

洪水氾濫による家屋流失の危険度評価

高橋 保・中川 一・加納 茂紀

RISK ESTIMATION AGAINST WASHED AWAY OF WOODEN HOUSES BY A FLOODING

By *Tamotsu TAKAHASHI, Hajime NAKAGAWA*
and *Shigeki KANOU*

Synopsis

In Janan, there are many wooden houses in flood hazardous zone. It seems that the wooden houses are comparatively easy to be swept away due to its weak base structures. By carrying out the model experiments on hydraulic force acting on the house, it was found that there were linear relations between the moment M around the bottom of the pillar and the hydraulic force factor u^2A by taking water depth h as a parameter. Then applying the maximum estimated moment value of resistance to collapse derived from a real scale wooden house test to this relation, we obtained the curves which present the critical combinations of the depth and velocity in the flood flow which will destroy the houses. So far river flowing data showed rather good agreements to these critical lines, whereas, tsunami data did not. The main reason to this discrepancy was attributed to the difference of mechanism of external force between flow and wave.

Resistance of a window glass against hydrodynamic pressure were examined and the risk of the glass window failure which may result in a severe damage to the house was discussed. Moreover, in relation to hydraulic force, effects of existence of the other houses with various arrangement were also examined.

1. 緒 言

従来、我が国の治水政策の根幹は、河道改修を推し進め、人命および財産は「堤防で守る」というところにあった。しかしながら、昭和51年の台風17号による災害を契機に、総合治水計画が打ち出され、従来の河川改修工事等のハードな対策を推し進めると同時に、土地の利用方法、水害危険区域の公表、水害保険、避難対策および災害の予警報等のソフトな対策をも含めた総合的な治水政策を行なおうという方向に転換してきた。この方針に基づく洪水防御システムは都市河川を中心に徐々に充実しつつあり、また、これまでの河道改修による連続堤の整備や洪水防御ダムの統合管理等の整備により、大河流域における primitive な形での災害は生じにくくなっている。しかし、昭和57年の長崎災害や昭和58年の山陰豪雨災害にみられるように、中小都市河川や二級河川の整備の遅れと異常外力が相乗することにより、まだまだ大災害が発生する可能性を有している。したがって、洪水による被害を最小限にとどめるには、総合治水対策をさらに充実することが急務となろう。

最近、過去の水害による洪水深の分布や流向等を記した浸水実績図が公表されつつあり、流域における氾濫危険区域が示されるようになってきた。これは災害を減ずる方向に寄与することはもちろんであるが、一方では住宅が多数、洪水に対して脆弱な地域に建てられている現実を示すものとなっている。狭隘で平地の少ない我が国土においてはある程度やむを得ないところもあるが、そこに居住する人々の洪水防御に対する過信や危険性に対する無知はさらに被害を高める要因ともなり得るものであり、従って、洪水という事象に

対し異常外力があることを認めた上で、その危険性および防御システムの信頼性を捉えることを共通認識にすることが重要となろう。

さて、我が国の住宅家屋の多くは木造であり、洪水氾濫時には容易に浸水を許し、あるいは流水によって破壊される危険性を孕んでいる。また、前述したように、都市化の進行によって、安価な土地を求めるために、洪水に対して脆い場所に安価な住宅を建てることとなり、ますますその危険性が増している。それ故、氾濫危険区域では、木造家屋を代表とする比較的弱い建造物に対して、浸水時の建造物の安全性、すなわち、変形や倒壊流失の危険に対する安全性を満たすような基準を定めねばならないと考える。実際、アメリカでは洪水氾濫原に家屋を建てる場合、家屋の構造に関して各種の規定があり、それを満足するものでないと建設許可が下りないこととなっている。ただし、過った判断に基づく安全性の確立は、危険であるにもかかわらず家屋に固執しようとする可能性を生じるかもしれない。従って、まず、構造的に比較的弱いとされる木造家屋が、流水によって受ける流体力に対し、どれほどの耐力を有するのか、また、それを支配する因子は何かを明らかにする必要がある。さらに、これをもとに、水理学的な根拠に基づいた洪水に対する家屋の流失危険範囲の予測および土地の開発規制に対する指針を明らかにすることも必要となろう。

本研究は、以上のことを踏まえ、地域における洪水災害危険度を評価する一段階として、洪水氾濫危険区域における木造家屋の流失危険度について、若干の考察を行なうものである。

2. 木造家屋の構造と耐力

2.1 木造家屋構造の耐力と外力

まず、木造家屋構造の耐力に関する規定について検討しよう。我が国では、この規定は建築基準法に含まれるものであるが、具体的には「建築基準法施工令」(以下施工令)に詳しいので、同法令について検討する。さらに、これと比較する意味で「アメリカにおける建築物の耐水化と技術基準」について検討する。

施工令¹⁾においては、木構造に関し「構造強度」の規定が第3章第3節にある。ここでは、土台および基礎について第42条第2項に「土台は、一体の鉄筋コンクリート造りまたは無筋コンクリート造りの布基礎に緊結しなければならない」とある。筋かいについては第45条に規定があり、さらに構造耐力上必要な軸組等に関しては第46条に「構造耐力上必要な部分である壁、柱および横架材を、木造建築物にあっては、すべての方向の水平力に対して安全であるように、各階のはり間方向およびけた行方向に、それぞれ壁を設けまたは筋かいを入れた軸組を釣り合いよく配置しなければならない」とされている。しかし、ここでは具体的な強度については述べられていない。

つぎに、構造計算で考慮する外力について検討する。第84条から第88条において、荷重および外力の種類として、固定荷重、積載荷重、積雪荷重、風圧力および地震力を取り扱われている。我が国は地震国であり、また地域によっては台風の常襲地帯、多雪地帯でもあるので、このような外力が当然取り上げられよう。そのほかに、第83条第2項に「建築物の状況に応じて、土圧、水圧、振動および衝撃による外力を採用しなければならない」とあるが、たとえば、洪水危険地域においては家屋構造をどのようにすべきかといったような流体力に対する具体的な規定は明確ではない。そこで、水平外力として、流水による流体力と類似の風圧力と地震力に関する外力の取り扱い方をみてみよう。

