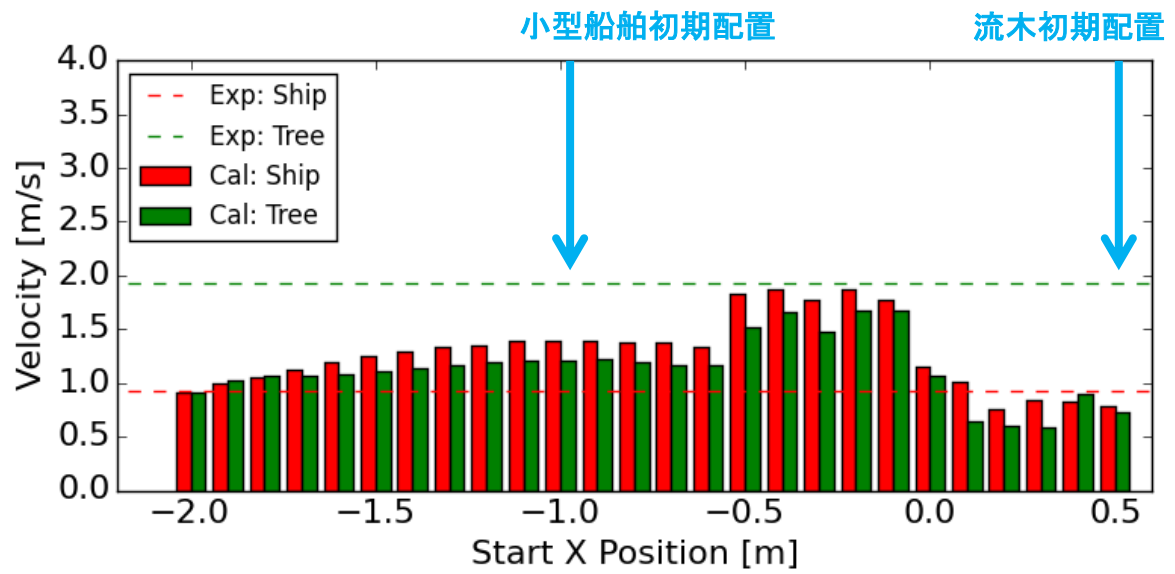


図 4-6-16 漂流物速度の比較【長波，クランクなし，汀線-60cm】

(7)PT_SW_clank_x0cm (孤立波, クランクあり, 汀線 0cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-17～4-6-18 に示す。漂流物は海上に 21 点（岸沖方向 3 × 横断方向 7），陸上のクランク部に 16 点（岸沖方向 4 × 横断方向 4）を配置した。漂流物同士の衝突は考慮していない。

次に，試験と解析における漂流物速度を図 4-6-19 に示す。解析結果は，各漂流物の堤体前面の最大速度を取得し，横断方向に並んだ漂流物について平均値を算出した。また，津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 17～図 H- 18 に示す。

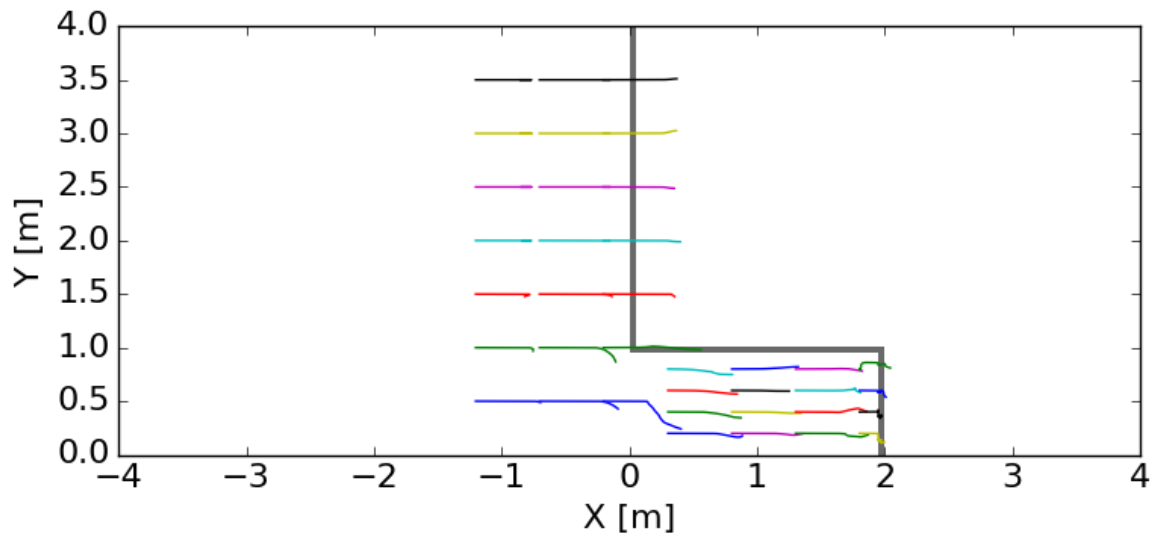


図 4-6-17 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクあり, 汀線 0cm, 小型船舶型】

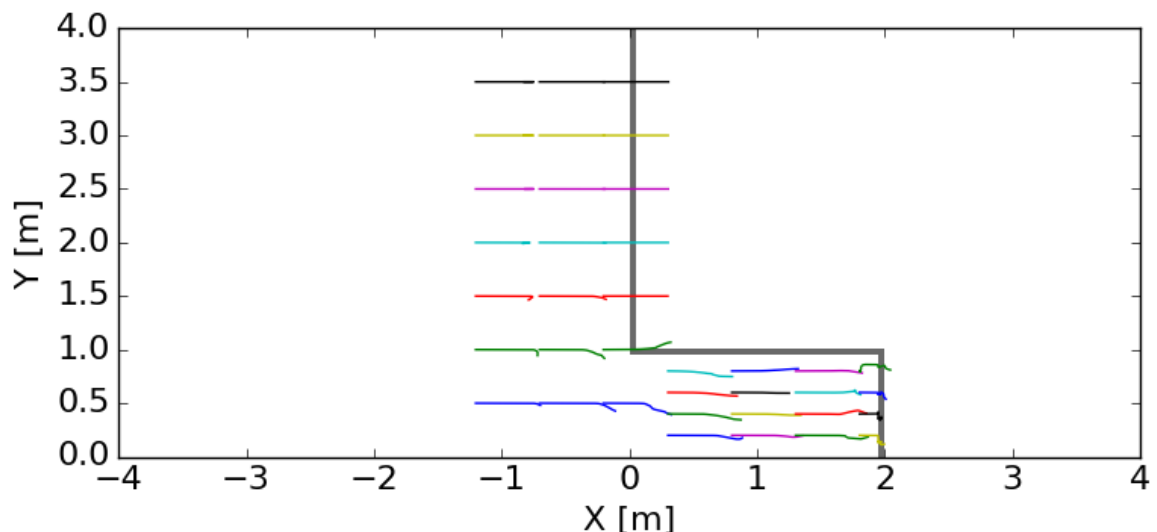


図 4-6-18 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクあり, 汀線 0cm, 流木型】

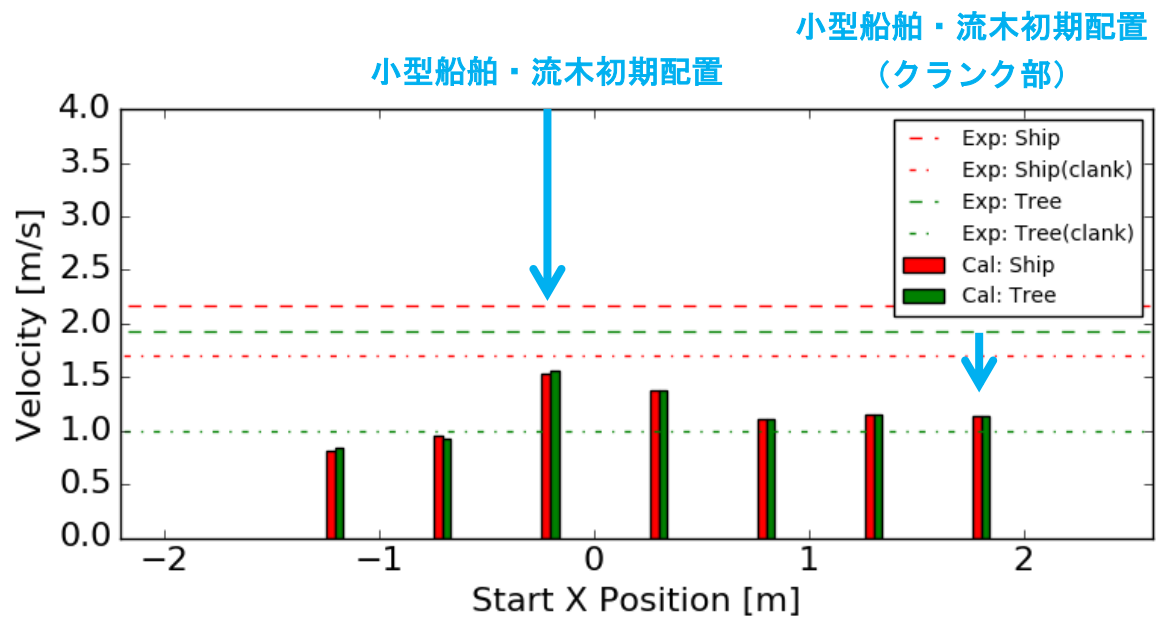


図 4-6-19 漂流物速度の比較【孤立波，クランクあり，汀線 0cm】

(8)PT_SW_clank_x60cm (孤立波, クランクあり, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-20～4-6-21 に示す。漂流物は海上に 21 点（岸沖方向 3×横断方向 7），陸上の堤体前面に 7 点（岸沖方向 1×横断方向 7），クランク部に 16 点（岸沖方向 4×横断方向 4）を配置した。漂流物同士の衝突は考慮していない。

次に，試験と解析における漂流物速度を図 4-6-22 に示す。解析結果は，各漂流物の堤体前面の最大速度を取得し，横断方向に並んだ漂流物について平均値を算出した。

また，津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 19～図 H- 20 に示す。

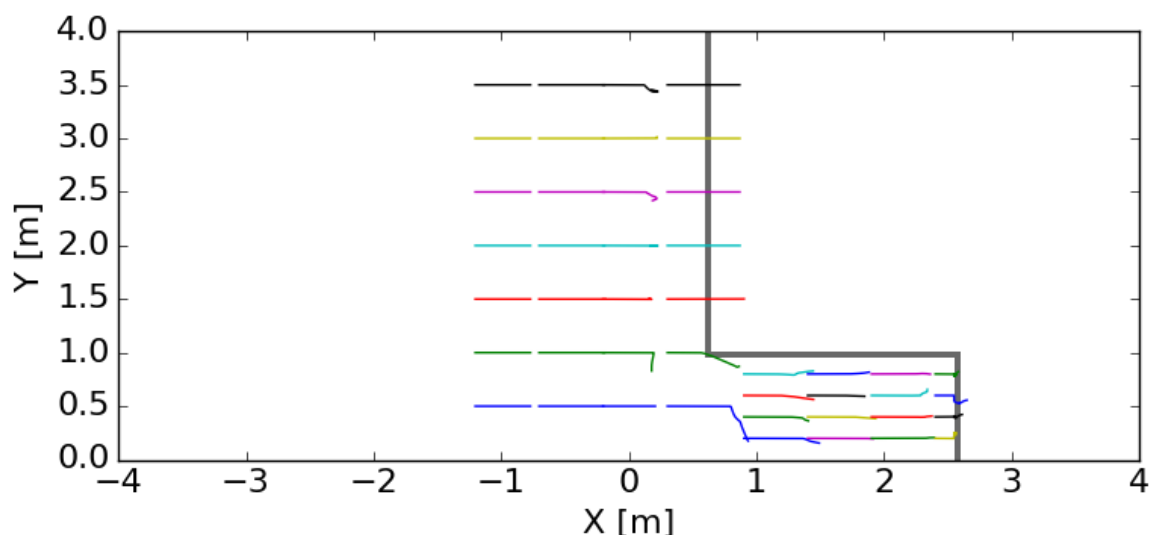


図 4-6-20 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクあり, 汀線-60cm, 小型船舶型】

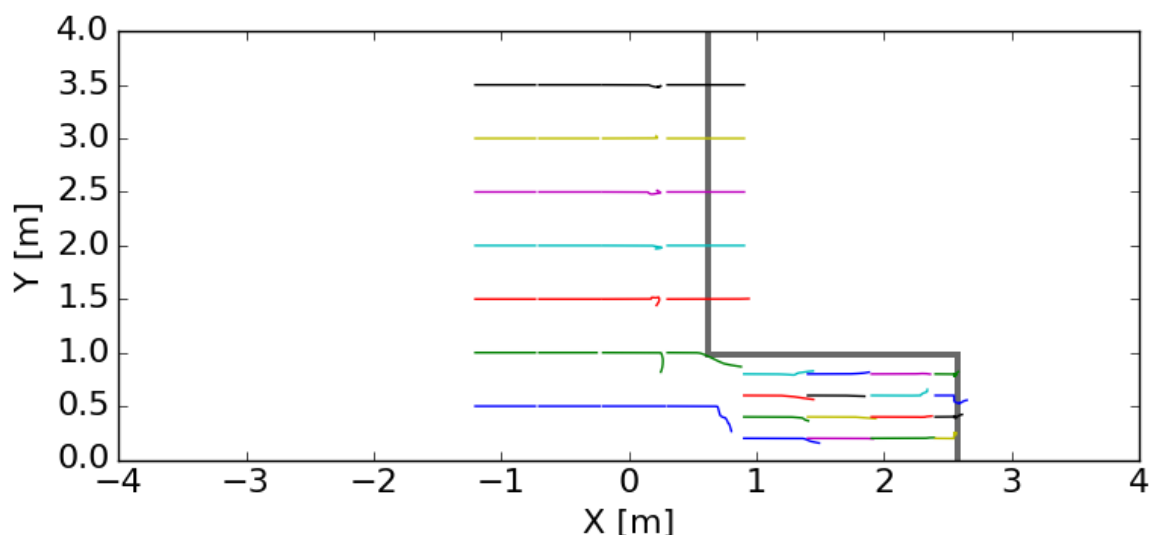


図 4-6-21 漂流物の移動軌跡【孤立波, クランクあり, 汀線-60cm, 流木型】

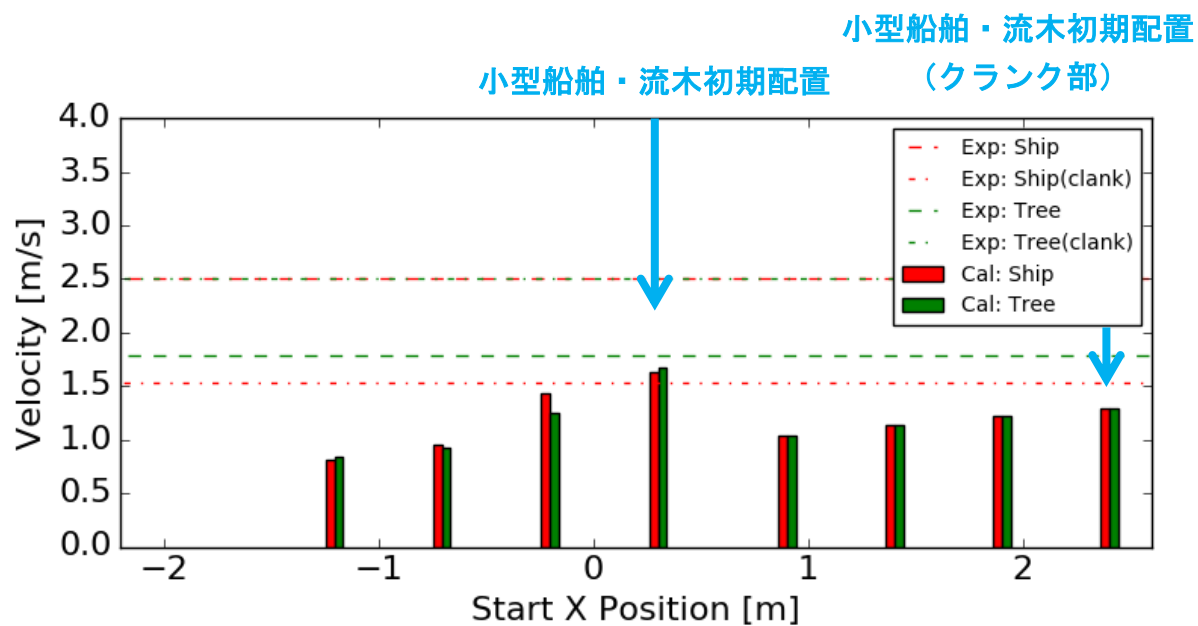


図 4-6-22 漂流物速度の比較【孤立波, クランクあり, 汀線 0cm】

(9)PT_UF_clank_x0cm (越流波, クランクあり, 汀線 0cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-23～4-6-24 に示す。漂流物は海上に 21 点（岸沖方向 3 × 横断方向 7），陸上のクランク部に 16 点（岸沖方向 4 × 横断方向 4）を配置した。漂流物同士の衝突は考慮していない。

また，津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 21～図 H- 24 に示す。

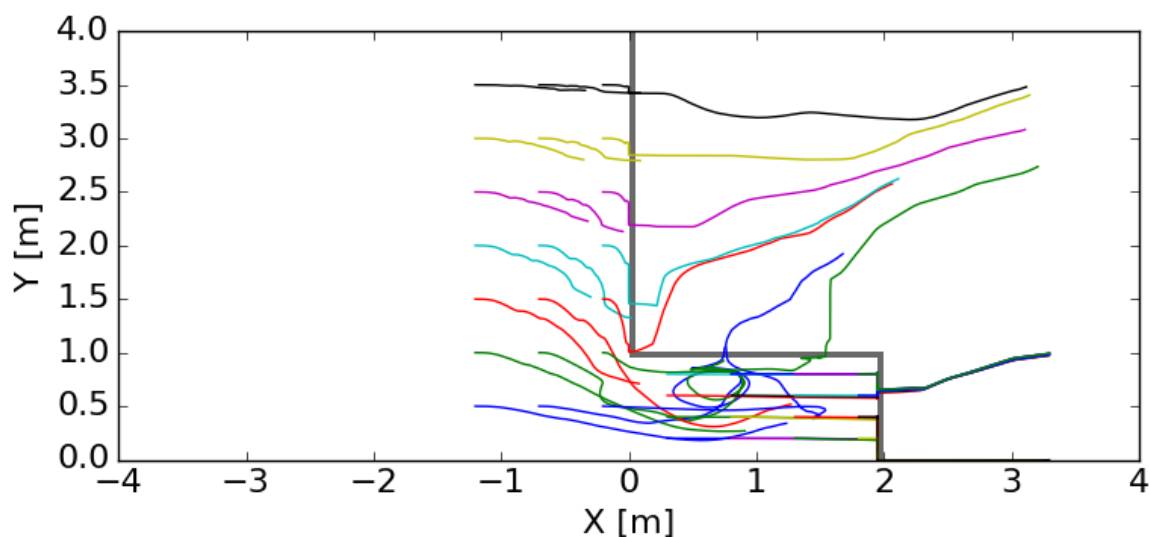


図 4-6-23 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクあり, 汀線 0cm, 小型船舶型】

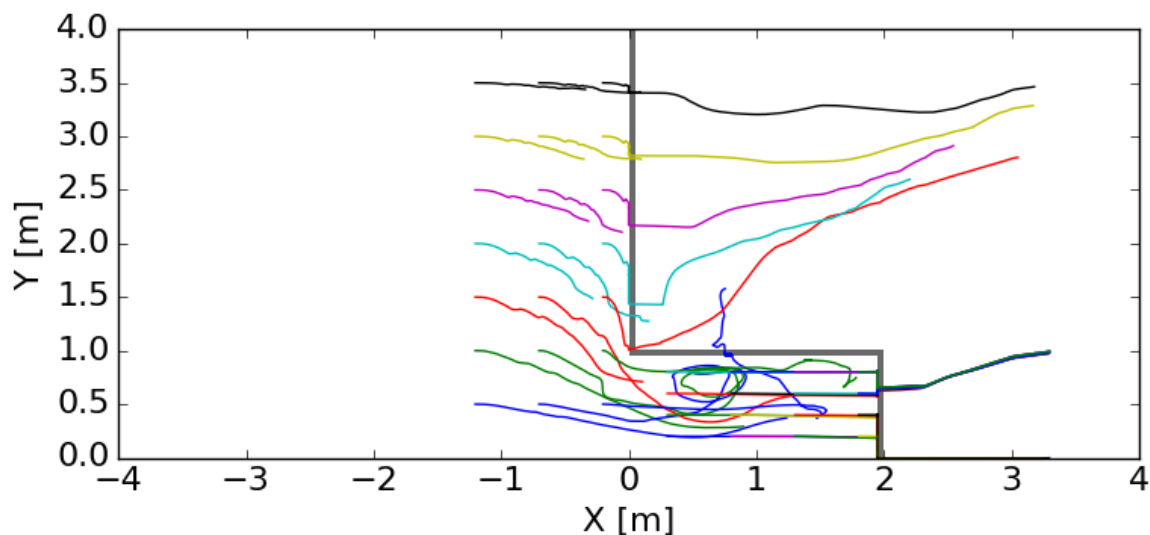


図 4-6-24 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクあり, 汀線 0cm, 流木型】

(10)PT_UF_clank_x60cm (越流波, クランクあり, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-25～4-6-26 に示す。漂流物は海上に 21 点（岸沖方向 3 × 横断方向 7），陸上の堤体前面に 7 点（岸沖方向 1 × 横断方向 7），クランク部に 16 点（岸沖方向 4 × 横断方向 4）を配置した。漂流物同士の衝突は考慮していない。また，津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 25～図 H- 28 に示す。

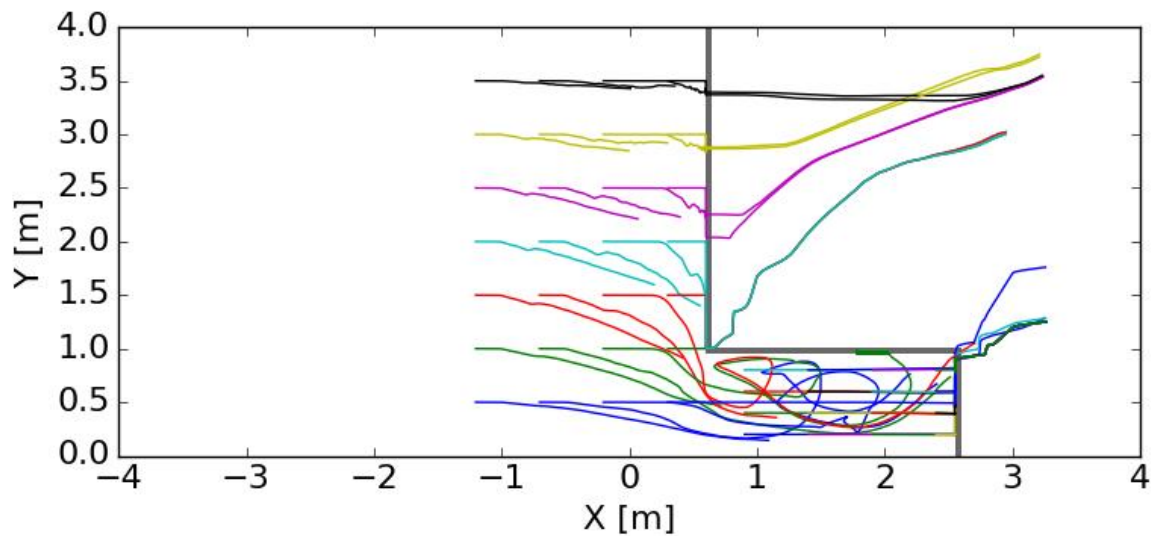


図 4-6-25 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクあり, 汀線-60cm, 小型船舶型】

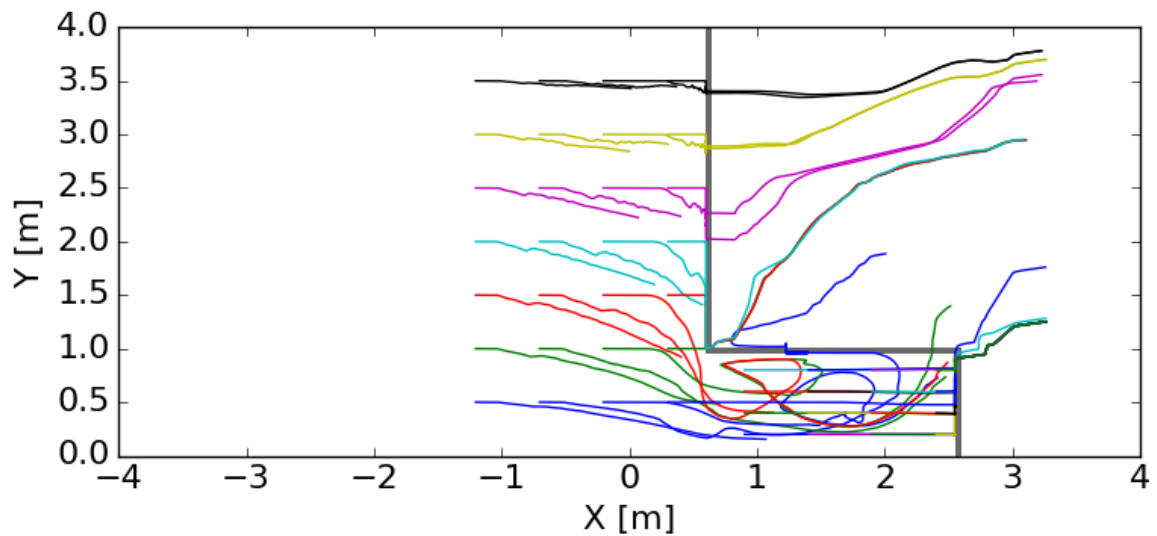


図 4-6-26 漂流物の移動軌跡【越流波, クランクあり, 汀線-60cm, 流木型】

(11)PT_RW_clank_x0cm (長波, クランクあり, 汀線 0cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-27～4-6-28 に示す。漂流物は海上に 21 点（岸沖方向 3 × 横断方向 7），陸上のクランク部に 16 点（岸沖方向 4 × 横断方向 4）を配置した。漂流物同士の衝突は考慮していない。

次に，試験と解析における漂流物速度を図 4-6-29 に示す。解析結果は，各漂流物の堤体前面の最大速度を取得し，横断方向に並んだ漂流物について平均値を算出した。また，津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 29～図 H- 30 に示す。

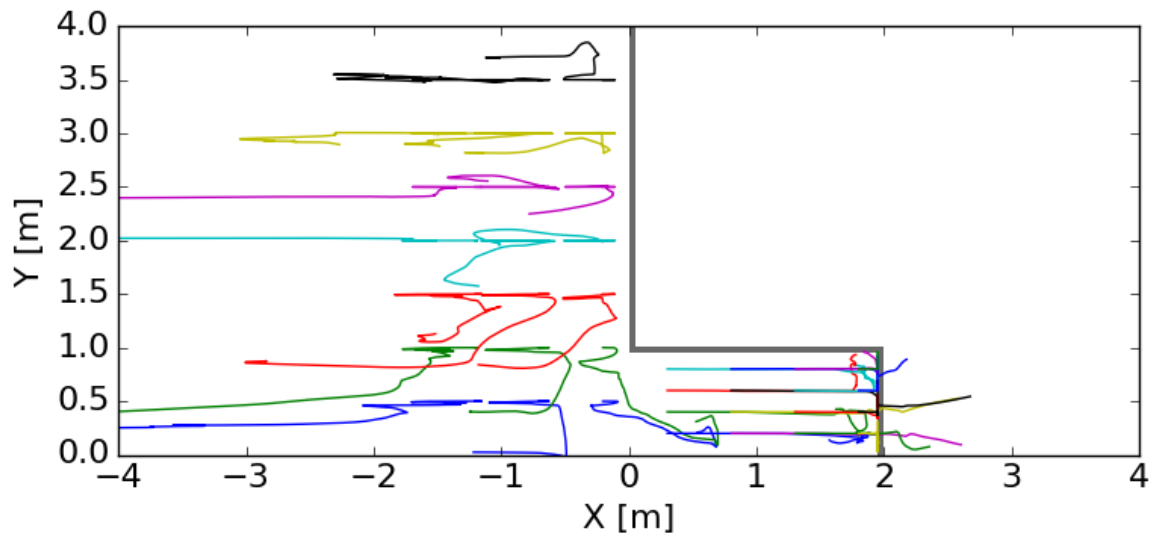


図 4-6-27 漂流物の移動軌跡【長波, クランクあり, 汀線 0cm, 小型船舶型】

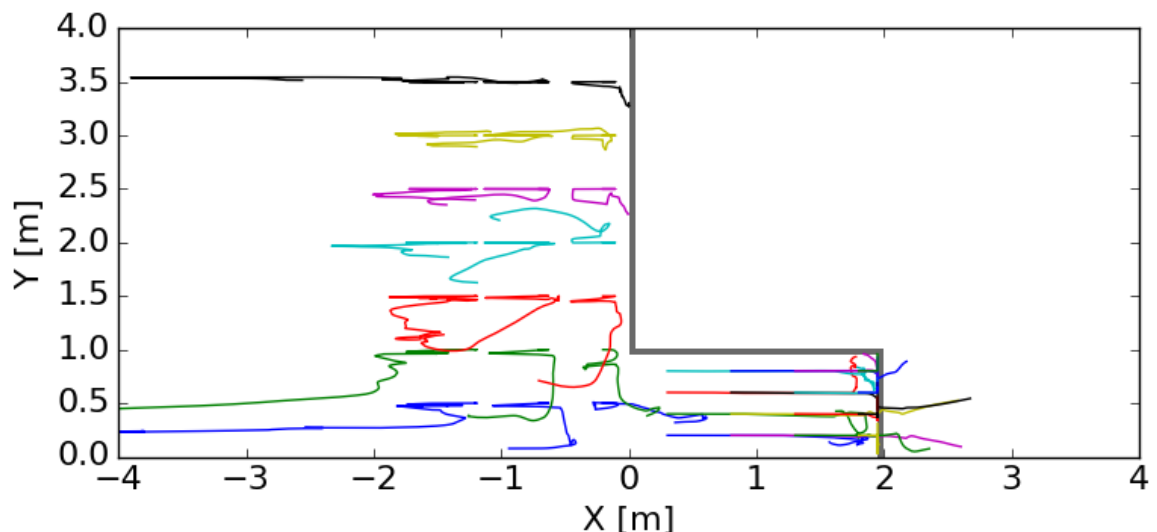


図 4-6-28 漂流物の移動軌跡【長波, クランクあり, 汀線 0cm, 流木型】

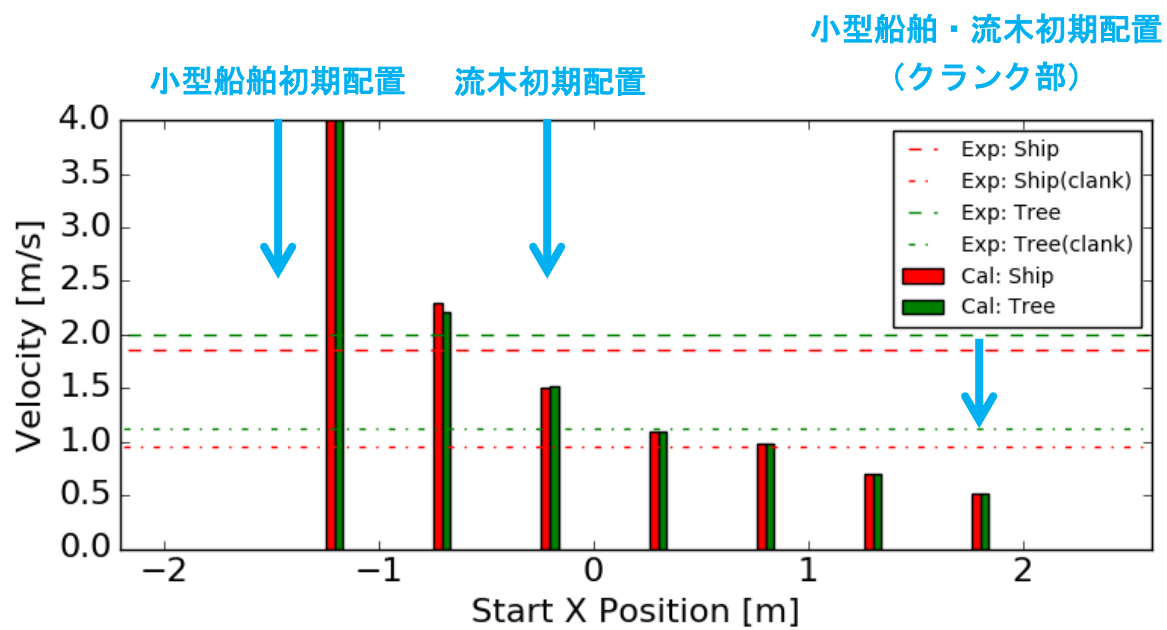


図 4-6-29 漂流物速度の比較【長波, クランクあり, 汀線 0cm】

(12)PT_RW_clank_x60cm (長波, クランクあり, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 4-6-30～4-6-31 に示す。漂流物は海上に 21 点（岸沖方向 3×横断方向 7），陸上の堤体前面に 7 点（岸沖方向 1×横断方向 7），クランク部に 16 点（岸沖方向 4×横断方向 4）を配置した。漂流物同士の衝突は考慮していない。

