

避難時の水中歩行に関する実験

An Experimental Study on Underwater Walking in Flood Disaster Evacuation

須賀 堯三* 上阪 恒雄** 白井 勝二**

高木 茂知*** 浜口 憲一郎*** 陳 志軒***

by Kyozo SUGA, Tuneo UESAKA, Syouzi SIRAI,

Sigenori TAKAGI, Kenichirou HAMAGUCHI and Zhixuan CHEN

Abstract

This paper presents the results of experimental study on walking in a stream at flood disaster evacuation. By observing the walking speed in water and people's psychology at the same time under the condition of simulated flood flow, the various condition of walking in the stream is studied. The hydraulic condition for feasible safe evacuation is obtained. The results can provide a quantitative reference for the flood disaster evacuation plan to a certain extent.

Keywords: flood disaster evacuation; underwater walking; feasible safe evacuation

1. まえがき

河川の氾濫による水害を防止・低減するためには、治水施設を整備するだけでなく、水防・避難活動を円滑かつ効率的に実施することも重要である。たとえば、水害時における安全な避難誘導のためには、浸水深と流速が避難時の心理に及ぼす影響、及び浸水深・流速と歩行避難の限界などを把握し、氾濫流の危険性についての住民への広報・啓蒙などをあらかじめ行うことが重要である。

本実験では、実際の避難行動に近い状況を想定した流水中歩行実験を実施し、水深・流速などに対する歩行速度の計測と、被験者への流水に対するヒアリングから、歩行避難の限界を把握するとともに、氾濫流に対する安全避難の程度を把握することを目的とした。

2. 実験の内容

2.1 実験方法及び被験者

本実験では、被験者による2種類の実験水路での水中歩行を実施し、水中での歩行速度の測定、歩行時の流水に対する感じ方をヒアリングした。同時に、水中歩行時の体の動き方をビデオ、写真で撮影し歩行速度と歩行形態について検討を行った。被験者と実験の諸元を表-1、図-1に示す。被験者の青年男子の体型は全国平均値よりやや大きく、子供の被験者は全国平均とほぼ同じである。

表-1 歩行実験の諸元一覧表

分類	被験者諸元				水路諸元		実験方法
	年齢	体重Kg	身長cm	人数	長さ×幅×高さm	水底底面	
子供	8~11	30~44	124~151	12	20×5×0.5	コンクリート、砂	順流、逆流、横流
青年	21~23	55~75	168~174	6	100×4×2.0	鉄板、砂	逆流、横流

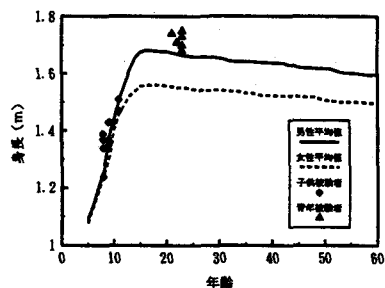


図-1 被験者の身長分布図

* 正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科
(〒321 宇都宮市石井2753)

** 正会員 建設省利根川上流工事事務所
(〒349-11 埼玉県北葛飾郡栗橋町北2-19-1)

*** 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株) 水工部、筑波実験場
(〒206 東京都多摩市関戸1-7-5)

2.2 実験結果

実験結果の一覧を表-2と図-2、3に示す。実験結果により、青年も子供も水深が膝までの場合の歩行速度は、流速との関係が少なく60cm/sぐらいの速度で歩行でき、恐怖感もほとんどない。それに比べ水深が股を越えた場合は歩行速度が急に下がり、恐怖感も感じている。歩行速度は、水深あるいは流速の増加につれて遅くなるが、実験結果から流速よりも水深に大きく影響されていると判断される。図-2に見られるように感じ方については、水深が股までの場合では流速が80cm/s以下の範囲であれば恐怖感あまり感じていない。実験において、水深約1m、流速約1m/sの場合では、被験者は歩行に困難さと恐怖感を感じており自主的には歩行しようとはしない。この水理量が歩行の限界であると考えられる。