第87条第2項の『風圧力』の規定に基づき、高さ16m未満の建築物の場合、風圧力は $P=Cq=60C\sqrt{h}$ で、16m以上の場合、 $P=120C\sqrt{h}$ に従って外力を計算することになっている。同式において、風速として昭和9年の戸台風の瞬間最大風速(60m/h)をもとにしており、風圧は地面からの高さの4乗根(高さ16m未満)あるいは7乗根(高さ16m以上)に比例すると考えている。ここに、Cは風力係数であり、建物の形状による風圧力の相違を表わすもので、一般家屋では0.8から1.2程度である。一方、地震力に関しては、「各階に生じる水平方向の層間変位の当該各階の高さに対する割合(層間変形角)が200分の1以内」の規定があり、さらに、地震層せん断力係数に関する規定が第88条に示されている。このように、風圧力や地震力に対する

諸規定が建築構造物に設けられているが、洪水氾濫危険区域などにおける家屋に作用する流体力に対しては、現在の段階では「洪水は堤防でまもる」という考え方にたっており、このような場における家屋構造強度の規定は一般的には取り入れられていない。

つぎに、アメリカにおける建築物の耐水化に関する規定をみてみよう。現在、アメリカ合衆国において建築物の耐水化と技術基準²⁾が確立されつつある。これは工兵隊によって作成されたものであって、この技術基準の目的の項に、「公認の氾濫原ゾーニング地図で示される氾濫危険区域内のあらゆる土地に現存し、あるいは将来建設されるであろうあらゆる建造物の設計、施工および使用材質を規制することによって、身体、生命の安全、健康、財産および公共の福祉を保全する最小限の建築基準を示すものである」と述べられている。その内容は、建築許可証の発行や使用の証明書、外力の計算法、水密構造から電気機器等までにわたる構造細目を含んでいる。たとえば水荷重についてみれば流水による荷重すなわち動水圧荷重は602.3条に規定されており、流速が10 feet/sec 以下の場合には $dh = aV^2/2g$ により静水圧相当荷重へ変換するとある。ここに V ; 流速 (feet/sec), g ; 重力加速度 (feet/sec²), a ; 抗力係数あるいは形状係数 (a の値は1.25より小さくない), dh ; 相当水深である。ただし、流速が10 feet/sec を越す速い流れに対しては、この基準の範囲を越えるとして、他の方法による解析を必要としている。

このような細部にまで至る技術基準が確立されてきた背景には、我が国と同様に氾濫原の開発による被害ポテンシャルの増大がある。州や地方行政による氾濫原規制や氾濫危険区域の公開などの情報があるにもかかわらず、年ごとの被害額が莫大なものとなっているのが実情である。氾濫被害に対して、堤防等のハードな対策のみでは経済的にも対応できないことから、政府援助による水害保険への加入が推奨されているのであるが、その加入の要件として、一定の耐水化構造を持った建物であることを規定しているのである。我が国でも、建物の耐水化に関する基準の確立や建物の流失に対する危険ゾーニングの予測等はアメリカ同様に重要であることは論をまたない。総合治水計画の一環としてこれはまだ緒についたばかりであり、洪水災害軽減のためのハードウェア、ソフトウェアともいっそう充実せねばならない。

2.2 木造家屋の構造例—主に土台と基礎について—

最近の木造家屋は、建築基準法に従い、一般に Fig. 1 に示すようなコンクリート基礎を採用している。これは、コンクリート基礎上に土台となる横架材を載せ、両者をアンカーボルトで緊結し、土台にほぞによって柱を立てた構造である。この形式では、土台と基礎とが一体となり、強固である。抵抗は土台の間のほぞで受け持たれると考えられる。したがって、流水による流体力を考えた場合 Fig. 2 に示すような旧式の木造家屋の置き基礎に比してせん断抵抗は大きくなり、ほぞ部に釘等を施すことにより、ある程度浮力にも抵抗する構造となる。

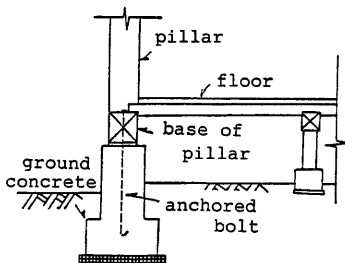


Fig. 1 Example of base structure of typical contemporary Japanese-style wooden house

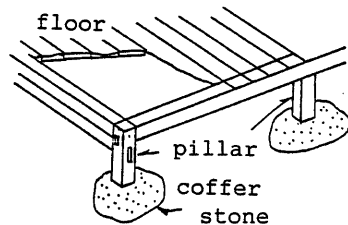


Fig. 2 Example of base structure of old-fashioned Japanese-style wooden house

さて、浸水時に家屋に作用する外力は浮力および流体力である。浮力は従来から、家屋の流失に対してかなり重要な要素であると言われている。また、一階の天井を越える程度の水位に達すると被害も増大するとも言われている。家屋内水位と外水位が等しい時、浮力は建築材料の体積に相当するもののみに限られているため、それほど大きくはないものと思われる。しかし、津波や破堤直後の段波状の流れのように、家屋内水位と外水位とに差がかなり生じるような流れの場においては、浮力および流体力双方とも大きく、相乗的な効果で家屋流失が発生し易いと想像される。従来の研究では、流体力と家屋流失との相関が認められており、³¹⁾ 浮力に関してはまだ十分な検証がなされていない。ここでは、浮力の影響については今後の検討課題として、まず、水平方向に作用する流体力と家屋の流失に着目することにする。

