2012年7月九州北部豪雨による龍田陳内四丁目 における氾濫状況に関する研究

HYDRAULIC MODEL EXPERIMENTAL STUDY OF FLOOD DISASTER IN THE SHIRAKAWA RIVER ON JULY, 2012

大本照憲¹・平川隆一²・西将吾³・中川裕貴⁴・陳翔⁵
Terunori OHMOTO, Ryuichi HIRAKAWA, Shogo NISHI,
Hirotaka NAKAGAWA and Chen XIANG

¹正会員 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8602 熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39番1号)

²正会員 博(工) 前橋工科大学准教授 工学部社会環境工学科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460番地1)

³学生会員 修(工) 熊本大学 大学院自然科学研究科 (〒860-8602 熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39番1号)

⁴学生会員 熊本大学 大学院自然科学研究科 (〒860-8602 熊本県熊本市中央区黒髪二丁目39番1号)

⁵学生会員 前橋工科大学 大学院工学研究科 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460番地1)

A heavy rainfall generated by a stationary front in rainy season attacked northern Kyushu district in July 3-14, 2012. Extreme rainfall event was recorded particularly in Aso city of Kumamoto prefecture during 2 am-8 am of July 12, which could occur in a return period of 130 years statistically. It induced flood inundation and/or debris flow disasters in this river basin, and resulted in the number of killed or missing people 25.

In this paper, picking up the Tatsuta Zinnai 4 district, where is most vulnerable one to flood disasters in Kumamoto city, we investigated the flood inundation in detail by hydraulic model experiments and clarified the main factors that affect death or injury to people during floods, which include flow velocity, flow depth, and the degree to which people are exposed to the flood on evacuation routes.

Key Words : *The Shirakawa river, hydraulic model experiments, flood disasters, flood water depth, evacuation routes*

1. はじめに

我が国では、危機管理施策についての議論を喚起する象徴的自然災害が生起している。このため、近年の深刻な豪雨災害に対して安全な社会形成を図ることを目的に、大河川は勿論のこと主要な中小河川においても超過洪水に対するハザードマップの作成・公表が義務付けられる様になった。

しかしながら、既存のハザードマップには水害対象地域の住民の意向は十分に取込まれていない。激甚な被害が想定された箇所が避難場所に設定されている場合もあり、改善すべき点が多々見受けられる。また、現行のハザードマップには氾濫流に対して浸水深のみ記載され、流速については明示されていない。避難時の人体に働く流体力の評価には流速と水深の両者が必要であり、氾濫

解析および物理模型実験の実施による信頼性の高い氾濫流のシミュレーションが求められる。さらに、住民のリスクに対するイメージが実態と大きく掛け離れた場合には、行政の避難勧告や避難指示が有効に働かず、避難行動の意思決定の狂いに伴う人的被害の拡大は避けられない。実際の洪水避難において多くの住民は、避難勧告や指示に従わないのが通例であり^{1), 2), 3)}、その要因を明らかにして災害教育の普及を図る意義は大きい。

気象庁が2012年7月12日6時41分に熊本県と大分県を中心に「これまでに経験したことのないような大雨。この地域の方は厳重に警戒を」と発表した梅雨末期に見られる典型的豪雨は、未曾有の被害をもたらした。

土木学会九州北部豪雨災害調査団による「平成24年7月九州北部豪雨災害調査団報告書」によれば、1) 降水量の再現期間は、標準最小二乗基準 (Standard Least-Square Criterion) $SLSC < 0.04$ で適合性の高い一般極値分