表-2 実験結果一覧表

子供							青年						
CASE NO.	流速 m/s	水深 m	距離 m	F r	歩行速度 m/s	感じ方	CASE NO.	流速 m/s	水深 m	距離 m	F r	歩行速度 m/s	感じ方
A1	0.00	0.35	4.50	0.00	0.91	--	D1	0.50	0.50	12.0	0.23	0.58	4.1
A2	0.36	0.35	4.50	0.19	0.73	--	D2	1.00	0.50	12.0	0.45	0.48	3.3
A3	0.36	0.35	4.50	0.19	0.85	--	D3	0.57	0.70	12.0	0.22	0.53	3.6
A4	0.48	0.35	3.00	0.26	0.66	--	D4	1.00	0.80	12.0	0.36	0.38	2.5
A5	0.25	0.42	4.50	0.12	1.12	3.9	D5	1.13	0.80	12.0	0.40	0.30	2.1
A6	0.50	0.20	4.50	0.36	1.16	3.9	D6	1.31	0.80	12.0	0.47	0.23	1.5
A7	0.50	0.20	4.50	0.36	1.02	3.4	D7	1.41	0.80	12.0	0.50	0.20	--
A8	0.77	0.20	3.00	0.55	0.98	3.3	D8	0.95	1.10	12.0	0.32	0.18	1.0
A9	0.18	0.57	4.50	0.08	0.96	3.8	E1	0.60	0.40	14.0	0.30	0.68	4.3
A10	0.36	0.35	4.50	0.19	1.00	4.3	E2	1.25	0.40	14.0	0.63	0.56	3.8
A11	0.36	0.35	4.50	0.19	0.96	4.0	E3	0.67	0.60	14.0	0.28	0.58	3.7
A12	0.48	0.35	3.00	0.26	0.87	3.4	E4	1.07	0.75	14.0	0.39	0.45	2.6
B1	0.48	0.35	7.50	0.26	0.56	--	E5	1.20	0.75	14.0	0.44	0.42	2.3
B2	0.77	0.20	7.50	0.55	1.02	3.4	E6	1.50	0.70	14.0	0.57	0.34	1.9
B3	0.48	0.35	7.50	0.26	0.94	3.1	E7	1.05	1.00	12.0	0.34	0.28	1.6
C1	0.48	0.35	7.50	0.26	0.84	--	F1	1.05	1.00	12.0	0.34	0.41	3.5
C2	0.77	0.20	7.50	0.55	1.23	4.5	F2	0.94	1.20	12.0	0.27	0.37	3.2
C3	0.48	0.35	7.50	0.26	1.10	4.6	F3	1.41	0.80	14.0	0.50	0.51	3.2
							G1	0.94	1.20	11.0	0.27	0.20	1.5

注：①A横流（子供）、B逆流（子供）、C順流（子供）、D砂の河床（青年）、E鉄板の河床（青年）、Fロープ使用（青年）、G荷物有り（青年）

②感じ方は恐怖感・歩き易さ・流れの感じ方・歩行直進性の各点数によりケース別の平均値を示した。

点数
1 2 3 4 5
恐怖感 生命に危険を感じ かなり怖かった 怖かった 少し怖かった 恐怖感が無かった
歩き易さ 歩けなかった とても歩きにくい 歩きにくい 少し歩きにくい 静水と同じであった
流れの感じ 流れをとても強く感じた 強く感じた 少し強く感じた あまり強く感じない 静水と同じであった
直進性 まっすぐ歩けない かなり困難だった 困難だった それほど困難でない 静水と同じであった

③歩行速度はケース別の平均値である。

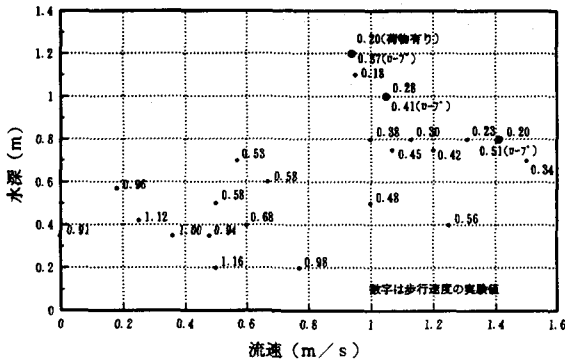


図-2 歩行速度と水深と流速の関係

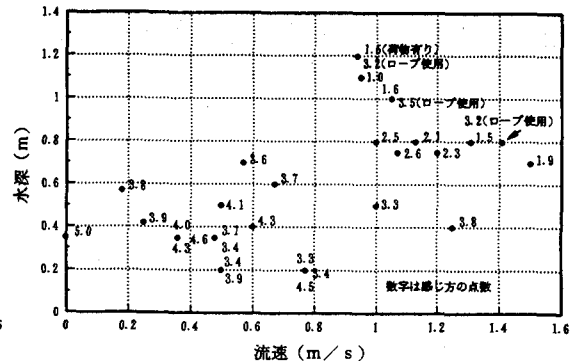


図-3 感じ方の分布図

いずれの条件についても水深と流速が増えるにつれて、歩行速度が低下している。実験においては20cm/s程度の歩行速度では歩行不可能な状態を示していることが確認された。このような状況では補助手段を用いないと歩行の継続は困難であり、10kgの荷物を持つ場合では、水深が限界より10cm増えても、あるいは流速が限界より15~20cm/s越えても歩行可能である。