従来の在来軸組工法（ほぞ構造）による木造家屋に、流体力のような水平外力が作用すると、土台の横架材と柱のほぞとの接合部に応力が集中し、ここが木造家屋の構造的弱点となる。すなわち、接合部に外力によるモーメントが作用することによって、Fig. 8 に示すように、木材の性質上ほぞ部分が塑性ヒンジとなって構造骨組の変形がおこる。このことから、水平外力による家屋の変形、倒壊、流失の危険度の指標として、柱と土台の接合部を支点とする外力の大きさと、それによる骨組の変形角度とが考えられる。また、この接合部は補強材である筋かいとの接合部にもなっているが、補強となるべき筋かいも過大な変形に対してはその効力を失う。すなわち、圧縮時には接合部の他の材を圧縮して破壊に至らしめ、引っ張り時には接合金具の離脱がおき、用をなさなくなる。以上のことから、対象とする家屋の基礎構造はコンクリート基礎とし、家屋の破壊は流体力に起因したモーメントによる過大な変形によるものとする。当然旧式な置き基礎の場合には、この時点において滑動や流失が発生するものと思われる。

Table 1 は、Fig. 4 に示した実大木造家屋への静的水平加力試験³⁾ から得られた家屋の水平耐力とそれに相当する耐力モーメントの例を示したものである。ここに、水平耐力とは、荷重作用点での水平変位が1/60ラジアンとなった時の荷重を言っている（現行では1/200ラジアン）。表中、タイプⅠは、柱、梁、床および屋根だけから構成される基本骨組構造、タイプⅡは基本骨組に三割り突き付け筋かいを入れた構造、タイプⅢは基本骨組みに構造用合板を施した場合、タイプⅣは基本骨組みに三割り相欠き筋かいを入れた構造、タイプⅤはほぼ仕上がった構造である。タイプⅤに対応する耐力が実際の家屋構造が持つ水平耐力とみなされよう。地震力を対象とした実験であるため、荷重が繰り返し荷重であること、けた行方向と直角方向の荷重に対する耐力が示されていないことおよび、この試験結果が普遍性のあるものかどうかなど、このデータが流水による流体力に対する抵抗力（耐力）として適用できるかどうか問題はありますが、この表により、標

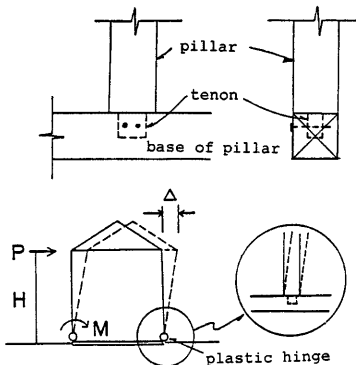


Fig. 3 Behavior of tenon as plastic hinge subject to lateral loads

Table 1 Example of bearing capacity of the typical Janese wooden house

TYPE	F	M	h_c
I	0.95	49110	5.275
II	1.86	96153	5.275
III	3.70	191272	5.275
IV	1.95	100805	5.275
V	8.10	418730	5.275

F : Total bearing capacity (ton)

M : Total bearing moment (Nm)

h_c : Height of action point (m)

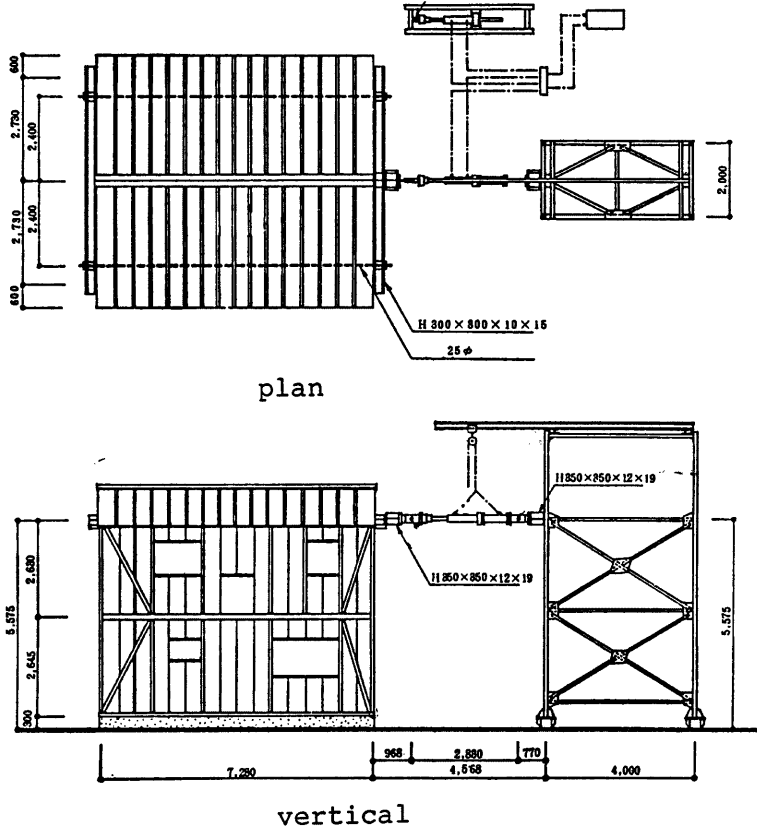


Fig. 4 Plan and vertical views of typical wooden Japanese test house⁵⁾

Table 2 Example of bearing capacity of the North-American type wood-en house

	F	M	h_c
case 1	5.15	138793	2.75
case 2	6.85	184608	2.75
case 3	6.10	328790	5.50

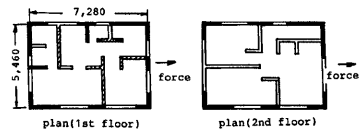


Fig. 5 Plan views of typical wooden North-American-type test house

準的と思われる在来軸組工法による木造家屋の耐力モーメントは40万Nm 程度であることがわかる。

Table 2 は、枠組壁工法による木質家屋の実大水平加力試験⁶⁾の結果を示したものである。構造規模は、**Fig. 5** に示すような枠組壁工法のプラットホーム方式による二階建構造である。この種の構造物は、耐力壁で保たせる構造であり、耐力壁の変形が問題となる。CASE 1 は一、二階とも外周だけに耐力壁を配し、内部には耐力壁を設けない場合で、加力位置は二階床である。CASE 2 は CASE 1 の試験後、内部に耐力壁を付加した場合で、加力位置は二階床である。CASE 3 は CASE 2 の試験後、加力位置を二階天井にしたばあいである。内部に耐力壁を施した場合を対象とすると、枠組壁工法に関して、許容せん断耐力決定基準として杉山ら⁶⁾が提案しているような、平均部材角が1/200 ラジアンをのときを考えると、耐力モーメントは19~33万Nm 程度である。