次に，試験と解析における漂流物速度を図 4-6-32 に示す。解析結果は，各漂流物の堤体前面の最大速度を取得し，横断方向に並んだ漂流物について平均値を算出した。

また，津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを図 H- 31～図 H- 32 に示す。

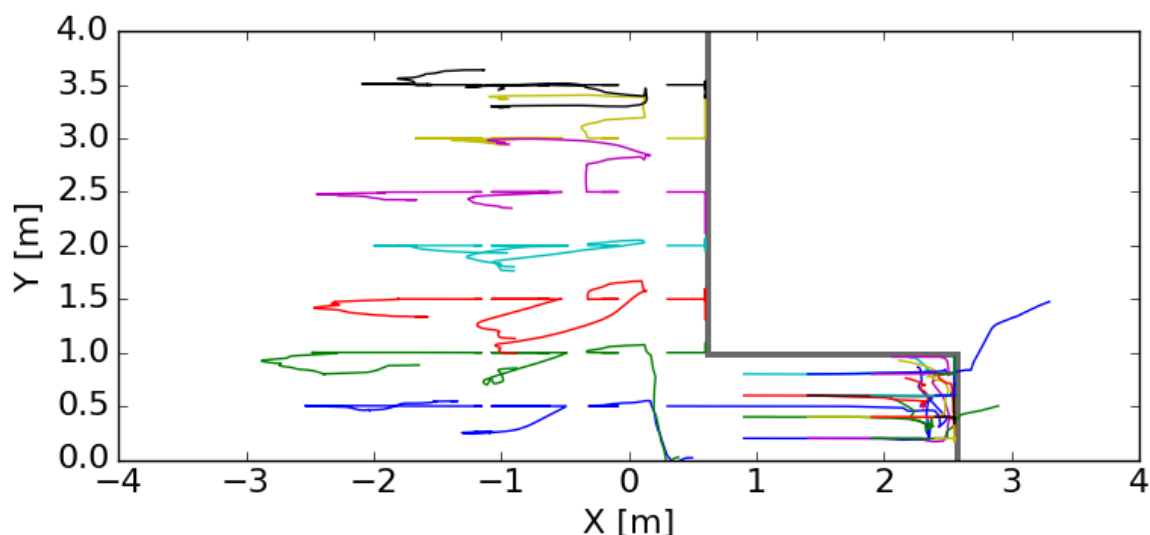


図 4-6-30 漂流物の移動軌跡【長波, クランクあり, 汀線-60cm, 小型船舶型】

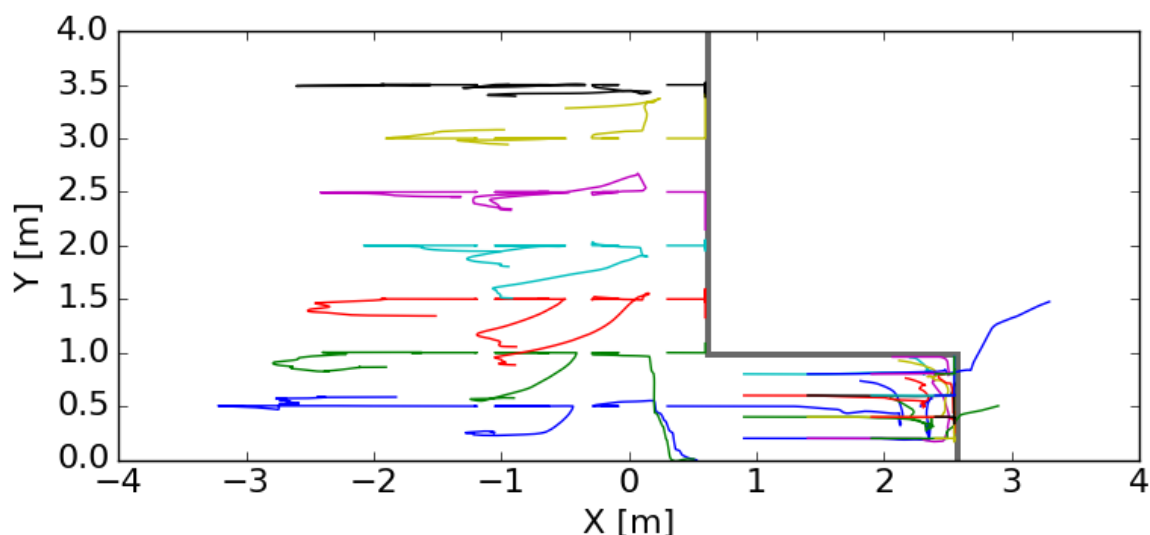


図 4-6-31 漂流物の移動軌跡【長波, クランクあり, 汀線-60cm, 流木型】

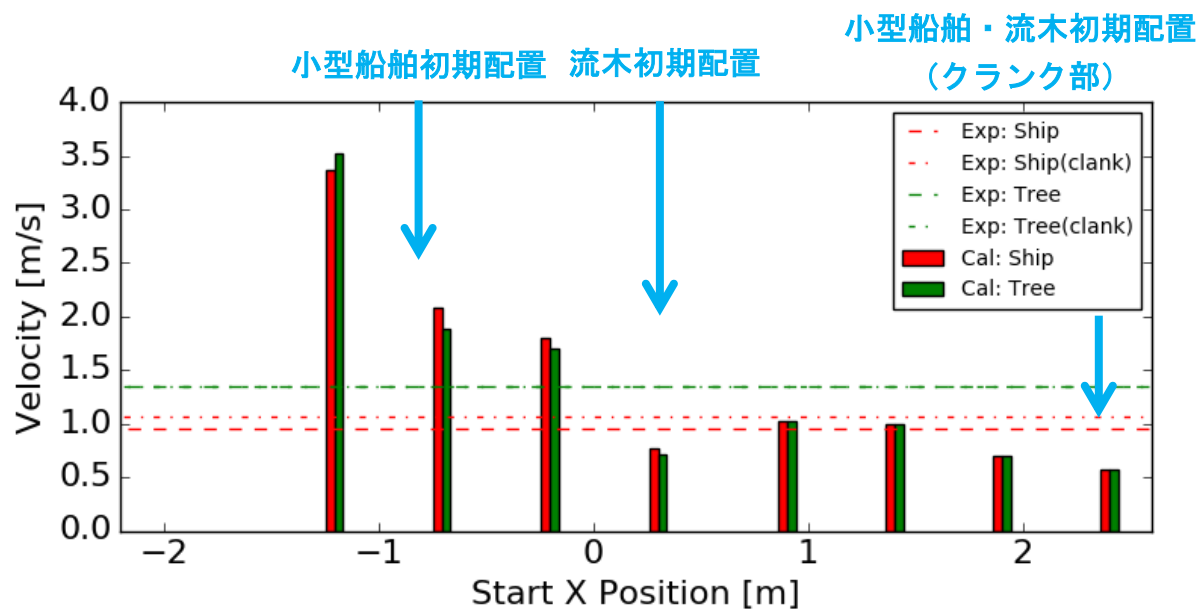


図 4-6-32 漂流物速度の比較【長波, クランクあり, 汀線-60cm】

4-7 解析結果のまとめ

漂流物解析の結果について、以下に整理する。

(1)移動軌跡

数値解析では、水理試験より多くの漂流物を配置し、初期位置による移動軌跡の違いについて検討した。数値解析では漂流物間の干渉を無視できるため、水理試験と比較してこのような検討が容易である。

クランクなしの 6 ケースは、岸沖方向に漂流物を配置し、岸沖および鉛直方向の移動軌跡を検討した。孤立波の 2 ケースは堤体近傍に配置した漂流物が堤体より高い位置まで運ばれる。一方、長波の 2 ケースは堤体より高い位置まで運ばれる漂流物は少ない。その結果、越流する漂流物の数は孤立波＞長波となり、この傾向は水理試験と同じである。

クランクありの 6 ケースは、海上および陸上のクランク部に漂流物を配置し、岸沖および横断方向の移動軌跡を検討した。孤立波の 2 ケースは横断方向の移動がほとんど見られないが、これは漂流物が堤体による反射波から受ける影響が小さいためと考えられる。一方、越流波や長波の場合、堤体による反射波の影響が大きく、横断方向の移動が見られる。特に越流波のケースでは、漂流物がクランク部へ流れ込み渦を巻く様子が確認できる。また、長波のケースでは漂流物の越流がクランク奥側のみ発生しており、水理試験の傾向と一致する。

なお、移動軌跡をより詳細に評価するには、漂流物の各時刻の位置情報を取得する必要がある、以下のような方法が考えられる。

- ・水理試験の動画を用いた画像解析
- ・漂流物に対する加速度計の設置

(2)移動速度

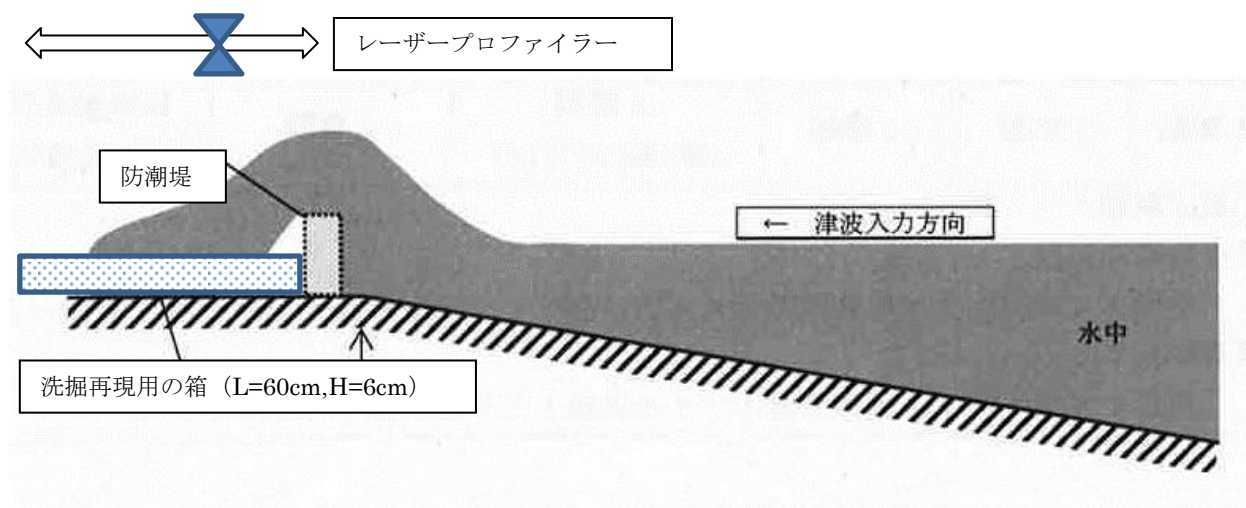
クランクなしの場合、孤立波の 2 ケースについては、水理試験の漂流物配置位置における移動速度に近い値となった。長波の 2 ケースについては、水理試験において流木型の移動速度が小型船舶型の 2 倍程度になっている。一方、解析結果は漂流物の種類による移動速度の差が小さく、水理試験の小型船舶型より大きく流木型より小さい結果となった。この要因としては、現在の漂流物モデルは重心位置における流動場の流速のみを用いるため、漂流物の形状やサイズによる影響を十分に考慮できていないことが考えられる。

クランクありの場合、孤立波の 2 ケースは水理試験と比較してやや移動速度が過小となった。一方、長波の 2 ケースは沖側に配置した漂流物の移動速度が過大となった。この要因としては、解析結果は衝突速度ではなく移動速度の最大値を取得しており、沖側に配置した漂流物は反射波によって沖に運ばれる際に最大値を記録していることが考えられる。

第5章 洗掘影響の把握

5-1 試験の概要

津波再現水槽を用いて、防潮堤の洗掘を対象とした水理試験を実施し、防潮堤周りでの洗掘に関する試験データを取得する。具体的には防潮堤直下流に長さ 60cm 高さ 6cm の箱を設置し、その中に移動床材料（平均粒径 0.2mm の砂）を充填して移動床を再現し、その洗掘状況を 3D レーザープロファイラーで計測を行う。また防潮堤を越流した津波の打込み波圧を、箱内の底面に波圧計を設置して計測する。



洗掘影響の把握試験 概略図

5-2 試験条件

(1) 試験水槽

試験に用いた水槽は、長さ 45m、幅 4.0m、水深 0.8m の津波再現水槽である。図 5-2-1 に試験水槽の概要を示す。

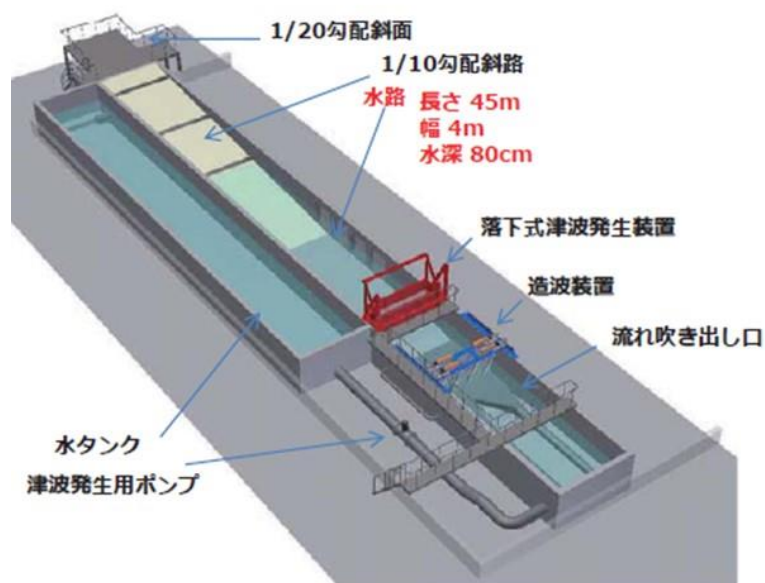


図 5-2-1 試験水槽（津波再現水槽）

(2) 試験ケース・試験条件

表 5-2-1 に洗掘影響の把握に関する試験ケース・試験条件を示す。

表 5-2-1 洗掘影響の把握に関する試験ケース・試験条件

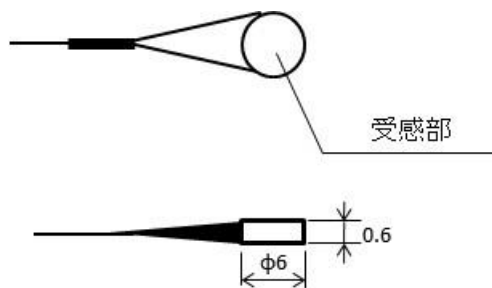
	ケース名	防潮堤位置	防潮堤平面形状	入力波形	試行回数
波圧 打込み	case4-1～3	①汀線0cm	①クランクなし	孤立波	3
	case4-4～6	汀線0cm	〃	長波	3
	case4-7～9	②汀線-60cm	〃	孤立波	3
洗掘影響の把握	case4-10～12	①汀線0cm	①クランクなし	孤立波	3
	case4-13～15	〃	〃	長波	3
	case4-16～18	〃	〃	越流波	3
	case4-19～21	①汀線0cm	②クランクあり	孤立波	3
	case4-22～24	〃	〃	長波	3
	case4-25～27	〃	〃	越流波	3
	case4-28～30	②汀線-60cm	①クランクなし	孤立波	3
	case4-31～33	〃	〃	長波	3
	case4-34～36	〃	〃	越流波	3
影響 前面 の 障	case4-37～39	②汀線-60cm	①クランクなし	孤立波	3
	case4-40～42	〃	〃	長波	3

※越流波の通水時間は、洗掘用の容器の深さの制限により、容器の底まで洗掘深が達しない範囲で設定し、越流開始後約 25 s で給水を停止する条件とした（最大越流水深は 1cm 弱）。

(3) 計測機器

・打込み波圧計測用波圧計

形式名	規格容量	定格出力	固有振動数	製造元
PS-1KC	100kPa	0.5mV/V以上	約10kHz	株式会社 共和電業
		(1000×10^{-6} ひずみ以上)		



洗掘 打込み波圧設置タイプ PS-1KC

・データサンプリング

実験の種類	データサンプリング時間(s)	サンプリング周波数(Hz)	(sec)
孤立波	15	4,000	0.00025
長波	20	2,000	0.00050
越流波	600	100	0.01000

打込み波圧は、洗掘再現用の箱の底面に図 5-2-2 に示すような配列で波圧計を設置して計測を行う。

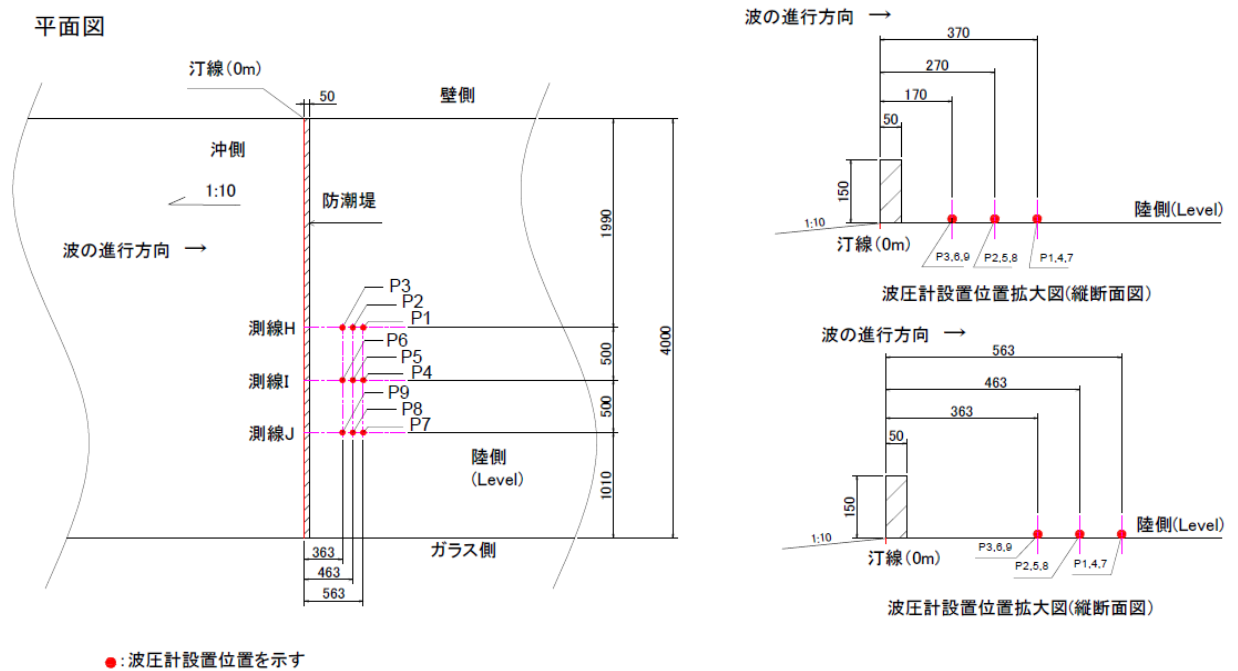


図 5-2-2 打込み波圧の計測位置図

・ 3D レーザープロファイラー

解像度：1mm ピッチ

照射距離（有効範囲）：300±145mm

1度の走行でプロファイリング

される幅：362.4mm

計測は2回走行して、幅600mm
の範囲を合成



3D レーザープロファイラー

5-3 試験結果

(1) 打込み波圧

洗掘再現用の箱に移動床材料を敷設する前の状態で、打込み波圧を計測した結果を図 5-3-1 に示す。同図に示した圧力値は、時系列データの最大値で 3 回試行の平均値を示す。

長波の打込み波圧は防潮堤に近い付近で最大値を示し、一方孤立波は洗掘容器のほぼ中央（防潮堤から 30cm 辺り）で最大値を示す。このことは越波の着水地点と概ね合致する。なお、孤立波の打込み波圧分布は防潮堤側に更に大きな波圧が作用している可能性があるため、波圧計を追加して計測を行った（図 5-3-2）が、上述した地点が最大値であることが確認された。

また参考までに、孤立波の条件で移動床材料を敷設した条件でも打込み波圧を計測し、敷設しない条件との比較も行った（図 5-3-3；移動床材料の質量は除く）。測線によって多少傾向が異なるが、移動床材料を敷設しない条件のほうが敷設した条件より値が小さくなる傾向があり、その原因としては有効落差の減少（移動床敷設厚の分）、および移動床材料による緩衝効果等が想定される。

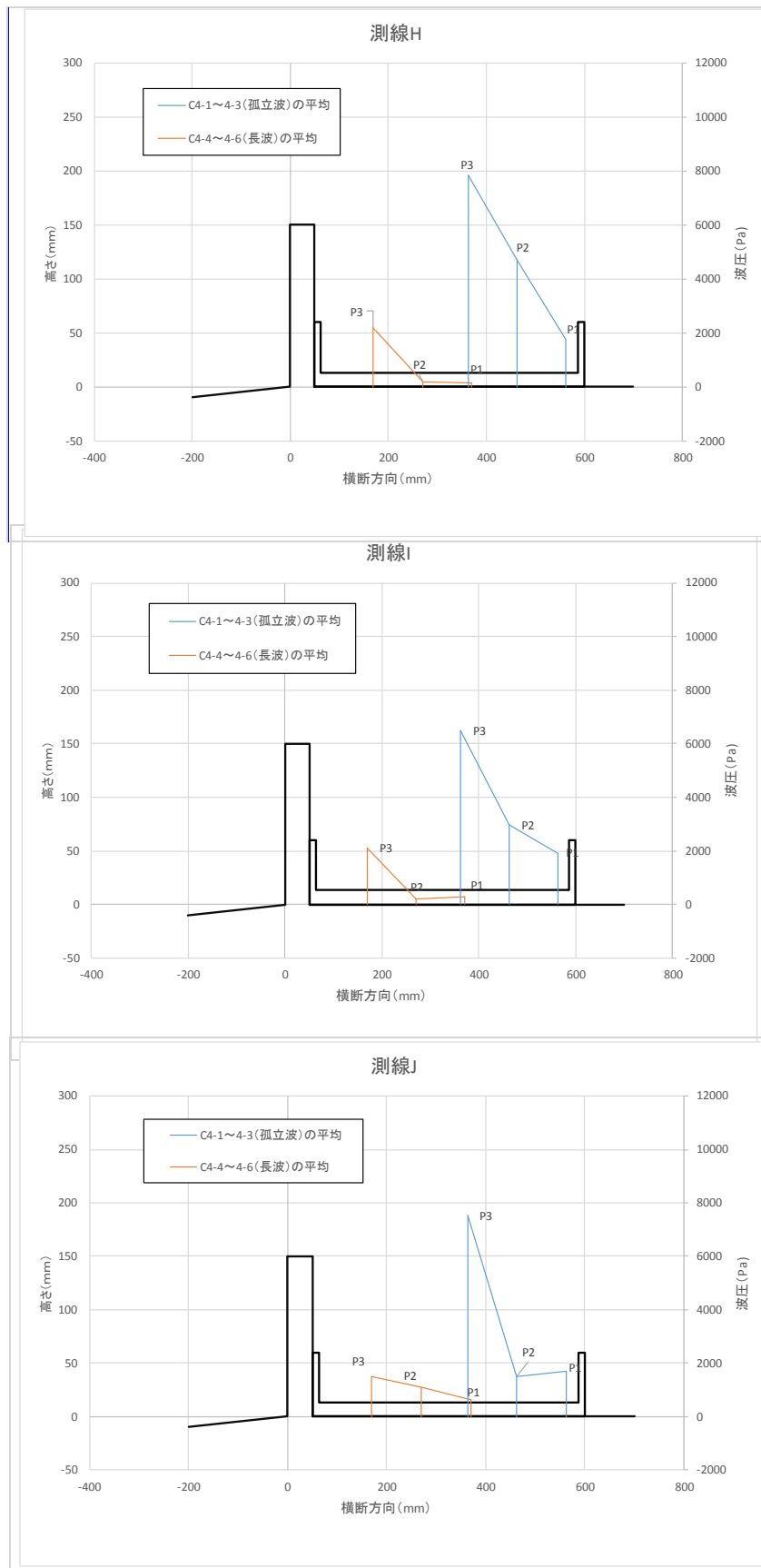


図 5-3-1 打込み波圧計測結果（汀線 0cm）

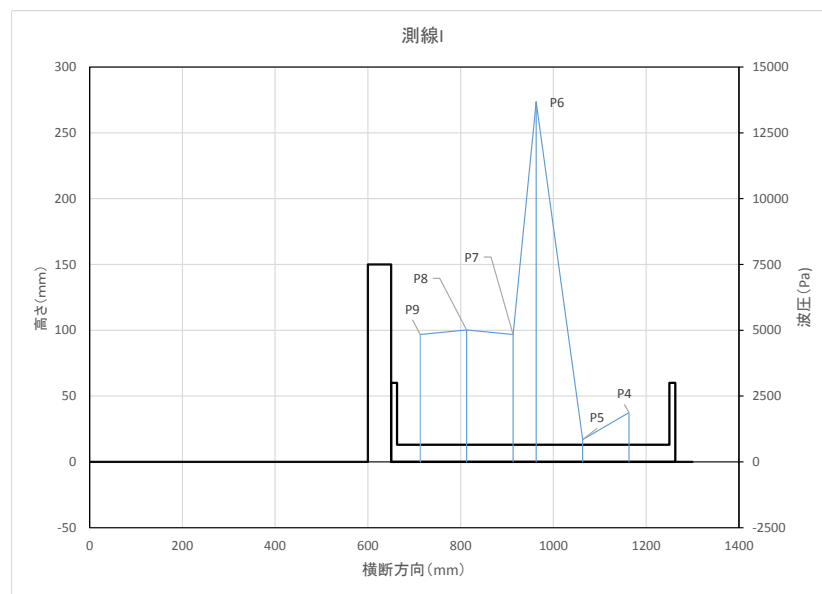


図 5-3-2 打込み波圧計測結果補足（汀線 0cm, 孤立波）

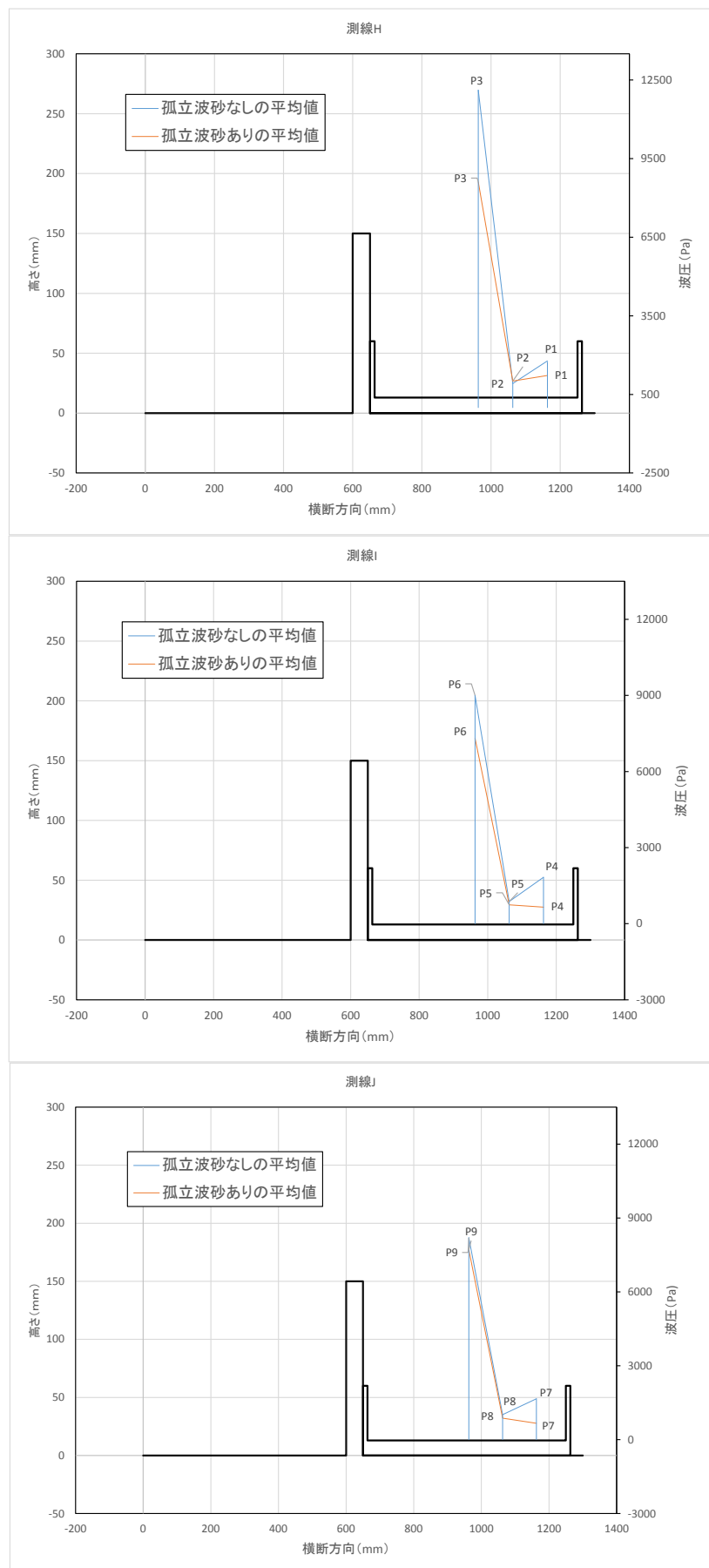


図 5-3-3 打込み波圧・移動床材料の有無による比較（汀線 0cm, 孤立波）

(2) 試験後の洗掘状況

図 5-3-4～5-3-6 に孤立波、長波、越流波の各入力波別に試験後の移動床形状の平面図を示す(3D レーザープロファイラーによる). また, 断面流況の一例を写真 5-3-1～5-3-2 に, 表 5-3-1～5-3-2 に試験後の移動床部の最大洗掘深および洗掘量の計測結果を示す. なお, 表中には 3D レーザープロファイラーのデータから算定した値と, 移動床部より岸側で採取した土砂量による計測値を併記している. また表中で示した空隙なしの換算は, 移動床材料の単位体積重量を $\rho_s = 2.65 \text{ gf/cm}^3$, 初期設置状態および流出後の空隙率を実測値の平均で以下のように与えて算出している.

初期設置状態の空隙率： $n = V_v/V = 0.247$ (V_v ：空隙体積， V ：全体積)
 流出後 " ： $n = V_v/V = 0.293$ (" ")

以下に，入力波ごとの特徴について示す.

