

市街地における洪水氾濫と土砂堆積に関する研究

高橋 保・中川 一・加納 茂紀

CHARACTERISTICS OF THE OVERLAND FLOOD FLOWS AND THE SEDIMENTATION DUE TO BREAKING OF THE LEVEE IN THE URBAN AREA

By *Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA and Shigeki KANOU*

Synopsis

Nowadays, with the development of the outskirts of the big city and with the high degree utilization of the land, gravitation of the population and property to the flood hazardous zones is advancing. It is said that the potential of the flood disaster is increasing.

Characteristics of the flood flows, for example, the advancing velocity of the front, unit stream power on the street and shape of the flood area in the urbanized city are much different from those of them in the plain field or suburbs.

In this paper, by carrying out the hydraulic experiments, the characteristics of the overland flood flows advancing along the street in the modeled urban area were investigated. Numerical simulation was also carried out, and the calculated results were compared with the measured ones. As the results, it was found that the calculated results were in some agreement with the experimental ones, but flood water spread too much near the bank breaking point in calculation. This reason was discussed from the view points of the experimental problems and the calculation methods.

Moreover, concerning to the phenomena of the sedimentation due to breaking of the river banks in the modeled urban area, range and thickness of the sedimentation and grain-size distribution were investigated based on the experimental results.

1. 緒 論

昭和57年7月の長崎水害で、長崎市の中心街を通る中島川が氾濫し、氾濫水が街路を河道化して流れ、通行中あるいは停車中の自動車や路上に設置してあった自動販売機等が流されるという市街地特有とも言える現象が起きた¹⁾。昨年7月の山陰豪雨災害においても、島根県の三隅地区で三隅川右岸堤防が決壊し、堤内地に氾濫した水が道路や駐車場などの空地を選択して流下し、街路に沿った古い木造家屋などが流失・全壊するといった災害が発生した²⁾。長崎災害の場合、中島川から氾濫した流量は、河道のピーク流量が300～400 m³/sec 程度と見積られていることから、それほど大きくはないと考えられる。しかし、氾濫の場が極度に市街化していたことおよび街路に沿った商店やデパート、民家等が浸水防止のためにシャッターをおろすなどの措置をとったことなども要因となって街路に氾濫水が集中したことが洪水規模の割には街路内の氾濫水の流量を大きくしたものと思われる。もし、氾濫の場が田畑や草原のように街路などが無い場合には、このような現象は生じなかったであろう。

このように、市街地内に洪水が氾濫する場合、流入する時の氾濫水の規模（たとえば、流速や水深）によって氾濫状況が異なるであろうが、長崎や三隅地区で見られたような市街地特有の現象が生じる。したがって、既成市街地における避難システムの確立や建物の耐水化あるいは土地開発の規制への指針を得るために、ひいては新しい防災都市の建設に対する合理的な根拠を得るためには、従来の最大浸水深のみに着目するよ

うな一面的な解析では不十分であり、市街地街路内を氾濫水がどのように流動し、それが持つ流体力がどの程度の規模になるかといった動的な特性を明らかにする水理学的な手法を樹立する必要がある。

さらに、大規模な洪水氾濫は破堤を伴う場合が多い。わが国では堤防直下にも家屋が建設され、市街地が形成されているところが少なくない。こういった所では、破堤によって外水に含まれる浮遊土砂のみでなく、堤体の土砂が市街地に氾濫・堆積する。水は河道水位が低下すれば大部分引いていくが、土砂は堆積したまま残り、交通や農耕に重大な影響と被害を与え、その回復にも時間を要する。ところが、土砂の氾濫に関しては、ほとんど研究がなされておらず、土砂の堆積範囲とその規模等についてはほとんど未解明である。

本研究は、こういった状況をふまえ、水理模型実験によって、市街地内の街路を流動する洪水氾濫水の挙動特性を明らかにするとともに、数値シミュレーションを行い、現象がどの程度説明されるかを検討する。ついで、河川堤防の決壊によって堤体土砂が市街地に堆積する範囲とその規模および粒度分布等を実験によって検討する。

2. 市街地における洪水氾濫の実験

実在する市街地の形態や街路の構成および地形などは複雑かつ多種多様であって、特定の地域を対象とした模型実験を行っても、その地域では有効であっても一般性がなく、他の流域に適用することはできない。そこで、ここでは市街地を単純化してかつ現象の本質をそこなわないような模型実験を行い、つぎのことに焦点を絞る。これを明らかにする。すなわち、①市街地街路が存在することで、これがない場合とどのように氾濫水の流動特性、すなわち氾濫水の進行速度、方向、氾濫範囲および水深が異なるか、②街路幅や家屋内への浸水の有無による影響、③地形の影響を明らかにする。

2.1 実験装置および方法

実験装置は Fig. 1 に示すように大別して2つの装置から構成されている。1つは堤内地を想定した氾濫台④である。これは、4.5 m×4.5 mの耐水ベニア製の氾濫台で、表面は白色ビニローゼで塗装されており、10 cm 毎に座標読み取りのため格子線が描かれている。

氾濫台は2層に分かれており、上層部を傾斜させることによって任意の勾配が得られる。台上で氾濫した水は台の縁に達すると段落ちし、樋により集水されて低水槽①に運ばれる。もう1つは、水平に設置された給水槽③で、一定の水頭を保持するように設計された高水槽②から、バルブにより調節された一定流量の水がここに供給される。給水槽には氾濫台一辺中央部に破堤を模擬できるゲートが設置されている。図中の拡大部分に示すように、破堤前は④の部分を閉じかつ⑥を開き、給水槽から供給される水を右側に流し、定常時の流量測定を行った。定常状態となった時点で⑥を閉じ、④を開くことにより氾濫させる。結局、水の循環は①→②→③→④→①である。

市街地をどのようにモデル化するかということは、前述したように、重要な問題である。ここでは、家屋の集合体を想定した、市街地ブロックとして Fig. 2 に示すような、高さ 5 cm、縦横 20 cm の木製のブロックを用い、その木枠の底の4辺に、幅 1.5 cm のプラスチック製の人工芝マットを貼りつけた。このマットの部分を通して水が出入りできるようになっている。ただし、ブロック内での水の流動をおさえ、貯留効果のみを出すように、