3. 家屋構造物に作用する流体力とモーメントに関する実験

家屋構造物が流水から受ける流体力は、既往の研究にみられるような二次元一様速度場におけるそれと比べて、自由水面および地面という境界面が存在することおよびそれに起因した流速分布が存在することなどの理由から、これを推定することはなかなか難しい。そこで、ここでは家屋構造物に作用する流体力とそれによるモーメントの特性について、水理規型実験を行ない、これを実験的に明らかにする。

3.1 定常等流中に存在する家屋に作用する流体力とモーメントに関する実験

実験に用いた水路は、長さ5 m、幅50 cm、高さ20 cm のアクリライト製の矩形断面水路である。水路上

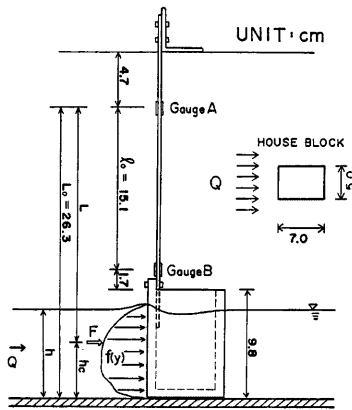


Fig. 6 Profile of experimental model

流で整流し、下流端に設けた可動堰を調節することにより水深を種々変化させることができる。上流に設けた高水槽の三角形堰に設置したサーボ式水位計を用いて、予め流量検定曲線を作成しておき、バルブ調節により任意の流量が得られるようになっている。なおポンプの給水能力は最大9.4l/sec である。

測定部の概要を **Fig. 6** に示す。測定は水路上流端から下流約 3.2 m の位置で行なった。家屋ブロックのモデルは、長さ7 cm、幅5 cm、高さ10 cm のアクリライト製の中空容器で、外水の侵入はない。これに支持棒として、幅2 cm、厚さ0.3 cm の真ちゅう棒を取り付け、上端を鋼製のアングルで固定した。 **Fig. 6** に示す支持棒の位置に表裏1枚ずつ計4枚のひずみゲージを貼り付け、各点における曲げひずみを2台のアンプを通して測定し、出力をペンレコーダに記録し、これを後で解析して求めた。家屋ブロックに作用する流体力 (抗力) F は次式で求まる。

$$F = EI(\varepsilon_A - \varepsilon_B) / e l_0 \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

ここに、 ε_A および ε_B ; それぞれ、ひずみゲージA およびB のひずみ、 E ; ヤング率、 I ; 断面二次モーメント、 e ; 縁距離、 l_0 ; AB 間の距離で、 $EI / e l_0$ は測定棒に用いた材料およびゲージ位置によって決定される定数である。実験に用いた真ちゅう棒は、実測より、 $EI / e l_0 = 1.94859 \times 10^8$ (dyn) であった。抗力の作用高さ h_c は次式で求まる。

$$h_c = L_0 - \varepsilon_A l_0 / (\varepsilon_A - \varepsilon_B) \quad \dots \dots \dots (3.2)$$

実験条件を **Table 3** に示す。水路勾配は1/2300、流量は4l/sec から9l/sec 程度まで6種類、水深は各流量に対して8通り変化させ、計48通りの水理条件のもとで測定を行なった。

Table 3 Experimental conditions

Q (cm ³ /s)	R _i	h (cm)	u (cm/s)	F _r
4079	6230	4.56—9.48	8.61—17.89	0.089—0.268
4992	8330	4.95—9.24	10.81—20.17	0.114—0.290
6166	10230	5.36—9.26	13.32—23.01	0.140—0.317
7157	11760	5.66—9.32	15.36—25.29	0.161—0.340
8174	12480	6.01—9.45	17.30—27.20	0.180—0.354
9179	14010	6.31—9.32	19.70—29.09	0.206—0.370

3.2 実験結果および考察

Fig. 7 は流体力と u^2A すなわち、断面平均流速の2乗と流れに直角なブロックの面積との積 ($A=Bh$ B; ブロック幅, h; 等流水深) との関係を示したものである。最小二乗法による回帰直線を求めると、両者には

$$F = 1.064u^2A \dots\dots\dots(3.3)$$

なる関係がある。一様流中の二次元物体に作用する流体力は

$$F = 0.5\rho C_D u^2 A \dots\dots\dots(3.4)$$

で表わされる。ここに、 ρ ; 流体の密度, C_D ; 抗力係数, u ; 一様流速である。これより、実験範囲内の Re 数の領域では、せん断流中においても一様流中の抗力と同様の関係が成り立つことがわかる。(3.3) および (3.4) 式から、実験に用いた物体の抗力係数は、 $\rho=1.0\text{g/cm}^3$ として、 $C_D=2.128$ となる。Fig. 8 は、各ケースの Re 数と C_D との関係のみたものである。実験における Re 数の範囲では、Re 数による抗力係数の変化は小さい。これは、球や円柱の場合には Re 数の変化により、はく離点の移動があるのに対し、角柱のように鋭いエッジを持つ物体では、はく離点がエッジによって固定され、安定な後流が形成されるからである。同図には一様流中における正四角柱および平板の形状抵抗係数が示されている。平板に対しては $C_D=1.98$, 正四角柱では2.05である。今回の実験値は四角柱でかつ摩擦抵抗も含んだ抗力係数であるが、せん断流中でも同様の値をとることがわかる。ただし、測定棒の厚さが薄いので、揚力（ここでは横方向の力）による測定棒の振れがひずみとなって検出される可能性もあるが、それについては検定をおこなっておらず、不明である。

