

高流速域における河川構造物の安定性に関する研究

研究予算：運営費交付金(一般勘定)

研究期間：平 25～平 28

担当チーム：寒地河川チーム

研究担当者：伊藤丹、井上卓也、阿部孝章

【要旨】

急流河川では、反砂堆上の水面波の一種である「三角状水面波列」と呼ばれる恐竜の背のような巨大な表面波が発生する場合がある。この水面波によって生じる流体力によって、河床の局所洗掘が発生し、護床・護岸の安定性に影響を与える可能性があるが、その特性についてはまだよく分かっていない。そこで本報告では、水面波列の発生条件とその列数を把握するための基礎的な実験を行った。この結果、水面波列の発生条件は水深粒径比に依存し、その列数は川幅水深比に依存することが確認された。

キーワード：水面波、反砂堆、水路実験

1.はじめに

急流河川では、高流速により水面波などが生じ、これらの流体力によって施設周辺では著しい河床洗掘および河岸侵食が発生する。これらの対策として、河床や河岸に護床・護岸が設置されるが、その設計のためには、高流速域における水理現象を予測する必要がある。

しかし、河川の流況計算で一般的に用いられる浅水流方程式では、水面波の変形・伝播過程を精度良く表現できないことが知られている。

本研究は、高流速により発生する水面波と河床変動を正確に予測する技術の開発を最終的な目標とし、平成 25 年度においては、①既往洪水における水面波発生事例の収集、②高流速域における水面波列の発生条件を把握するための基礎的な実験を行った。

2. 水面波の発生事例の収集

発生事例は、インターネット上に公開されている資料、既往論文および報告を中心に収集した。収集した資料から巨大な水面波の有無、河岸侵食の有無、護床・護岸の被災有無、堤防の被災有無の 4 つを整理した結果を表-1 に示す。

これによると、収集した写真から巨大な水面波が確認できたのは、常願寺川、安倍川、辺別川、豊平川の 4 河川であった (図-1)。なお、この他の河川でも、写真が残っていないだけで巨大な水面波が発生している可能性はある。

表-1 被災事例の収集

	洪水	水面波列	河岸侵食	護床・護岸・堤防の被災
黒部川	H7.7		○	○
手取川	H16.10		○	○
常願寺川	S44.8	○	○	○
	S53.6	---	---	○
	S58.7	---	○	○
	S59.7	---	---	○
	S63.6	---	---	○
	H2.9	---	○	○
	H5.7	---	○	---
	H7.7	---	○	---
安倍川	H8.6	---	---	○
	H10.8	---	○	○
	S57.8	---	○	○
安倍川	H10.8	---	○	○
	H23.7	○	---	---
天竜川	H18.7		○	○
鬼怒川	H13.9			○
多摩川	H19.9		○	○
辺別川	H22.8	○	---	---
	H23.9	---	○	○
音更川	H23.9		○	○
豊平川	S56.8	○	○	○
	H23.9	○	---	○

図-1 を見ると水面波は線状に連なっている。長谷川ら²⁾によると、このような水面波列は 3 次元的な跳水とも見られ、波頂部分が砕けて巻いた形をしている。日本における正式な名称はないが、古くは木下³⁾が実験水路で発生した波列に「線状跳水」という呼称を与えている。また、土木学会では下流に下る反砂堆としての性質に着目して「流下反砂堆」と呼ぶことがあるが、水面波の特徴が見えないせいかあまり使われてい

a) 常願寺川の昭和 44 年 8 月洪水での水面波¹⁾



b) 豊平川の昭和 56 年 8 月洪水での水面波



c) 辺別川の平成 22 年 8 月洪水での水面波



図-1 洪水時に発生した水面波列の写真

ないようである。本研究では、長谷川ら²⁾と同様にこの水面波を「三角状水面波列」と呼ぶこととする。

山本⁴⁾によると、河床勾配が 1/250 以上の扇状地河川では、出水時には一部反砂堆と呼ばれる小規模河床波が発生し、その水面形は恐竜の背びれのように水面が盛り上がり、それが流下方向に連続する形をとることが多い。一般にこの発生場所は流速が大きくかつ幾分浅いところである。ただし、反砂堆は保存性が悪いため、その特性についてまだよく分かっていない。

昭和 56 年 8 月洪水時に豊平川で発生した三角状水面波列は、ビデオ撮影されており、平常時の画像と重ね合わせることで、波長と波高が推定されている⁵⁾。これによると、三角波の波長は 17.5~18.0m 程度、波高は 2.0m~3.0m 程度であった(図-2、3、4、5)。