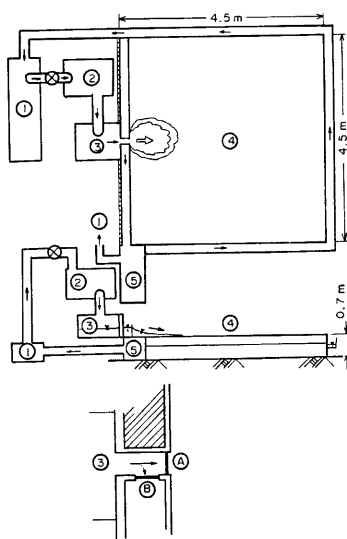


Fig. 1 Experimental apparatus

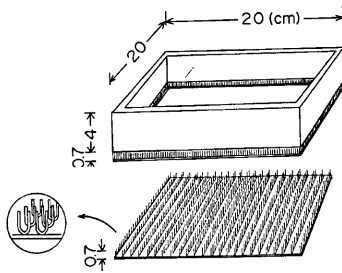


Fig. 2 The sketch of a house block which can simulate submergence

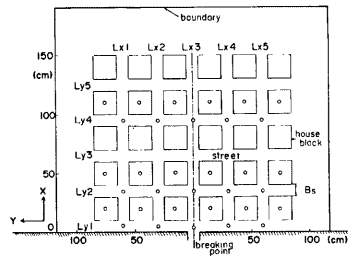


Fig. 3 The arrangement of house blocks.
Symbol $\circ$ is a measuring point of water depth

20 cm 四方の同一マットをその下に敷いた。これによって、市街地ブロック内への浸水を模擬した。浸水が無い場合は、マットを用いずに、非浸透性の底板を有する同様のブロックを用いた。ブロックの配置方法は Fig. 3 に示すように、30個のブロックを縦横に整列させ、ブロック間を街路と見なすことにした。

測定項目は、街路内、ブロック内の浸水深の場所的、時間的变化、街路内のフロントの進行速度、氾濫範囲および流速分布である。浸水深は、3台のサーボ式水位計によって計測し、データレコーダーにサンプリング周波数 125 Hz で収録した。フロントの移動速度および氾濫域は、ローダミンBにより水を着色し、氾濫台上方に設置したビデオカメラで撮影し、映像解析により求めた。流速分布は約 1 cm 四方の紙片をトレーサーとして流して同様の解析を行った。

実験条件は、Table 1 に示すように、地形条件として氾濫台の勾配 i 、氾濫原の周辺に設置した盛土のような、氾濫水の進行を阻止する障害物（境界）の有無（表中の B. C. の欄）、Fig. 3 に示した市街地ブロック間の街路幅（表中の B_s 欄）、およびブロック内への浸水の有無（表中の Submergence 欄）の条件を与えた。なお、流量は、瞬時に 2/l sec 出るように設計されている。

2.2 実験結果とその考察

Fig. 4(a)～(d) および Fig. 5(a)～(d) は、それぞれ浸水が有る場合とない場合における、街路幅と境界の有無による氾濫形状の時間変化を示したものである。浸水の有無による氾濫水の拡がりの違いについてみると、浸水が有る場合、ブロック内へ氾濫水の一部と運動量が輸送されるため、浸水がない場合に比べて街路でのフロントの進行が遅くなっている。また、氾濫形状も、ブロックを配置しないときのような円形にはならず、有賀³⁾が、小さなモルタルブロックを多数施して氾濫実験を行ったときに得られた三角形の氾濫形状に近いものとなっている。一方、浸水が無い場合には、中央街路に沿って一気にフロントが進行するとともに、市街地への流入前における横方向への拡が

Table 1 Experimental conditions

CASE	SUBMERGENCE	i	B.C.	B_s (cm)
1-1	YES	1/500	YES	5
1-2	YES	1/500	YES	10
1-3	YES	1/500	YES	15
2-1	YES	1/500	NO	5
2-2	YES	1/500	NO	10
2-3	YES	1/500	NO	15
3-1	YES	-1/200	YES	5
3-2	YES	-1/200	YES	10
3-3	YES	-1/200	YES	15
4-1	YES	-1/200	NO	5
4-2	YES	-1/200	NO	10
4-3	YES	-1/200	NO	15
5-1	NO	-1/200	YES	5
5-2	NO	-1/200	YES	10
6-1	NO	-1/200	NO	5
6-2	NO	-1/200	NO	10

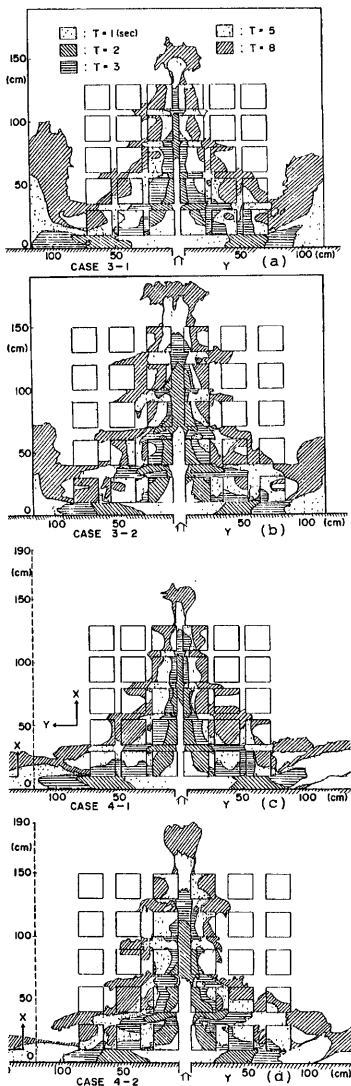


Fig. 4 Experimental results concerning to time change of flooded area when house blocks are inundated with water