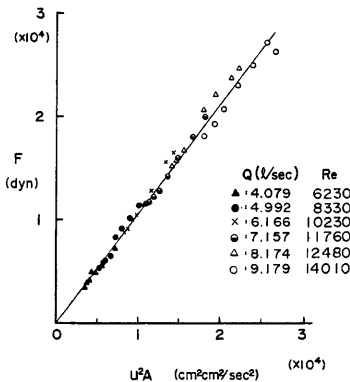


Fig. 7 Relationship between drag force F and hydraulic force factor u^2A

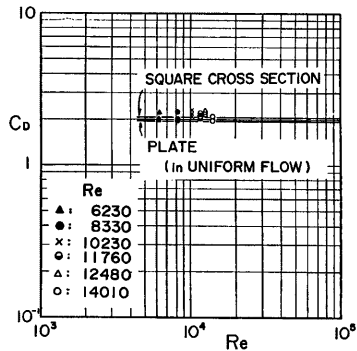


Fig. 8 Relationship between drag coefficient and Reynolds number

Fig. 9 は、各実験ケースにおける流体力の作用点の高さを (3.2) 式を用いて求めたものである。各ケースでばらつきはあるが、これらの平均をとれば、水路床から等流水深の 0.732 倍のところにある。いま、家屋ブロックへの接近流速が (3.5) 式の数値則で近似できるものとし、この流速の二乗の分布が直接その位置で流体力に変換され、それが家屋ブロックに作用すると考えると、抗力 R およびモーメント M は、 C_D を定数と考えるとそれぞれ次のようになる。

$$\frac{u}{u_*} = 5.5 + 5.75 \log \frac{u_* y}{\nu} \quad (\delta < y < h) \dots\dots\dots (3.5)$$

$$R = \frac{1}{2} \rho \int_{\delta}^h C_D B u^2 dy \Rightarrow \frac{1}{2} \rho C_D B h \frac{u_*^2}{\kappa^2} [\{\ln(9.025 R_{*h})\}^2 - 2\ln(9.025 R_{*h}) + 2] \dots\dots\dots (3.6)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho \int_{\delta}^h C_D B u^2 y dy \Rightarrow \frac{1}{2} \rho C_D B h^2 \frac{u_*^2}{\kappa^2} \left[\frac{1}{2} \{\ln(9.025 R_{*h})\}^2 - \frac{1}{2} \ln(9.025 R_{*h}) + \frac{1}{4} \right] \dots\dots\dots (3.7)$$

ここに、 $u_* = \sqrt{gIh}$ 、 I ；水路勾配、 $R_{*h} = u_* h / \nu$ であり、 ν および κ はそれぞれ動粘性係数およびカルマン定数である。(3.6) および (3.7) 式より作用高さ h_c は次式で表される。

$$h_c = \frac{M}{R} = \frac{\frac{1}{2} \{\ln(9.025 R_{*h}) - \frac{1}{2}\}^2 + \frac{1}{8}}{\{\ln(9.025 R_{*h}) - 1\}^2 + 1} h \dots\dots\dots (3.8)$$

(3.8) 式から求めた h_c の値が Fig. 9 に実線で示されている。これより、実験範囲内では h_c/h の値は 0.55 程度で水深によらずほぼ一定値をとり、実験値よりかなり小さい。実験に関しては、データのばらつきから判断して測定精度の問題があるものと思われるが、小さくなる理由としては、解析では物体前面でのせき上げと背面での水位低下など、両者の圧力差が考慮されていないこと等が考えられる。したがって、以下の解析では、 h_c/h として実験値の 0.732 を使用する。Fig. 10 は実験値のモーメントと $u_*^2 A$ との関係を示したものである。一方、モーメントは (3.2) 式を用いると次式で表わされる。

$$M = h_c F = 0.732 h F \dots\dots\dots (3.9)$$

同図には h をパラメーターとして M と $u_*^2 A$ との関係が直線で示されている。実験値はほぼこの直線上に乗っているとみなせることから、モーメントは水深によってかなり影響され、家屋ブロックの幅 B を固定すれば u と h によって決定されることがわかる。

Fig. 11 は、実家屋との対応をつけるためにフルードの相似則を用いて Fig. 10 のデータを相似変換した後のモーメントと $u_*^2 A$ の関係を示したものである。なお、幾何学的な相似条件は、2.2 で述べた在来軸組

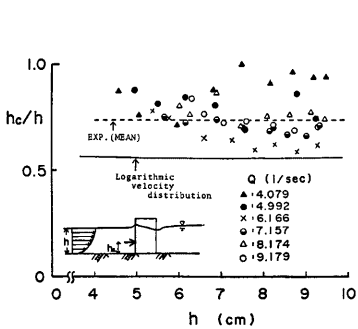


Fig. 9 Experimental and theoretical data concerning to the height of the acting point by the hydraulic force

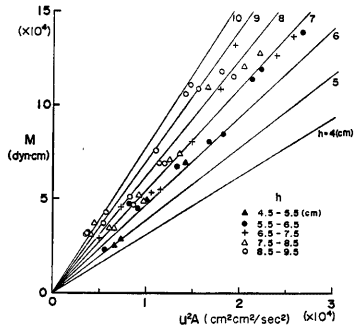


Fig. 10 Relationship between $u_*^2 A$ and M taking water depth h as a parameter in hydraulic experiments

工法による家屋規模を対象とした水理実験を行なっている
ので、Fig. 4を参考にして、 $L_n/L_p=1/\lambda=1/109$ となる。
同図には、タイプⅠ、Ⅱ、ⅢおよびⅤに対応する耐力モー
メント M_1, M_I, M_{II} および M_V が示されている。水
理実験のデータの多くは M_V よりかなり大きく、非常に危
険側の実験であった。 M と u^2A との関係が水理量の小
さい範囲でも成り立つとし、家屋の破壊基準の耐力モー
メントを M_V にとるとそれに対応する流速 u_p および水深 h_p
の関係が次式のように求まる。