なお、三角状水面波列が構造物に与えた影響については今後検討する予定である。

3. 水面波列の発生条件に関する既往研究

3.1 長谷川らの研究

長谷川ら²⁾は、反砂堆波長と斜め交錯水面波の波長が一致する共振条件から、三角状水面波列の発生条件



図-2 三角波の撮影ポイント⁵⁾

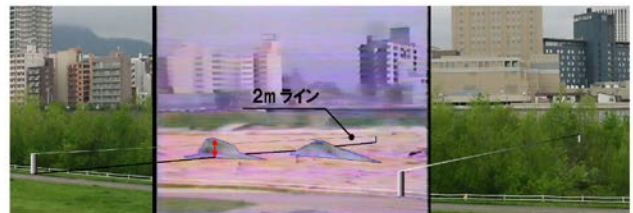


図-3 三角波の波向の推定 (Point 1)⁵⁾



図-4 三角波の波向の推定 (Point 2)⁵⁾

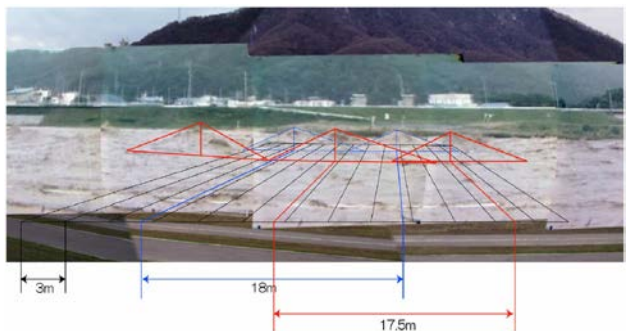


図-5 三角波の波長の推定 (Point 3)⁵⁾

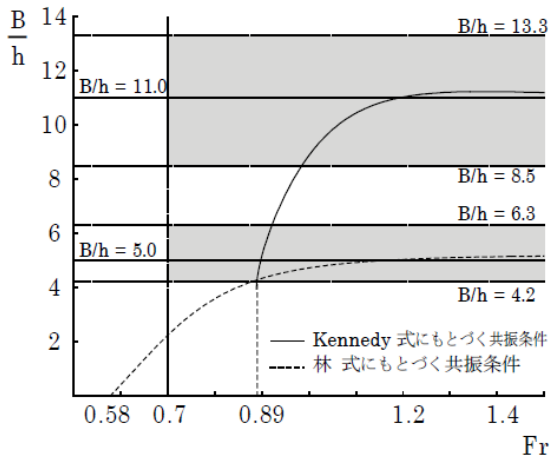


図-6 長谷川ら²⁾による三角波発生条件の分析結果

を、川幅/水深比 (B/h) とフルード数 (Fr) の関係で表している (図-6)。これによると、反砂堆の理論波長を Kennedy⁶⁾式から導くか、林⁷⁾式から導くかによって、三角状水面波列の発生条件は若干異なり、Kennedy 式の場合 $8.5 < B/h < 13.3$ 、林式の場合 $4.2 < B/h < 6.3$ となる。

3.2 井上らの研究

河川流況計算には、浅水理論式が用いられることが多い。しかし、この理論は三角状水面波列のような波の伝達過程を精度良く表現できないことが知られている。

そこで井上ら⁵⁾は、非線形分散波理論式 (一次元 Boussinesq 方程式) を用いた一次元河床変動モデルを構築し、豊平川の三角状水面波列の再現計算と発生条件の分析を行っている。

計算対象区間は昭和 56 年 8 月洪水時に三角波が発生した石狩川合流点から 15.8km 付近 (Point1) である。計算水路の幅は昭和 56 年 9 月測量横断データから 70m、河床勾配は 1/100 (Point1 付近の最深河床高の勾配) である。計算流量は昭和 56 年 8 月洪水ピーク流量より $1400\text{m}^3/\text{s}$ 、河床材料は対象地点の代表粒径より 100mm である。

図-7 は井上ら⁵⁾が行った再現計算結果である。これによると、波長が 18m~26m、河床波高が 0.4m~0.8m、水面波高が 1.0m~2.5m であり、再現計算結果は、観測ビデオからの推定した昭和 56 年 8 月洪水時の三角状水面波列 (波長 17.5~18.0m 程度、波高 2.0m~3.0m 程度) と概ね一致している。

図-8 は、フルード数 (Fr) に対する水面波高一水深比 (H_s/h) の感度分析結果である。これによると、フルード数が 1.1 より大きい場合、水深の 60%~70%