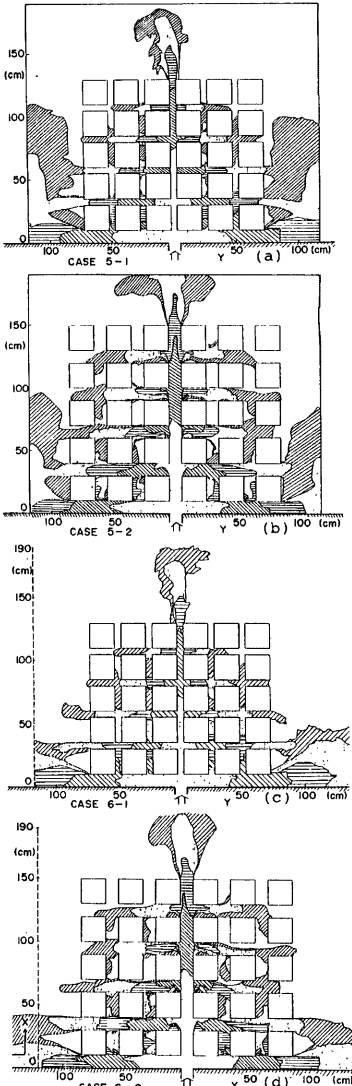
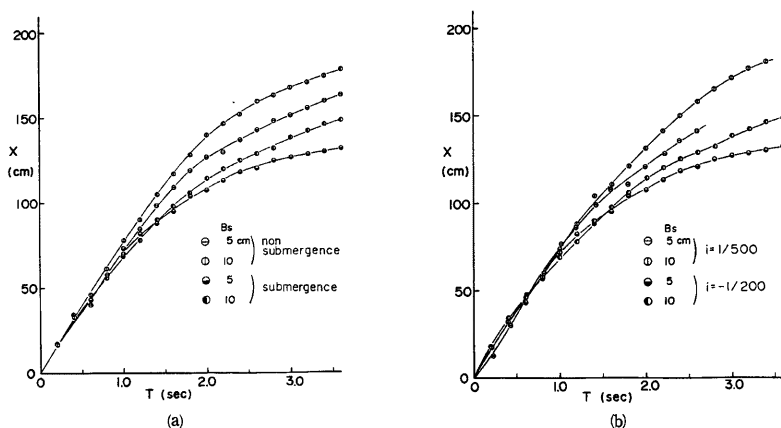


Fig. 5 Experimental results concerning to time change of flooded area when house blocks are not inundated with water

Fig. 6 (a), (b) Position of front along L_{x3} line as a function of time

りがかなり顕著である。横方向への氾濫は、破堤口直前に中央街路が存在しているために、遮蔽効果が大きく現われる街路幅が 5 cm の場合の方が、著しい。

Fig. 6(a) は、中央街路におけるフロントの走時曲線を浸水の有無および街路幅をパラメータにとって示したものである。この図からも、上述したことが明確に認められる。**Fig. 6(b)** は、勾配が中央街路のフロントの移動速度に与える影響を街路幅をパラメータにとって示したものである。この図は、浸水がある Case 1-1, 1-2 と Case 3-1, 3-2 とを比較したものであって、浸水のため時間内に移動速度が減少するという影響もあるが、勾配の影響がかなり著しいことが認められ、微妙な地形の傾斜によって、氾濫水の流動が影響を受けることがわかる。

Fig. 7(a) および **(b)** は、Case 4-2 および Case 6-2 に関し、街路 $L_{y1} \sim L_{y5}$ における水位の分布を示したものである。Case 4-2 では、ブロック内へ浸水する分だけ街路を通る流量が減少し、その結果水位が浸水のない Case 6-2 に比べて低くなっている。このことは L_{y1} の街路では顕著でないが、 L_{y2}, L_{y3} で顕著である。また、中央街路とそれに平行な街路では水深に顕著な差が認められる。

以上のように、市街地に洪水が氾濫する場合、浸水の影響や街路幅、勾配などによって氾濫水の流動特性

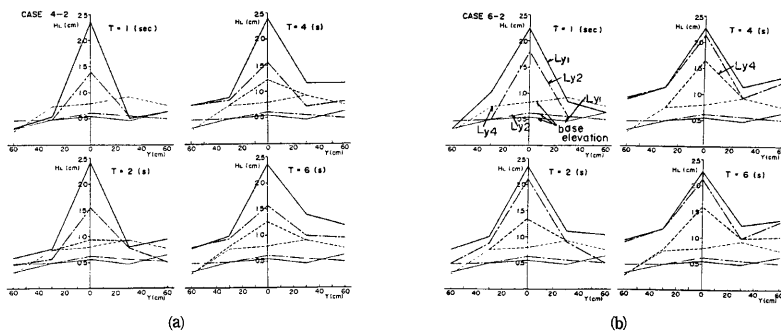


Fig. 7 Water surface profiles along streets or in houses

がかなり影響されることがわかった。これらの事実から、実際の洪水氾濫においても同様の現象が起きることが予想され、これらを考慮した対策なら数値計算による予測が行われなければならない。さらに、実際の現象とモデル実験との相違を十分に検討しなければならない。

3. 街路内を流動する氾濫水の数値シミュレーション

今回行った洪水氾濫の実験から、市街地の街路網、ブロック構造、微地形等が現象を大きく規定する重要な要素であることが判明した。しかし、実際に存在する市街地は、実験で行ったような単純な街路網ばかりで構成されてはおらず、また、街路とブロックとの相対的な規模も、実験で行ったものが必ずしも適当であるとは言えない。このような多岐にわたる支配要因の組合せに対する現象を的確に予測する方法としては、模型実験によるよりも市街地の構造を十分考慮に入れた数値モデルによるシミュレーション計算が有効であると考えられる。そこでここでは、街路を格子サイズで表わして、街路内における氾濫水の挙動を有限差分法による数値シミュレーションによってどの程度説明できるかを検討する。

3.1 基礎方程式

数値計算に用いた基礎式は、以下に示すような水深方向に積分した二次元の流体運動を表わす運動量保存式と連続式である。

$$\frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} = -g h \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = -g h \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 M および N ；それぞれ x および y 方向について、 $M=uh$ 、 $N=vh$ と定義した流量フラックスであって、 u および v ；それぞれ x および y 方向の流速成分、 h ；水深、 H ；水位 ($H=z_b+h$ 、 z_b ：基準面の高さ)、 ρ ；水の密度、 g ；重力加速度、 τ_{bx} および τ_{by} ；それぞれ x および y 方向の底面せん断応力である。ここでは、底面せん断応力の算定にあたって、Manning の抵抗則を用いることにすれば、 τ_{bx} および τ_{by} はそれぞれ次式で与えられる。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}}, \quad \tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 n は Manning の粗度係数である。