図-1 研究対象地区と水深および道路上流速の検討箇所

布を基に評価した。阿蘇乙姫における平成24年度7月12日の降雨の再現期間は、最大日雨量で60年、最大1時間雨量で50年、最大6時間雨量130年であった。降雨継続時間と再現期間との関係から降水量は阿蘇乙姫で降雨継続時間が約6時間、高森では6～8時間において再現期間がピークを示すことが認められた。また、黒川側の阿蘇谷に降雨が集中し、南郷谷の白川側では再現期間が最大で25年程度であった。2) 黒川は阿蘇地域に対して甚大な被害をもたらしたが、一方で黒川の氾濫によって白川と黒川の合流点より下流ではピーク流量の低減、ピーク流量発生時刻の遅延により熊本市は大きな人的被害を免れた。洪水痕跡から黒川堤防長さ55.85kmの約62%から越流し、2カ所で越流破堤した。3) 熊本市で特に被害の大きい龍田一丁目および龍田陳内四丁目における河道の疎通能が約1500m³/sに対して、約2300 m³/sの濁流が通過し、特に龍田陳内四丁目では逃げ遅れた住民は、県警、自衛隊、消防団によりヘリコプター32名、ゴムボートにより50名が救出された。流水型の外水氾濫によって川と化した堤内地に対するハザードマップでは、浸水深に加えて氾濫流速の情報が必要である。4) 土地の利用形態と河川災害との関係から、河川災害は都市開発を抑制する効果は無いことが認められた。危険地帯においては何らかの土地規制、建築規制が必要である。との指摘があった。

そこで本研究では、2012年7月12日の出水規模、1953年6月26日に対応した熊本市北区龍田陳内四丁目地先における氾濫流を水理模型実験で再現し、河道内の流れ、堤内地の浸水深および氾濫流速を解析し、避難経路の危険度⁴⁾を評価すると共に、急流河道の掃流力⁵⁾を検討する事を目的とする。

図-2 研究対象地区の地盤高

2. 実験方法および実験条件

実験で使用した模型は、図-1に示す龍田陳内四丁目の氾濫全域を含む縦450cm、横450cmの大きさであり、縮尺1/100の無歪みである。家屋の大きさと路地等との位置関係は、航空写真と地形図を基に再現している。軒ごとの家屋は、不透水性材料を用いて作成している。堤内地の道路は縮尺1/100で精密に再現し、特殊堤は薄い板を設置して再現している。なお、家屋の高さは5mに設定した。地盤高は、図-2に示す航空レーザ測量で得られた標高を基にしている。左岸は山付き堤防で越流は無く、疎通能を越えた氾濫流は右岸側から流入する形態を取る。

相似則に関しては、フルード数を模型と原型の流れで一致させた。また表面張力の影響を弱めるために、実験開始前に堤内地の道路や建築物等を全て水で浸潤させている。

河床粗度に関しては、現況河道では0.034であり、これに対応する模型縮尺1/100の河床粗度は0.016となる。模型水路で上記の粗度係数を実現させるために、中央粒径 $d_{50}=5\text{mm}$ の珪砂を敷き均し、粗度面を作製した。

流速の計測には、非接触型の代表的な計測法であるPIV法およびPTV法と、接触型の点計測である電磁流速計を用いた。画像解析では上方からデジタルビデオカメラで撮影を行った。その時の画像の1pixelの最小サイズは2.08mmである。流速のサンプリング周波数は30Hz、1計測面での画像データは200枚、計測時間は10secであった。なお、トレーサーとして粒径100 μm 、比重1.02のナイロン粒子を使用した。また、水位の計測にはポイントゲージを用いた。電磁流速計およびポイントゲージの計測線は、白川下流端からの距離が18k600から19k500の900m区間において100mおきに10測線を取り、横断方向

表-1 実験流量

流 量	事 由
1,500 m ³ /s	・現況河道の流下能力相当 ・再現確率年：10年
2,000 m ³ /s	・再現確率年：30年
2,300 m ³ /s	・整備目標の将来計画 ・2012年7月12日の洪水に相当 ・再現確率年：150年
3,000 m ³ /s	・1953年6月26日の実績洪水流量 ・再現確率年：150年 ・洪水調整施設による400m ³ /sのピーク流量カット

には水深は河道の中央、左岸および右岸の3点、流速は河床から1cm高さにおいて横断方向に4cm間隔で計測した。また、堤内地の浸水深をポイントゲージで計測した地点を図-1に示す。なお、計測地点は道路および交差点を中心に、家屋が存在する場所を選定した。

設定流量を表-1に示す。白川の治水計画では再現確率年を150年に設定し、計画基準点の代継橋地点において基本高水ピーク流量3400m³/s、洪水調整施設（立野ダム）により400m³/sを調節し、計画高水流量3000m³/sとしている。しかしながら、現況の白川における洪水疎通能力は1500m³/s程度である。各設定流量を基に一次元不等流計算を行い、その計算結果を基に18k500地点の水位を水利模型下流端に設置した堰で調整した。