【孤立波】

防潮堤位置が汀線 0cm では打込み波圧の最大値が生じる位置より防潮堤側に洗掘域が生じ、最大洗掘深も打込み波圧の最大値が生じる位置とは異なる．洗掘のメカニズムは打込んだ波の内側にできる回転流によると推察される．

また“クランクなし”と“クランクあり”で単位幅あたりの洗掘量は変わらないが、最大洗掘深さは“クランクあり”の方がやや小さくなる。

汀線-60cm では碎波後に防潮堤に衝突するため，越波の打込み位置が変わり（防潮堤直背面），打込み位置付近に最大洗掘深が生じる．全体の洗掘量は汀線 0cm よりやや少ない．

【長 波】

防潮堤位置，クランクの有無に関わらず，防潮堤直背面に最大洗掘深が生じ，打込み波圧の最大値が生じる位置と一致する．また，防潮堤位置が汀線 0cm より汀線－60cm の方が全体の洗掘量はやや小さい．各ケースとも洗掘・流下した土砂が岸側のエリアでやや堆積している．

なお、長波試験では入力波の 2 波目も越波しており、洗掘形状はその影響も受けている。

【越流波】

防潮堤位置に関わらず，防潮堤直背面に最大洗掘深が生じ，その下流に顕著な堆積域が生じる．洗掘範囲は長波より狭いが，最大洗掘深は長波より大きい．

“クランクあり”の場合，岸沖方向と平行な防潮堤からも越流するため，その背面にも同様の洗掘が生じる．

【障害物の影響】

孤立波、長波とも障害物を設置することにより越波の度合いが増すため、障害物なしの場合より洗掘量、最大洗掘深とも増加する。

なお洗掘量について、今回用いた 3D レーザープロファイラーのデータによる算定値と、移動床部より岸側で採取した土砂量による計測値の比較を行っている（表 5-3-1～5-3-2）。

これらの洗掘量の比較から全体的に算定値より計測値の方が大きい傾向である。これは初期河床の空隙率 n を計る際、試料のサンプリングの際に乱して、実際の n の値より大きくなっていることが要因と推察される。

また洗掘量の算定値と計測値の差は、孤立波より長波、越流波の方が大きい。これは長波、越流波の条件では堆積域が発生しており、洗掘した土砂が再堆積したこの部分の n を過小評価していることによると推察される。つまり、プロファイラーデータによる算定値は、一律初期河床の n を用いて算定しているが、再堆積した部分の n はそれより大きい（空隙が増えている）と考えられ、堆積量を過大評価しているものと考えられる。

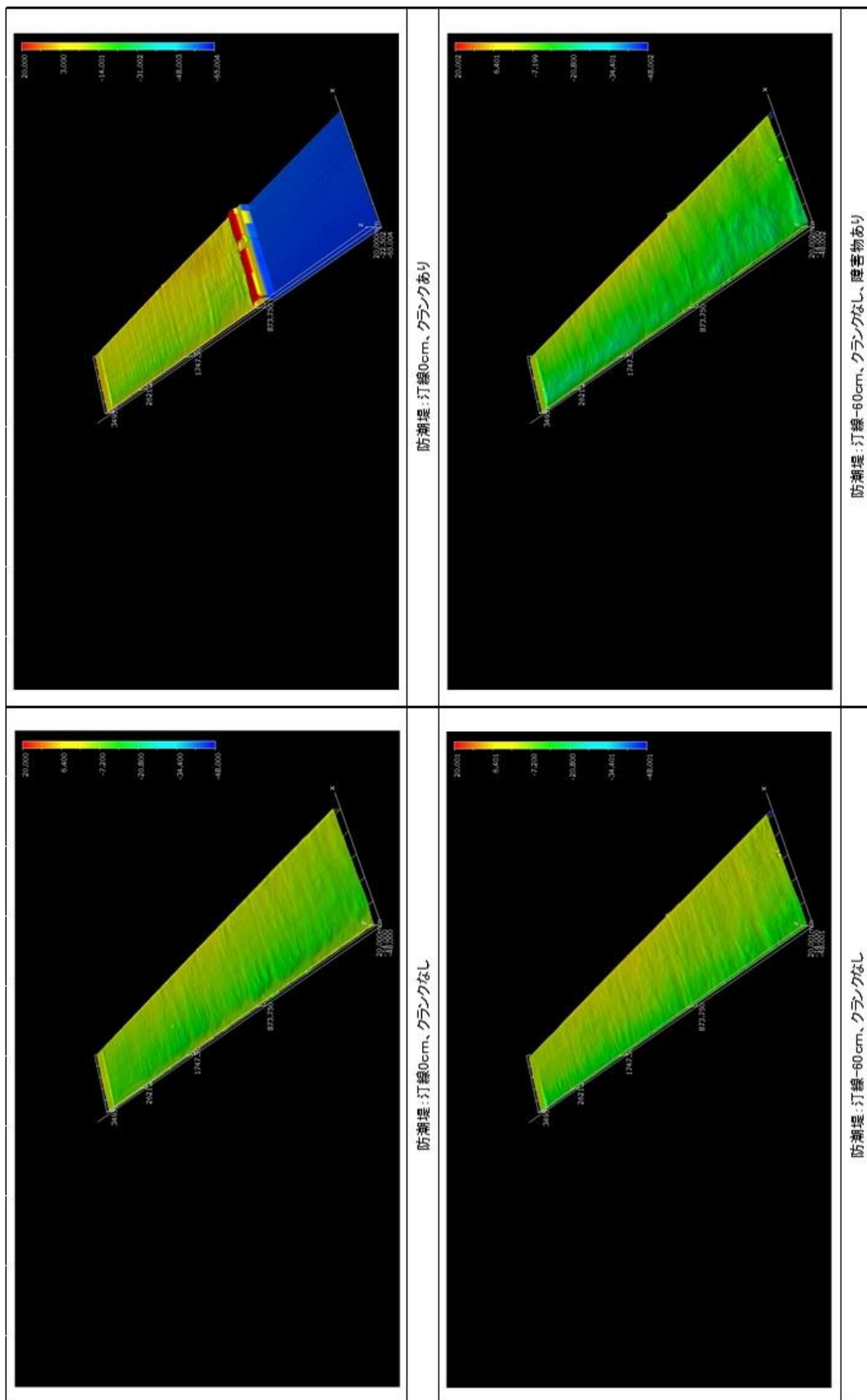


図 5-3-4 実験後の移動床形状 (3D プロファイラーによる：孤立波)

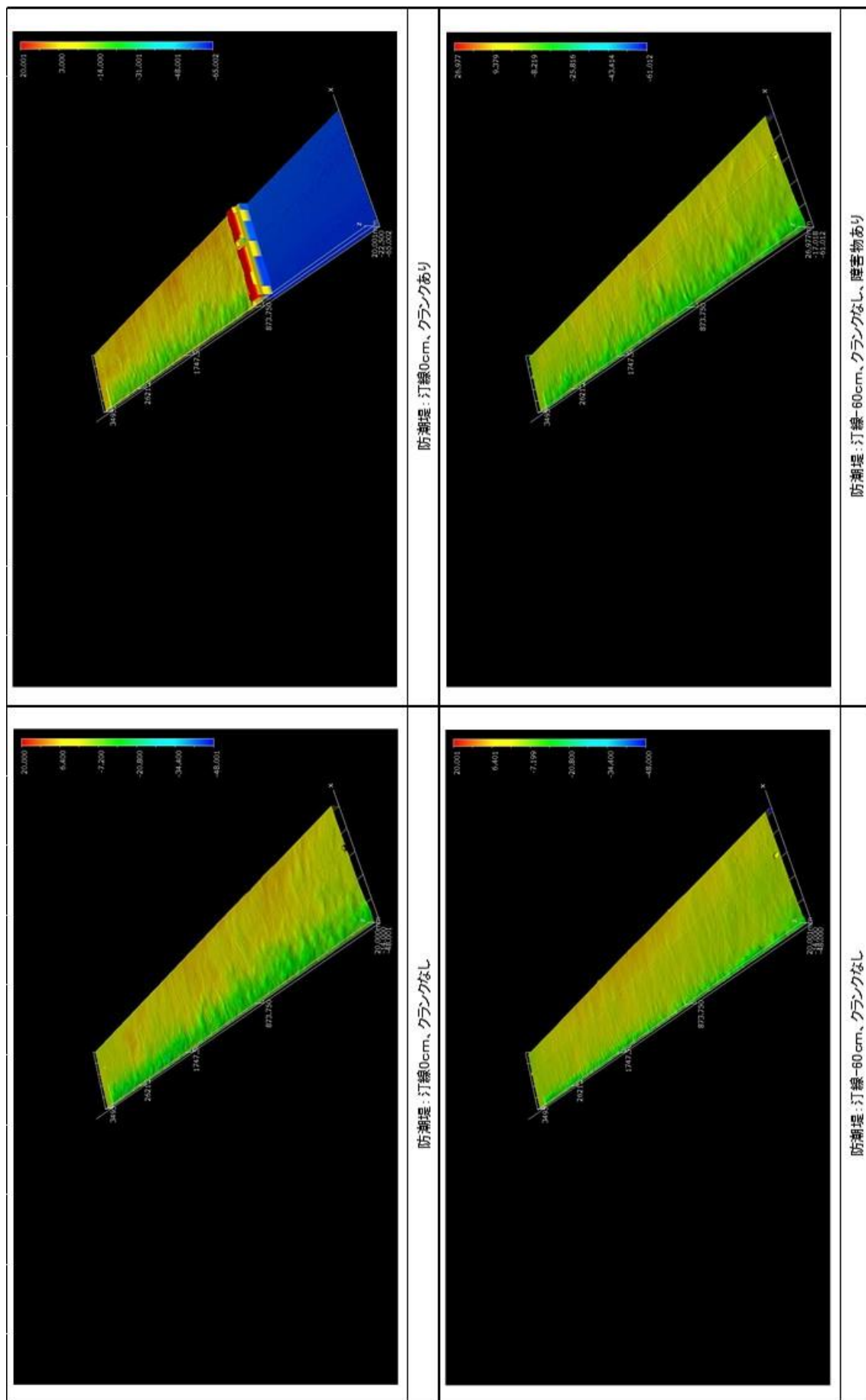


図 5-3-5 実験後の移動床形状（3D プロファイラーによる：長波）

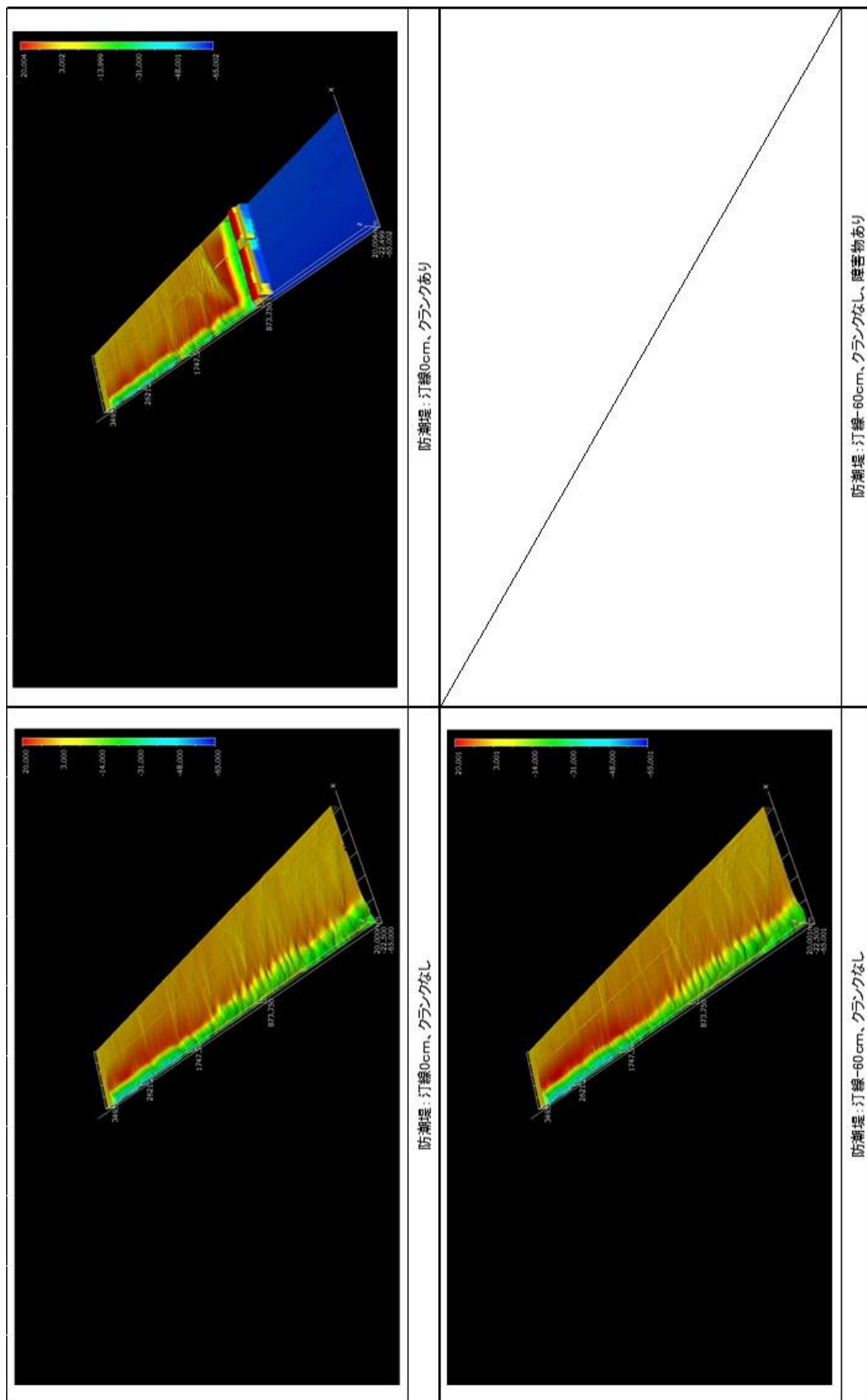


図 5-3-6 実験後の移動床形状（3D プロファイラーによる：越流波）

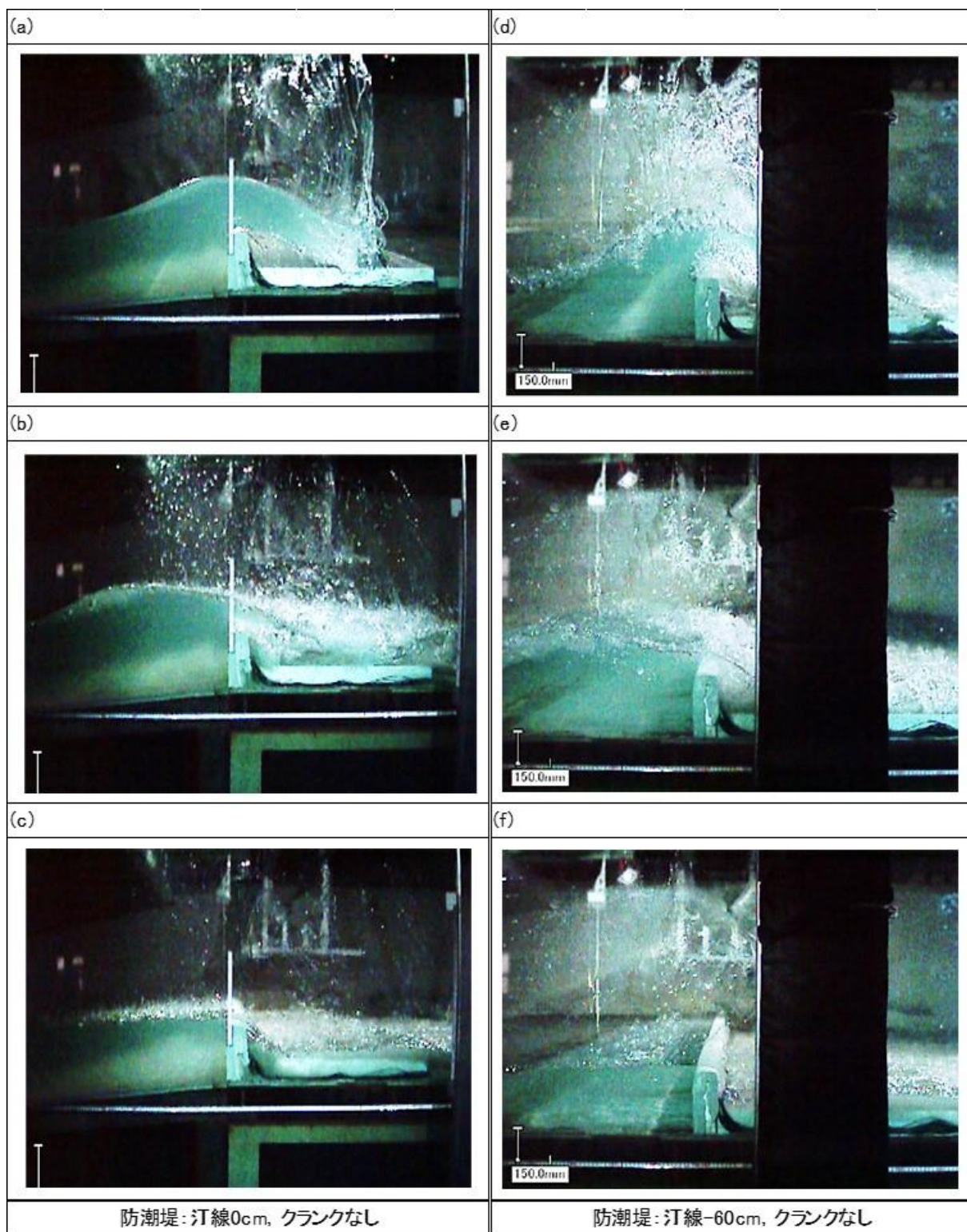


写真 5-3-1 断面流況のスナップショットの一例（孤立波）



写真 5-3-2 断面流況のスナップショットの一例（長波）

表 5-3-1 試験後の移動床部最大洗掘深および洗掘量計測結果(1)

洗掘影響実験ケース表(孤立波)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	最大洗掘深 (mm)	最大洗掘発生 位置(防潮堤か らの距離)(mm)	空隙込み		空隙なし		差(%)
					洗掘量(Q) PF計測値	洗掘量(Q) 実測値	洗掘量(Q) PF計測値	洗掘量(Q) 実測値	
Case4-10	汀線 0cm ①	①クランク なし	-19.8	166.2	10.28	12.20	7.74	8.63	11.5
Case4-11			-17.8	146.6	10.15	12.26	7.64	8.67	13.5
Case4-12			-17.8	179.0	10.43	12.60	7.86	8.91	13.4
Case4-19		②クランク あり	-15.6	157.4	7.08	8.10	5.33	5.73	7.5
Case4-20			-15.1	161.0	7.22	8.50	5.44	6.01	10.5
Case4-21			-16.1	141.8	7.09	8.76	5.34	6.19	16.0
Case4-28	汀線 -60cm ②	①クランク なし	-18.5	123.8	8.82	10.92	6.64	7.72	16.3
Case4-29			-21.2	132.2	9.94	11.84	7.49	8.37	11.8
Case4-30			-21.7	113.0	10.71	12.00	8.07	8.48	5.2

洗掘影響実験ケース表(長波)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	最大洗掘深 (mm)	最大洗掘発生 位置(防潮堤か らの距離)(mm)	空隙込み		空隙なし		差(%)
					洗掘量(Q) PF計測値	洗掘量(Q) 実測値	洗掘量(Q) PF計測値	洗掘量(Q) 実測値	
Case4-13	汀線 0cm ①	①クランク なし	-20.8	126.2	4.75	5.88	3.58	4.16	16.2
Case4-14			-20.2	94.2	4.50	6.02	3.39	4.26	25.5
Case4-15			-21.2	104.6	4.59	6.18	3.46	4.37	26.4
Case4-22		②クランク あり	-21.2	116.6	3.47	4.06	2.61	2.87	9.8
Case4-23			-18.6	110.6	3.36	4.70	2.53	3.32	31.5
Case4-24			-19.9	134.6	3.51	4.56	2.65	3.22	21.8
Case4-31	汀線 -60cm ②	①クランク なし	-16.3	56.6	2.34	2.94	1.76	2.08	18.0
Case4-32			-17.3	55.4	2.63	3.20	1.98	2.26	14.0
Case4-33			-18.2	67.4	2.42	2.94	1.82	2.08	14.2

洗掘影響実験ケース表(越流波)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	最大洗掘深 (mm)	最大洗掘発生 位置(防潮堤か らの距離)(mm)	空隙込み		空隙なし		差(%)
					洗掘量(Q) PF計測値	洗掘量(Q) 実測値	洗掘量(Q) PF計測値	洗掘量(Q) 実測値	
Case4-16	汀線 0cm ①	①クランク なし	-44.8	47.0	0.96	1.18	0.73	0.83	14.8
Case4-17			-44.7	72.2	1.02	1.52	0.77	1.07	39.4
Case4-18			-46.9	66.2	1.34	1.92	1.01	1.36	34.6
Case4-25		②クランク あり	-46.5	78.2	0.95	1.26	0.71	0.89	25.0
Case4-26			-45.3	75.2	0.89	1.14	0.67	0.81	20.1
Case4-27			-42.2	63.8	0.61	0.92	0.46	0.65	40.6
Case4-34	汀線 -60cm ②	①クランク なし	-47.4	47.0	1.66	2.16	1.25	1.53	22.4
Case4-35			-47.9	53.0	1.43	1.94	1.08	1.37	27.0
Case4-36			-47.0	48.2	0.98	1.34	0.74	0.95	28.2

※洗掘量 PF 計測値はプロファイラーデータからの算定値, 洗掘量実測値は岸側で採取した土砂量の計測値を示す.

表 5-3-2 試験後の移動床部最大洗掘深および洗掘量計測結果(2)

洗掘影響実験ケース表(孤立波、前面障害物)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	最大洗掘深 (mm)	最大洗掘発生 位置(防潮堤か らの距離)(mm)	空隙込み		空隙なし		差(%)
					洗掘量(ℓ) PF計測値	洗掘量(ℓ) 実測値	洗掘量(ℓ) PF計測値	洗掘量(ℓ) 実測値	
Case4-37	汀線 -60cm ②	①クランク なし	-27.3	174.2	20.84	24.28	15.69	17.17	9.4
Case4-38			-26.1	212.6	21.93	26.82	16.51	18.96	14.8
Case4-39			-26.9	163.4	20.11	22.00	15.14	15.55	2.7

洗掘影響実験ケース表(長波、前面障害物)									
ケースNo.	堤体位置	平面配置 形状	最大洗掘深 (mm)	最大洗掘発生 位置(防潮堤か らの距離)(mm)	空隙込み		空隙なし		差(%)
					洗掘量(ℓ) PF計測値	洗掘量(ℓ) 実測値	洗掘量(ℓ) PF計測値	洗掘量(ℓ) 実測値	
Case4-40	汀線 -60cm ②	①クランク なし	-21.9	134.2	5.97	6.83	4.50	4.83	7.4
Case4-41			-23.2	77.0	5.76	7.45	4.34	5.27	21.4
Case4-42			-24.1	65.0	5.97	7.00	4.49	4.95	10.2

※洗掘量 PF 計測値はプロファイラーデータからの算定値，洗掘量実測値は岸側で採取した土砂量の計測値を示す．

5-4 シミュレーションの概要

対津波設計・フラジリティ評価手法の高度化に資することを目的に、別途実施される水理模型試験結果を対象とした完全3次元流体解析モデルによる数値シミュレーションを実施することで、防潮堤周辺における洗掘影響を把握する。なお、河床変動モデルの概要は付録Ⅰに記す。

5-5 解析条件

解析の概要及びケース数を表 5-5-1 に示す。Case5-1～Case5-6 の地形は、5-1 の試験の概要及び 5-2 の試験条件で上述した水槽において単純勾配とし、入力波は孤立波、長波、越流波の解析を実施した。

表 5-5-1 シミュレーション解析ケース一覧表

ケース名	地形	入力波種類	防潮堤位置 (汀線から : cm)	入力波高 (cm)
Case5-1	単純勾配	孤立波	0	15.3cm
Case5-2	単純勾配	孤立波	-60	15.3cm
Case5-3	単純勾配	長波	0	7.07cm
Case5-4	単純勾配	長波	-60	7.07cm
Case5-5	単純勾配	越流波	0	越流水深 3.0cm
Case5-6	単純勾配	越流波	-60	越流水深 3.0cm

1) 計算メッシュ

計算メッシュは、図 5-2-1 の試験水槽の形状を適切に表現できるように作成した。水路縦断方向のメッシュ分割について、遡上時の津波の変形・伝播過程を詳細に検討できるように、計算メッシュサイズを 1cm に設定した。横断方向のメッシュ分割について、津波の横断方向の変化が少ない事を勘案し、計算メッシュサイズを 1m に設定した。

鉛直方向のメッシュ分割について、解析対象となる津波波形の形状を表現する為に、計算メッシュサイズを 1cm に設定した。

2) 防潮堤

防潮堤を汀線から 0cm ないし -60cm の位置に設置する条件で解析を実施した。

3) 入力波

孤立波は波高 15.3cm、長波は波高 7.07cm、越流波は波高 18cm(越流水深 3.0cm) の入力波を各々与え解析を実施した。

5-6 解析結果と試験結果の比較

以下では、防潮堤法尻背面における河床高断面分布の計算結果及び各ケースにおける流速場の計算結果を示す（図 5-6-1～図 5-6-12 参照）。なお、全ケースの計算結果は摩擦速度 2 倍で実施した結果を示し、河床高断面分布は越流後波が十分収まる時刻の結果を採用した。

(1) Case5-1 及び Case5-2 (孤立波,入力波高 15.3cm)

Case5-1 (防潮堤位置:汀線 0cm) の河床高断面分布を図 5-6-1, Case5-2 (防潮堤位置:汀線-60cm) の河床高断面分布を図 5-6-2 に示す.

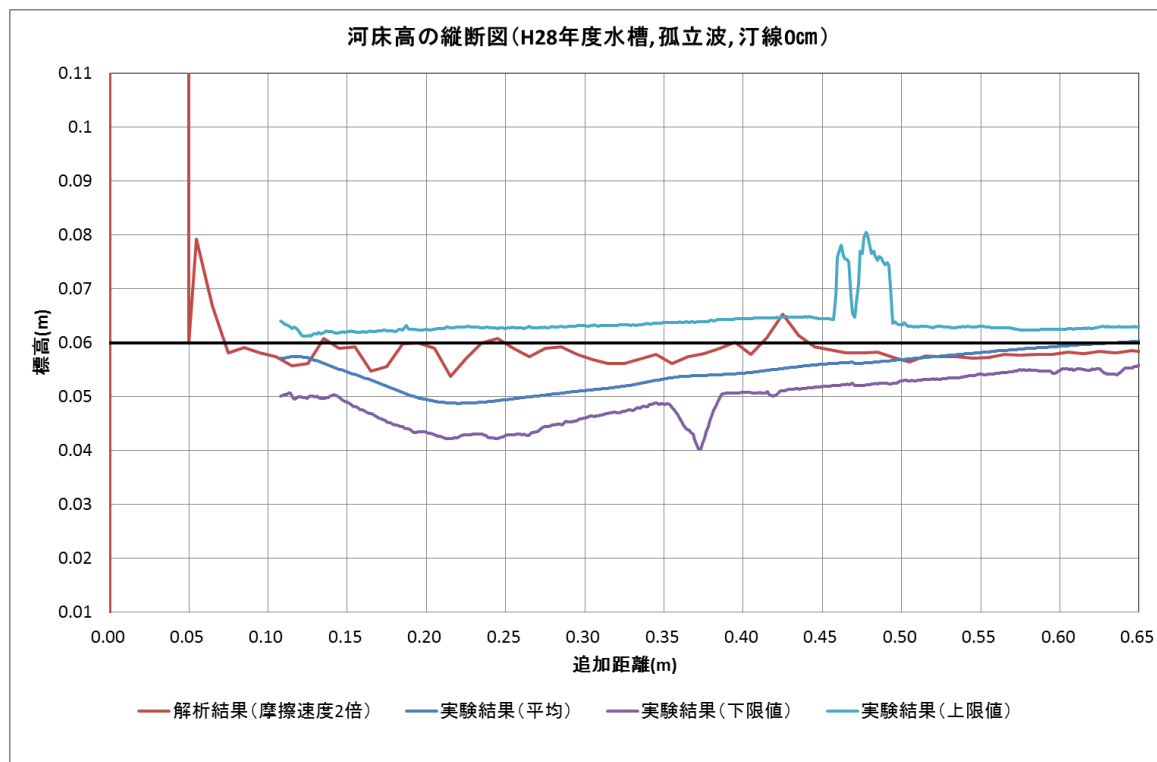


図 5-6-1 河床高断面分布【孤立波, 汀線 0cm, 入力波高 15.3cm】

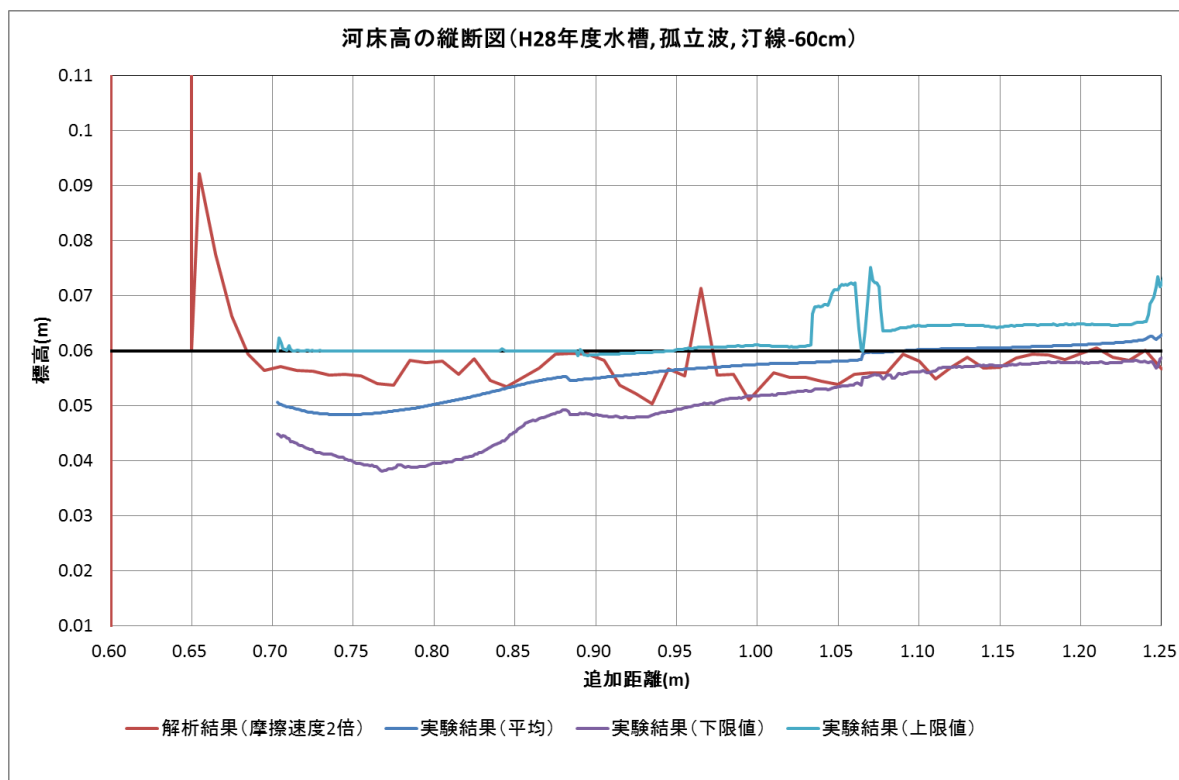


図 5-6-2 河床高断面分布【孤立波, 汀線-60cm, 入力波高 15.3cm】

図 5-6-3 は Case5-1 及び Case5-2 における断面 2 次元流速スナップショット【孤立波，入力波高 15.3cm】を示す. (a)-(c)は Case5-1（防潮堤位置：汀線 0cm）を示し，(d)-(f)は Case5-2（防潮堤位置：汀線 60cm）を示した図であり，(a)(d)は越流直後，(b)(e)は越流開始から 0.5 秒後，(c)(f)は越流開始から 1.0 秒後を示す.