補助手段としてのロープ使用の効果は荷物有りの場合において明らかにみられる。歩行者によって効果が多少異なるが、実験結果から水深が歩行限界より30cm増えても、あるいは流速が歩行限界より60cm/s越えても水中歩行が可能となっている。ロープ使用の場合は荷物を持つ場合に比べ安心感が大きく上昇している。

3. 実験結果の解析

3.1 水中歩行の機構

水中歩行時、人体に作用する外力の釣り合い条件から、外力と歩行速度、外力と感じ方について検討を行った。歩行中の人体に作用する流水による抗力を D とし、抗力係数を C_d 、流れ方向の遮断面積を A 、洪水平均流速を u 、歩行速度を v とすると、 D は下記の様に表現できる。

$$D = C_d \frac{\rho (u + v)^2 \cdot A}{2} \quad (1)$$

また、水中歩行時、人体に作用する重力を G_0 とし、浮力を W 、荷物の重量を G_1 とすると、底面での摩擦力は下記の様に表現できる。

$$F = f \cdot (G_0 + G_1 - W) \quad (2)$$

ここに、 f ：摩擦係数（0.7程度）

力の釣り合いを考えると、 $F < D$ の場合は歩行不可能であり、 $F \geq D$ の場合は水中歩行が可能であると判断される。しかし、実際には歩行者の心理的な状態、流れに対する感じ方によって、歩行能力に及ぼす影響があると考えられ、安全に歩行により避難するには抗力に対し安全率を考慮した摩擦力が必要となる。

$$F \geq \alpha \cdot D \quad (\alpha : \text{安全率})$$

従って、安全に避難できる洪水流速の範囲は、式（1）、（2）から（3）式のようにになる。

$$u \leq \left[\frac{2 f (G_0 + G_1 - W)}{\alpha C_d \rho A} \right]^{1/2} - v \quad (3)$$

式（3）を無次元化すると以下のようである。

$$F_r = \frac{u}{(gh)^{1/2}} \leq \left[\frac{2 f (G_0 + G_1 - W)}{\alpha C_d \rho gh A} \right]^{1/2} - \frac{v}{(gh)^{1/2}} \quad (4)$$

3.2 実験の検証

(a) 水中歩行の可能最大領域

式（3）、（4）に示す安全率 $\alpha = 1$ の範囲は水中歩行の可能最大領域であり、その結果を実験値と比較したのが図-4である。図-4に示すように、実験 F_r の範囲の大部分は歩行可能な F_r 限界以内である。歩行限界以上の領域では、ロープ使用・荷物を持つ等の補助機能を付加することで歩行が可能となっている。

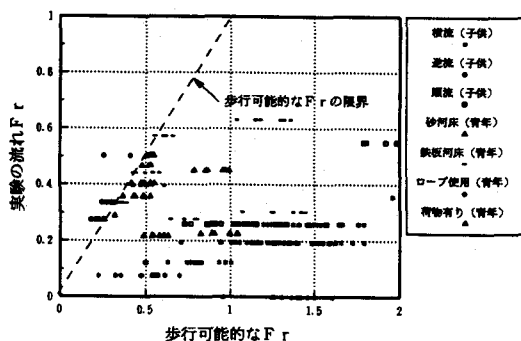


図-4 水中歩行の可能最大領域

(b) 歩行者の心理と安全率

本実験では被験者から恐怖感・歩き易さ・流れの感じ・直進性の4項目の感じ方についてヒアリングを実施した。実験はコンクリートの直線水路で行ったため、歩行者にとって洪水時の環境と異なり実際と感じ方が違うこともあると判断される。恐怖感は流れの強さと歩行の安定度などから影響を受けるが、流れから受ける感じと安定度は歩行者の水中歩行の経験度に影響される。水深が増加し、浮力を受けて安定感がなくなると急激に恐怖感を感じるようになる。水深が増加し流速が速くなり、流れの抗力を大きく受けると流される恐怖感から歩行が困難になっている。流水に対する感じ方と摩擦力抗力比 σ との関係を図-5に示す。 $\sigma > 2$ の状態では、 σ の増加により感じ方が安定化の方に移行する。 $\sigma < 2$ 時、感じ方は σ の低下により急激に低下している。ロープを使用した場合には安心感がかなり増加している。実際には、安全率 α は避難時間の長さ、安全地までの距離等の避難計画によっても影響されることとなるが、本実験の実験条件では $\sigma = 2$ 程度が安全避難の限界であると判断される。図-6は安全率 α と歩行速度の関係である。図-6に示すように安全率 α の上昇により避難歩行速度は上昇している。