3. 実験結果および考察

(1) 河道内水位と浸水水深

各種流量規模に応じた河道中央部の水位の流下方向変化を図-3に示す。図中には、河床高の流下方向変化も併せて示す。水位は、何れの流量においても流下方向に類似の変化傾向を示し、何れの流量においても18k700、19k000および19k300において上昇していることが着目される。この位置は湾曲部入口に当たり、堰上背水に類似の効果をもたらし、19k300では曲がりの効果に加えて河道狭窄部の効果も働き水位が上昇したことが考えられる。

また水面勾配 i_s は、18k600から19k500の区間における平均河床勾配1/300に対して、流量1500m³/sでは $i_s=1/377$ 、2000m³/sでは $i_s=1/415$ 、2300m³/sでは $i_s=1/407$ 、流量3000m³/sでは $i_s=1/452$ であり、河床勾配に対して水面勾配は小さく、流量の増大に伴って小さくなる傾向があった。

一方、可視化実験を行った所、龍田陳内四丁目における堤内地の氾濫流は、流量規模に応じて若干異なるが、全般的には19k300から19k500の区間で河道から特殊堤を乗り越え堤内地に流入し、18k700から18k900の区間で堤内地から河道へ戻り、流水型の氾濫形態を有していた。そこで、河道から堤内地へ特殊堤を乗り越えた越流水深および堤内地から河道へ流入した際の、越流水深の流下

図-3 河道中央水位の流下方向変化

図-4 越流水深の流下方向変化

方向変化を図-4に示す。図中には右岸側に建設された特殊堤の高さの流下方向変化も示している。洪水流量2300 m³/sおよび3000 m³/sでは河道から堤内地へ流入した区間は19k000から19k100および19k300から19k500の2区間であり、逆に堤内地から河道部に流出した区間は18k600から18k950および19k100から19k200の2区間であった。図-3において河床勾配に対して水面勾配は小さく、流量の増大に伴って小さくなる傾向を示したのは、この河道から越流した氾濫流が19k100から19k200の区間および18k600から18k950の区間では河道に戻るために、堤内地の低い運動量が河道に運び込まれ抵抗を大きくし、水深の上昇さらには水面勾配を小さくしたことが示唆される。

計測で得られた越流水深と越流幅を用いて、越流公式より河道から堤内地への流入量を求めた。その結果、洪水流量2300 m³/s時では約250m³/s、洪水流量3000m³/s時では約1300m³/sであった。本実験は一定流量で行っており、これらの流量が堤内地を通過することになる。

2012年7月12日に被災した龍田陳内四丁目における、洪水痕跡から得られた堤内地の浸水深を図-5に示す。こ

図-5 龍田陳内四丁目の
痕跡水深分布

図-6 模型実験での浸水深
(2000m³/s)

図-7 模型実験での浸水深
(2300m³/s)

図-8 模型実験での浸水深
(3000m³/s)

ここに示した浸水深は、道路面から住宅が浸かった水面までの高さで定義した。この地域の土地利用は本来、水田や畑地であったが1971年5月市街化区域に設定され、1973年以降にリバーサイド・ニュータウン計画が持ち上がり、急激な都市化が勧められ現在に至っている。住居の大半は0.5mから1.0mの範囲で盛土されたが、濁流は特殊堤を乗り越え堤内地は川の一部と化した。更に、白川から運ばれた泥土が龍田陳内四丁目を埋め尽くすとともに、水衝部に位置する2戸の住居が流木によって大破した。浸水深は、地盤高の低い18k800から19k100の河道沿いの低平地では2.3mから3.4mにまで達し、18k800の蓮台寺龍田分院近傍の曲がり部において極大値3.4mであることがわかる。19k300から19k500の区間の特殊堤に沿った越流区間では2.8mから3.3mにまで達して公園近傍で極大値を示している。

図-6～8は、各々模型実験から得られた洪水流量2000m³/s、2300m³/sおよび3000m³/sにおける浸水深の空間分布である。流量規模の増大に伴って浸水深は増大傾向を示し、その空間分布傾向は類似している。更に図-5と比較すれば、模型実験の浸水深の方が若干大きめに現れ19k400地点の公園近傍の直上流で3.6mの極大値を示し、18k800から19k100区間の蓮台寺龍田分院近傍の直上流で極大値3.0mである。洪水流量2000m³/sでは、19k400地点の公園近傍の直上流で3.0mの極大値を示し、18k800の蓮台寺龍田分院近傍で極大値2.0mである。洪水流量3000m³/sでは、19k400地点の公園近傍の直上流で4.2mの極大値を示し、18k800の蓮台寺龍田分院近傍の直上流で