さて、流速の場所的变化が大きくなるところでは、基礎式において慣性項が無視できなくなると言われている⁴⁾。しかしながら、基礎式で水平粘性項を省略していることや、静水圧近似を行っていることから、今回の計算では、加速度項のうち時間項と線型項のみを考慮し、式(1)左辺第3項および式(2)左辺第2項を省略した形で数値計算を実行することにする。この省略した基礎式を岩佐ら⁵⁾の差分スキームの方法に従い差分化すると以下のように表わせる。

x 方向の運動量式：

$$\begin{aligned} & \frac{M_{i,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^n}{2\Delta t} + \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{1}{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}} \left(\frac{M_{i+1,j+1/2}^n + M_{i,j+1/2}^n}{2} \right)^2 \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}} \left(\frac{M_{i,j+1/2}^n + M_{i-1,j+1/2}^n}{2} \right)^2 \right] \\ & = -g \frac{(h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1})(H_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - H_{i-1/2,j+1/2}^{n+1})}{2\Delta x} \\ & \quad - g n^2_{i,j+1/2} \frac{\bar{U}_{mi,j+1/2} \sqrt{(u_{mi,j+1/2}^n)^2 + (v_{mi,j+1/2}^n)^2}}{[(h_{i+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2}^{n+1})/2]^{1/3}} \quad \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

y 方向の運動量式：

$$\begin{aligned} & \frac{N_{i+1/2,j}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^n}{2\Delta t} + \frac{1}{4y} \left[\frac{1}{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}} \left(\frac{N_{i+1/2,j}^n + N_{i+1/2,j+1}^n}{2} \right)^2 \right. \\ & \quad \left. - \frac{1}{h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1}} \left(\frac{N_{i+1/2,j}^n + N_{i+1/2,j+1}^n}{2} \right)^2 \right] \\ & = -g \frac{(h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1})(H_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} - H_{i+1/2,j-1/2}^{n+1})}{2\Delta y} \\ & \quad - g m_{i+1/2,j}^2 \frac{\bar{V}_{mi+1/2,j} \sqrt{(u_{mi+1/2,j}^n)^2 + (v_{mi+1/2,j}^n)^2}}{[(h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1})/2]^{1/3}} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

連続式：

$$\frac{h_{i+1/2,j+1/2}^{n+3} - h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1}}{2\Delta t} + \frac{M_{i+1,j+1/2}^{n+2} - M_{i,j+1/2}^{n+2}}{\Delta x} + \frac{N_{i+1/2,j+1}^{n+2} - N_{i+1/2,j}^{n+2}}{\Delta y} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_{mi,j+1/2} &= (M_{i,j+1/2}^{n+2} + M_{i,j+1/2}^n) / (h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}) \\ u_{mi,j+1/2}^n &= 2M_{i,j+1/2}^n / (h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}) \\ u_{mi+1/2,j}^n &= 2M_{i+1/2,j}^n / (h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1}) \\ \bar{V}_{mi+1/2,j} &= (N_{i+1/2,j}^{n+2} + N_{i+1/2,j}^n) / (h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}) \\ v_{mi,j+1/2}^n &= 2N_{i,j+1/2}^n / (h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i-1/2,j+1/2}^{n+1}) \\ v_{mi+1/2,j}^n &= 2N_{i+1/2,j}^n / (h_{i+1/2,j+1/2}^{n+1} + h_{i+1/2,j-1/2}^{n+1}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

なお、摩擦項は2次であるので非線型となるが、ここに M^{n+2} 、 N^{n+2} なる項を取り入れることで Vasiliev の不安定を避けられるようになっている。

3.2 境界条件

境界条件は Fig. 8 に示すように、破堤口（1メッシュ）における流入流量フラックスとそのメッシュ中央における水深を与えることにした。水深は、サーボ式水位計による実測値を0.008秒間隔で与え、流量フラックスは近似的に、0.1秒から60秒までの平均水深と、その時刻における水深との比を、定常時の流量 2.0 l/sec に乗じ、これを流量フラックスに換算して与えた。

街路以外の境界、すなわちブロック、堤防および周囲の境界に直角に流入する流量フラックス M 、 N をゼロとしている。計算は、勾配が $-1/200$ 、街路幅が 10 cm で、市街地の周囲に境界を設けた Case 5-2 のみを対象とする。粗度としては、一次元の河道を氾濫台上に設け、等流状態で計測された水深 h と流量 Q および勾配 i から Manning の抵抗則によって求め、 $n=0.008$ という値を採用した。先端条件には、threshold 水深で規定される条件を用い、これを 1 mm とした。すなわち、

$$h < 1 \text{ mm} \rightarrow M \text{ or } N = 0$$

空間差分間隔 Δx および Δy は両者とも街路幅、すなわち 10 cm とし、時間差分間隔は 1/2000 秒である。なお、計算条件を Table 2 にまとめて示す。

3.2 計算結果の考察と実験値との比較

Fig. 9 は Case 5-2 に対応する氾濫水の拡がりの計算値と実験値とを示したものである。これらを比較

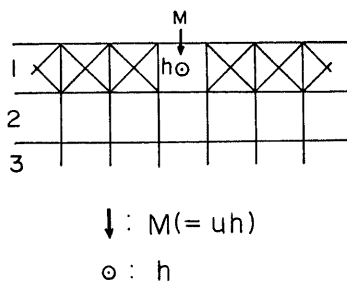


Fig. 8 Boundary condition of the inflow

Table 2 Conditions of calculation

$B=10.0$ (cm)
$i=-1/200$
$\Delta X=\Delta Y=10.0$ (cm)
$\Delta t=1/2000$ (sec)
$g=980$ (cm/sec ²)
$n=0.008$ (sec/m ^{1/3})
$\rho=1.0$ (g/cm ³)

すると、中央街路においては一気にここを流動する様子が計算で再現されており、比較的良好な結果を得ている。しかし、その他の街路で、実験値よりも計算値の方が、かなり速く先端が移動しており、全体的に拡がり過ぎている。この理由としては、実験上の要因として、水深が小さいために、表面張力の影響が大きくなり、先端が移動しにくくなることが挙げられる。計算上の問題としては、つぎのようなことが考えられる。すなわち、実験では氾濫水がジェットの様状を示して中央街路を一気に進行するのに対し、計算では、静水圧近似によって計算される水面勾配で横方向への運動量輸送が顕著となり過ぎる傾向にあることである。このことについて、ブロックを配置しない場合の実験値と計算値とを比較することによってさらに検討してみよう。Fig. 10 にこの結果を示す、実験値では、破壊後3秒程度までは円形の氾濫形状を示しているが、計算値では出口付近で横方向の氾濫が顕著である。これは、決壊口直前のメッシュでは比較的水深が大きく計算され、横方向への水面勾配が顕著となり、流速の v 成分が u 成分と比較して小さいにもかかわらず 1 mm 以上の水深であればフロントは進行するためであると考えられる。実際には、流速の u 成分と v 成分との合成ベクトルの方向にしか進行しないのに対して、それを差分によって分離しているため、斜め方向へ進行する現象を適切に表せなかったものであろう。今後、このことについてさらに検討を加え、モデルを改良していく必要がある。