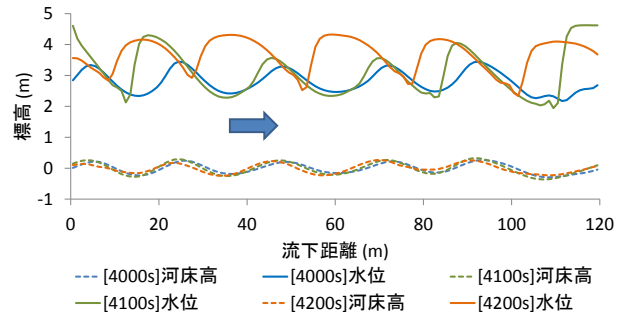


図-7 井上ら⁵⁾の再現計算結果

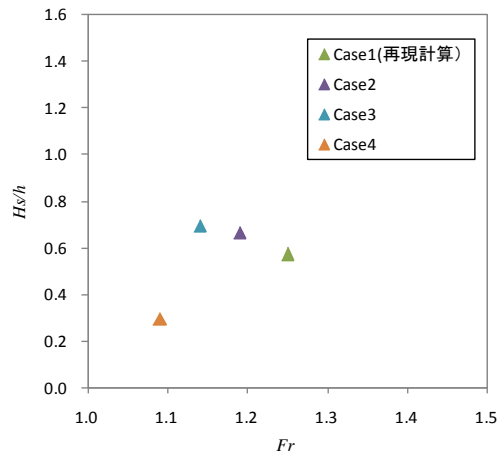


図-8 波高水深比とフルード数の関係⁵⁾

の波高を有する水面波が発生するが、フルード数が 1.1 以下では、その波高が水深の 30% まで小さくなる。このことから、井上ら⁵⁾はフルード数 1.1 以下では三角状水面波列は発生しにくいと推察している。

ただし、再現結果 (図-7) では、ビデオ画像と異なり三角形ではない水面波も見られている。これは、井上ら⁵⁾のモデルが一次元モデルのため、長谷川ら²⁾が指摘している斜め交錯波の影響を考慮できていないためである。今後は斜め交錯波の影響も考慮できるモデルが必要と考えられる。

4. 三角状水面波列の基礎実験

4.1 実験条件

三角状水面波列の発生条件を把握するために、長さ 22m、幅 0.5m の実験水路を用いて移動床実験を行った。実験条件を表-2 に示す。観測項目は、三角状水面波列の発生有無、列数、波高、波長である (図-9)。

4.2 実験結果と考察

表-3 に三角波の発生有無と平均的な水面波高、河床波高、水面波長を示す。また、図-10~図-13 には、水

表-2 実験条件

実験ケース	使用材料	勾配 S	勾配 1/S	粒径 d (mm)	等価砂粗度 ks (m)	マンング粗度 n	砂礫上の 無次元掃流 力 τ^*c	水深 hs (m)	径深 R (m)	流速 v (m/s)	幅 B (m)	流量 q (L/s)
Case1-1	乾燥珪砂 3号	0.0080	125	1.42	0.0030	0.0150	0.034	0.045	0.038	0.68	0.50	15.2
Case1-2								0.080	0.061	0.92		36.8
Case1-3								0.025	0.023	0.64		8.1
Case1-4								0.010	0.010	0.36		1.8
Case2-1	ろ過砂利 5mm	0.0180	56	5.00	0.0076	0.0175	0.050	0.045	0.038	0.87	0.50	19.5
Case2-2								0.055	0.045	0.97		26.7
Case2-3								0.075	0.058	1.14		42.9
Case2-4								0.025	0.023	0.82		10.3
Case2-5								0.040	0.034	1.08		21.7
Case2-6								0.050	0.042	1.23		30.7