$$u_p h_p = c/\sqrt{B_p} \dots\dots\dots (3.10)$$

ここに、 c ；定数であって、

$$c = \sqrt{\frac{M_V}{h_c/h \cdot C_D/2 \cdot 1000}} = 23.2$$

$$(M_V = 418730, h_c/h = 0.732, C_D/2 = 1.064)。$$

Fig. 12(a) は、家屋幅 B_p が 5, 7 および 10m の時の
(3.10) 式の関係を示したものである。この曲線より上方
が家屋の破壊危険領域となる。同図には、昭和58年山陰豪
雨による三隅地区の家屋流失について、河田らによる数値
計算と被害家屋の調査から求められたデータ³⁾ および1946
年の南海地震における高知県宇佐の津波災害を対象として
実測と数値計算から求められた相田のデータ⁴⁾ が示されている。三隅川の洪水氾濫のデータはかなり破壊
危険曲線と一致しているのに対し、津波のデータはそれよりも下側にある。これは洪水氾濫の流れの状況が
今回行った水理模型実験の流れの状況に近いので適用が可能であると思われるのに対して、津波の流れでは、
波力、衝撃力および寄せ波と引き波という逆方向の力が作用すること等の影響があって、 u^2A で表わした流
体力のみで家屋の破壊力と関連付けるのには限界があるからだと思われる。これら2つのデータは、数値計
算精度の問題、家屋の基礎構および家屋幅の問題および定常流れについて求められた破壊危険曲線が適用可
能なものかどうか等の問題があり、今後このようなデータを収集して、(3.10) 式の適用性を検討する必要
がある。

さらに同図には 2.1 で述べたアメリカにおける技術基準による流速と水深との関係も示されている。ただ
し、流速は一様分布とし、作用高さを水深の2分の1と仮定して、静水圧相当荷重をモーメントに変換した
ものから求めたものである。適用範囲は流速が10 feet/sec (3.05m/sec) 以下の部分である。この技術基準
では建物の幅は考慮されていないが、水深が3m～5m程度の範囲、すなわち我が国の過去の洪水災害で家
屋被害の発生が十分予想されるような範囲においては、この破壊危険曲線とかなり一致する部分がある。

Fig. 12(b) は、2.2 で述べた枠組壁工法による木質家屋の耐力に関し、Table 2 の各実験ケースの耐力
を破壊基準の許容耐力として、(3.10) 式から $B = 5$ mとして求めた家屋の破壊危険曲線である。ただし、
許容せん断耐力の決定基準として、平均部材角を1/200としている。許容せん断力の決定基準が Fig. 12(a)
のものとは異なるので直接比較はできないが、家屋内部に耐力壁を設けた枠組壁工法による通常の木質家屋の
破壊危険度曲線によって河田らのデータはかなりよく説明される。

4. 動水圧に対する窓ガラスの耐力

一般にガラスの耐力に関しては、風圧力に対する強度基準が定められており、建築基準法に基づく建設省
告示109号では次のようである。

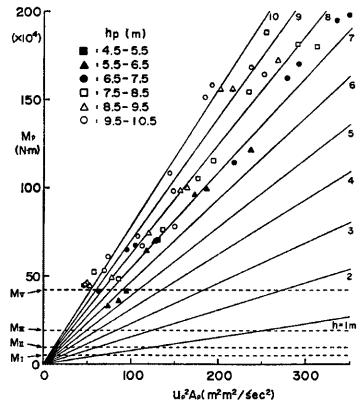
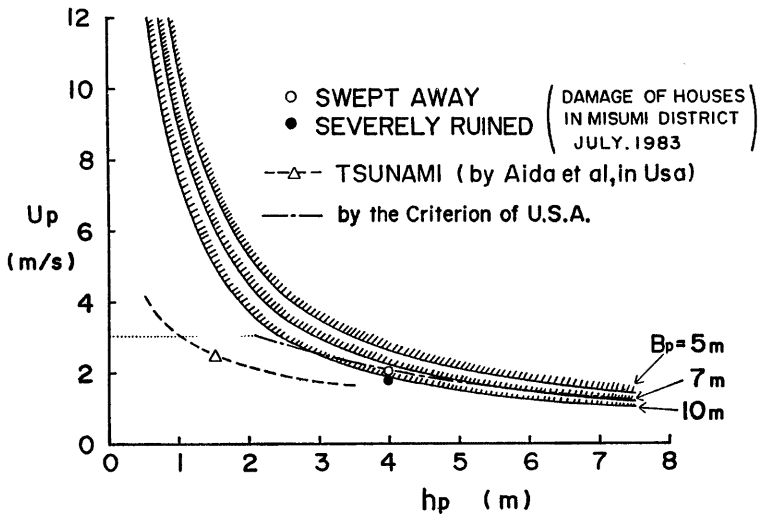
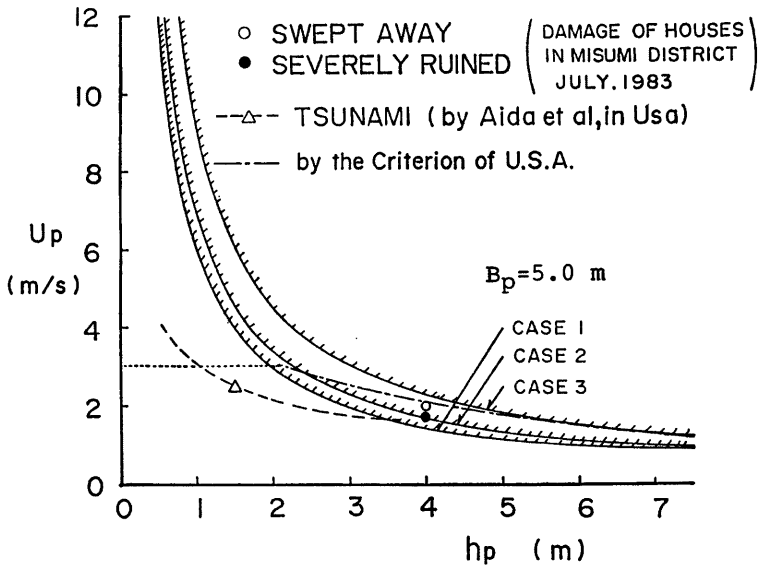


Fig. 11 Relationship between u^2A and M taking water depth h as a parameter after similarity transformation. Bearing moments of the full scale Japanese house are shown against each structural elements.