Fig. 11 は、Case 5-2 に対する中央街路の水深の実験値と計算値とを比較したものである。計算値の水深

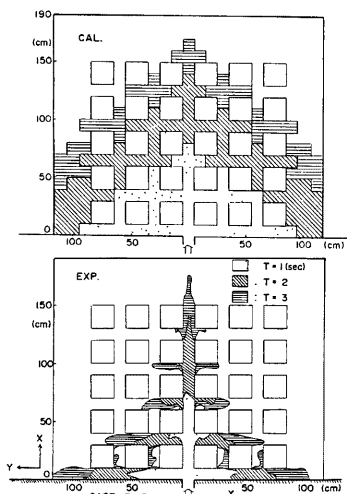


Fig. 9 Comparison between calculated flood area and experimental one

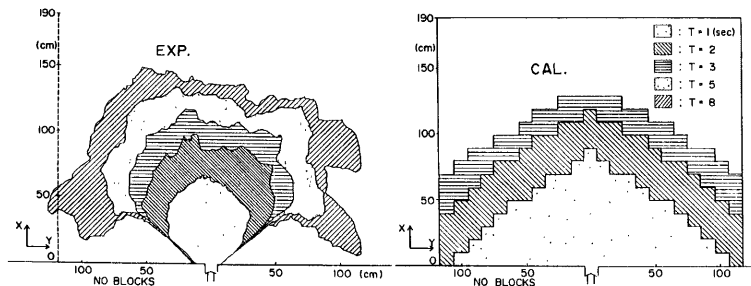


Fig. 10 Comparison between calculated flood area and experimental one when house blocks are not arranged

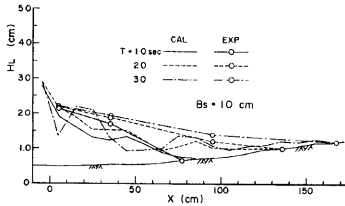


Fig. 11 Comparison between calculated water surface profiles and experimental ones along the L_{23} street

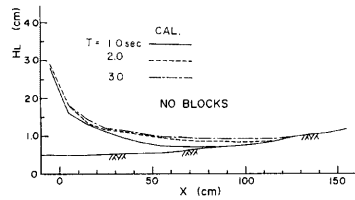


Fig. 12 Comparison between calculated water surface profiles when house blocks are not arranged

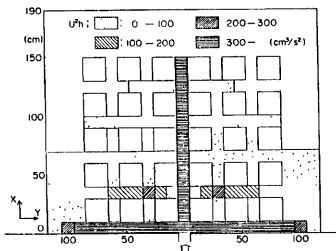


Fig. 13 (a) Distribution of unit stream power under conditions of arranging house blocks

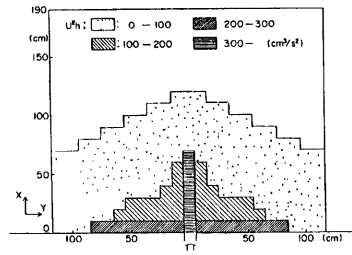


Fig. 13 (b) Distribution of unit stream power under conditions of no house blocks

は、平均してみると実測値より若干小さくなっている。これは、前述したように、横方向への流れが過分に計算されて中央街路内の水深が小さくなったものと考えられる。**Fig. 12** は、ブロックを配しない場合の破堤口中心線上の水面形を示したものである。街路がない場合、氾濫水は制約する境界がないため、全体的に拡がるので水深は街路がある時と比べて小さくなっている。また、**Fig. 12** では、水深がほとんど変動していないのに対し、街路を有する場合の計算値は若干の変動が見られる。これは、街路が交差する地点で横方向への氾濫が生じるため、その部分での運動量の変換と、それが計算に不安定性を与えているのではないかとと思われる。

Fig. 13(a) および **(b)** は、それぞれ Case 5-2 およびブロックを配置しない場合の $t=3$ 秒における流体力の分布を示したものである。なお、ここで言う流体力とは、流速の2乗に水深を乗じたものである。線型計算であるため、流入境界における流速の影響を受けて、破堤口中心線上において両者ともかなり大きな流体力を示している。しかし、ブロックを配置しない場合、破堤口中心線上の両側でも大きな流体力が表われており、街路がある場合に比べて流体力が分散していることがわかる。このように、街路内に直進的に流入する氾濫水は、他の部分と比べて、街路内でかなり大きな流体力をもつことが確認された。しかし、これが実際現象としてどの程度の規模となるのか、また、家屋等の構造物に作用する外力を評価するためには、モデルの相似律の問題等を十分検討しなければならない。

4. 破堤に伴う市街地の土砂堆積

ここでは、破堤によって堤体の土砂がどのように流送され、堆積形状および堆積規模が市街地街路の幅および堤体構成材料の土砂の粒度分布によってどのような状況呈するのかという事に注目して実験を行い、

得られた若干の成果について述べる。

4.1 実験装置および方法

実験装置は Fig. 14 に示すように、河道部水路⑦と氾濫台⑥とから構成されている。河道部は、長さ 8 m、幅および深さが 20 cm の鋼製水路である。給水方法は以下のである。すなわち、まず周波数変換器①に直結したパーソナルコンピュータ②に所定の流量をセットする。ついで、ポンプ④によって低水槽⑨より吸水し、吸水した水を流量計⑤で feed back 方式で検定させ、所定の流量を供給させる。水路には氾濫台の端から 130 cm の部分に幅 20 cm の堤体作成用の切り欠きを設け、そこにゲートを架設した。水路下流端には、高さ 3 cm の水位調節用のせきを設けてある。破堤の方法は以下のように行った。すなわち、まず切り欠き部のゲートの外側に幅 20 cm、高さ 5 cm 奥行 10 cm の直方体の堤防を作る。