実験ケース	無次元掃流力 τ^*	砂礫床上の流砂量		川幅水深比		$\frac{\sum qb^2}{(1-\lambda)}$ λ :空隙率 総給砂量(m3)	単位時間 給砂量 $\text{L}/5\text{分}$	フルード数 fr	水深粒径比 h/d	径深粒径比 R/d	備考
		qb (m^2/s)	$\sum qb$ (m^3)	$B^{0.2}/hs$	B/h						
Case1-1	0.154	7.12E-05	0.26	4.230	11.11	0.43	17.81	1.02	31.69	27	川幅水深比を変化させる
Case1-2	0.273	2.01E-04	0.72	2.380	6.25	1.21	50.33	1.04	56.34	43	
Case1-3	0.155	7.22E-05	0.26	8.576	20.00	0.43	18.05	1.30	17.61	16	
Case1-4	0.062	8.02E-06	0.03	21.441	50.00	0.05	2.00	1.16	7.04	7	
Case2-1	0.098	1.20E-04	0.43	4.975	11.11	0.72	30.07	1.31	9.00	8	
Case2-2	0.120	2.11E-04	0.76	4.071	9.09	1.26	52.66	1.32	11.00	9	
Case2-3	0.164	4.36E-04	1.57	2.985	6.67	2.61	108.92	1.34	15.00	12	
Case2-4	0.097	1.16E-04	0.42	10.048	20.00	0.69	28.94	1.66	5.00	5	
Case2-5	0.155	3.88E-04	1.40	6.280	12.50	2.33	96.95	1.73	8.00	7	
Case2-6	0.194	6.21E-04	2.24	5.024	10.00	3.73	155.28	1.76	10.00	8	

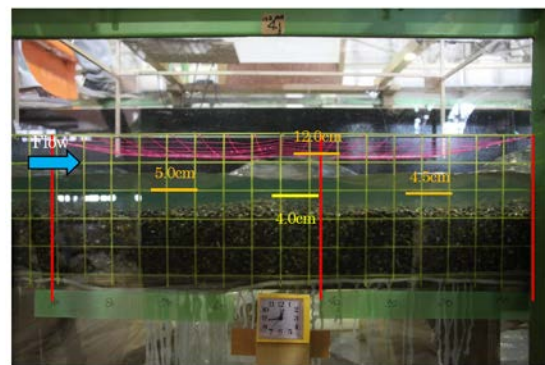
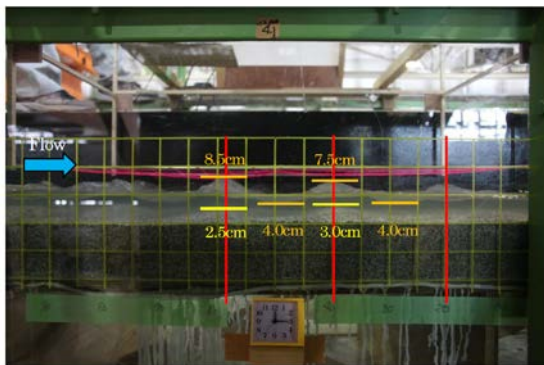


図-9 波長波高の計測 (左 Case1-1、右 Case2-3)

面波の列数と、フルード数 (Fr)、無次元掃流力 (τ^*)、水深粒径比 (H/d)、川幅水深比 (B/H) の関係をそれぞれ示す。これによると、三角状水面波列の発生条件は、長谷川ら²⁾や井上ら⁵⁾が提案していたフルード数 (Fr) よりも、水深粒径比 (H/d) との関連性が高かった。本実験では、水深粒径比 12 程度が、三角状水面波列の発生非発生の境目であった (図-12)。また、三角状水面波列の列数は、川幅水深比 (B/H) の増加に伴い増加する傾向にあった (図-13)。なお、水深粒径比 (H/d) や川幅水深比 (B/H) に対する依存性の物理的な解明は、今後の課題とする。

表-3 実験結果

ケース名	平均水面波高 (cm)	平均河床波高 (cm)	平均水面波長 (cm)
Case1-1	3.8	3.8	23.8
Case1-2	6.4	4.0	42.3
Case1-3	4.1	2.5	17.9
Case1-4	非発生	非発生	非発生
Case2-1	非発生	非発生	非発生
Case2-2	非発生	非発生	非発生
Case2-3	7.4	4.0	54.3
Case2-4	非発生	非発生	非発生
Case2-5	非発生	非発生	非発生
Case2-6	非発生	非発生	非発生

6. まとめ

本報告では、既往洪水における水面波と河川構造物の被災実績の収集と、高流速域における水面波列の発生条件を把握するための基礎的な実験を行った。実験の結果、水面波の列数は川幅水深比に依存し、水面波の発生条件は水深粒径比に依存することが明らかとなった。

今後は、水面波が構造物の安定性に与える影響について調査すると共に、水面波形状をより正確に再現するための新たなモデル開発を行う予定である。

参考文献

- 1)建設省北陸地方建設局富山工事事務所：常願寺川の急流河川工法，1979.
- 2)長谷川和義，山口甲，伊賀久晃，辻珠希：急流河川における三角状水面波列の発生条件について，土木学会北海道支部論文報告集第66号，2009.
- 3)木下良作：石狩川河道変遷調査・本文・付図，科学技術庁資源局資料，第36号，1960.
- 4)山本晃一：河道計画の技術史，1994.
- 5)井上卓也，清水康行，木村一郎，川村里実：1次元ブシネスク方程式モデルを用いた豊平川における三角状水面波列の数値計算，土木学会水工学論文集，第55巻，2011.
- 6)Kennedy, J. F. : The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 16, pp. 521-544, 1963.
- 7)Hayashi, T. : Formation of dunes and antidunes in open channels, Journal of Hydraulic Division, Proc. of ASCE, Vol. 96, No. HY2, pp. 357-366, 1970.