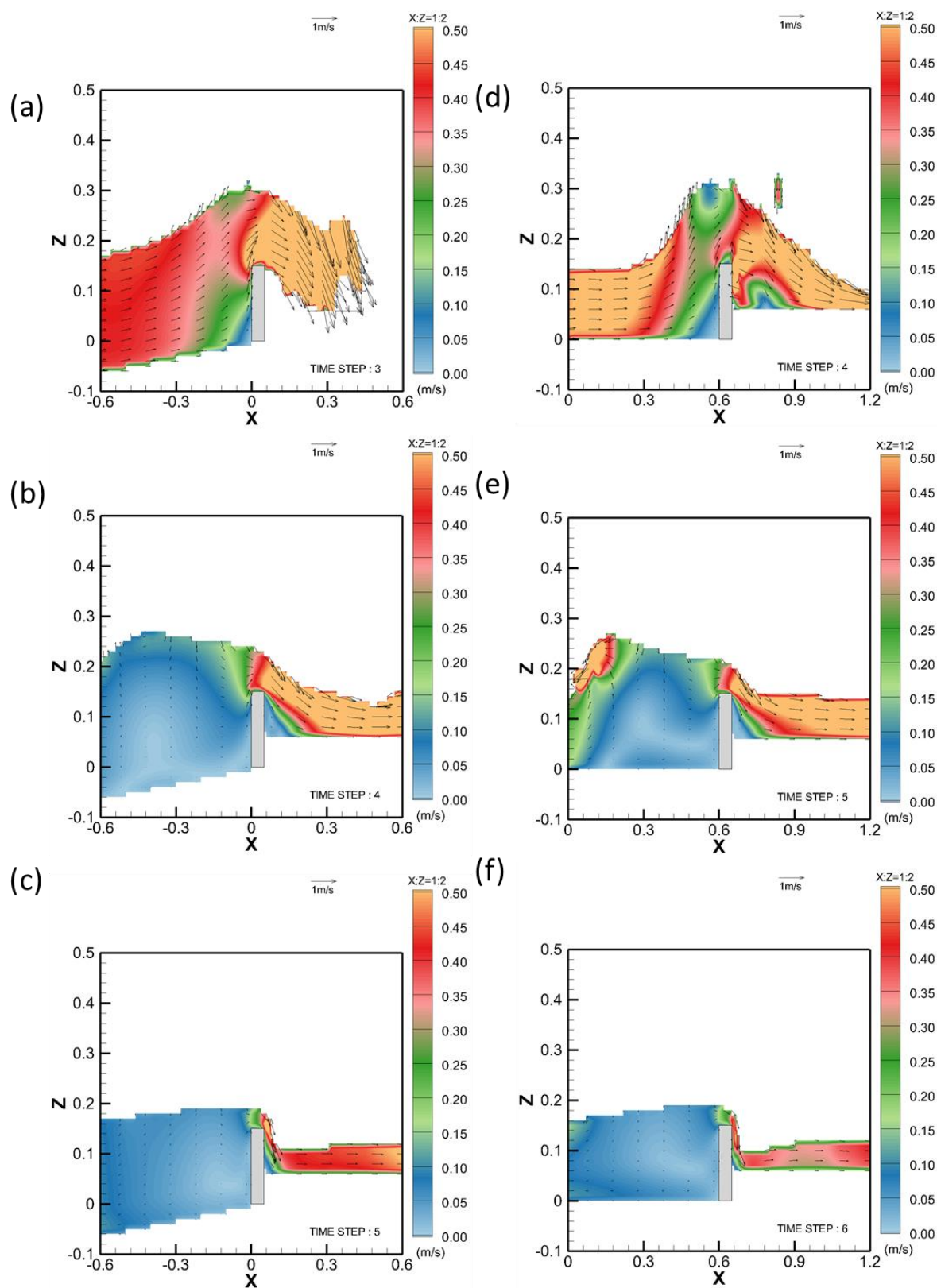


図 5-6-3 断面 2 次元流速スナップショット【孤立波，入力波高 15.3cm】

図 5-6-4 は Case5-1 及び Case5-2 における打込み波圧の最大値【孤立波，入力波高 15.3cm】を示す。(a)は Case5-1 (防潮堤位置：汀線 0cm) を示し，(b)は Case5-2 (防潮堤位置：汀線-60cm) を示す。

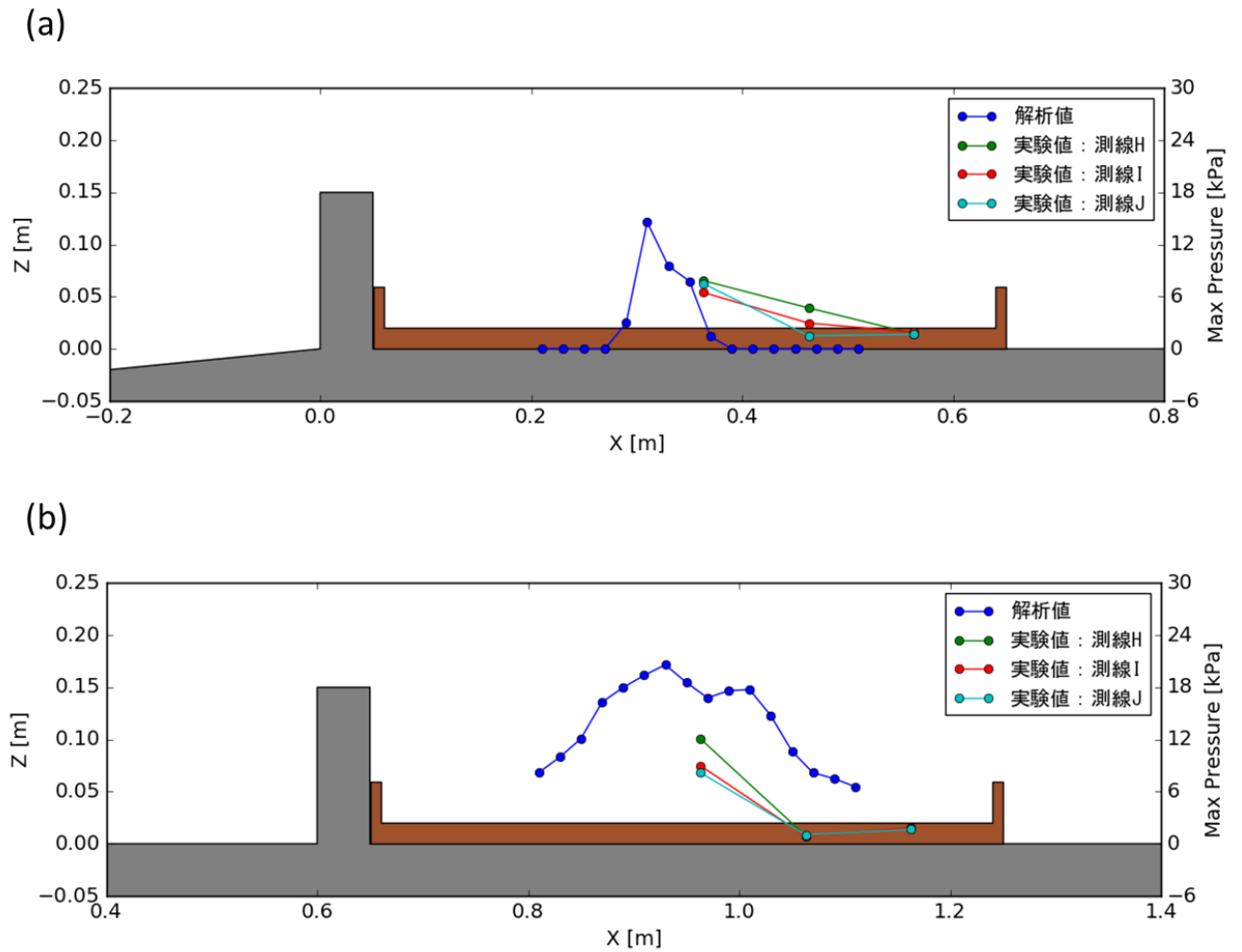


図 5-6-4 打込み波圧の最大値【孤立波，入力波高 15.3cm】

(2) Case5-3 及び Case5-4 (長波,入力波高 7.07cm)

Case5-3 (防潮堤位置：汀線 0cm) における河床高断面分布を図 5-6-5, Case5-4 (防潮堤位置：汀線-60cm) の河床高断面分布を図 5-6-6 に示す。

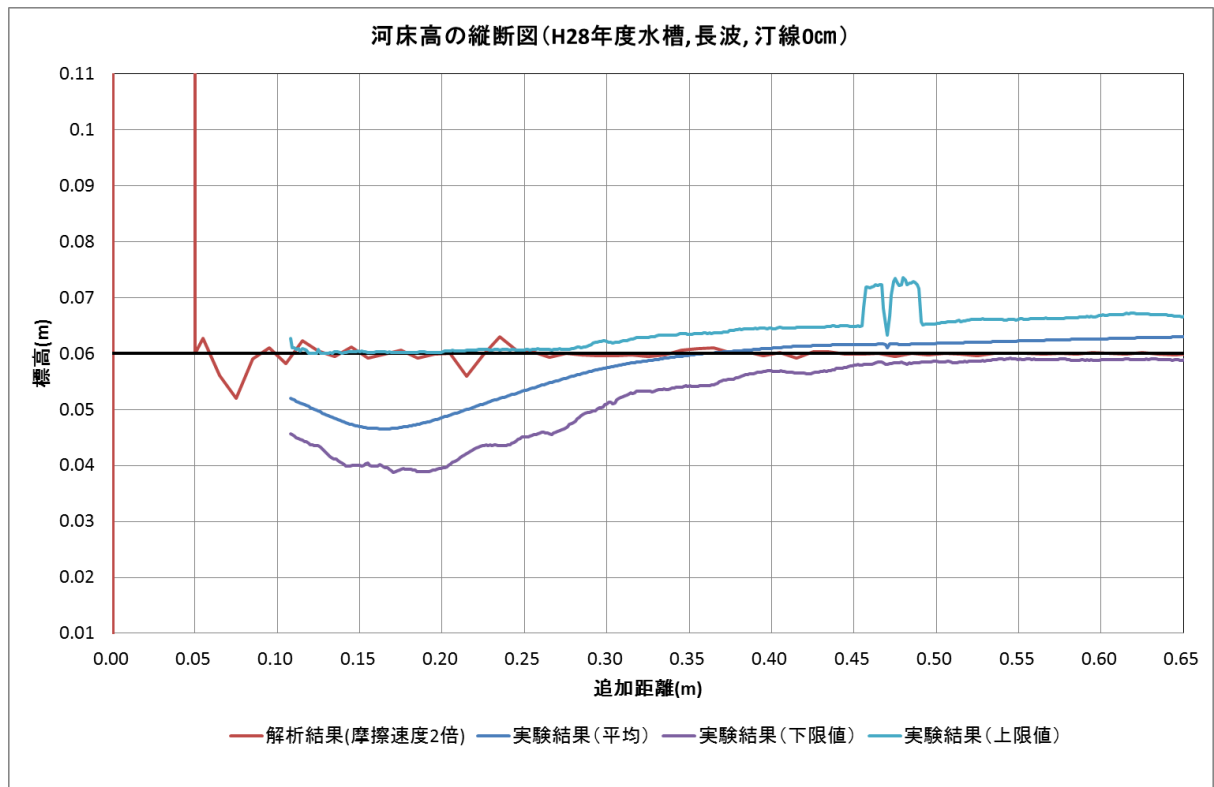


図 5-6-5 河床高断面分布【長波, 汀線 0cm, 入力波高 7.07cm】

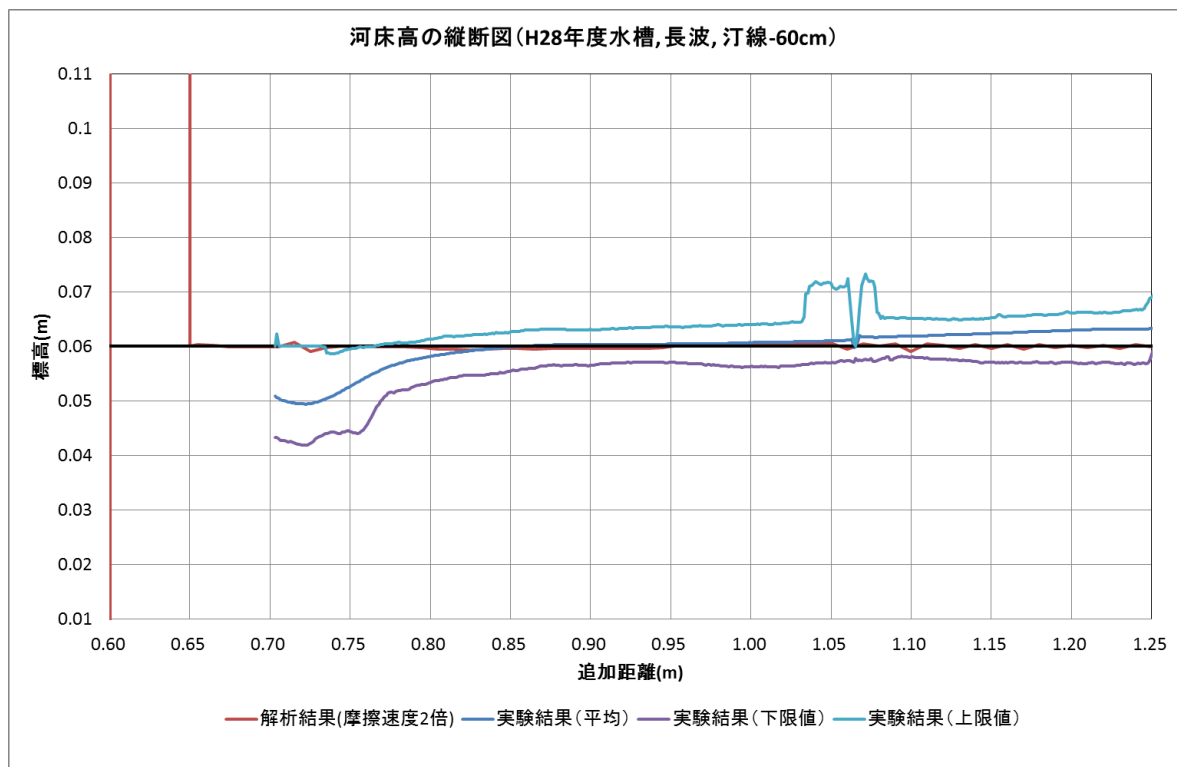


図 5-6-6 河床高断面分布【長波, 汀線-60cm, 入力波高 7.07cm】

図 5-6-7 は Case5-3 及び Case5-4 における断面 2 次元流速スナップショット【長波，入力波高 7.07cm】を示す。(a)-(c)は Case5-3（防潮堤位置：汀線 0cm）を示し，(d)-(f)は Case5-4（防潮堤位置：汀線 60cm）を示した図であり，(a)(d)は越流直後，(b)(e)は越流開始から 0.5 秒後，(c)(f)は越流開始から 1.0 秒後を示す。

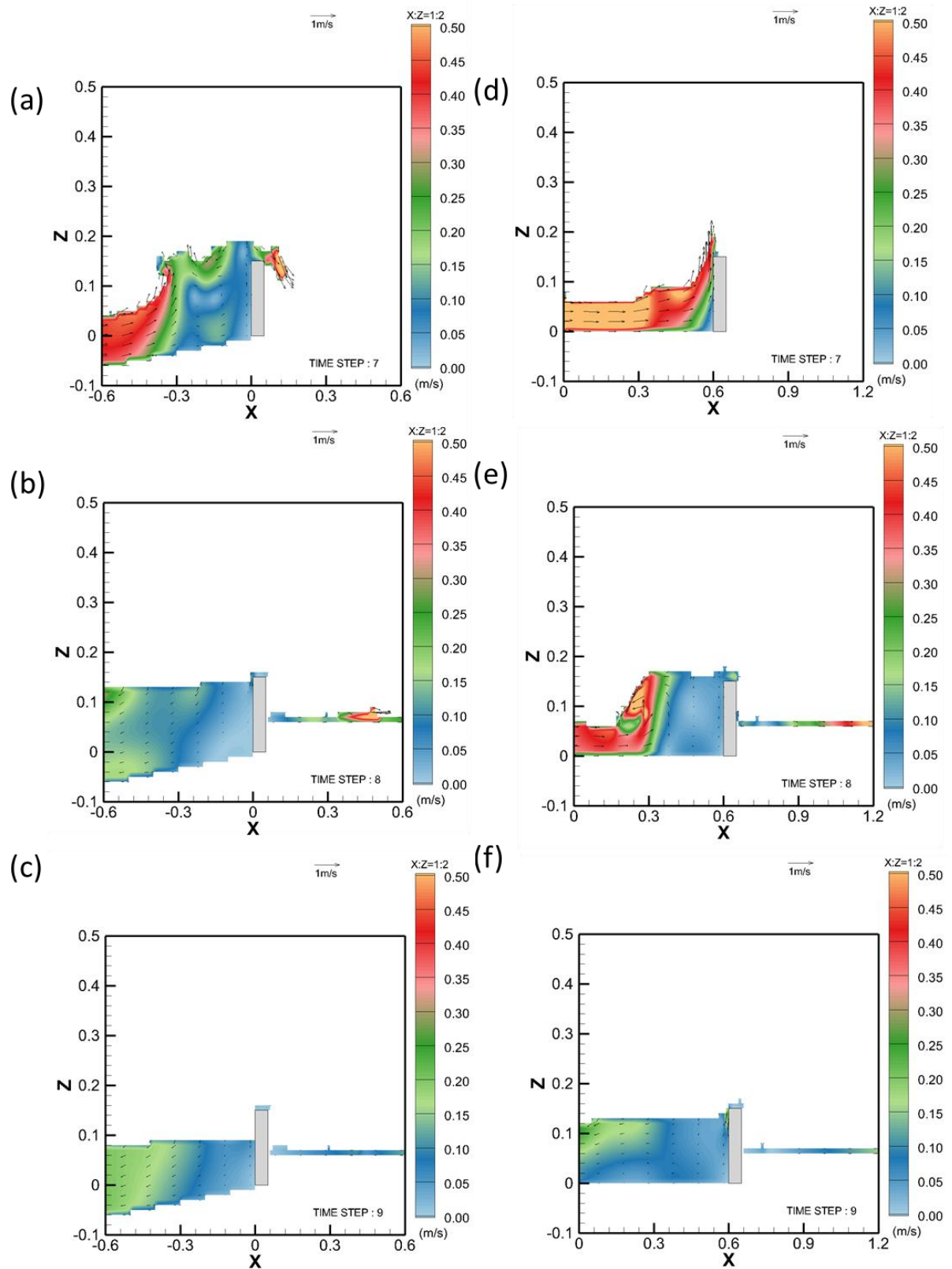
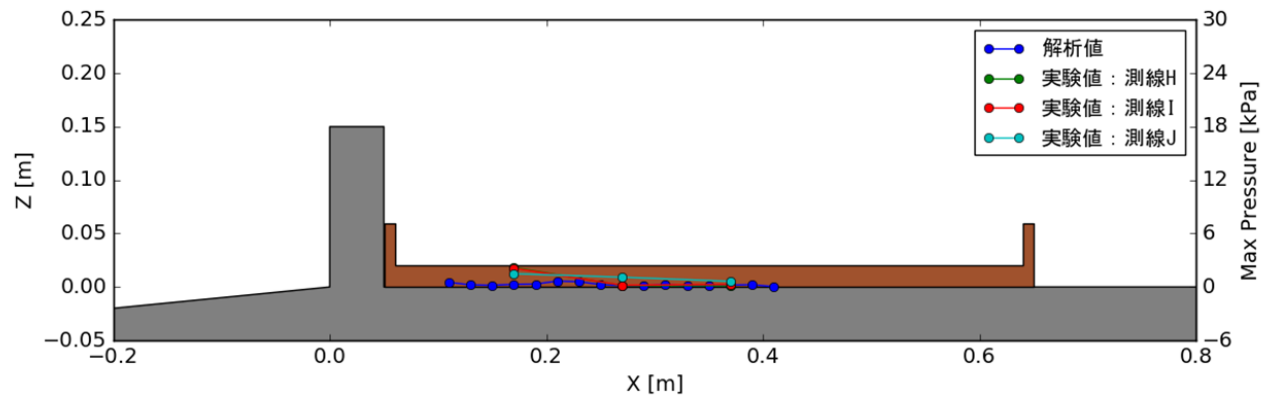


図 5-6-7 断面 2 次元流速スナップショット【長波，入力波高 7.07cm】

図 5-6-8 は Case5-3 及び Case5-4 における打込み波圧の最大値【長波，入力波高 7.07cm】を示す。(a)は Case5-1（防潮堤位置：汀線 0cm）を示し，(b)は Case5-2（防潮堤位置：汀線-60cm）を示す。

(a)



(b)

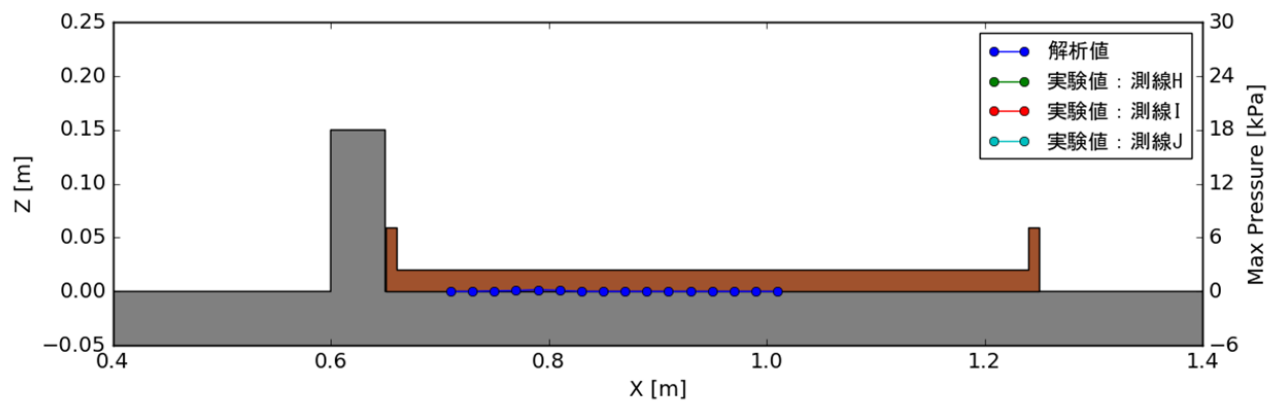


図 5-6-8 打込み波圧の最大値【長波，入力波高 7.07cm】

(3) Case5-5 及び Case5-6 (越流波,入力波高 18.0cm)

Case5-5 (防潮堤位置:汀線 0cm) における河床高断面分布を図 5-6-9, Case5-6 (防潮堤位置:汀線-60cm) の河床高断面分布を図 5-6-10 に示す.

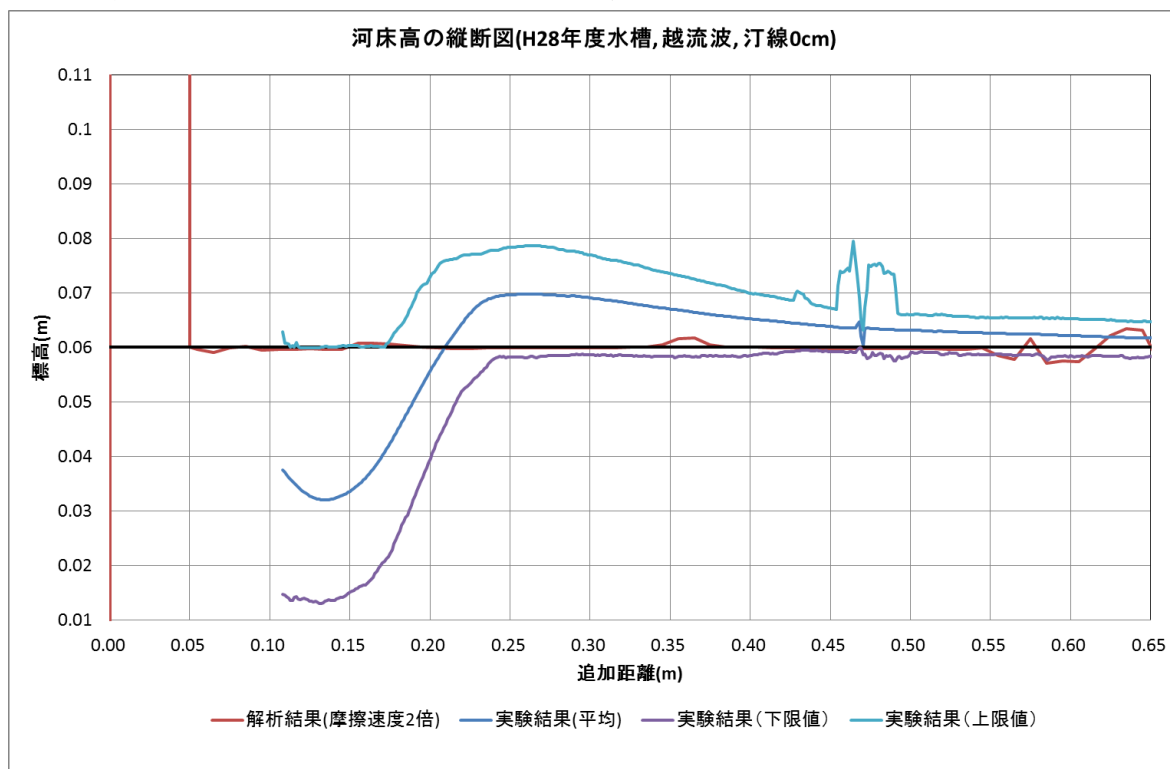


図 5-6-9 河床高断面分布【越流波, 汀線 0cm, 入力波高 18.0cm】

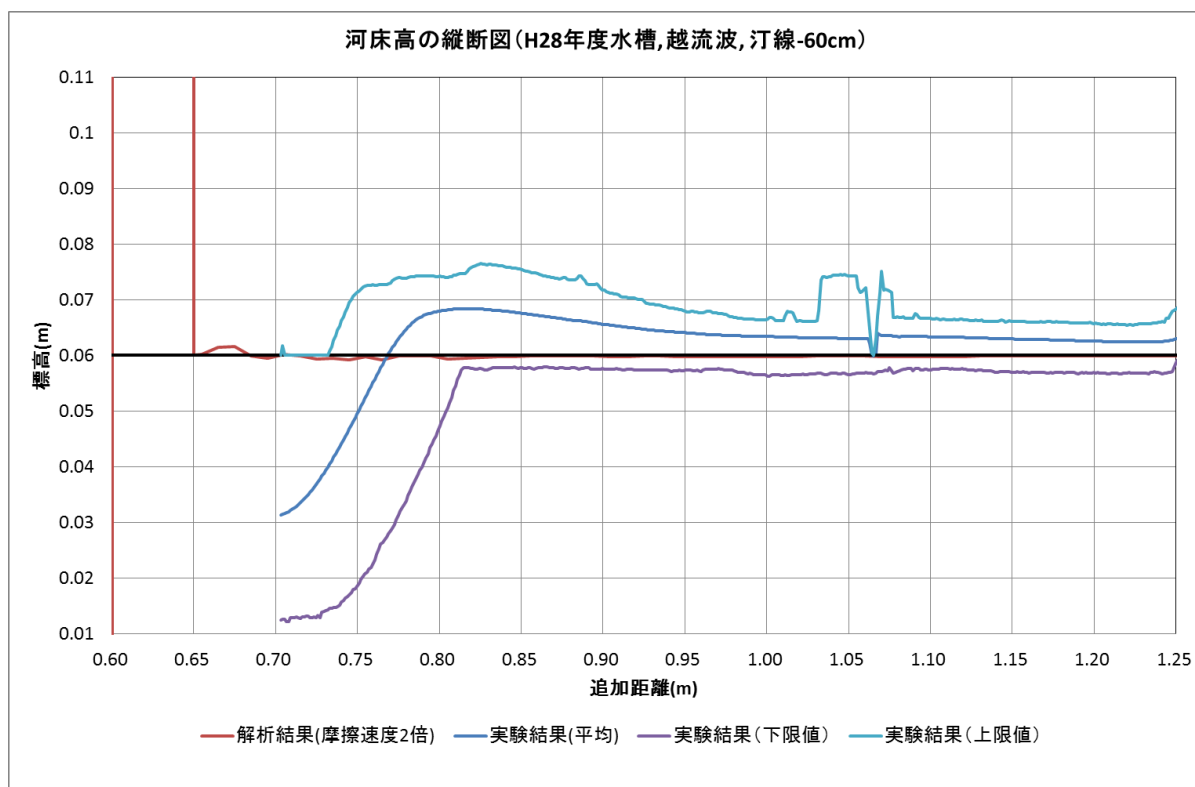


図 5-6-10 河床高断面分布【越流波, 汀線-60cm, 入力波高 18.0cm】

図 5-6-11 は Case5-5 及び Case5-6 における断面 2 次元流速スナップショット【越流波，越流水深 3.0cm】を示す。(a)-(c)は Case5-5（防潮堤位置：汀線 0cm）を示し，(d)-(f)は Case5-6（防潮堤位置：汀線 -60cm）を示した図であり，(a)(d)は越流直前，(b)(e)は越流開始から 1.0 秒後，(c)(f)は越流開始から 2.0 秒後を示す。

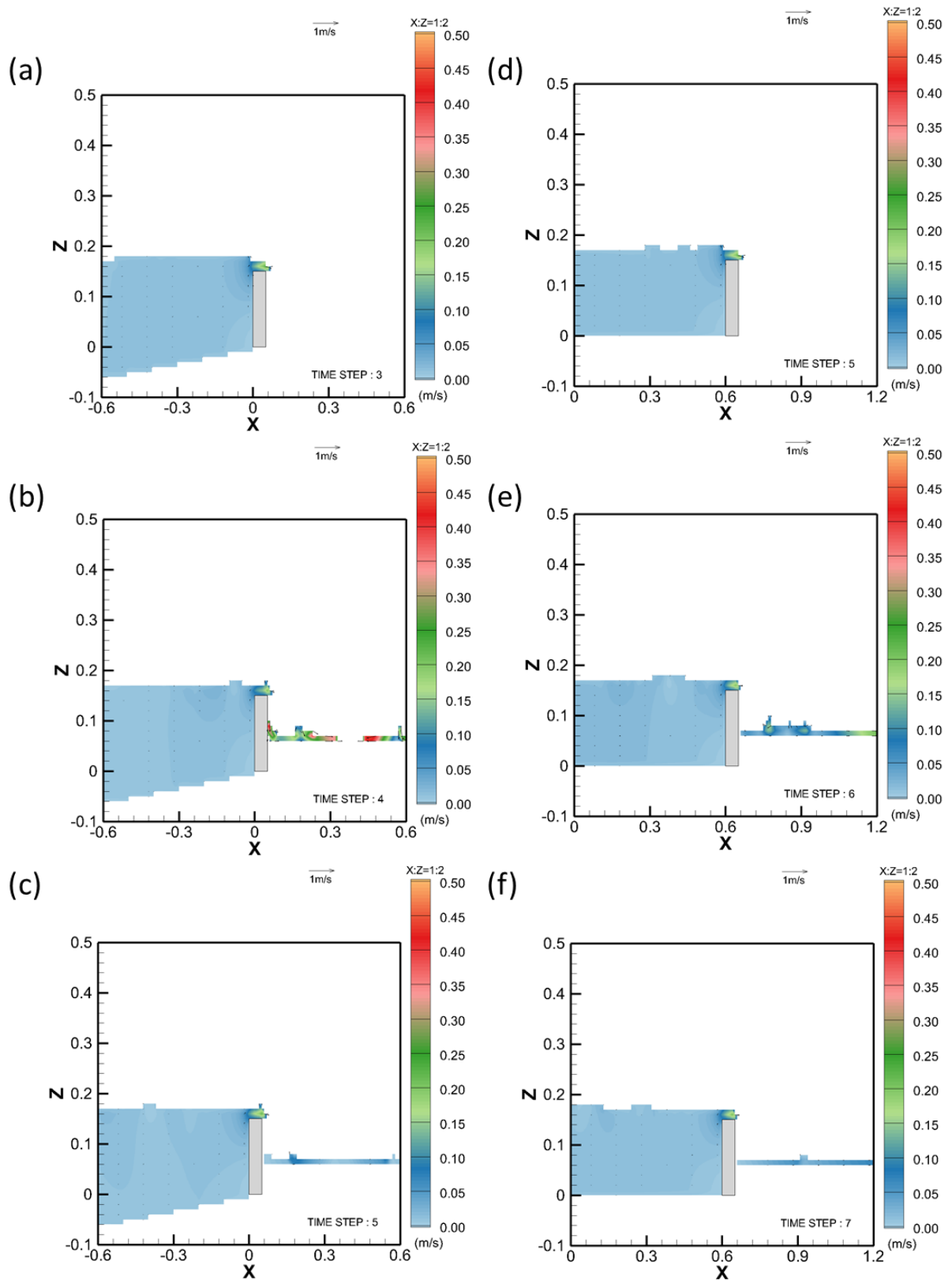


図 5-6-11 断面 2 次元流速スナップショット【越流波，越流水深 3.0cm】

(4) Case5-1～Case5-6 の最大洗掘深

表 5-6-1 は Case5-1～Case5-6 の試験結果と解析結果の最大洗掘深をそれぞれ示す。なお、解析結果においては試験の測定範囲外をも含む領域において洗掘深の最大値を求め、その値を最大洗掘深としている。

表 5-6-1 各ケースの試験結果と解析結果における最大洗掘深

ケース名	試験結果(平均)[m]	解析結果(摩擦速度 2 倍)[m]
Case5-1	0.0113	0.0063
Case5-2	0.0116	0.0097
Case5-3	0.0135	0.0080
Case5-4	0.0106	0.0009
Case5-5	0.0280	0.0030
Case5-6	0.0284	0.0008