ついで、河道内に通水し十分定常になった段階でゲートを瞬時に引き抜き、破堤させた。

決壊口からの流出流量は、実際には次式で求まる。

$$Q_b = Q_{in} - Q_{out} - dS/dt$$

ここに、 Q_b : 決壊口からの流出流量、 Q_{in} : 水路への給水量、 Q_{out} : 水路下流端からの流出流量、 S : 河道内の貯留量である。 dS/dt の項は、河道内の水位変化から求まるはずであるが、決壊口付近の水面形が極めて複雑で精度よく測定するのが困難なため、上式によって決壊口からの流出流量を求めることができなかった。そこで、ここでは決壊口を有しない場合に予め求めておいた下流端での流量-水深検定曲線と、決壊口を有する場合の下流端のそれとの差から、決壊口からの流出流量を求めた。その結果を Fig. 15 に示す。この場合、河道内における貯留量変化に伴い、下流端の水位変化には time lag が生じているが、定常時にはほぼ 2 l/s の流量となっていることがわかる。なお、堤体の材料としては Table 3 に示すような特性をもつ 3 号

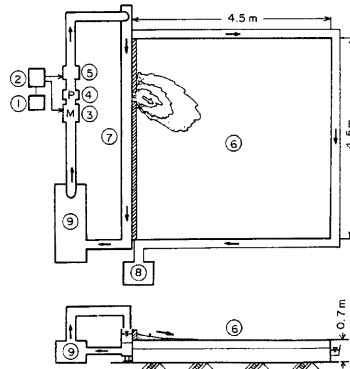


Fig. 14 Plan and vertical views of experimental apparatus

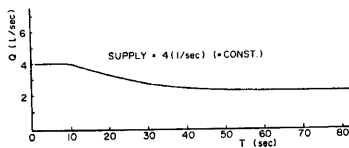


Fig. 15 Hydrograph at channel end

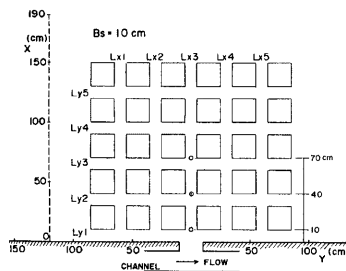


Fig. 16 Arrangement of house blocks

Table 3 Experimental conditions

CASE	MATERIAL	$B_s(\text{cm})$
7-1	NO. 3	NO
7-2	$d_m = 1.49(\text{mm})$	5
7-3	$\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.26$	10
7-4		15
8-1	NO. 5	NO
8-2	$d_m = 0.54(\text{mm})$	5
8-3	$\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 1.26$	10
8-4		15
9-1	MIXED	NO
9-2	$d_m = 1.45(\text{mm})$	5
9-3	$\sqrt{d_{84}/d_{16}} = 2.46$	10
9-4		15

砂，5号砂および混合砂を用い，市街地のブロックとしては，洪水氾濫の実験に使用した浸水をしないブロックを用いた。

測定項目は，土砂の堆積形状，堆積厚および Fig. 16 に丸印で示した3点における水深の時間変化である。形状はビデオカメラで，堆積厚は給水停止後ポイントゲージで計測した。水深は，洪水氾濫の実験と同様の方法で計測，解析を行って求めた。

実験条件は，Table 3 に示すとおりであって，河道部の勾配は1/500，氾濫台のそれは1/200である。なお，表中 B_s 欄の NO はブロックを配置しないケースを意味する。

4.2 実験結果とその考察

Fig. 17, 18 および 19 は，それぞれ3号砂，5号砂および混合砂を用いたときの破堤後3分30秒後の土砂の氾濫形状である。まず市街地ブロックを配置しない Fig. 17(a), 18(a) および 19(a) について，堆積形状を考察しておこう。これらは3者とも同様の形状をしており，土砂の違いによる有意な差は認められない。すなわち，3者とも主流の方向が決壊口中心線のx軸から右に約20°程度偏倚し，堆積範囲はこれより左側が大きくなっている。また，主流方向の流速が大きいため，決壊口からこの方向に向かって土砂は堆積せず，移動床の場合は洗掘領域となる部分を形成している。ただ，通水時間が短いため，土砂の流送が十分でなく，静的平衡状態に達していないことも有意な差が表われていない原因と考えられる。ついで，ブロックを配置したときの堆積形状，および堆積厚について考察しよう。Fig. 17(b)~(d), Fig. 18(b)~(d) および Fig. 19(b)~(d) は，それぞれ3号砂，5号砂および混合砂に関して堆積形状に与える街路幅の影響をみたものである。Fig. 20 は，5号砂を用いたときの各街路幅に対する土砂の堆積厚の分布を示したものである。今， L_{g2} ，

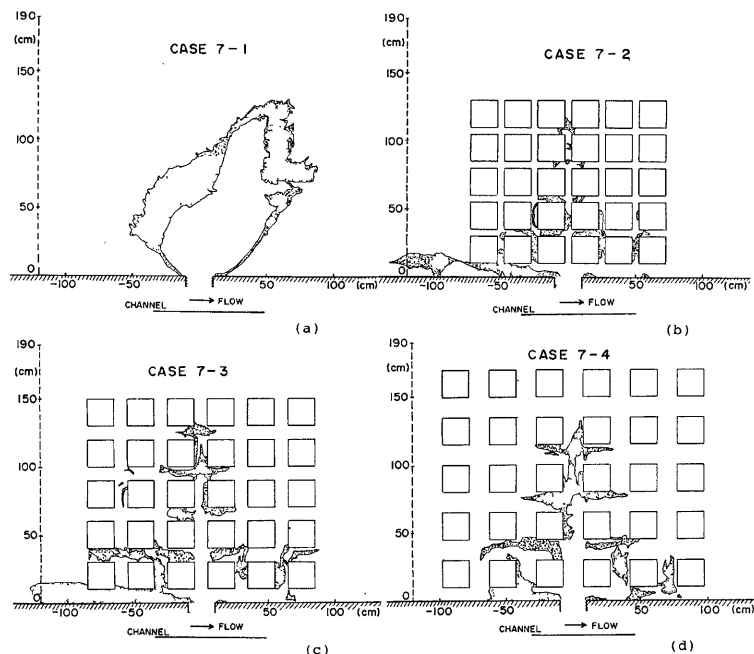


Fig. 17 Plan distribution of sediment (sediment class: NO. 3)