図-9 1500m³/s時の表面流速分布

図-10 2000m³/s時の表面流速分布

極大値3.8mであることがわかる。

(2) 河道内の表面流速

PIV計測から得られた、洪水流量1500m³/s、2000m³/s、2300m³/sおよび3000m³/sでの河道部の水表面における等値線および流速ベクトルを、各々図-9～12に示す。全般的に主流速が大きく現れるのは、河道狭窄部で水深が小さな値を示した19k100から19k200の区間および河道から堤内地への越流区間である19k300から19k500の2区間であり、5～6m/sに近い大きな値を示していることが認められる。

19k000よりも下流側では、何れの流量においても5m/s以下の値である。洪水流量による違いでは、主流速は流量が小さい1500m³/sに較べて越流があり流量の大きい2000m³/s、2300m³/s、3000m³/sでは19k100から19k200の区間では大きな違いは無く、一方越流のある19k300から19k500の区間では洪水流量の増大に伴い大きな値を示していることが分かる。19k100から19k200の区間で流量の増大に伴い主流速が大きくなる原因として、堤内地から河道へ特殊堤を乗り越えた19k100から19k200の区間と一致し、堤内地から低速の運動量が河道部に流入し、主流速が大きくならなかったことが考えられる。

図-11 2300m³/s時の表面流速分布

図-12 3000m³/s時の表面流速分布

(3) 堤内地の氾濫流速

図-13と図-14は、各々画像解析から得られた、洪水流量が2300m³/sおよび3000m³/sにおける堤内地の氾濫流の表面流速ベクトルの空間分布である。

表面流速が顕著に大きいのは、図-2に示されたA-lineおよびB-lineの2区間である。A-lineにおいては、河道19k300から19k500区間から堤内地へ特殊堤を乗り越えた氾濫流は、特殊堤に沿った道路上を高速で流れ、一部は河道に沿った特殊堤19k100から19k200の区間を通して堤内地から河道への戻り流れが発生している。一方B-lineでは、A-line上を高速で走る氾濫流は19k300右岸側の公園直下の水衝部に当たる住居で右折し、B-lineが高速域となっている。

A-line上の極大流速は、洪水流量2300m³/sでは4.3m/s、洪水流量3000m³/sでは4.8m/sであり、B-line上の極大流速は、洪水流量2300m³/sでは3.1m/s、洪水流量3000m³/sでは3.7m/sあり、圧倒的にA-line上の氾濫流速が大きいことが分かる。その他の道路上においても、全般的にはB-lineに平行な流向を持つことが分かる。18k800から19k100区間の蓮台寺龍田分院近傍では、浸水深は大きいものの氾濫流速は小さいことがわかる。

またこれらの箇所は、龍田陳内四丁目における家屋被害の中で全壊および半壊が集中した箇所とも対応していることが認められた。

図-13 2300m³/s時の氾濫表面流速

図-14 3000m³/s時の氾濫表面流速

(4) 堤内地の危険度評価

図-15は、洪水流量2300m³/sにおける浸水深および氾濫流速を基に堤内地の危険度を示したものである。図中の実線は避難可能限界線⁴⁾を、菱形の変数は図-2の計測点を示す。最も危険な領域は、19k300から19k500の区間の特殊堤に沿った越流区間であるA-line、続いてB-lineであることが分かる。

洪水最盛期において龍田陳内四丁目の道路は氾濫流によって極めて危険な状況にあり、特に道路上の流速が速いB-lineよりも南側の住民が無理を押して北の方へ避難した場合には、極めて危険な実態であったと考えられる。

なお、濁流には大量の土砂および流木も含まれており、この点については今後の検討課題で有り、更に危険度が増したことが想定される。逃げ遅れた住民にとっては公的救助を待つことを選んだのは賢明な選択であったと考えられる。

図-15 2300m³/s時の堤内地避難危険評価

(5) 底面せん断応力の評価

各洪水流量に対して、18k600から19k500の区間において、50mおきに河床から1cmの高さにおいて横断方向に4cm間隔で流速を二成分電磁流速計で計測した。その時間平均流速を基に対数則を用いた摩擦速度⁶⁾を求めた。