また図 5-6-12 のグラフは、各ケースの最大洗掘深の試験結果と解析結果との比較を示す。

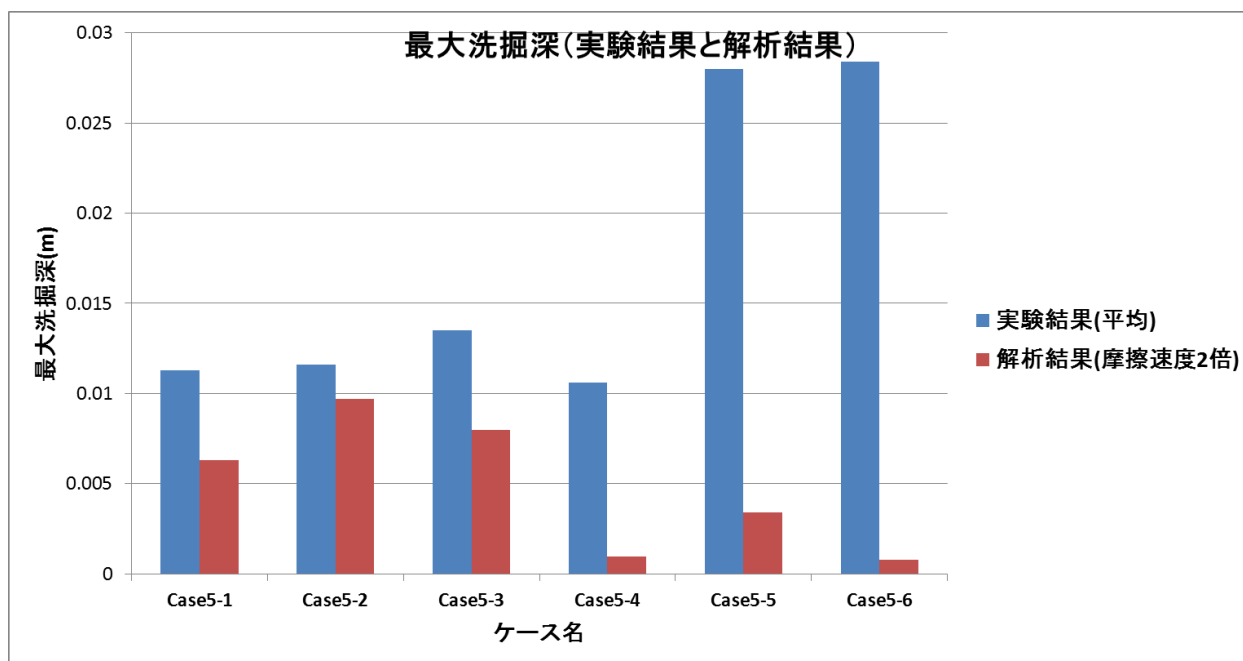


図 5-6-12 各ケースにおける最大洗掘深の試験結果と解析結果との比較

5-7 解析結果のまとめ

5-6 に示した洗掘影響に係る解析結果について、入射波別に結果を整理する。

(1)孤立波

河床高断面分布の洗掘深については、汀線 0cm のケースでは試験結果の方が若干大きくなるのに対し、汀線-60cm のケースでは試験結果との差異が少なく調和的である。

一方、打ち込み波圧の最大値の分布については、試験と解析はほぼ同じ傾向の分布を示している。ただし、汀線 0cm のケースでは試験結果の方がやや過大となるのに対し、汀線-60cm のケースでは解析結果の方がやや過大となる。

(2)長波

河床高断面分布の洗掘深については、汀線 0cm 及び汀線-60cm の両ケースで試験結果の方がやや過大となる。この理由としては、防潮堤の背後の波力が試験と比較して弱いためと考えられる。

一方、打ち込み波圧の最大値の分布については、試験と解析はほぼ同じ傾向の分布であるが、試験結果の方が若干大きくなる。

(3)越流波

河床高断面分布の洗掘深については、汀線 0cm 及び汀線-60cm の両ケースで試験結果の方が過大となった。この理由としては、見たい現象に対して解析の解像度が低く、越流波の流れが再現できていないためと考えられる。

第6章 護岸形状の影響の把握

本章では、波圧分布、漂流物挙動および洗掘挙動に対する護岸形状の影響を把握する為、断面二次元水路を用いて水理試験を実施し、防潮堤周りでの漂流物挙動および洗掘に関する試験データを取得する。護岸形状は直立護岸タイプおよび単純勾配タイプとする。透過波検定解析および波圧検定解析と同様に波高、波圧を測定するとともに、入力津波の遡上形状や漂流物挙動の詳細分析が可能なように、高速度カメラ等により入力津波の遡上性状および砕波性状等の動画を撮影する。また、高速度カメラで撮影した動画から、衝突速度、衝突姿勢等を測定する。

6-1 試験の概要

漂流物挙動および洗掘挙動に対する護岸形状の影響を把握するため、断面二次元水路を用いて水理試験を実施し、防潮堤（堤体模型）周りでの漂流物挙動および洗掘に関する試験データを取得する。護岸形状は単純勾配タイプ直立護岸タイプとし（図6-1-1）、流速、波高、波圧を測定するとともに、入力津波の遡上性状や漂流物挙動の詳細分析が可能なよう、高速度カメラ等によりその動画を撮影する。また、洗掘試験では洗掘深の分布を測定する。

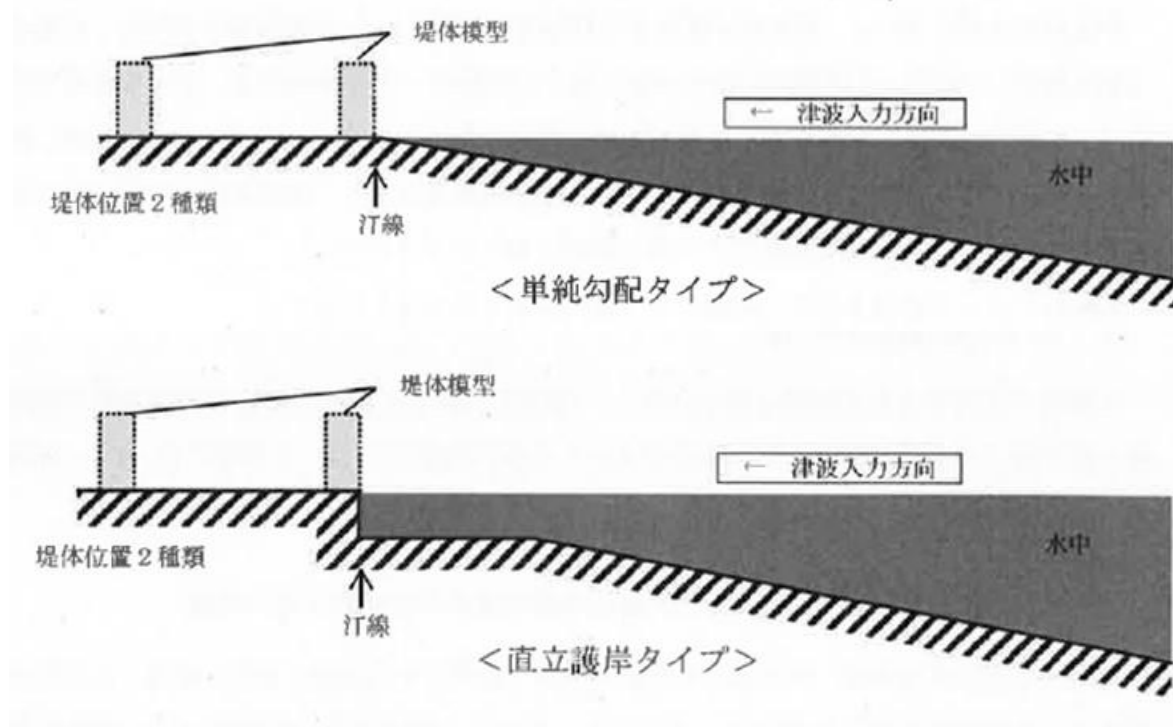


図 6-1-1 対象とする護岸形状イメージ図

6-2 試験条件

(1) 試験水路

断面二次元水路

長さ： 20.0m

幅： 1.0m



(2) 試験条件

実施した試験ケースを表 6-2-1 に示す。

表 6-2-1 断面二次元水路試験ケース

	ケース名	地形	漂流物	防潮堤位置	防潮堤 平面形状	入力波形	試行回数
検 定	case1-6	単純勾配	—	—	—	孤立波 波高15cm	3
	case1-7	直立護岸	—	—	—	〃	3
波 力 特 性 の 把 握	case2-37~39	単純勾配	—	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	3
	case2-40~42	〃	—	汀線-60cm	〃	〃	3
	case2-43~45	直立護岸	—	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	3
	case2-46~48	〃	—	汀線-60cm	〃	〃	3
漂 流 物 影 響 の 把 握	case3-2-37~39	単純勾配	流木模型	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	3
	case3-2-40~42	〃	〃	汀線-60cm	〃	〃	3
	case3-2-43~45	直立護岸	〃	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	3
	case3-2-46~48	直立護岸	〃	汀線-60cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	3
洗 掘 影 響 の 把 握	case4-37~39	単純勾配	—	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	3
	case4-40~42	〃	—	汀線-60cm	〃	〃	3
	case4-43~45	直立護岸	—	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	3
	case4-46~48	〃	—	汀線-60cm	〃	〃	3

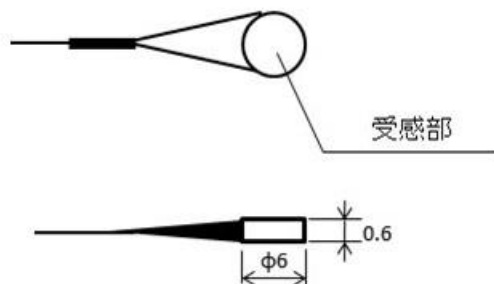
① 防潮堤（堤体模型）

大型津波再現水槽での試験と同様に、高さ 15cm のモデルを用いた（透明アクリル製）。



② 波圧計

形式名	規格容量	定格出力	固有振動数	製造元
PS-1KC	100kPa	0.5mV/V以上 (1000 × 10 ⁻⁶ ひずみ以上)	約10kHz	株式会社 共和電業

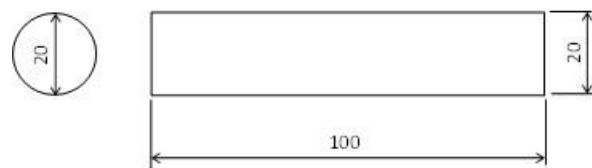


データサンプリング周波数：1,000Hz

波圧計設置状況

③ 漂流物模型

既成の円柱木材（杉材）に防水塗装を施して用いた。



流木1～3番

基本寸法：左図の通り

個体質量：No.1 0.020kgf (0.196N)

No.2 0.019kgf (0.186N)

No.3 0.019kgf (0.186N)

使用本数：各CASE毎に1本使用

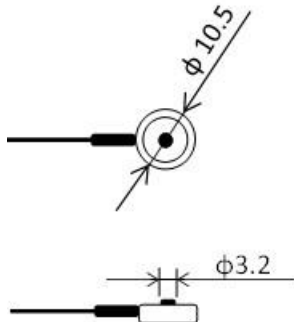
※防水塗装により、吸水による質量の変動はなし



④ 衝突力測定装置

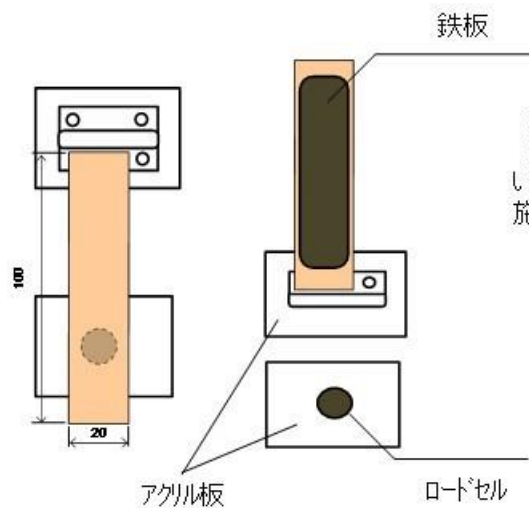
(ロードセルの仕様)

型式名	定格容量	固有振動数	製造元
LMB-A-100N	100N (10.20kgf)	約47kHz	株式会社 共和電業

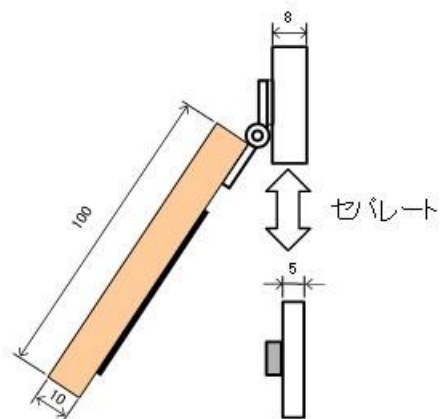


データサンプリング周波数：4,000Hz

(設置方法・取付け冶具)



ロードセルの特性に踏まえて支持棒を設置
受感部に対して垂直な力が加わらないと加重を感知しない。あわせて支持棒とロードセルの間に鉄板を加える措置を施した。

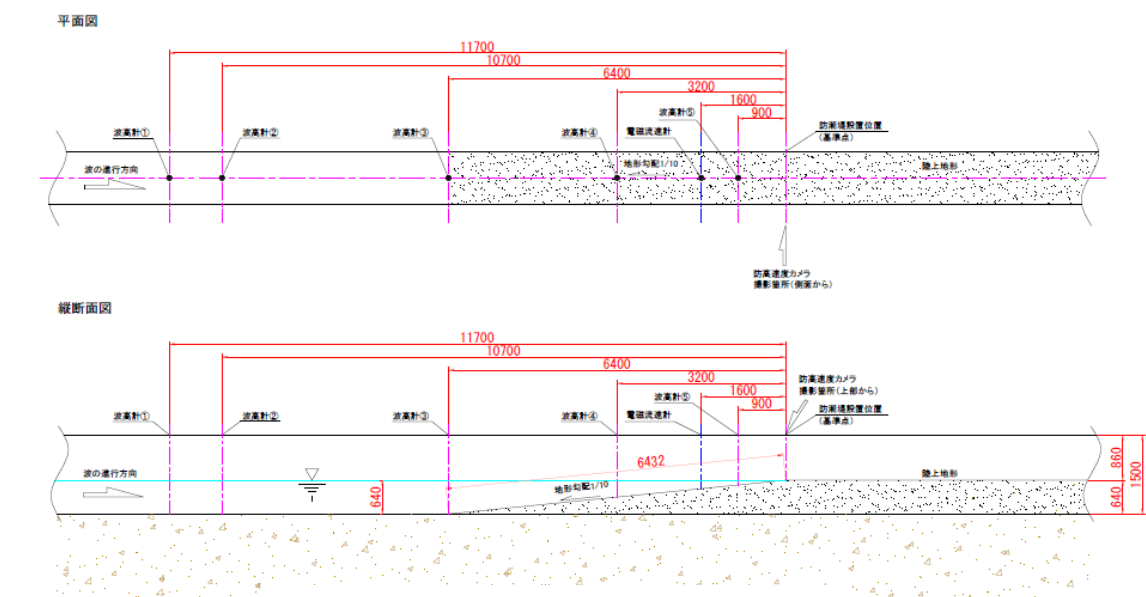


⑤ 洗掘試験

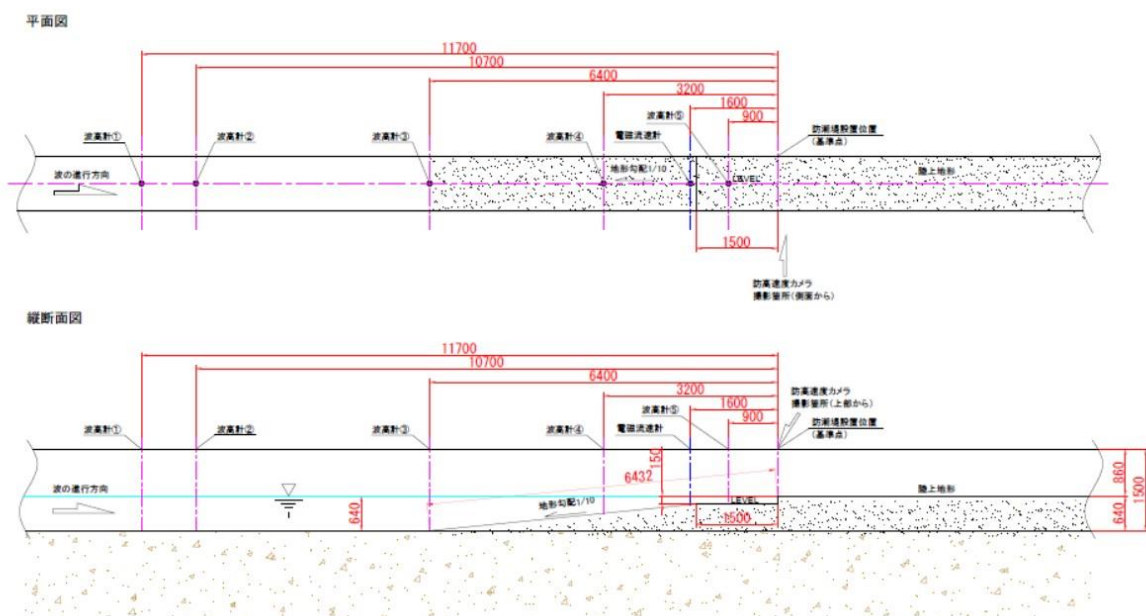
防潮堤（堤体模型）背面を移動床とし
（平均粒径 0.2m の移動床材料を敷設），
越波後の洗掘深をレベルおよび鋼尺で
計測した。
また，画像解析で洗掘縦断形を記録した。



(3) 計測機器設置位置



試験測定位置図（単純勾配）



試験測定位置図（直立護岸）

6-3 試験結果

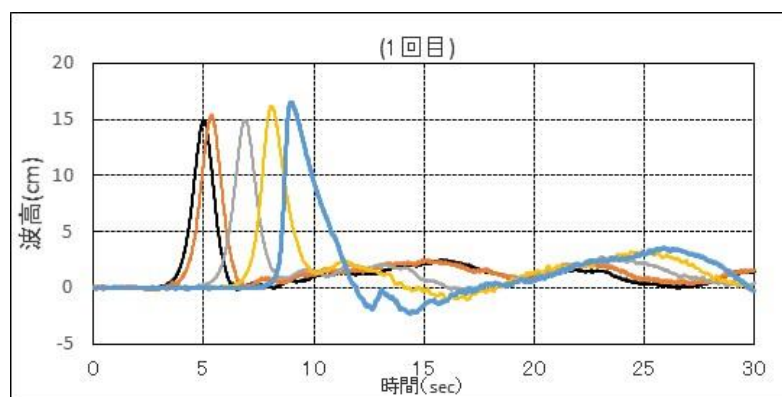
(1)通過波検定

通過波検定結果を以下に示す.

① 単純勾配

通過波試験測定結果（単純勾配）

設定波高	試行	波高値(cm)					流速値(cm/sec)
		波高1	波高2	波高3	波高4	波高5	電磁 流速計
波高 15cm	1回目	14.947	15.404	14.941	16.196	16.545	74.352
	2回目	14.941	15.243	14.946	16.162	16.585	73.225
	3回目	14.913	15.311	14.951	16.176	16.608	73.733
	平均値	14.934	15.319	14.946	16.178	16.579	73.770

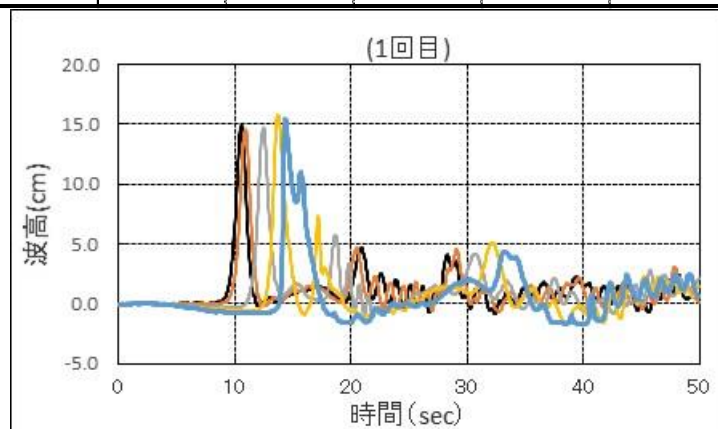


通過波の波高測定結果の一例（単純勾配）

② 直立護岸

通過波試験測定結果（直立護岸）

設定波高	回数	波高1	波高2	波高3	波高4	波高5	流速
(cm)		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm/sec)
15.0	1回目	14.905	14.638	14.789	15.858	15.525	99.591
	2回目	14.826	14.719	14.908	16.141	15.916	96.179
	3回目	14.888	14.755	14.949	15.838	15.581	97.113
	平均値	14.873	14.704	14.882	15.946	15.674	97.628



通過波の波高測定結果の一例（直立護岸）

(2)波力特性の把握

防潮堤に作用する波圧分布の比較を図 6-3-1～6-3-2 に示す。また、入力波が防潮堤に衝突する瞬間の波形を写真 6-3-1～6-3-2 に示す。

単純勾配の場合、汀線 0cm では汀線付近が砕波点となって防潮堤に衝突するため、底部付近に大きな圧力が作用するのに対し、汀線-60cm では砕波後に防潮堤に衝突するため、汀線 0cm より小さな波圧分布となる。直立護岸の場合は、汀線 0cm では防潮堤前面で砕波せず、重複波のような挙動を示すため、ほぼ静水圧に近い波圧となるが、汀線-60cm では砕波後に防潮堤に衝突するため、汀線 0cm より大きな波圧分布となる。結果として、汀線 0cm での波圧は（単純勾配）＞（直立護岸）であるが、汀線-60cm での波圧は大差ない（若干直立護岸が大きい）。

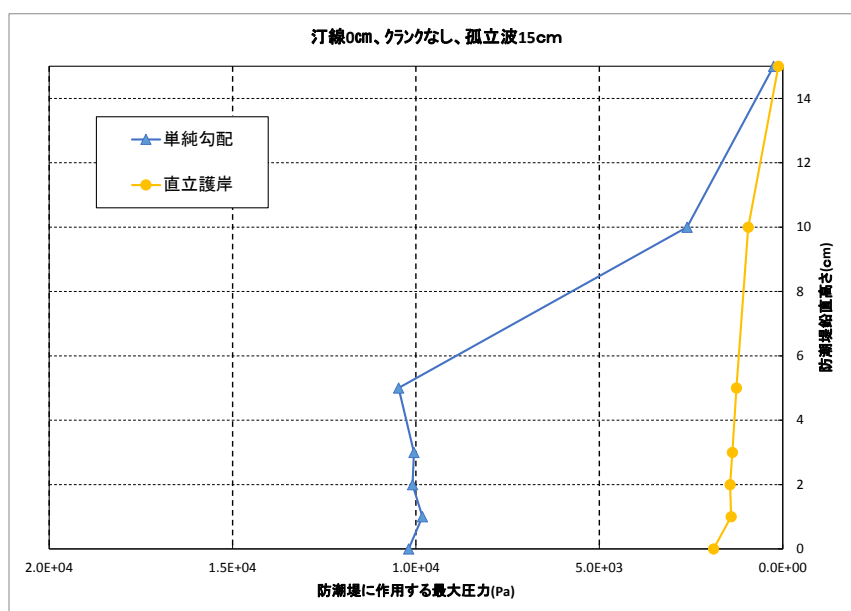


図 6-3-1 防潮堤に作用する波圧分布の比較（防潮堤位置：汀線 0cm）

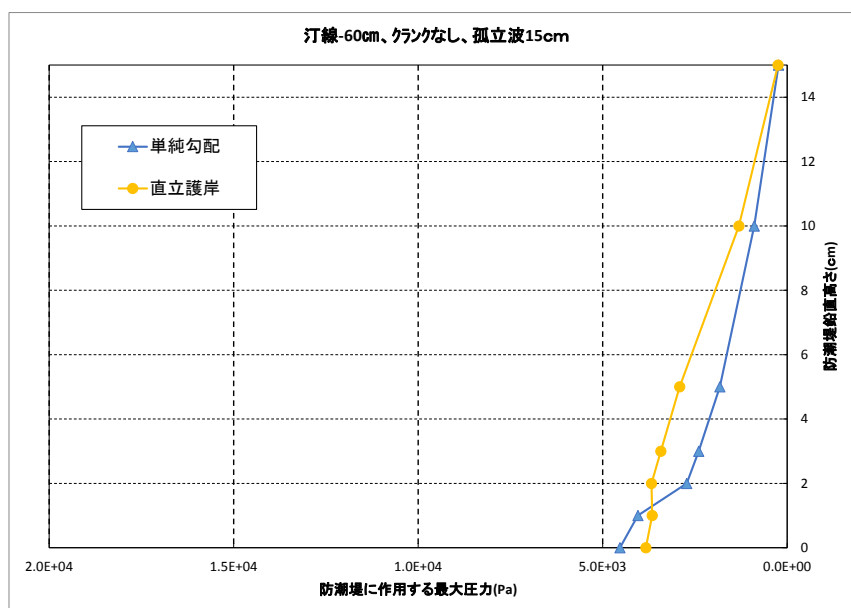


図 6-3-2 防潮堤に作用する波圧分布の比較（防潮堤位置：汀線-60cm）



(防潮堤位置：汀線 0cm)



(防潮堤位置：汀線-60cm)

写真 6-3-1 防潮堤衝突時の波形（単純勾配）



(防潮堤位置：汀線 0cm)



(防潮堤位置：汀線-60cm)

写真 6-3-2 防潮堤衝突時の波形（直立護岸）

(3)漂流物影響の把握

表 6-3-1 に流木モデルの防潮堤への衝突力の測定結果を、流木が防潮堤に衝突する瞬間の状況（側面）を写真 6-3-3～6-3-4 に示す。なお、直立護岸で防潮堤位置が汀線 0cm の場合は、流木モデルが防潮堤に衝突しなかったため、衝突力は欠測となっている。これは波圧特性でも示したように、防潮堤前面で碎波せずに重複波のような挙動を示すため、上昇する波面に乗って流木が防潮堤を越えてしまうためである。換言すれば、防潮堤位置が汀線 0cm にあるような直立護岸では、漂流物の衝突が生じにくいと言える。

その他の条件では、衝突力は概ね作用波圧に比例しているようであるが、単純勾配で防潮堤位置が汀線-60cm の場合の値が直立護岸のケースに比べて小さい。これは流木が衝突する前に水脈が防潮堤に達し、ロードセル前面に一種のウォータクッションが形成されたためと推察される。

また、表 6-3-2～6-3-3 に画像解析による衝突速度からの衝突力を算定した結果を示す。なお、表中の各ケース上段はビデオコマ数、下段が時間（衝突時を 0）を示し、衝突速度は直前の 10cm 間の移動時間を用いて算出した。また衝突力は以下に示す式で算出した。

$$\text{衝突力 } F = MV/Dt$$

M：漂流物の質量（N）

V：衝突時の速度（m/s）

Dt：0.1/√40=0.0158s ※

※実物での作用時間は Dt=0.1 とされており、これを模型縮尺 1/40 相当で換算した値を用いた。

これらの結果から、画像解析から算出した衝突力は何れもロードセルによる計測値より小さく、上述した作用時間を 1/1.5～1/4.5（平均で 1/3.0）とすると両者の値は一致する。このことは大型水槽で行った試験の傾向と概ね一致する。

表 6-3-1 流木モデル 防潮堤への衝突力の測定結果

ケース名	地形	漂流物	防潮堤 設置位置	防潮堤 平面形状	入力波形	衝突力(N)		水温
						測定値	平均値	(℃)
case3-2-37	単純勾配	流木模型	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	86.625	110.928	5
case3-2-38						116.905		
case3-2-39						129.255		
case3-2-40			汀線 -60cm			51.428	45.353	7
case3-2-41						39.626		5
case3-2-42						45.006		
case3-2-43	直立護岸		汀線0cm			-	-	9
case3-2-44						-		
case3-2-45						-		
case3-2-46			汀線 -60cm			93.944	98.967	8
case3-2-47						125.237		
case3-2-48						77.721		

衝突力: 最大衝突力の測定値



(防潮堤位置：汀線 0cm)



(防潮堤位置：汀線-60cm)

写真 6-3-3 流木モデル衝突状況（単純勾配）



(防潮堤位置：汀線 0cm)



(防潮堤位置：汀線-60cm)

写真 6-3-4 流木モデル衝突状況（直立護岸）

表 6-3-2 画像解析による衝突速度からの衝突力算定結果（単純勾配）

ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 (cm)	測定位置(cm)										速度(m/s)	衝突力F(N)	
			40	30	20	10	0	-10	-30	-40	-50	-60		計算値	実測値
case3-2-37	15	0		848	880	907	929						2.273	28.193	86.625
				0.162	0.098	0.044	0.000								
case3-2-38				1266	1303	1335	1353						2.778	34.459	116.905
				0.174	0.100	0.036	0.000								
case3-2-38				916	948	978	999						2.381	29.536	129.255
				0.166	0.102	0.042	0.000								

漂流物影響 画像解析による衝突速度の算出(単純勾配 流木模型 汀線-60cm 孤立波 波高15cm)															
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 (cm)	測定位置(cm)										速度(m/s)	衝突力F(N)	
			-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110		計算値	実測値
case3-2-40	15	-60	1000	1022	1059	1086	1104						2.778	34.459	51.428
			0.208	0.164	0.090	0.036	0.000								
case3-2-41			1196	1223	1262	1289	1313						2.083	25.844	39.629
			0.234	0.180	0.102	0.048	0.000								
case3-2-42			1305	1328	1369	1394	1415						2.381	29.536	45.006
			0.220	0.174	0.092	0.042	0.000								

表 6-3-3 画像解析による衝突速度からの衝突力算定結果（直立護岸）

漂流物影響 画像解析による衝突速度の算出(直立護岸 流木模型 汀線0cm 孤立波 波高15cm)																
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 (cm)	測定位置(cm)										速度(m/s)	衝突力F(N)		
			40	30	20	10	0	-10	-30	-40	-50	-60		計算値	実測値	
case3-2-43	15	0	1620	1650	1674	1712	1732							2.500	31.013	未衝突 測定不可
			0.224	0.164	0.116	0.040	0.000									

漂流物影響 画像解析による衝突速度の算出(直立護岸 流木模型 汀線-60cm 孤立波 波高15cm)															
ケースNo.	設定波高 (cm)	堤体位置 (cm)	測定位置(cm)										速度(m/s)	衝突力F(N)	
			-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110		計算値	実測値
case3-2-46	15	-60	998	1030	1055	1076	1099						2.174	26.968	93.944
			0.202	0.138	0.088	0.046	0.000								
case3-2-47			1309	1337	1364	1383	1407						2.083	25.844	125.237
			0.196	0.140	0.086	0.048	0.000								
case3-2-48			953	988	1014	1036	1057						2.381	29.536	77.721
			0.208	0.138	0.086	0.042	0.000								

(4)洗掘影響の把握

各試験ケースの最大洗掘深およびその発生位置，洗掘量を表 6-3-2 に示す．また，洗掘形状の比較を図 6-3-3～6-3-4 に，各ケースの越流状況（波が防潮堤背面に打ち込む状況）および試験後の洗掘状況を写真 6-3-5～6-3-6 に示す．

汀線位置が 0cm，-60cm それぞれにおいて，単純勾配と直立護岸との洗掘形状の差異はあまりない．強いて挙げれば最大洗掘深，洗掘量ともやや直立護岸の方が大きい程度である．

単純勾配，直立護岸それぞれにおいて，汀線位置が 0cm と -60cm との比較を行うと，汀線位置が -60cm の方が最大洗掘深，洗掘量ともやや大きい．また汀線位置が -60cm の場合は汀線位置が 0cm に比べて，防潮堤近傍が洗掘されやすい．

ちなみに大型水槽で試験した結果（単純勾配のみ）と比較すると，洗掘位置の特性は同じであるが，洗掘量の特性は異なる（汀線位置が -60cm の方が最大洗掘深，洗掘量とも小さい）．このことは再現した波浪条件の違いによると考えられ，特に汀線位置が 0cm の場合の碎波点の違いが影響していると推察される．

表 6-3-2 洗掘影響の把握試験結果一覧

ケース名	地形	防潮堤 設置位置	防潮堤 平面形状	入力波形	最大洗掘深		洗掘体積 (cm ³)
					発生位置(cm)	洗掘深(cm)	
case4-37	単純勾配	汀線0cm	クランクなし	孤立波 波高15cm	18.3	1.5	2815
case4-40		汀線-60cm			75.0	1.7	3385
case4-43	直立護岸	汀線0cm			24.2	1.7	3297
case4-46		汀線-60cm			75.0	2.1	4052