L_{y3} および L_{y4} の街路に注目すると、5, 10, 15 cm の街路幅の順に堆積幅が狭くかつ堆積厚が大きくなっている。これは、街路幅が 5 cm の時は街路幅全体に土砂が厚く堆積するのにに対し、街路幅が大きくなると街路内で土砂が堆積している部分としていない部分が存在し、2 次元的に分布するようになり、広くかつ薄く堆積するようになるからであると考えられる。破堤口中心線上の街路についてみると、逆に 15, 10, 5 cm の順で街路内の堆積域が広くかつ厚くなっている。これは、この順に、破堤口から流出した土砂が街路内に流入しやすいからであろう。なお、同一街路幅において、土砂の違いによる堆積範囲および規模の有意な差は認められなかった。これは、通水時間が短かったことが最大の原因であって、これを長くすれば、各粒径に対する移動限界および停止限界摩擦速度等の要因によって堆積範囲および規模が異なることが予想される。

最後に、混合砂を用いた時の各堆積域における粒度構成に着目して考察を加えよう。**Fig. 21** は、**Fig. 19** に示した各地点の土砂を採取してその平均粒径 d_m と $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の関係をみたものである。Case 9-1 では主流方向の左側に、Case 9-3 および 9-4 では中央街路の左側外縁部に比較的均一で大粒径の砂が堆積していることがわかる。一方、Case 9-2 では、ほとんどの地点でもとの混合砂と同一の粒度構成となっている。このことは以下のように考えられる。すなわち、氾濫水の主流方向が右へ偏倚している結果、掃流力は右側の方が大きく、この部分の土砂は十分級分散することなく、一挙に流送されるのに対し、左側は十分級分散して拡がる。その間、水深が薄いために露出面積の大きい大粒径の砂は流体力を受けやすく、その結果流送されやすくなる。一方、小粒径の砂は大粒径の砂に遮蔽され、流送されにくい。したがって、大粒径の砂が外縁部に比較的均一に堆積するものと考えられる。また、Case 9-2 の場合は、街路幅が 5 cm であるため、

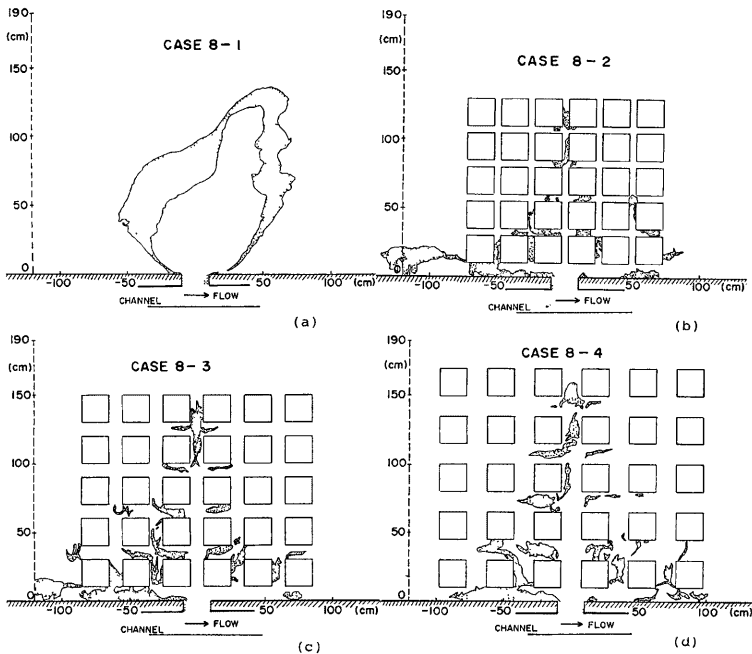


Fig. 18 Plan distribution of sedimentation (sediment class: NO. 5)

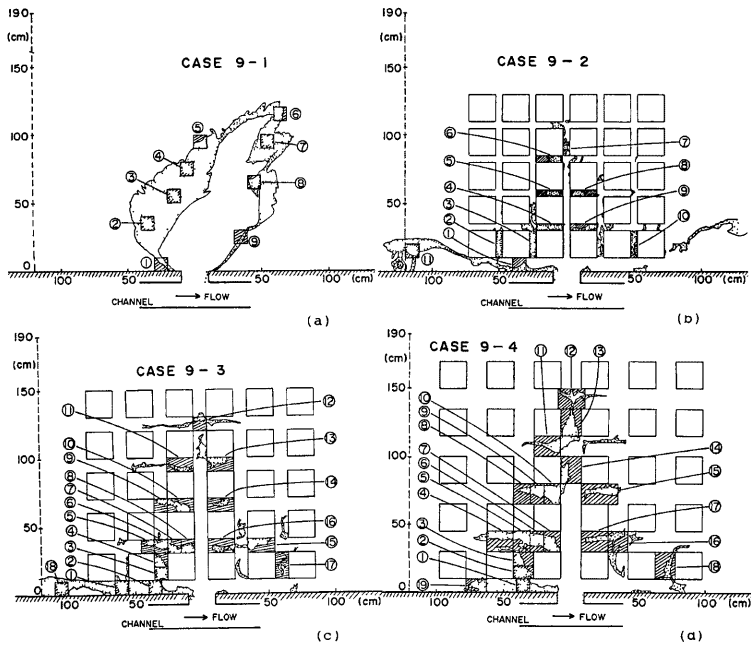


Fig. 19 Plan distribution of sedimentation, and sampling points of sediment (sediment class: mixed)

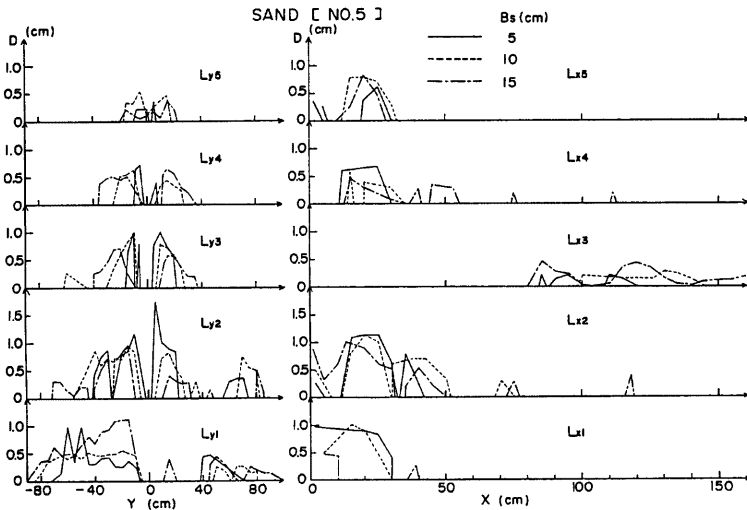


Fig. 20 Vertical distribution of the height of sedimentation along each street

堆積幅に比して堆積厚が大きく、深さ方向には分級されにくい。そのため、初期に輸送された土砂がそのまま残っているのではないかと考えられる。

5. 結 語

以上、市街地を単純化したモデルを用いて、市街地街路内における洪水氾濫水の挙動を実験結果に基づいて考察するとともに、数値シミュレーションによる検討を加えた。ついで、堤体土砂の流出による土砂堆積に関して実験的検討を行った。得られた主要な結果と問題点を要約して結語とする。