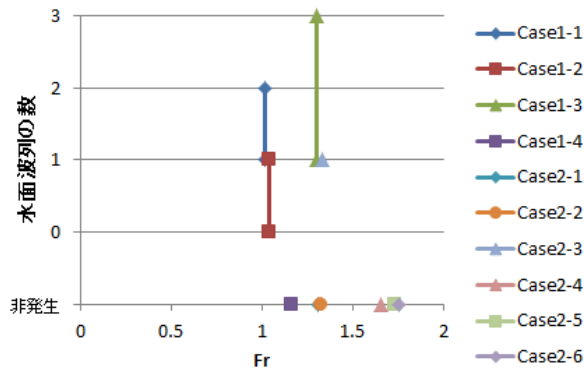


図-10 列数とフルード数

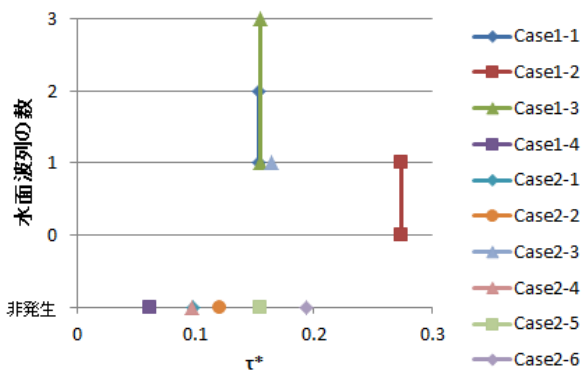


図-11 列数と無次元掃流力

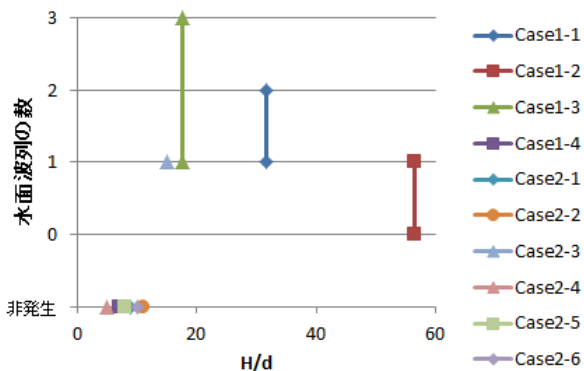


図-12 列数と水深粒径比

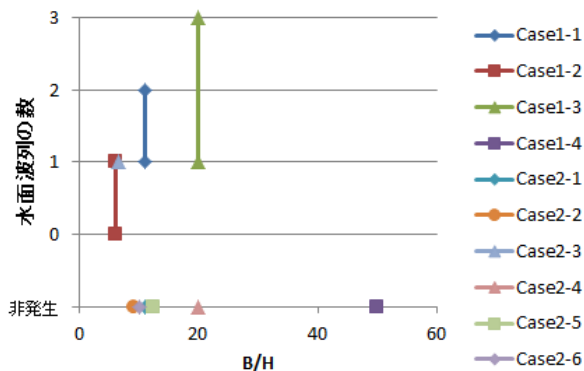


図-13 列数と川幅水深比

A STUDY ON THE STABILITY OF REVETMENT BLOCKS UNDER HIGH FLOW VELOCITY CONDITIONS

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : River Engineering Research Team

Author : ITO Akashi

INOUE Takuya

ABE Takaaki

Abstract : During the flood, high-velocity flow sometimes generates large surface waves called "triangular wave train", which look like the jagged plates on the back of a dinosaur. These waves cause local erosion of riverbed and may have great destructive effects on revetment blocks. Although the wave train is thought as one of the surface waves on antidunes, study on their occurrence condition have not been sufficiently conducted. In this paper, we made the flume experiment to understand the occurrence condition of triangular wave. The experimental results showed that the triangular waves were generated when the ratio of water depth and grain size is larger than 12 and the number of waves train increased with the increase in the ratio of width and depth.

Keywords: surface waves, antidune, flume experiment