(a) For typical Japanese wooden houses



(b) For typical North-American-type wooden house
 Fig. 12 Critical lines concerning to the house destruction

$$P_s = \frac{30\alpha}{A} \left(t + \frac{t^2}{4} \right) \dots\dots\dots (4.1)$$

ここに、 P_s ：ガラスに作用する許容風圧力 (kgf/m²)、 A ：ガラスの表面積 (m²)、 α ：ガラスの種類によって決まる定数、 t ：ガラスの厚さ (mm) である。通常板ガラスでは $\alpha=1.0$ が用いられる。石崎¹⁾は、(4.1)式に対し、ガラスの静的疲労および載荷時間の影響を考慮した次式を提案している。

$$P_s(T) = f \cdot S \cdot \frac{t}{a} \left(1 + K \frac{t}{b} \log \frac{10^n}{T} \right) \dots\dots\dots (4.2)$$

ここに、 T ：載荷時間 (sec)、 a および b ：ガラスの短辺および長辺の長さ (m)、 S 、 K および n ：実験定数で、それぞれ $S=3.5 \times 10^4 \sim 5.0 \times 10^4$ (kgf/m²)、 $K=70$ 、 $n=7$ 、 f ：強度係数である。ガラス窓に作用する単位面積当りの風圧力は次式で与えられる。

$$P = 0.5 \rho v^2 C \dots\dots\dots (4.3)$$

ここに、 ρ ：空気の密度 (kg・sec²/m³)、 v ：風速 (m/sec)、 C ：風力係数である。この関係を流水に適用する。

その場合、流速は断面平均値を、それによる流体力は均等に分布すると仮定し、**Fig. 13** に示すように、実際の圧力には静水圧もかかるが、浸水により家屋内水位が外水位と同じ場合を考え、動水圧のみを対象とする。**Table 4 (a)** に窓の大きさが異なる 2 ケースの計算条件を、**Table 4 (b)** に (4.1) および (4.2) 式を用いた場合の計算結果を示す。ただし、風力係数を 1.0、載荷時間を 1 秒としている。つぎに、この 2 ケースを対象として、ガラスの許容耐力を

Table 4(a) Conditions of calculation

	a (m)	b (m)	D (m)	t (mm)
CASE 1	0.7	1.0	1.3	1.9, 3.0, 5.0
CASE 2	0.7	1.8	0.5	1.9, 3.0, 5.0

$$f=0.5, S=4 \times 10^4, T=1.0, K=70, n=7$$

Table 4(b) Results for calculation

CASE	EQ	t (mm)		
		1.9	3	5
1	P_s	84.1	158	338
	v	1.53	2.10	3.07
2	P_s	73.4	148	345
	v	1.43	2.04	3.11
2	P_s	84.1	158	338
	v	1.14	1.57	2.29
2	P_s	103.8	196.2	254
	v	1.27	1.75	2.57

P_s : (kgf/m²), v : (m/s)

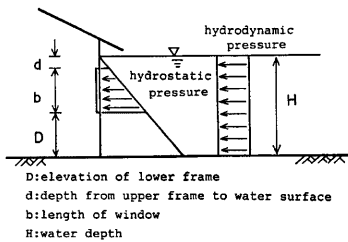
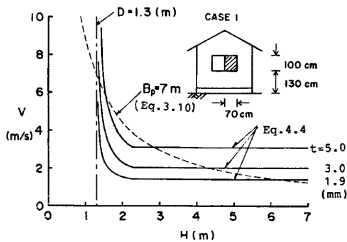
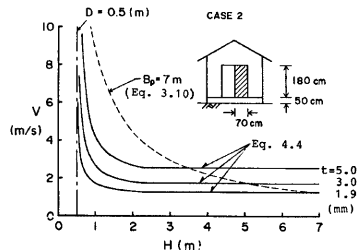


Fig. 13 Model of flow field subject to hydraulic pressure



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 14 Critical lines concerning to the window glass breaking

与える流速と水深との関係を求めよう。水位 H が $D+b$ 以上の場合、すなわち窓枠上部よりも水位が上がった場合には流体力は一定値をとり、 $H < D+b$ の場合には、窓の縦方向の長さ b のかわりに $H-D$ 、すなわち外水位と窓枠下までの高さを用いることとし、ガラスの耐力は (4.2) 式から求めることにする。ガラスの耐力に相当する v と H の関係は、(4.2) および (4.3) 式より次のように求まる。

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho C} f S_a^{\frac{1}{2}} \left(1 + K \frac{t}{H-D} \log \frac{10^6}{T}\right)}, \quad (D < H < D+b) \dots\dots\dots(4.4a)$$

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho C} f S_a^{\frac{1}{2}} \left(1 + K \frac{t}{b} \log \frac{10^6}{T}\right)}, \quad (H > D+b) \dots\dots\dots(4.4b)$$

$\rho = 1000/9.8 \text{ kg} \cdot \text{sec}^2/\text{m}^4$ とし、(4.4) 式を用いて Table 4 の条件のもとで計算を行い、 v と H の関係を求めたのが Fig. 14(a) および (b) である。同図には、家屋の破壊危険曲線も示してある。これらの図より窓枠上部に水位が上がるまでは家屋の破壊危険曲線よりも窓ガラスの破壊危険度がかなり高いことがわかる。ガラスの破壊は動水圧以外に流木などの浮遊物の衝突によって容易に生じる。したがって、浮遊物の衝突によるガラスの破壊危険度についても明らかにする必要がある。

5. 家屋群中で受ける流体力

これまでは流れの場に単一家屋が存在する場合を取り扱ってきたが、実際の市街地における家屋の配置は様々であり、氾濫水の挙動もこれに影響されるものと思われる。ここでは、Fig. 15 に示すように、前方

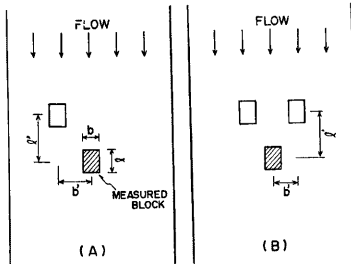


Fig. 15 Arrangement of house blocks

Table 5 Experimental conditions for arrangement of house blocks

TYPE	b'/b	l'/l
A	0.0	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
A	0.5	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
A	1.0	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
A	1.5	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
A	2.0	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
A	2.5	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
B	1.0	1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
B	1.5	0.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
B	2.0	0.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
B	2.5	0.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
B	3.0	0.0