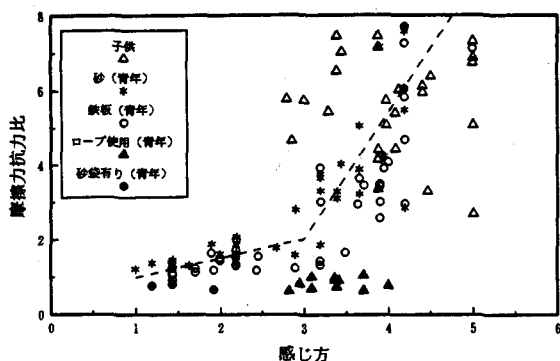


図-5 感じ方と摩擦力抗力比の関係

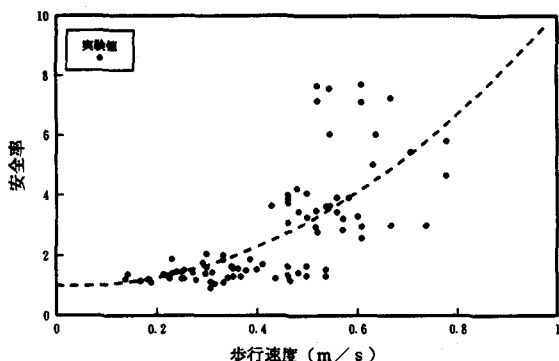


図-6 安全率と計画避難歩行速度の関係

4. 安全避難領域について

4.1 安全避難歩行速度

避難行動因子の内でもっとも重要な因子は避難速度である。既往の避難に関するアンケートにおける避難速度は概ね40～70 cm/sである。本実験では摩擦力抗力比 $\sigma < 2$ の時、恐怖感が急激に上昇するため、 $\sigma = 2$ は安全避難の限界と判断される。実験結果の $\sigma = 2$ に対する避難速度はより、計画避難最低歩行速度は40 cm/s程度と判断される。

4.2 安全避難領域図

式(4)から $\alpha = 2$ として計画避難歩行速度 $v = 40$ cm/sとして求められる安全避難領域を図-7に示す。また荷物を持つ場合など摩擦力を増加させた場合の歩行領域を図-8に示す。

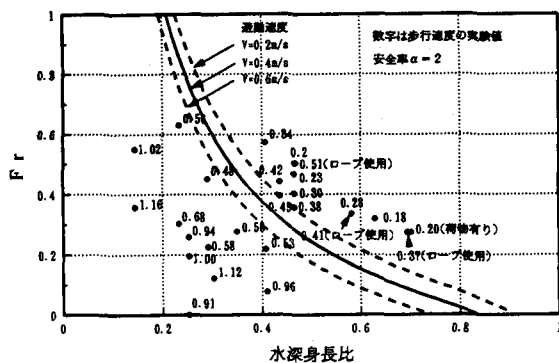


図-7 安全避難領域図(荷物を持たない)

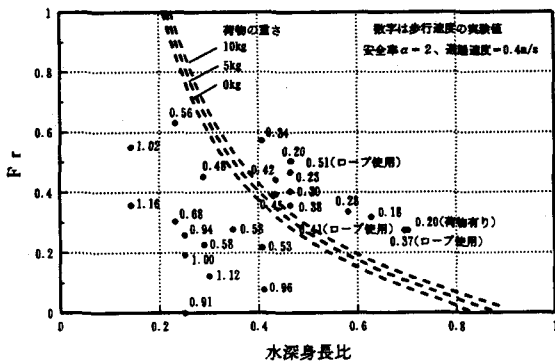


図-8 安全避難領域図(荷物を持つ)

5. おわりに

本文では、水害避難時を想定した水中歩行実験を行い、水中歩行する歩行者の心理的状态と歩行速度を測定し、水中歩行形態を検討することで、安全避難歩行領域を求めた。この結果に関しては、今後の避難計画を考える際にある程度の目安を提示できるものと考えられる。この種の実験には、水路規模や実験条件の制限があり、長距離歩行の場合の歩行速度の低下、氾濫時の風雨・日没後の歩行のような不確定要素による心理的影響度の把握等については実験を行えなかった。様々な条件下で生じる洪水時の避難に関しては解明すべき項目も多く、実際の氾濫による経験者のヒアリング・現地測定などにより避難誘導に関する基礎資料を収集・解析する必要があると思われる。

《参考文献》「水害時の避難体制の強化に関する研究」、建設省土木研究所、昭和63年3月