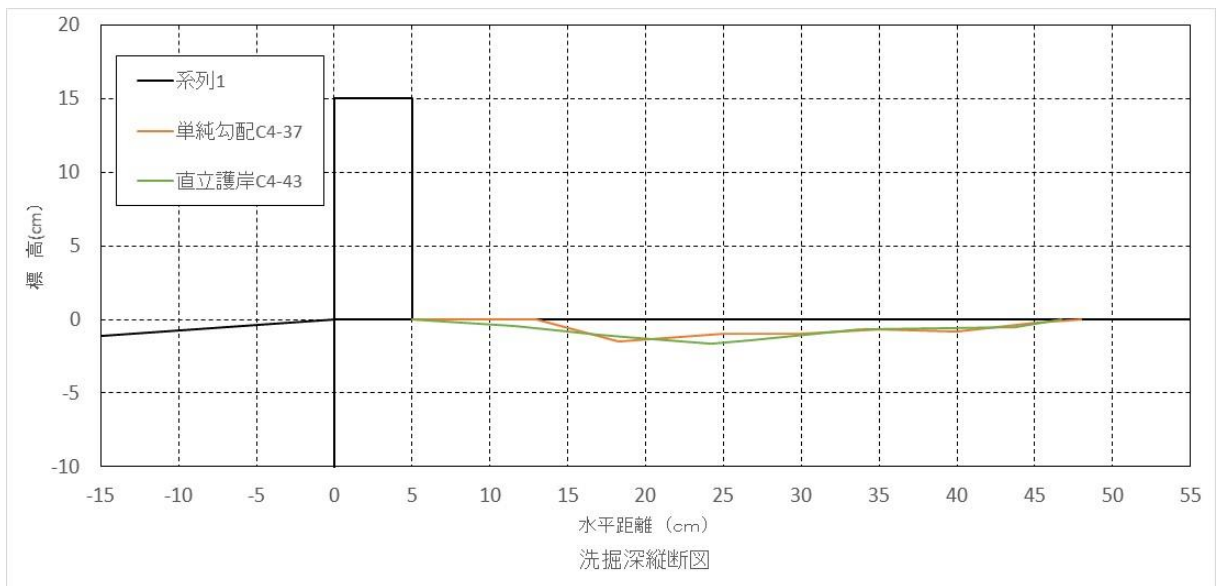


圖 6-3-3 洗掘形状比較図 (防潮堤位置：汀線 0cm)

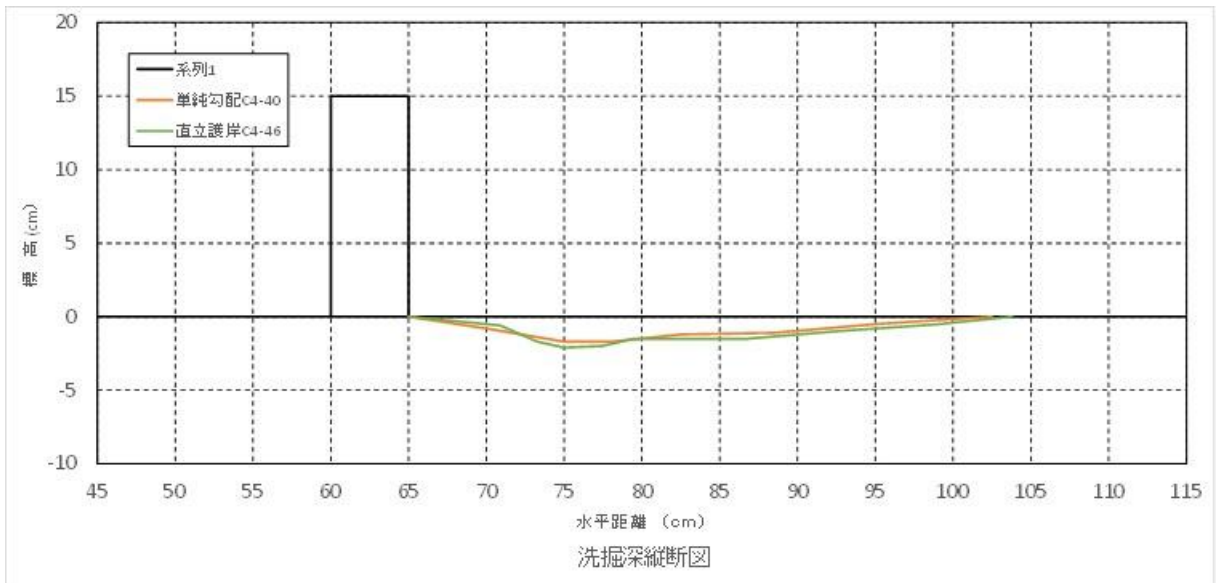


圖 6-3-4 洗掘形状比較図 (防潮堤位置：汀線-60cm)

洗掘試験流況（防潮堤位置：汀線 0cm）



写真 6-3-5 洗掘試験流況（防潮堤位置：汀線 0cm）

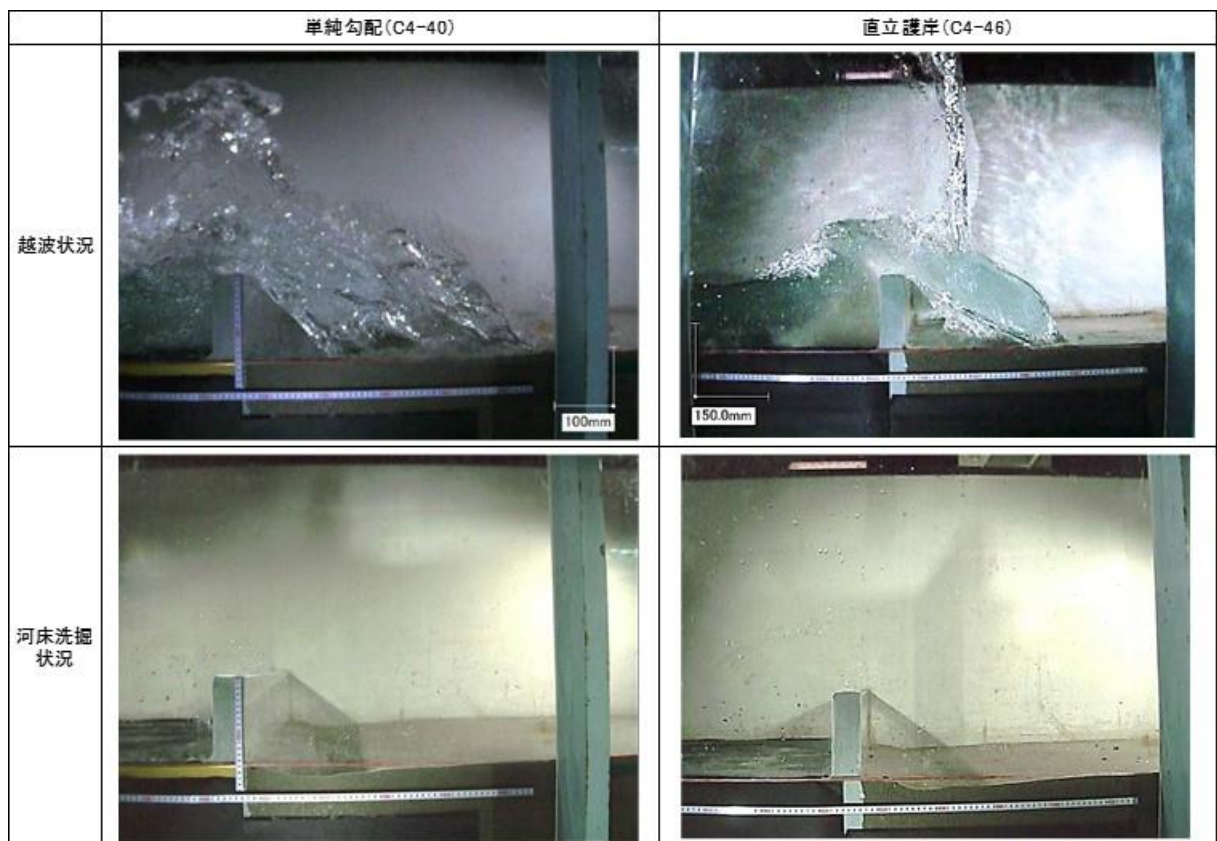


写真 6-3-6 洗掘試験流況（防潮堤位置：汀線-60cm）

6-4 シミュレーションの概要

漂流物挙動および洗掘挙動に対する護岸形状の影響を把握するため、完全3次元流体解析モデルによる数値シミュレーションを実施することで、防潮堤（堤体模型）周りでの津波波形・波圧、漂流物の挙動・構造物への衝突力、洗掘影響を把握する。護岸形状は単純勾配タイプ及び直立護岸タイプとする（図 6-1-1 参照）。

6-5 解析条件

(1) 計算メッシュ

計算メッシュは、上記の断面2次元試験水路の形状を適切に表現できるように作成した。水路縦断方向のメッシュ分割について、遡上時の津波の変形・伝播過程を詳細に検討できるように、計算メッシュサイズを1cmに設定した。横断方向のメッシュ分割について、津波の横断方向の変化が少ない事を勘案し、計算メッシュサイズを1mに設定した。

鉛直方向のメッシュ分割について、解析対象となる津波波形の形状を表現する為に、計算メッシュサイズを1cmに設定した。

(2) 防潮堤

防潮堤を汀線から0cmないし-60cmの位置に設置する条件で解析を実施した。

(3) 入力波

波高15.3cmの孤立波を入力波として解析を実施した。

(4) 解析ケース

通過波検定解析、波圧解析、漂流物解析、洗掘解析の各解析ケースを表 6-5-1～6-5-4 に示す。

表 6-5-1 シミュレーション解析ケース一覧表（通過波検定解析）

ケース名	地形	入力波種類	入力波高 (cm)
SW_nowall	単純勾配	孤立波	15.3
SW_nowall_VR	直立護岸	孤立波	15.3

表 6-5-2 シミュレーション解析ケース一覧表（波圧解析）

ケース名	地形	入力波種類	防潮堤位置 (汀線から : cm)	入力波高 (cm)
SW_x0cm	単純勾配	孤立波	0	15.3
SW_x60cm	単純勾配	孤立波	-60	15.3
SW_x0cm_VR	直立護岸	孤立波	0	15.3
SW_x60cm_VR	直立護岸	孤立波	-60	15.3

表 6-5-3 シミュレーション解析ケース一覧表（漂流物解析）

ケース名	地形	入力波種類	防潮堤位置 (汀線から : cm)	入力波高 (cm)
PT_SW_x0cm	単純勾配	孤立波	0	15.3
PT_SW_x60cm	単純勾配	孤立波	-60	15.3
PT_SW_x0cm_VR	直立護岸	孤立波	0	15.3
PT_SW_x60cm_VR	直立護岸	孤立波	-60	15.3

表 6-5-4 シミュレーション解析ケース一覧表（洗掘解析）

ケース名	地形	入力波種類	防潮堤位置 (汀線から : cm)	入力波高 (cm)
Case6-1	直立護岸	孤立波	0	15.3
Case6-2	直立護岸	孤立波	-60	15.3
Case6-3	単純勾配	孤立波	0	15.3
Case6-4	単純勾配	孤立波	-60	15.3

6-6 解析結果と試験結果の比較

(1)通過波検定

(1-1)SW_nowall（単純勾配）

波高計位置における水位の時系列波形図を図 6-6-1～図 6-6-2 に示す。また解析結果として、2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録Jの図J-1～図J-8に示す。

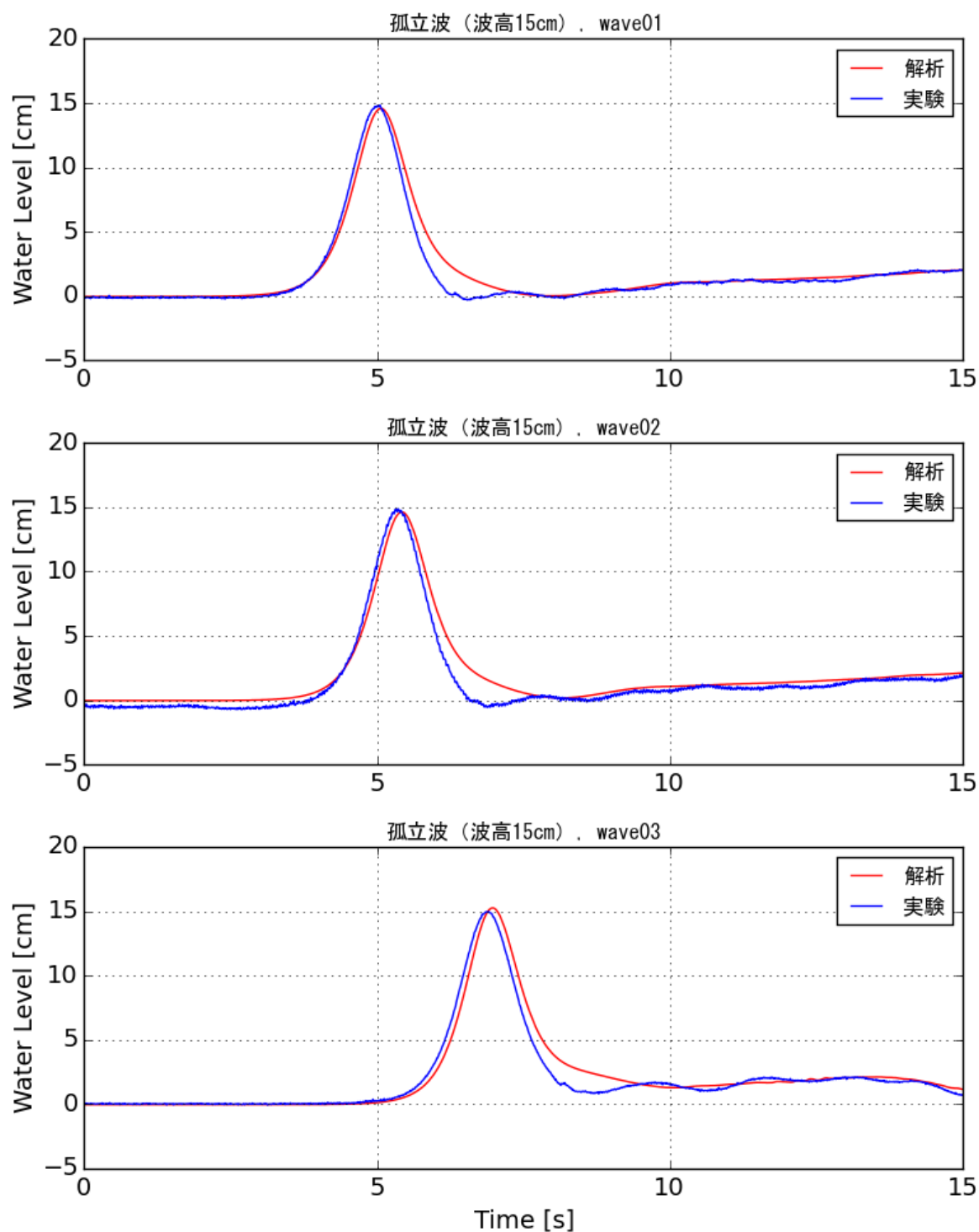


図 6-6-1 水位時系列波形【単純勾配, 波高計 1～3】

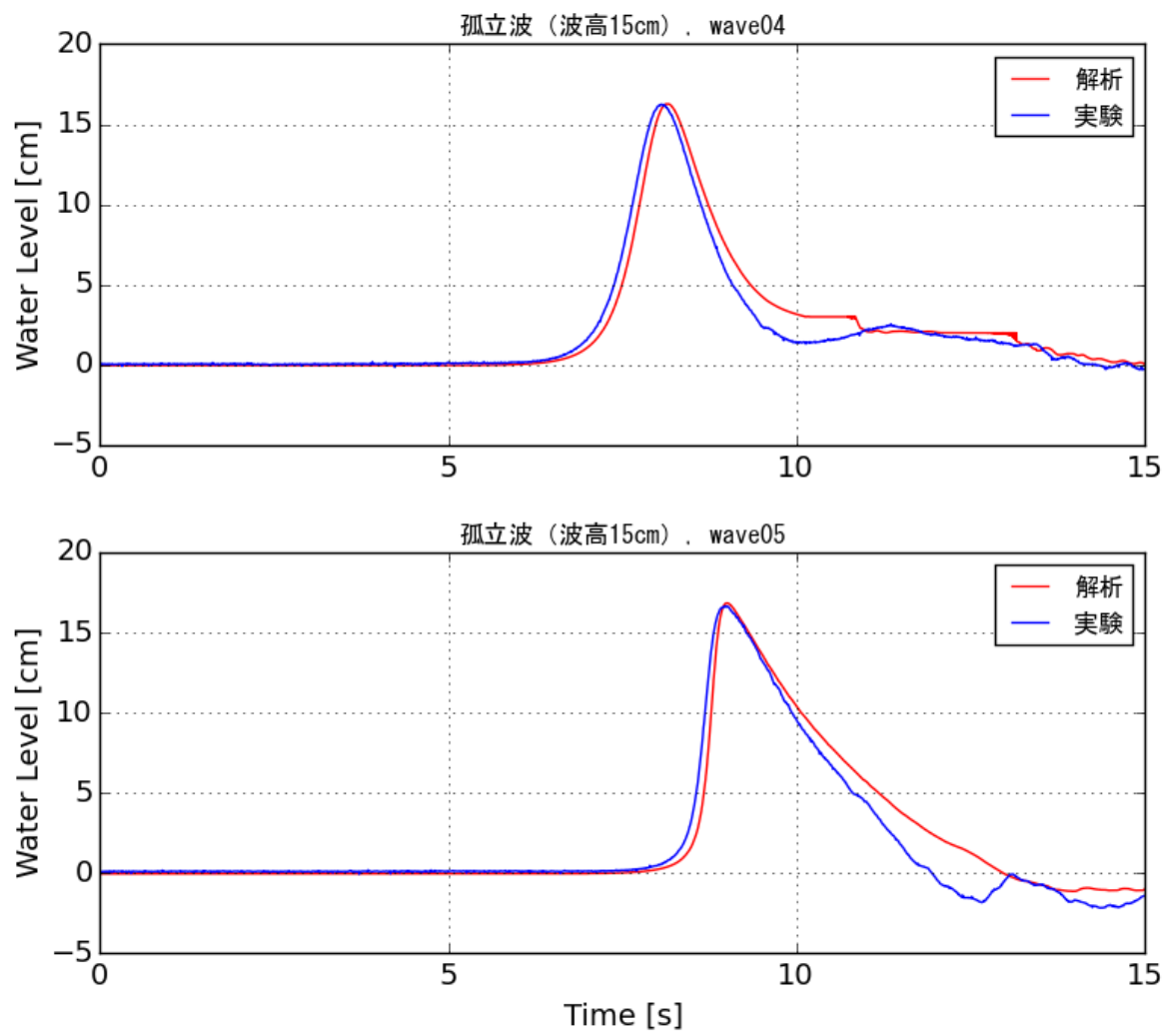


図 6-6-2 水位時系列波形【単純勾配, 波高計 4~5】

(1-2)SW_nowall_VR (直立護岸)

波高計位置における水位の時系列波形図を図 6-6-3～図 6-6-4 に示す。また解析結果として、2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録Jの図J-9～図J-16に示す。

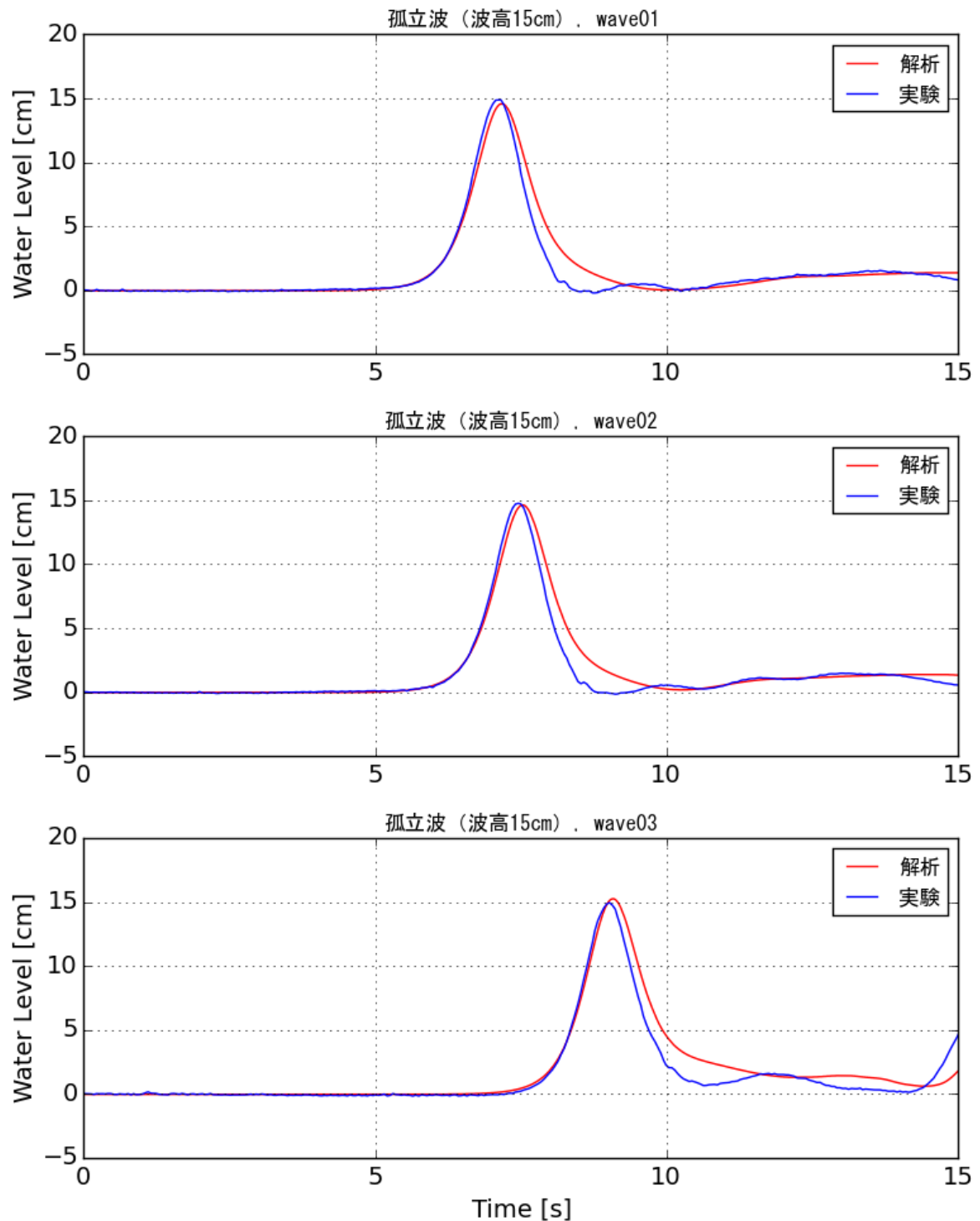


図 6-6-3 水位時系列波形【直立護岸, 波高計 1～3】

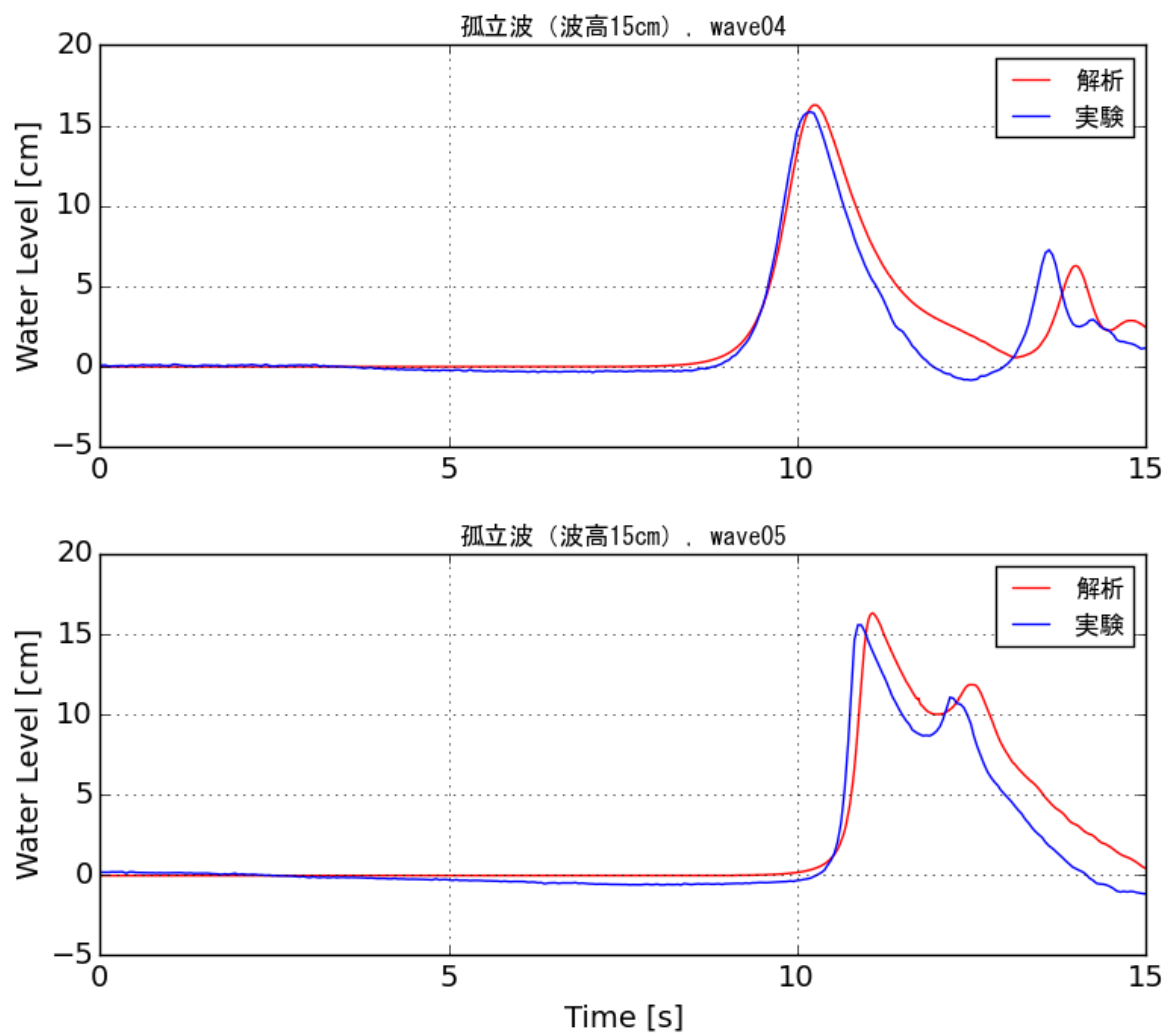


図 6-6-4 水位時系列波形【直立護岸, 波高計 4~5】

(2)波力特性の把握

(2-1)SW_x0cm（単純勾配，汀線 0cm）

図 6-6-5～図 6-6-6に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す．また解析結果として，2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録Jの図J-17～図J-24，各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図J-25～図J-31に示す．

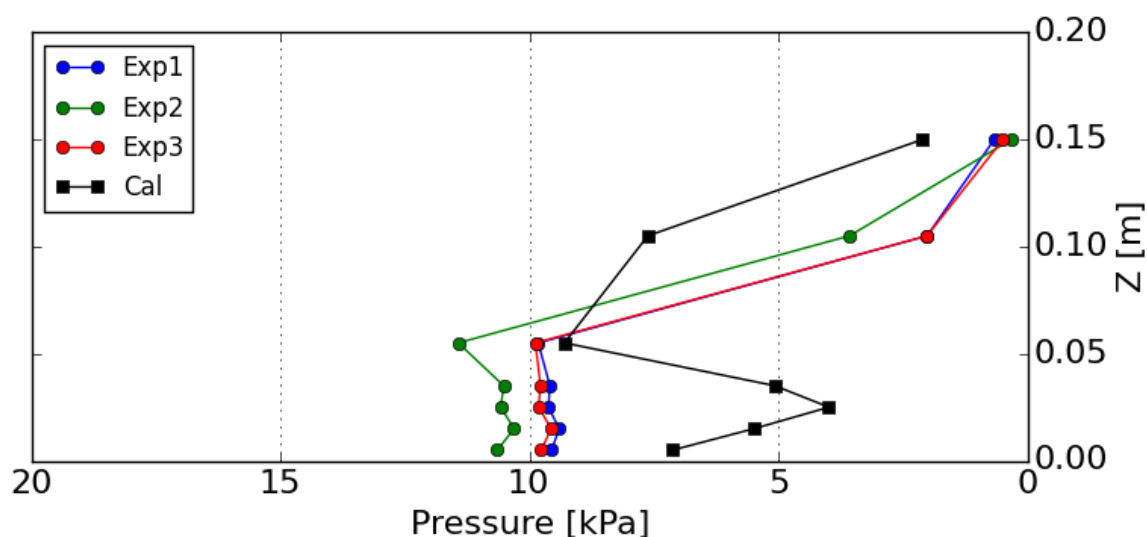


図 6-6-5 段波波圧の最大値【単純勾配，汀線 0cm】

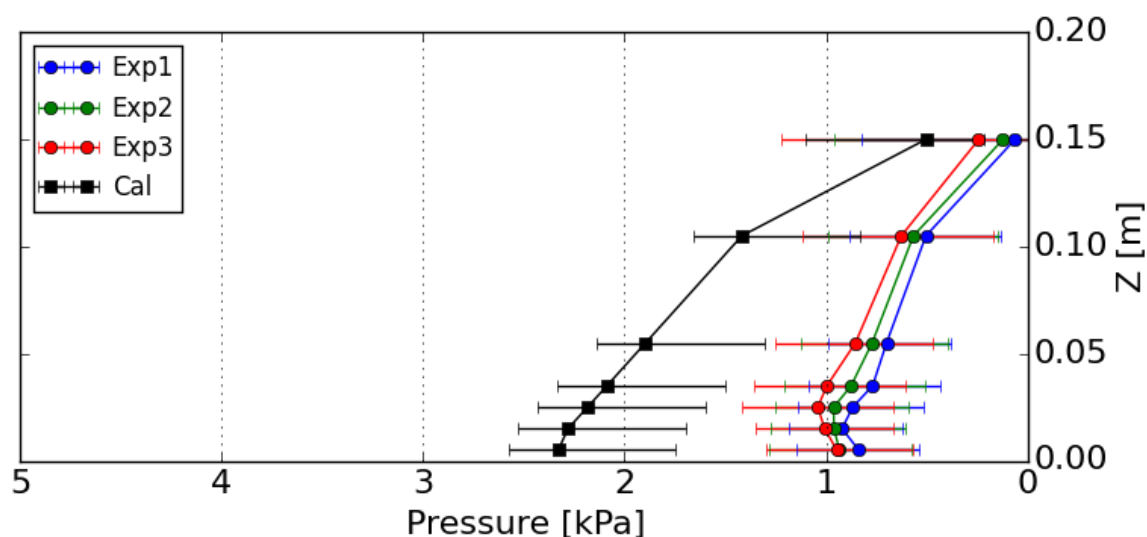


図 6-6-6 持続波圧の中央値【単純勾配，汀線 0cm】

(2-2)SW_x60cm (単純勾配, 汀線-60cm)

図 6-6-7～図 6-6-8に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す．また解析結果として，2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録Jの図J-32～図J-39, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図J-40～図J-46に示す．