その結果、洪水流量1500m³/sの左岸側では19k150において最大64cm/s、この区間では平均的には50cm/s、右岸側では17～54cm/sの範囲にあった。このことから曲がり伴う遠心力二次流の影響が強く現れていることが分かる。一方で、洪水流量2300m³/sの左岸側では19k150において最大44cm/s、平均的には35cm/s程度、右岸側では2～44cm/s、洪水流量3000m³/sの左岸側では19k150において最大51cm/s、平均的には36cm/s程度、右岸側では4～42cm/sであった。これらのことから、洪水流量2300m³/sと3000m³/sでは類似した傾向にあることがわかる。

限界掃流力と河床材料 d との関係⁸⁾は、以下の式で表される。

$$\frac{u_{*c}^2}{sgd} = 0.05 \quad (1)$$

ここに、 u_{*c} は限界摩擦速度、 g は重力加速度、 s は水中比重で砂の場合1.65である。

本実験での河床材料は5mm粒径に相当するので、摩擦速度が64cm/sの場合には河床材料は代表径が52cm以上の大きさのものしか残らないことが明らかとなった。ただし、ここでの数値は今後検証する必要がある。

4. おわりに

本研究では、熊本市北区龍田陳内四丁目における流水型の外水氾濫を模型実験に再現し、浸水深を求め、さらに氾濫流の可視化で表面流速を算定した。以下に得られた成果を列挙する。

(1) 龍田陳内四丁目における氾濫流は、表面流速ベクトルおよび浸水深で示され、洪水流量2000m³/s、2300m³/sおよび3000m³/sにおける氾濫流況の細部が示された。

(2) 模型実験による浸水深の実測値から、避難経路の危険度が詳細に検討され、19k300～19k500の区間の特殊堤に沿った越流区間で大きな値を示した。

(3) 洪水流量2300m³/sおよび3000m³/sにおいては、表面流速および浸水深の両者から氾濫最盛時には図-2のA-lineおよびB-lineは歩行避難路として使用不可能であることが示された。特に、A-line上では4m/s、B-line上では3m/s以上に達する場所も出現していた。

(4) 対数則および摩擦係数を仮定することで摩擦速度を算出し、洪水時の対象区間において残存する河床材料を想定した。

今後は氾濫シミュレーションを行うとともに、道路上の流速が速かったB-lineよりも南側からの、徒歩での避難経路について検討を進める予定である。

謝辞：本研究を実施するに際して、国土交通省熊本河川国道事務所、熊本県土木部河川課および熊本土木事務所から貴重な情報を提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 平野宗夫研究代表：1990年7月九州中北部豪雨による災害の調査研究、文部省科学研究費突発災害調査研究成果，1991。
- 2) 大本照憲，藤見俊夫，小場隆太：河川災害における住民の避難行動と災害外力の相関分析，水工学論文集，第52巻，pp.451-456，2008。
- 3) Terunori OHMOTO, Naoki YAMASHITA : INUNDATED FLUSH FLOOD RISK IN CENTRE OF KUMAMOTO CITY, JAPAN, Proc. of the 3rd International Conference on Water & Flood Management ICWFM-2011, Vol.1, pp.251-258, 2011。
- 4) 須賀堯三，上坂恒雄，白井勝二，高木茂知，浜口憲一郎，陳志軒：非難時の水中歩行に関する実験，水工学論文集，第38巻，pp.829-882，1994。
- 5) William E・Dietrich and Peter Whiting : Boundary Shear Stress and Sediment Transport In River Meanders of Sand and Gravel, pp.1-50, American Geophysical Union / Water Resources Monograph 12, River Meandering edited by Shunsuke Ikeda and Gary Parker, 1989。
- 6) M. Nelson and J. Dungan Smith : Flow In Meandering Channels With Natural Topography, Jonathan, American Geophysical Union / Water Resources Monograph 12, River Meandering edited by Shunsuke Ikeda and Gary Parker, pp.69-102, 1989。
- 7) (財)国土技術研究センター：河道計画検討の手引き，山海堂，pp.84-97，pp.109-114，pp.119-124，pp.142-144，2001。
- 8) 土木学会水理委員会：水理公式集[平成11年版]，土木学会，丸善，pp.111-114，1999。