(1) 市街地の家屋内に氾濫水の浸水が有る場合と無い場合について、街路内のフロントの進行速度、氾濫形状、および水深の分布を実験結果をもとに検討した。その結果、フロントの進行速度に関しては、浸水がある場合、家屋ブロック内に氾濫水の一部と運動量が輸送されるため、浸水がない場合に比べて街路内のフロントの進行は遅くなった。氾濫形状に関しては、浸水がある場合、ブロックを配置しないときのような円形には拡がらず、むしろ三角形形状に近くなった。浸水がない場合には、街路を一気に進行してより広い範囲にまで拡がった形状を示した。水深に関しては、浸水がある場合、浸水する分だけ街路内流量が減少し、その結果浸水のない場合と比べて水深が小さくなった。

(2) 同様に、街路幅および地盤の勾配の影響についても検討した。その結果、水深に関しては、水深が小さいために測定上の困難さも作用して有意な差は認められなかったが、勾配に関しては、正勾配と逆勾配との実験結果を比較したことによるが、勾配の影響がかなり著しいことが認められ、地盤の傾斜や微地形によって氾濫水の流動がかなり強く影響されることがわかった。街路幅に関しては、中央街路への流入量に直接的に関係することから、遮蔽効果の小さい広い街路 (15 cm) の方がフロントの進行速度が大きかった。しかしながら、広すぎても二次元的な拡がり呈するようになって減衰しやすくなることも考えられる。

(3) 数値シミュレーションを行い、実験値と比較した結果、水深の計算値は実験値よりも薄くかつ氾濫域が大きくなった。また、ブロックを配置しない場合、実験では円形に拡がるところが計算では三角形形状になり、実験結果を十分に説明する計算結果が得られなかった。これには、実験上の問題として、水深が小さい流れでは表面張力がかなり影響し、拡がりにくいということが挙げられる。モデル上の問題として、決壊口前面のメッシュでは、横方向の水面勾配が急となり、これによって計算される流速の v 成分と u 成分との合成ベクトルの方向にしか水粒子は輸送されないのに対して、1 mm 以上の水があれば、先端が進行するという先端条件のため、水面勾配で計算される w 方向への拡がりが増大したものと考えられる。これによって、水深の大きい破堤口近傍でかなり大きな横方向の流れが生じ、三角形形状に氾濫していくものと思われる。したがって、決壊口近傍では、別途急変流的な取り扱いを行う必要がある。今後、これについてさらに検討を加え、モデルを改良していく必要がある。

(4) 街路がある場合とない場合とを対象として流体力の分布を検討した。その結果、街路がある場合、そこでかなり強い流体力が生じること、これがない場合、流体力が周囲に分散することがわかった。このことから、市街地を対象とした氾濫計算を行う場合、市街地の形状と街路の構成を十分評価できるような取り扱いをしなければならないことがわかった。そのためには、平面的および空間的に建物占める割合、たとえ

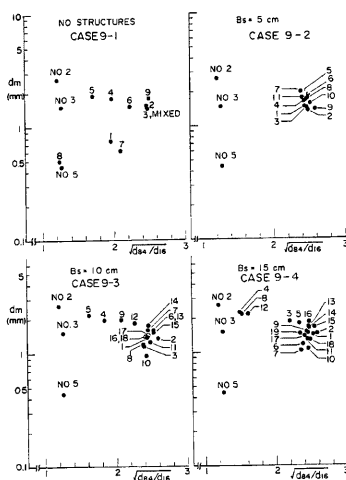


Fig. 21 Relation between sediment mean diameter d_m and $\sqrt{d_{84}/d_{16}}$ in each sampling point when mixed sediment is used.

ば建ぺい率などの情報を取り入れて数値計算することが考えられよう。

(5) 破堤に伴う堤体土砂の流出による土砂堆積の実験を行い、以下のような結果を得た。すなわち、同一街路幅では、土砂の粒径による堆積範囲および規模に有意な差は見られなかった。しかしながら、街路幅の影響はかなり顕著で、破堤口中心線上の街路を除けば、街路が狭いほど土砂は輸送されにくく街路に厚く堆積した。このため、混合砂を用いた実験では、街路が狭いと分級が進まず、逆に街路が広いと土砂は薄く堆積し、水深が小さいために露出面積の大きい大粒径の砂ほど大きな流体力を受け、流送されやすくなる。その結果分級分散が進行して大きい粒径の土砂が堆積域の前縁に分布することが明らかにされた。

最後に、本研究を遂行するにあたり、実験や資料整理に協力していただいた京都大学大学院学生西崎丈能君に深謝する。なお、本研究の一部は、昭和58年度文部省科学研究費（一般C）の補助を受けた。また、氾濫計算を行うにあたり、京都大学大型計算機を利用した。関係各位に記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 高橋 保・大久保賢治・中川 一：昭和57年長崎豪雨における中島川の洪水氾濫解析，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，1983，pp. 109-126.
- 2) 河田恵昭・中川 一：三隅川の洪水災害——洪水氾濫と家屋の被害——，京都大学防災研究所年報，第27号B-2，1984，pp. 179-196.
- 3) 有賀世治：有堤河川の破堤による氾濫区域の推定に関する実証的研究（第1報および第2報），東海大学紀要，No. 8 および No. 9，1977，pp. 133-178.
- 4) 伊藤 剛編：数値計算の応用と基礎（水理学を中心として），アテネ出版，1971，pp. 1-27.
- 5) 岩佐義朗・井上和也・水鳥雅文：氾濫水の水利の数値解析法，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，1980，pp. 305-317.