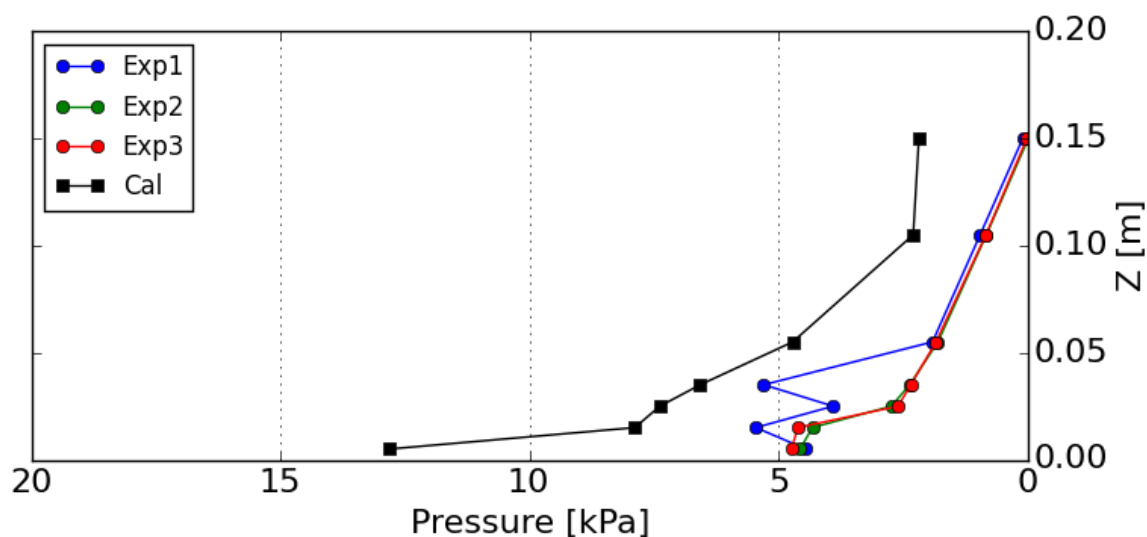


図 6-6-7 段波波圧の最大値【単純勾配, 汀線-60cm】

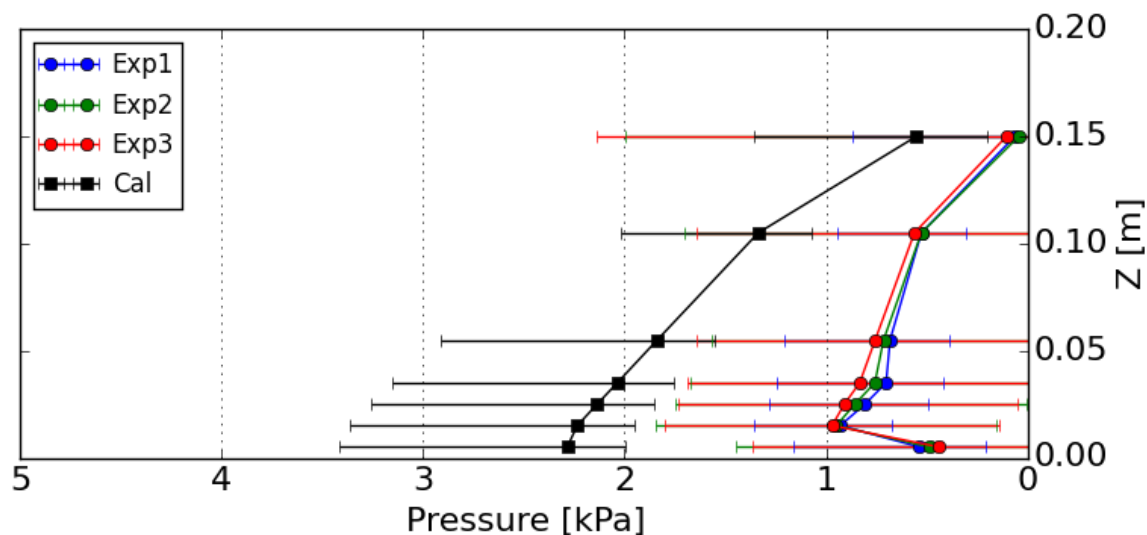


図 6-6-8 持続波圧の中央値【単純勾配, 汀線-60cm】

(2-3)SW_x0cm_VR (直立護岸, 汀線 0cm)

図 6-6-9～図 6-6-10 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す。また解析結果として、2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録Jの図J-47～図J-54, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図J-55～図J-61に示す。

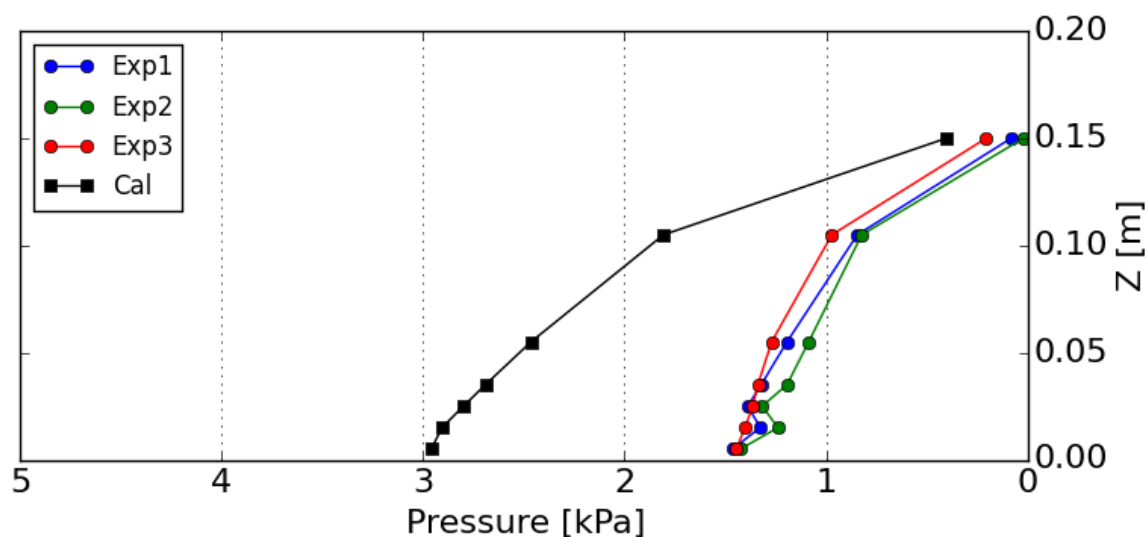


図 6-6-9 段波波圧の最大値【直立護岸, 汀線 0cm】

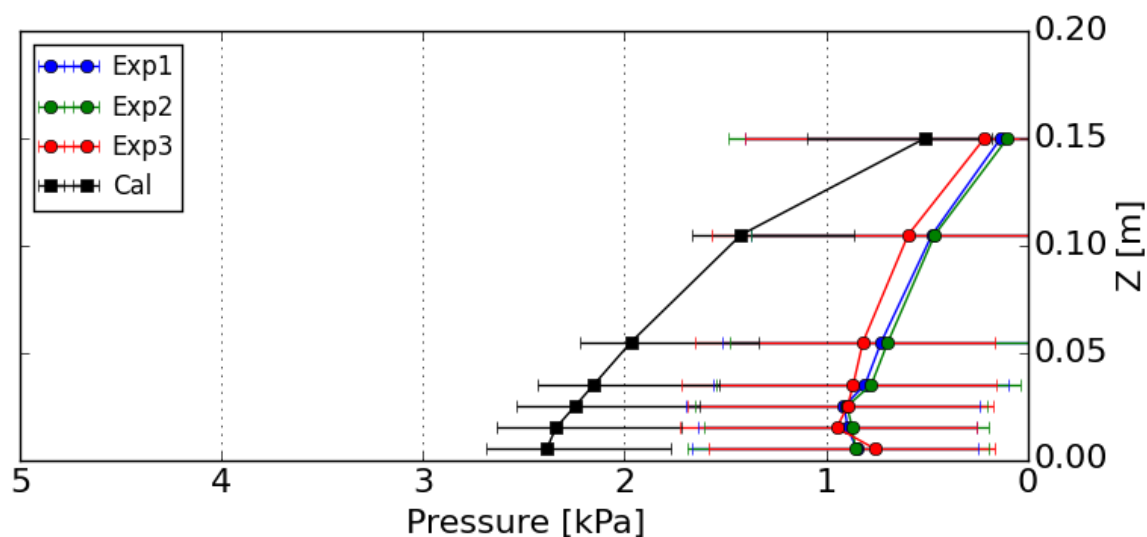


図 6-6-10 持続波圧の中央値【直立護岸, 汀線 0cm】

(2-4)SW_x60cm_VR (直立護岸, 汀線-60cm)

図 6-6-11～図 6-6-12 に防潮堤前面における段波波圧の最大値および持続波圧の中央値の鉛直分布を示す。また解析結果として、2次元及び3次元流速スナップショットと2次元及び3次元圧力スナップショットを付録Jの図J-62～図J-69, 各計測高さの防潮堤前面における波圧時系列グラフを図J-70～図J-76に示す。

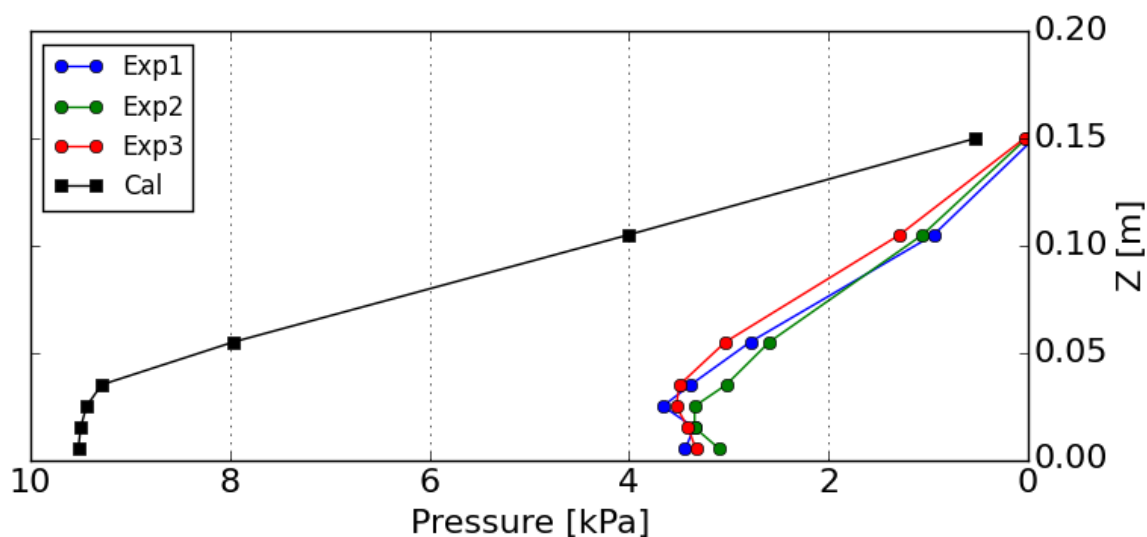


図 6-6-11 段波波圧の最大値【直立護岸, 汀線-60cm】

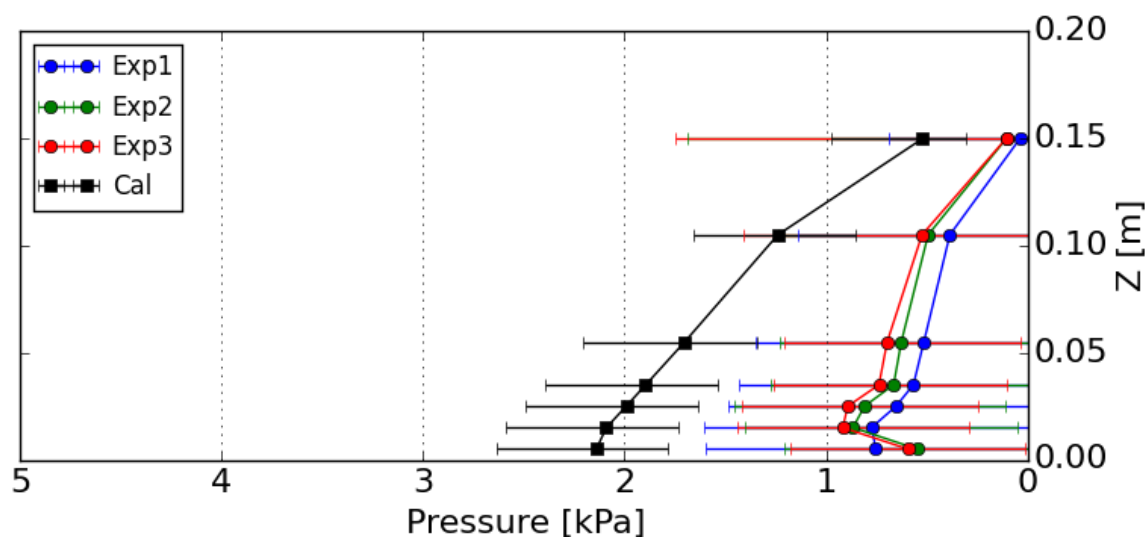


図 6-6-12 持続波圧の中央値【直立護岸, 汀線-60cm】

(3)漂流物影響の把握

(3-1)PT_SW_x0cm（単純勾配，汀線 0cm）

漂流物の移動軌跡を図 6-6-13 に示す．漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し，漂流物同士の衝突は考慮していない．次に，試験と解析における漂流物速度を図 6-6-14 に示す．解析結果は，初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した．

また，津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを付録 J の図 J- 77～図 J- 78 に示す．

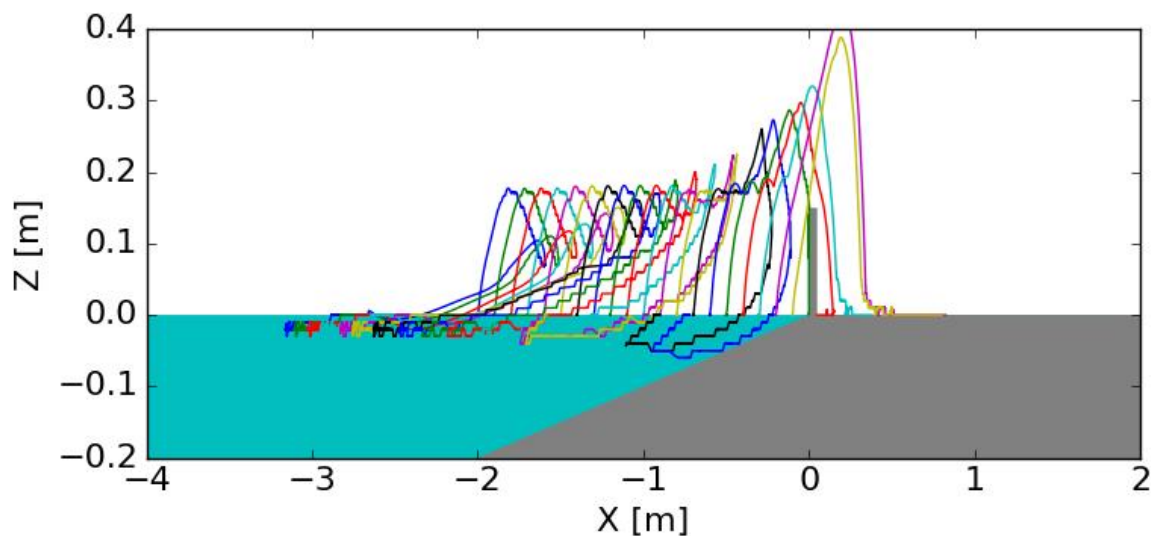


図 6-6-13 漂流物の移動軌跡【単純勾配，汀線 0cm】

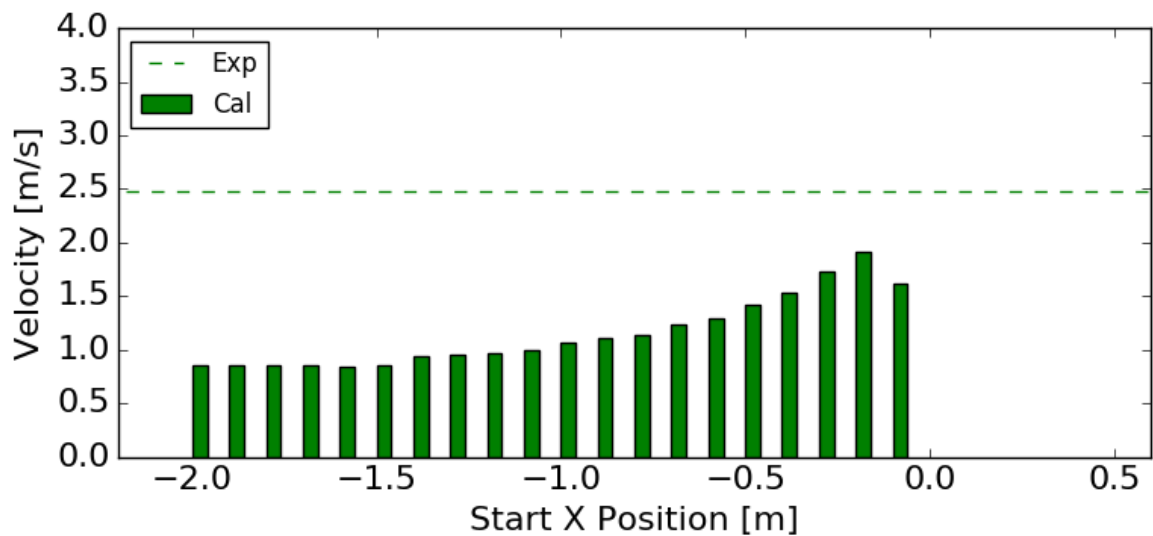


図 6-6-14 漂流物速度の比較【単純勾配，汀線 0cm】

(3-2)PT_SW_x60cm (単純勾配, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 6-6-15 に示す。漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し、漂流物同士の衝突は考慮していない。次に、試験と解析における漂流物速度を図 6-6-16 に示す。解析結果は、初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した。

また、津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを付録 J の図 J- 79～図 J- 80 に示す。

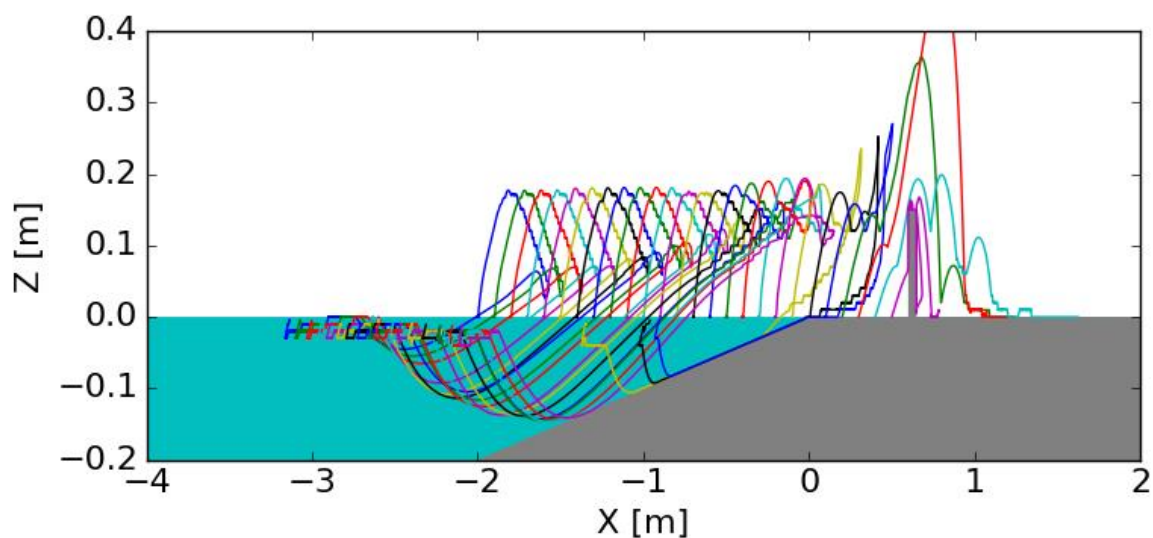


図 6-6-15 漂流物の移動軌跡【単純勾配, 汀線-60cm】

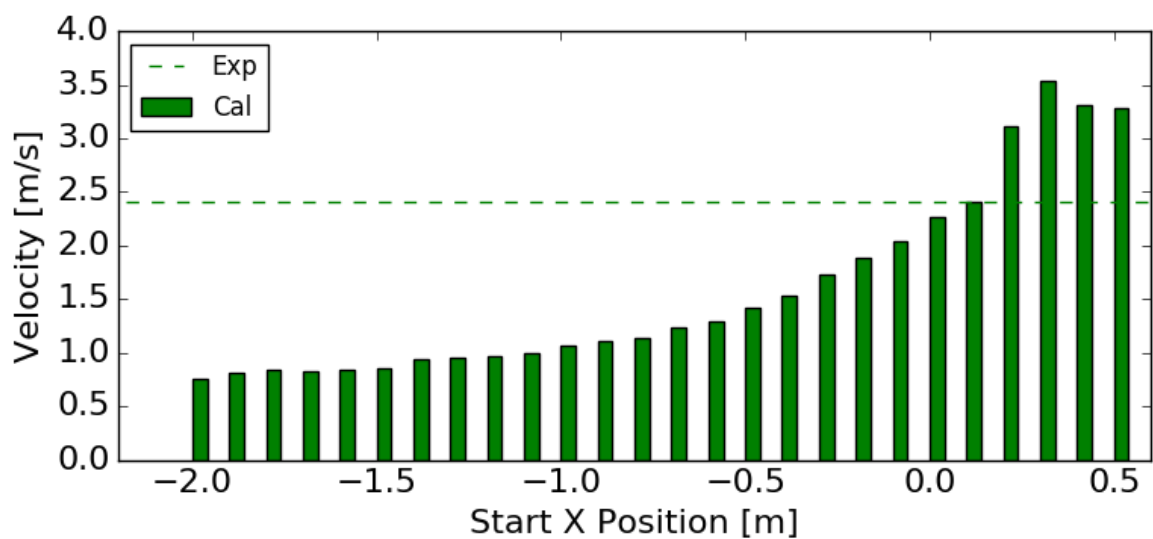


図 6-6-16 漂流物速度の比較【単純勾配, 汀線-60cm】

(3-3)PT_SW_x0cm_VR (直立護岸, 汀線 0cm)

漂流物の移動軌跡を図 6-6-17 に示す。漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し、漂流物同士の衝突は考慮していない。次に、試験と解析における漂流物速度を図 6-6-18 に示す。解析結果は、初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した。

また、津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを付録 J の図 J- 81～図 J- 82 に示す。

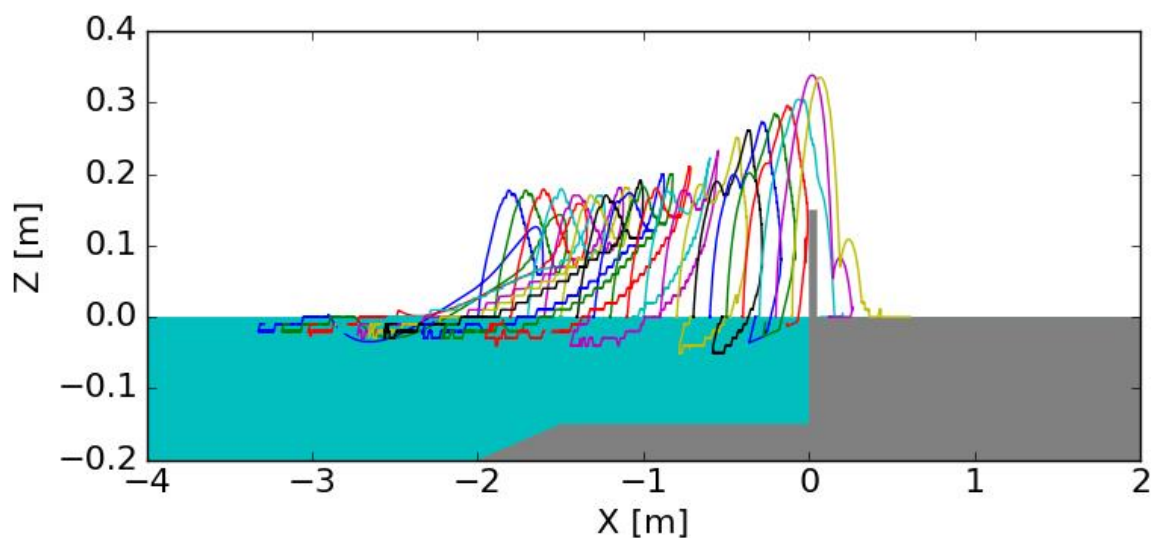


図 6-6-17 漂流物の移動軌跡【直立護岸, 汀線 0cm】

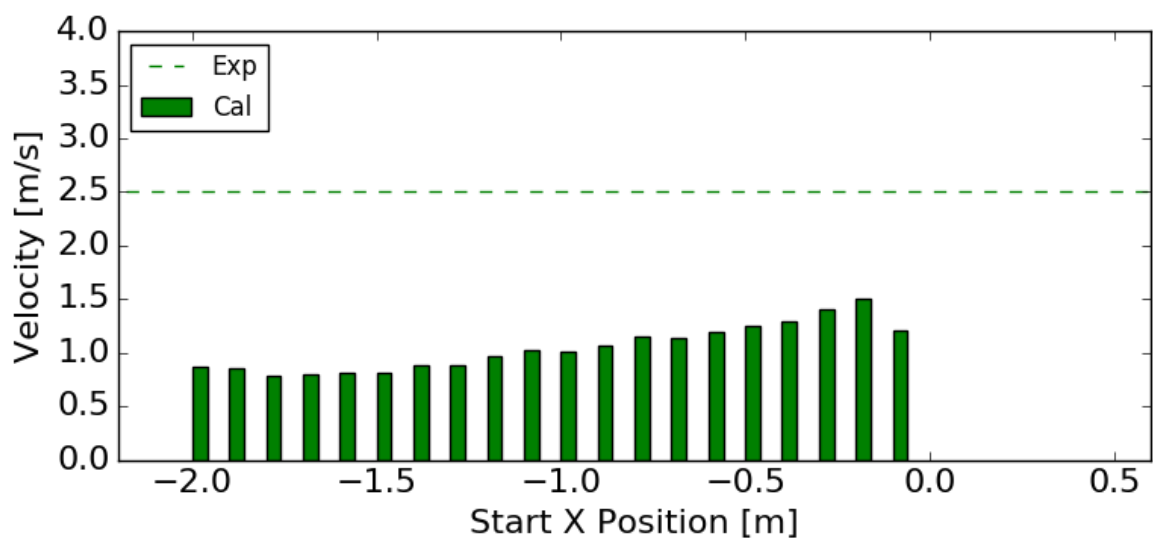


図 6-6-18 漂流物速度の比較【直立護岸, 汀線 0cm】

(3-4)PT_SW_x60cm_VR (直立護岸, 汀線-60cm)

漂流物の移動軌跡を図 6-6-19 に示す. 漂流物は汀線+2m と堤体の間に 0.1m 間隔で配置し, 漂流物同士の衝突は考慮していない. 次に, 試験と解析における漂流物速度を図 6-6-20 に示す. 解析結果は, 初期配置毎に堤体前面の最大速度を取得した.

また, 津波襲来時の漂流物挙動のスナップショットを付録 J の図 J- 83～図 J- 84 に示す.

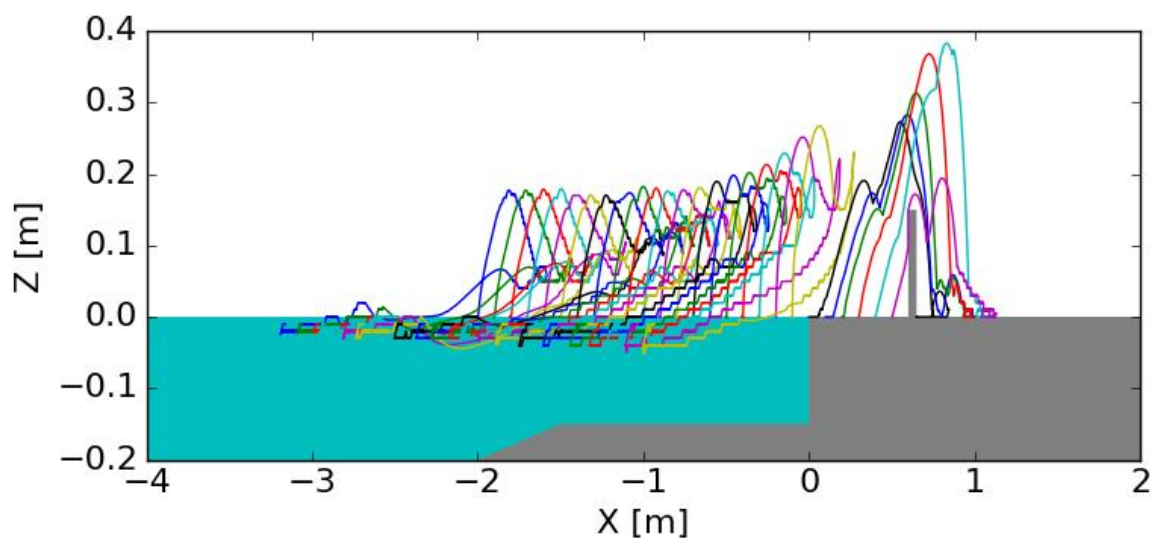


図 6-6-19 漂流物の移動軌跡【直立護岸, 汀線-60cm】

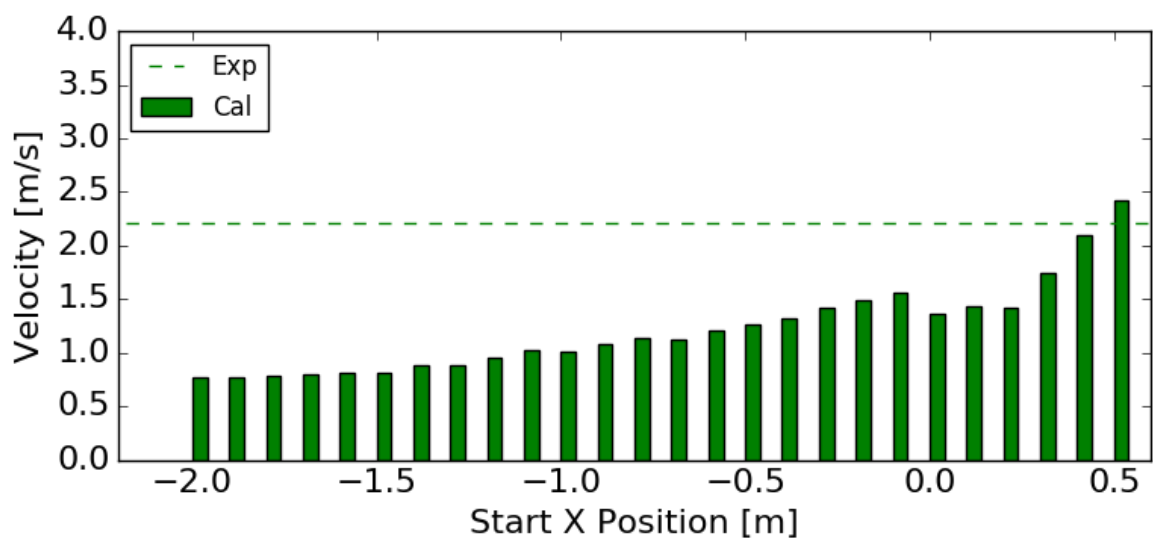


図 6-6-20 漂流物速度の比較【直立護岸, 汀線-60cm】

(4)洗掘影響の把握

以下では、防潮堤法尻背面における河床高断面分布の計算結果及び各ケースにおける流速場の計算結果を示す（図 6-6-21～図 6-6-27 参照）。なお、全ケースの計算結果は平成 27 年度の洗掘試験の追算を行い、パラメータの同定を行った結果、摩擦速度に補正係数（2 倍）を乗じた場合の計算結果を示し、河床高断面分布は越流後波が十分収まる時刻の結果を採用した。

(4-1) Case6-1 及び Case6-2 (直立護岸,孤立波,入力波高 15.3cm)

Case6-1 (防潮堤位置:汀線 0cm) における河床高断面分布を図 6-6-21, Case6-2 (防潮堤位置:汀線-60cm) の河床高断面分布を図 6-6-22 に示す.

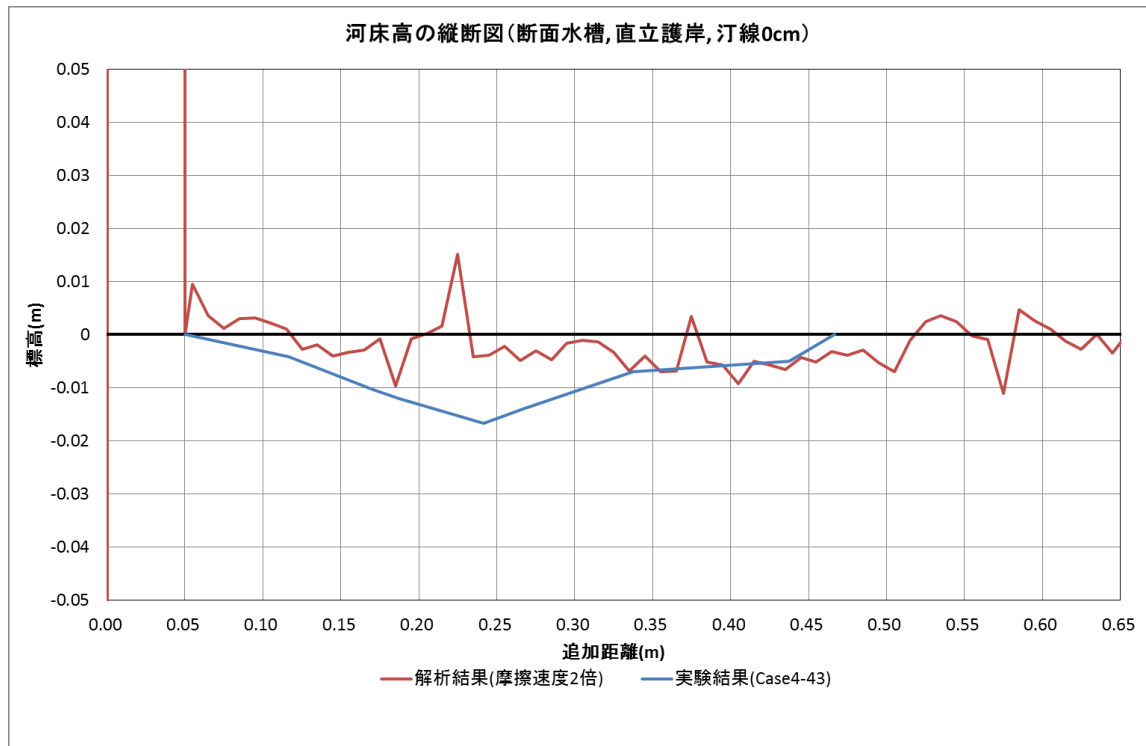


図 6-6-21 河床高断面分布【直立護岸, 孤立波, 入力波高 15.3cm, 汀線 0cm】

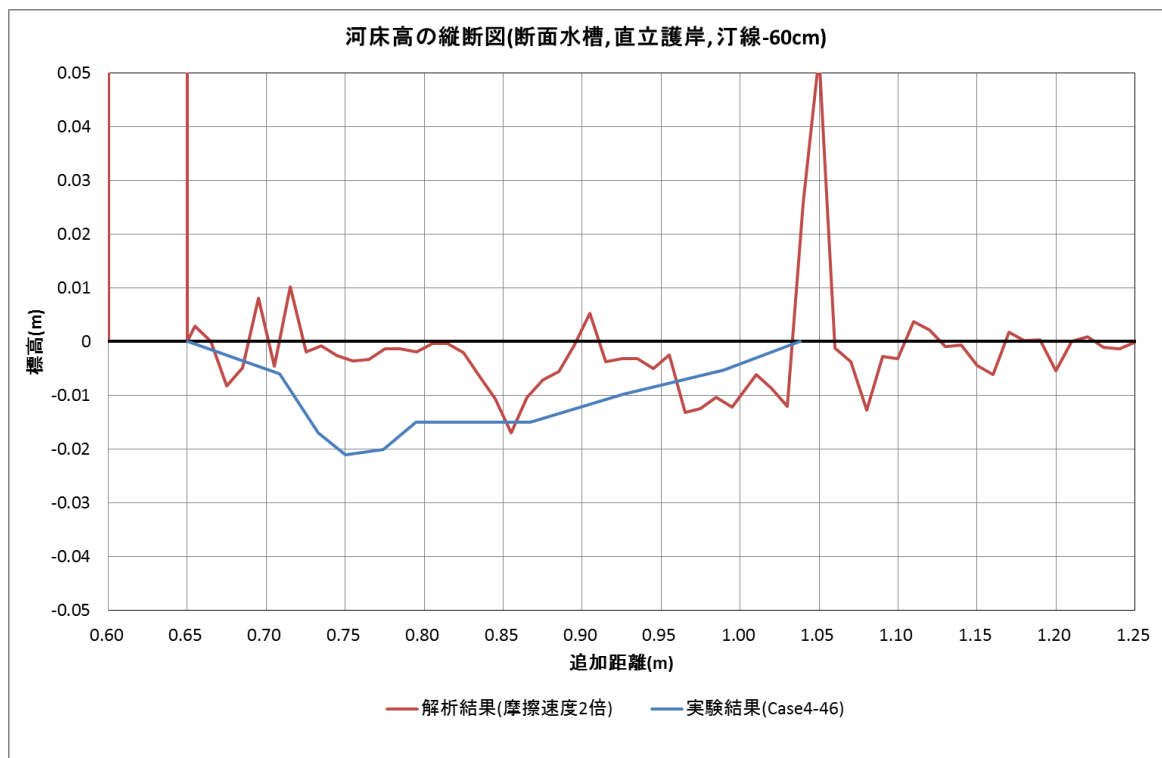


図 6-6-22 河床高断面分布【直立護岸, 孤立波, 入力波高 15.3cm, 汀線-60cm】

図 6-6-23 は Case6-1 及び Case6-2 における断面 2 次元流速スナップショット【直立護岸, 孤立波, 入力波高 15.3cm】を示す. (a)-(c)は Case6-1 (防潮堤位置: 汀線 0cm) を示し, (d)-(f)は Case6-2 (防潮堤位置: 汀線 -60cm) を示した図であり, (a)(d)は越流直後, (b)(e)は越流開始から 0.5 秒後, (c)(f)は越流開始から 1.0 秒後を示す.

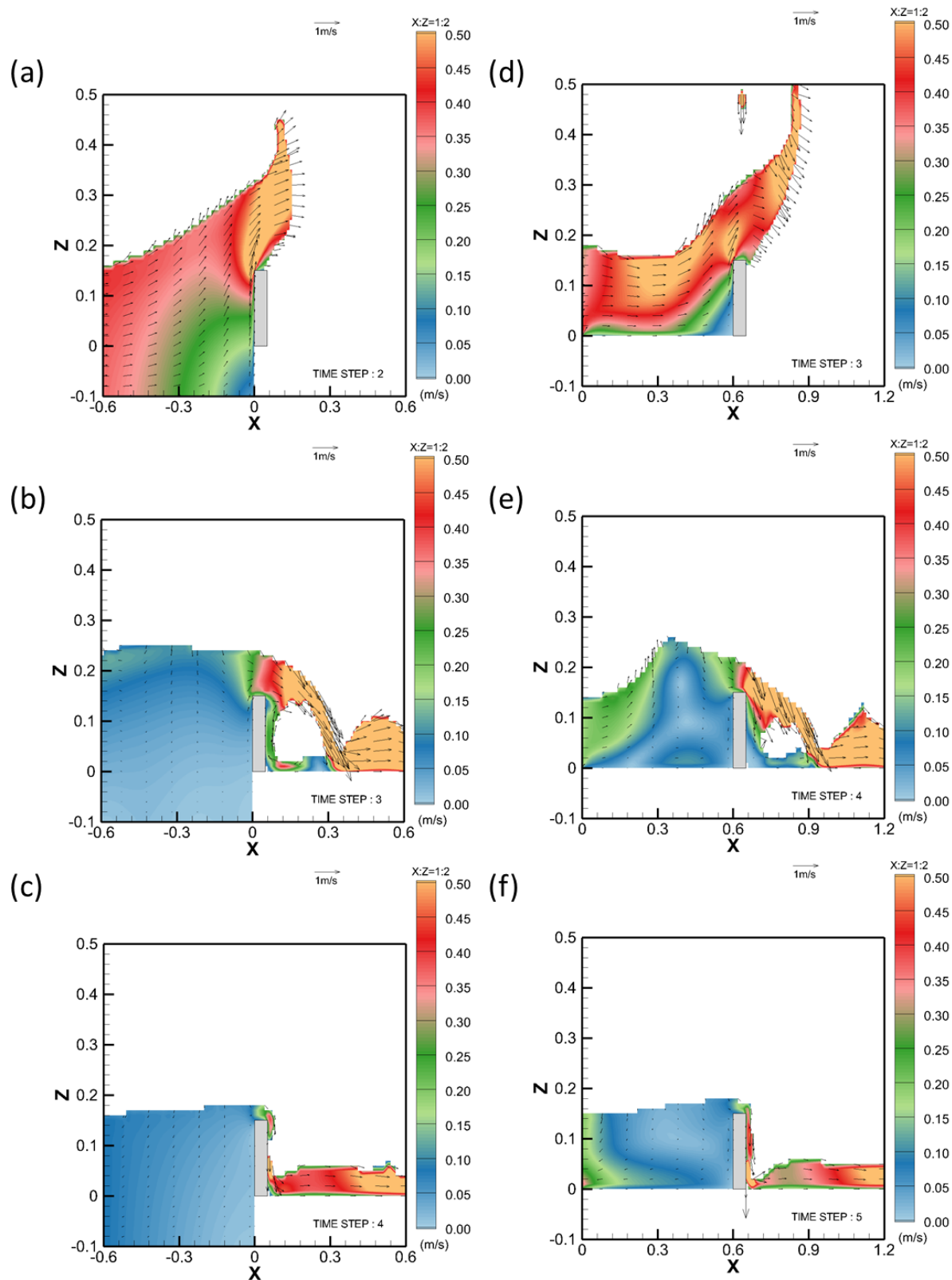


図 6-6-23 断面 2 次元流速スナップショット【直立護岸, 孤立波, 入力波高 15.3cm】

(4-2) Case6-3 及び Case6-4 (単純勾配,孤立波,入力波高 15.3cm)

Case6-3 (防潮堤位置:汀線 0cm) における河床高断面分布を図 6-6-24, Case6-4 (防潮堤位置:汀線-60cm) の河床高断面分布を図 6-6-25 に示す.

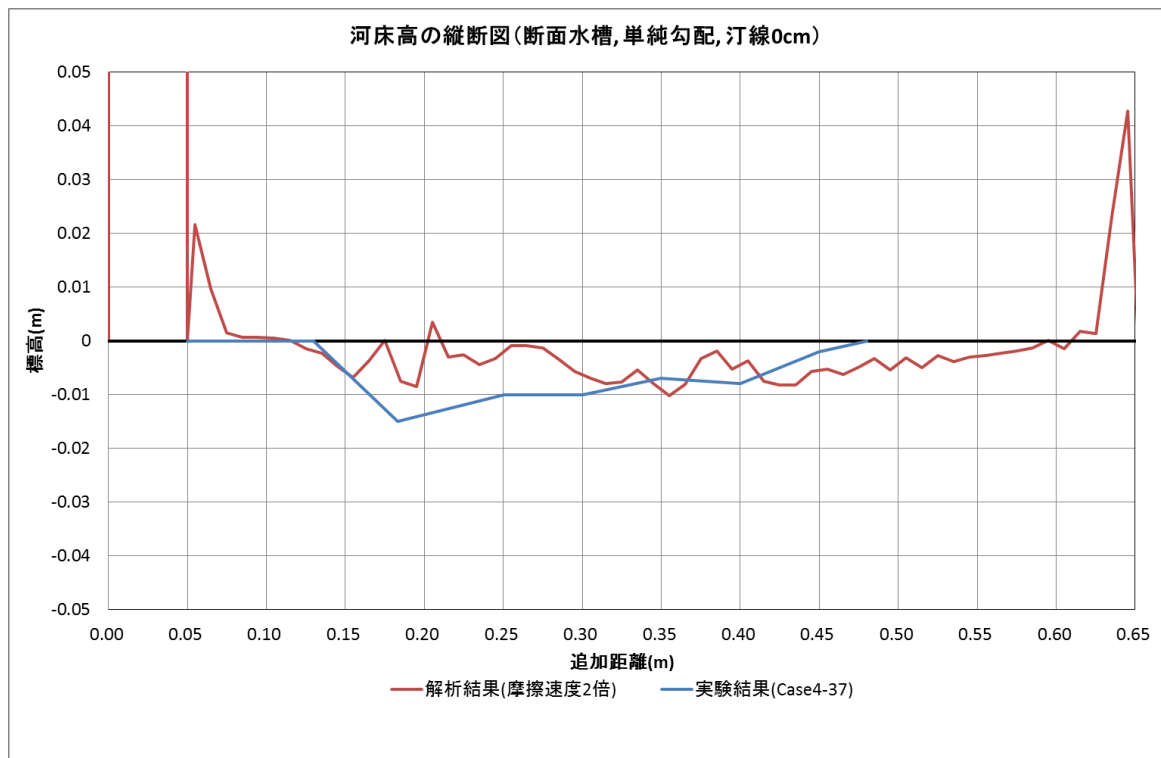


図 6-6-24 河床高断面分布【単純勾配, 孤立波, 入力波高 15.3cm, 汀線 0cm】

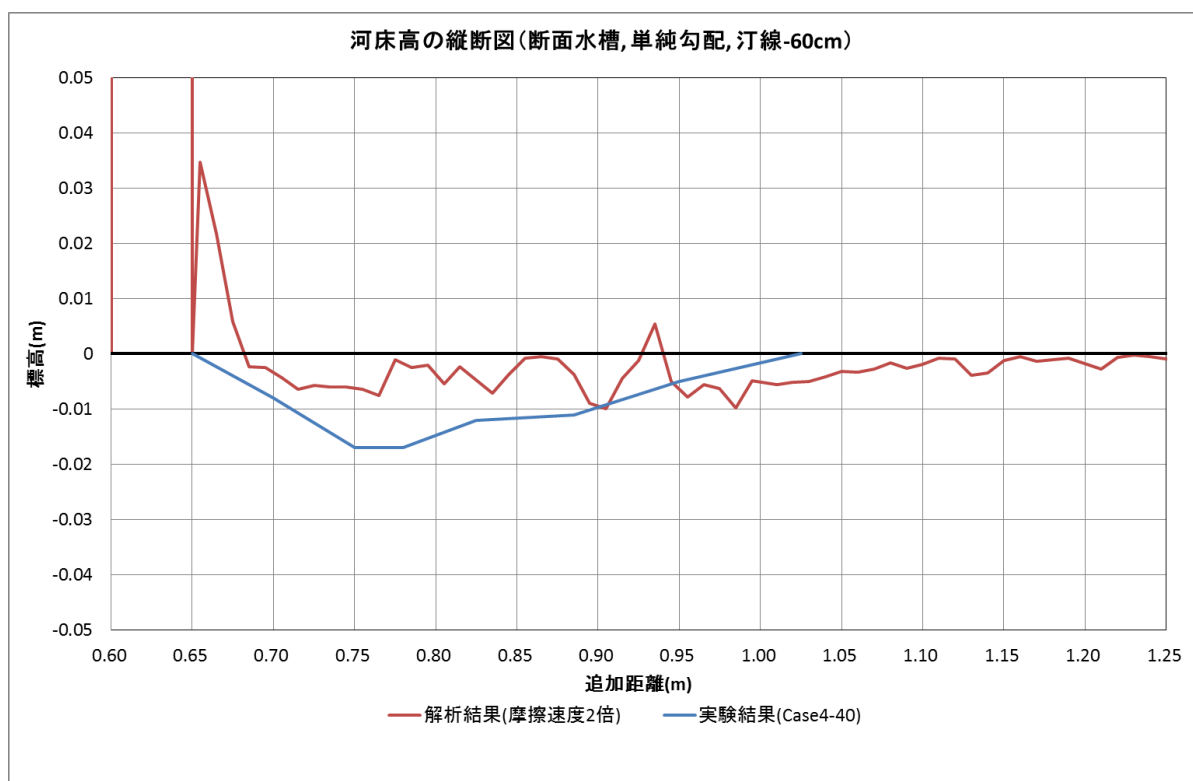


図 6-6-25 河床高断面分布【単純勾配, 孤立波, 入力波高 15.3cm, 汀線-60cm】

図 6-6-26 は Case6-3 及び Case6-4 における断面 2 次元流速スナップショット【単純勾配: 孤立波, 入力波高 15.3cm】を示す. (a)-(c) は Case6-3 (防潮堤位置: 汀線 0cm) を示し, (d)-(f) は Case6-4 (防潮堤位置: 汀線 -60cm) を示した図であり, (a)(d) は越流直後, (b)(e) は越流開始から 0.5 秒後, (c)(f) は越流開始から 1.0 秒後を示す.

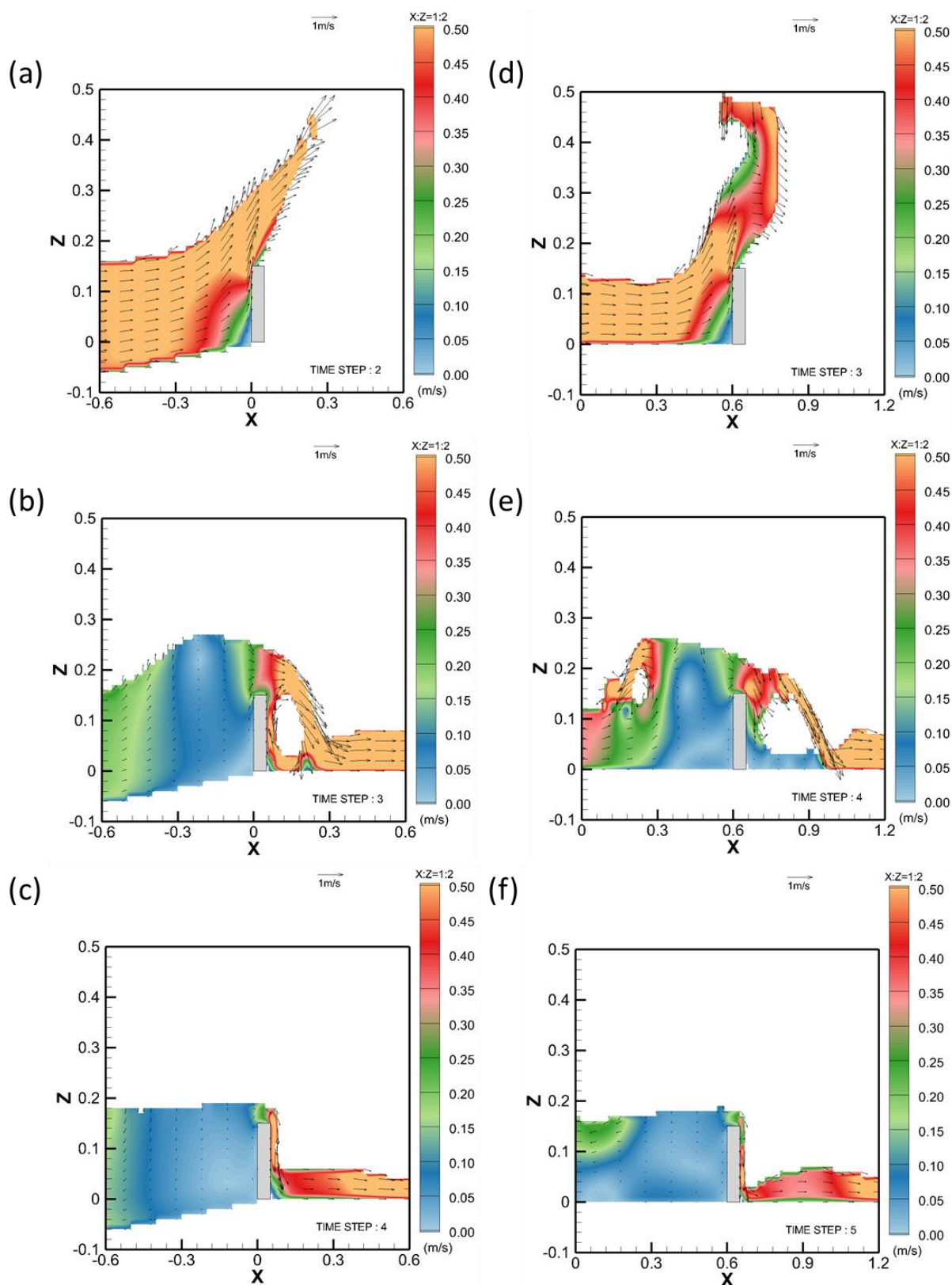


図 6-6-26 断面 2 次元流速スナップショット【単純勾配, 孤立波, 入力波高 15.3cm】

(4-3) Case6-1～Case6-4 の最大洗掘深

表 6-6-1 は Case6-1～Case6-4 の試験結果と解析結果の最大洗掘深をそれぞれ示す。

表 6-6-1 各ケースの試験結果と解析結果における最大洗掘深

ケース名	試験結果(平均)[m]	解析結果 [m]
Case6-1	0.0170	0.0110
Case6-2	0.0210	0.0169
Case6-3	0.0150	0.0102
Case6-4	0.0170	0.0100

また図 6-6-27 のグラフは、各ケースの最大洗掘深の試験結果と解析結果との比較を示す。

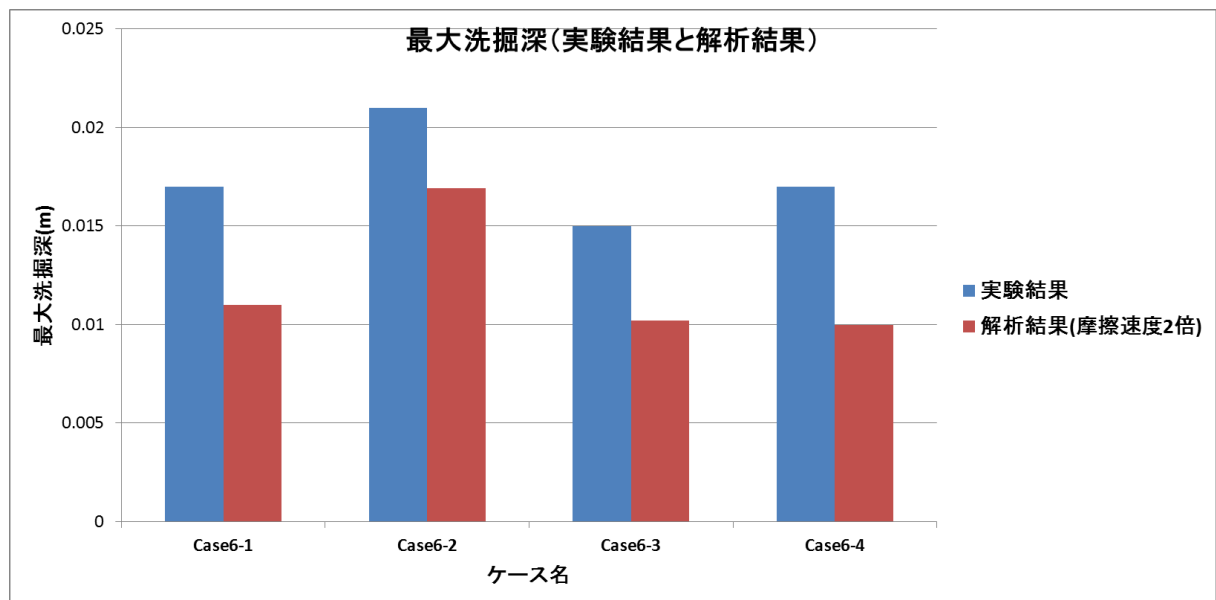


図 6-6-27 各ケースにおける最大洗掘深の試験結果と解析結果との比較

6-7 解析結果のまとめ

断面水槽を用いた解析結果について、以下に整理する。

(1) 通過波検定解析

水位時系列波形の数値計算結果と水理模型試験結果との比較について、沖合から砕波帯前面にかけての計算水位は水理模型試験における観測水位を高い精度で再現しており、精度としては十分であると考えられる。砕波帯周辺では、計算水位と観測水位には、わずかではあるが相違が見られる。この理由は、以下のように考えられる。

- ・ 試験は数値計算のような完全な理想条件で行うことができず、水路床の軽微な凹凸や造波のごく僅かな違いによって、砕波時および砕波後の流動に数値計算との条件上の差異が生じる。
- ・ 数値計算では、詳細な計算格子を用いたとしても、砕波時の乱れの影響もあり、砕波後の複雑な流れの挙動を完全には再現することはできない。

(2) 波圧解析

波圧の分布に関しては、汀線 0cm の検討ケースでは単純勾配地形での波圧が直立護岸に作用する波圧よりも大きくなる点など、試験結果と計算結果の波圧分布の傾向は一致している。ただし、段波波圧の評価については、試験での波力計測のばらつきが大きく、再現性がそれほど高くない現象であることを考慮すると、試験結果と計算結果の間にはある程度の相違が残るものとして検討する必要がある。

(3) 漂流物解析

汀線 0cm のケースについては、単純勾配の地形では解析で得られた漂流物速度が試験結果を下回っており、やや過小評価となっている。ただし、直立護岸のケースについては漂流物が防潮堤の上を越えていく状態となった為、衝突の評価自体が困難である。また、汀線-60cm のケースについては、防潮堤の前面に近い位置での漂流物速度が試験結果と概ね近い値となっていることから、ある程度漂流物の移動を再現できしており、漂流物の移動速度から衝突力を算出・評価できる可能性があると考えられる。

(4) 洗掘解析

洗掘地形の縦断分布について、最大洗掘の発生地点は試験と解析で概ね一致している。試験では最大洗掘箇所を起点に防潮堤側と岸側に向かって洗掘が浅くなっていく形状となっているが、計算ではその傾向が明確には表れていない。計算の解像度（メッシュ間隔）が 1cm であるのに対し、試験での最大洗掘のオーダーが 2cm 程度であることを考えると、洗掘を引き起こす水衝部付近の流れが計算では平均化されている影響がある。今後、試験の洗掘のオーダーに即して計算の解像度を細かくすることで洗掘現象の再現精度が向上する可能性がある。

最大洗掘深について、全てのケースで計算値が試験値より小さくなっており、過小評価となっている。波高が高く、防潮堤を越流する際の流れが最も強くなる孤立波の汀線-60cmの結果での洗掘深が大きくなる傾向は試験と計算で一致している。

第7章 今後の試験および解析の課題

本章では、本業務によって得られた知見を基に、実験及び解析上の反省点、改善点と今後考えられる検討項目を以下に示す。

7-1. 本業務の結果を踏まえた、実験及び解析上の反省点、改善点

7-1-1 実験関係

難易度の高い実験が多く、実験装置のセットアップも手探りから始めることが多かった。また、必要なケースの実施に主眼を置いたため、それぞれの現象理解に十分な時間が割けていない。そのため、実験結果の妥当性についても検討が十分とはいえない。ただし、これまでの実験により、正確かつ効率的な実験を行うための多くの知見を得た。これを無駄にせず、下記の点を考慮しながら、腰を据えた実験を行う必要がある。この際、これまでの実験結果の精査を行った上で、必要なものに対して、再実験もしくは追加実験を行うことも今後重要となる。

(1) 衝突挙動の把握について

漂流物影響の把握のためには、衝突姿勢、衝突時間の把握が重要となることが明らかになった。しかし、長波の実験のように、漂流物モデルが砕波に巻き込まれ、画像解析ではその動きがトレースしきれないケースがあった。これを解決する方法として、ウェアラブルカメラ（水中での挙動を追える）または加速度計を漂流物モデル内部に仕込み、その動きが追えるようにすることが考えられる。これが実現すれば、衝突力評価結果を左右する衝突時間も明らかになることが期待される。

(2) 画像解析用の映像記録について

今回、画像解析用の映像記録については、昨年度と同様に高速度カメラを用いた。断面実験では鮮明な画像が得られたが、大型水槽では光量不足と撮影対象に奥行きがあったことから、鮮明な画像データが得られなかった。大型水槽で十分な光量を確保するのは困難なことから、1秒間の記録コマ数を落とす、あるいは高感度カメラを用いる等の更なる工夫が必要である。特に漂流物の衝突挙動やその作用時間を推定するのに画像データが有用であり、鮮明な画像が得られればより精度よく評価することができる。

(3) 3D プロファイラーによる洗掘形状の計測について

今回、大型水槽での洗掘実験では、3D プロファイラーによる洗掘形状の計測を行い、比較的短時間に詳細で高精度のデータを得ることができた。ただし、プロファイラーの照射距離が約 30cm と短く、大規模な固定架台を必要とするため、波浪の状況を平面的に（同時に）記録する上での障害となった。多少精度が落ちても照射距離が大きく取れる形式に替えて、双方の記録に支障のない計測システムとする、あるいは

架台の移動が容易に行える（例えばレールに乗せる等）システムにする，等の改変が必要である．

7-1-2. 解析関係

昨年度，今年度に多くの解析が行われているが，個々のケースに関する分析が十分とはいえない．ただ，これまでの検討により，実験の再現性が良い現象，実験との乖離が大きい現象を把握することができた．そのため以下の項目を考慮して，解析作業を継続する必要がある．もとより，解析により実験を完全に再現することはあり得ないが，少なくとも，解析コードが想定した解析結果は得られる必要があり，それが確認できたコードを用いて様々なパラメータ解析を行えば安全側の評価を導き出すことは十分可能である．

(1) 計算負荷の低減

今回，クランクケースの実験の解析に際し，横断方向の計算メッシュを細分化して解析を行ったが，越流波の検討等，継続的な長時間の実験と同じ時間分の数値計算を行う上で，全領域を三次元モデルで解析した場合の計算負荷は大きく，計算に数日を要するものであった．しかし，「計算時間がかかるから評価できない」という姿勢では，説明責任が果たせない．そのため，より効率的で実用的な予測検討を進めて行く為に，下記に示すような方法で計算負荷の低減および計算の高速化を図る必要がある．その対策として，三次元解析モデルと平面二次元解析モデルの結合計算を本格的に活用する．これは，横断方向の波の空間分布がほぼ一様である沖合から水路斜面部までの領域は平面二次元解析モデルで計算し，水路斜面部から防潮堤を含む岸側の領域は三次元解析モデルにより計算を行う．領域の境界部分では平面二次元解析モデルと三次元解析モデルで水位・流速・流量等の諸変数を相互に受け渡ししながら結合計算を行うため，計算時間の削減が期待できる．

(2) 障害物や防潮堤に衝突した後の空気層の影響を受けた流況再現精度向上

障害物や防潮堤越流後には，水塊により空気領域が閉じ込められる．例えば，越流解析では長時間にわたって空気領域が存在する場合がある．このような流況を再現するためには，部分的な気液二相流解析の導入が必要になる．

(3) 漂流物解析の精度向上

今回，漂流物の挙動を模した粒子追跡解析を行ったが，漂流物と防潮堤の衝突を直接的に評価する解析にはなっていない．今後，仮想的な体積と質量による解析ではなく，漂流物の形状を正確に反映させた漂流物解析を行うことにより，より実現象に近い漂流物の挙動および衝突現象を再現できる可能性がある．

(4) 洗掘解析の精度向上

今回、流動場の解析には 1cm の計算メッシュを用いているが、実験での洗掘深のオーダーが数 cm であることを勘案すると、洗掘の駆動力となる流動場の計算の解像度を上げることにより、洗掘現象の再現性が向上する可能性がある（流動場の再現性を向上させることで河床変動現象の再現性を向上させる）。

7-2. 本業務の結果を踏まえた、今後考えられる検討項目

(1) 波力特性、洗掘影響に対する防潮堤高および津波高の変数化

今年度は防潮堤高を模型で 15cm（実物で 6m 相当）に固定して実験を行った。防潮堤を設計する上での指針として、堤高の設定が重要であることから、防潮堤高を変化させる実験を行うことによって防潮堤に作用する波力特性、および防潮堤を越波することによる洗掘への影響を調べ、設計指針設定への基礎データとして纏めることが考えられる。また洗掘実験に関しては、初期河床の設定高の変化（上げる方向）についても考えられる。また、極端事象の検討に当たっては、津波高のさらなる変化も必要となる。

(2) 障害物影響に対する本格的な検討

今年度は、基本的な実験ケースに付加する形で、ケース数を限定し障害物に関する実験を行った。位置付けとしては、防潮堤前面に堆積した土砂とも、人工的な根固工とも取れる、曖昧な設定であったが、興味深い結果が幾つか得られた。この結果を踏まえて（派生させて）、

- ① 障害物としての特性を更に詳細に調べるため、高さ、形状、位置等を変化させて実験を行う
- ② 対策工としての位置づけとして捉え、離岸堤や潜堤の設置条件に置換して、その対策効果に関する実験を行う。等が考えられる。

(3) 防潮堤頂部形状の検討

今年度の検討では、防潮堤頂部の形状に着目してこなかったが、越流を考慮する場合にはその形状が大きく影響することは明白であり、どのような形状であれば被害を軽減できるかについて検討することは有用である。

(4) 漂流物衝突時間の正確な把握

画像解析から算出した衝突力とロードセルのセルの値の差違は、衝突時間に左右される可能性があることが分かった。そこで、上記 7-1-1 の(1)で示したような方法で、衝突時間をできるだけ正確に計測する必要がある。また、津波が作用する場合だけでなく、単に、物体が防潮堤に衝突する場合も対象とする。この場合、物体の挙動は完全に観察できるため、画像解析とロードセル値の値をより詳細に分析できる。これらにより、津波が衝突に対してどのような作用をするかを把握することが可能になる。