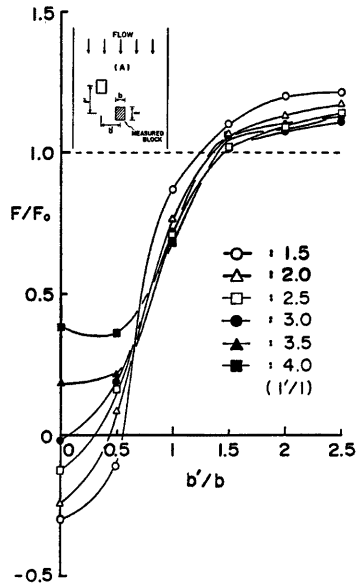


Fig. 16 Relationship between b'/b and F/F_0 with parameter l'/l (TYPE A)

に1個および2個の家屋ブロックを配置した水理模型実験を行ない、他の家屋の存在によって対象とする家屋に作用する流体力がどのように影響されるのかについて検討する。

用いた水路は **3.1** で用いたものと同じである。流量は $8174 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、水深を 6.1 cm に固定し、家屋ブロックの配置の違いによる影響のみに着目し、水理条件は変化させていない。配置の種類は、**Fig. 13** の b および l をそれぞれ変化させ、**Table 5** に示すように計11通りである。表中、TYPE A および B はそれぞれ前方に1個および2個の家屋ブロックを配置した場合である。また、 $l'/l=0.0$ は3個並列に配置した場合である。

まず、TYPE A の配置の実験結果について考察する。実験結果を **Fig. 16** に示す。横軸にブロック中心間の距離 b' とブロック幅 b との比を、縦軸に単独で置かれた場合に作用する流体力 F_0 によって無次元化した流体力 F/F_0 をとっている。同図より、 b'/b が 0.5 付近で F/F_0 が急上昇し、その傾向は l'/l_0 とはほぼ無関係に、増大している。 $b'/b=0.0$ すなわち、2つのブロックを流れに対して直列に配置した場合をみても。このとき、 l'/l が大きいほどすなわち、ブロック間隔が大きくなるほど F/F_0 が大きくなる。 $l'/l < 3.0$ までは逆方向の流体力を受け、 $l'/l=3.0$ 付近で F/F_0 がゼロとなり、 l'/l がさらに大きくなると F/F_0 も大きくなり、次第に単体で置かれた時の F_0 の値に近くなるようである。このことを流れの状況からみてみよう。**Photo. 1(a)**, **(b)** および **(c)** はそれぞれ l'/l が 2.0 、 3.0 および 4.0 のときの流況を示したものである。 $l'/l=2.0$ ではブロックは完全に前方のブロックの後流域にあり、負圧領域のため、ブロックの背面のほうが圧力が高くなり、逆方向の流体力を受けるものと思われる。 $l'/l=4.0$ では前方のブロックから出る後流が後方のブロックの前面に衝突しており、背面より圧力が高くなるものと思われる。 $l'/l=3.0$ の **Photo. 1(b)** の流れの状況からは、 F/F_0 がゼロ近傍であるかどうかはわからないが、両者の中間的な状態であることが想像される。**Photo. 2(a)~(d)** は、 $l'/l=2.0$ として b'/b を $0.5 \sim 2.0$ まで変化させたときの流れの状況

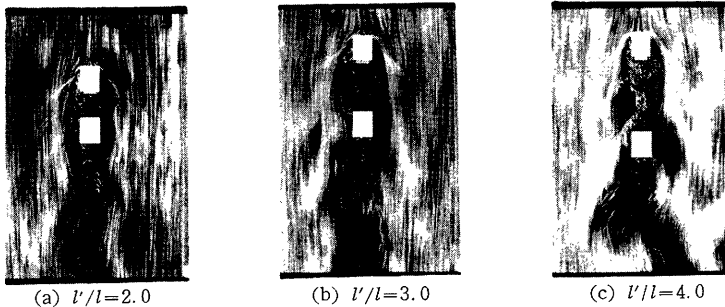


Photo. 1 Flow patterns for TYPE A ($b'/b=0$)

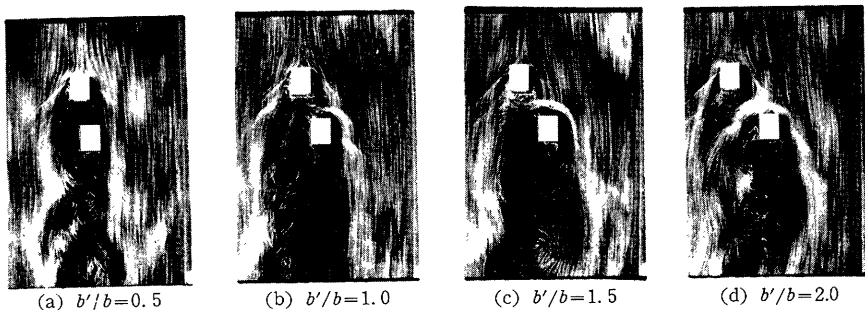


Photo. 2 Flow patterns for TYPE A ($l'/l=2.0$)

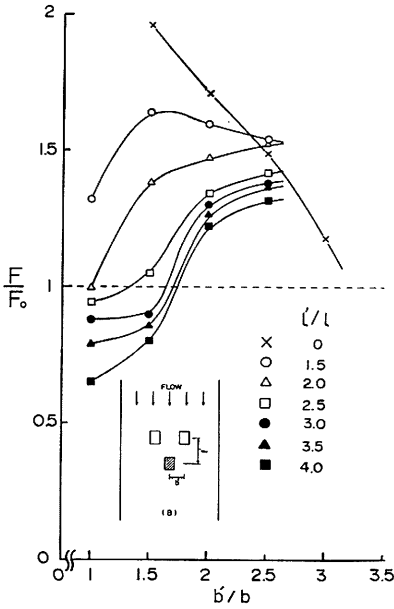


Fig. 17 Relationship between b'/b and F/F_0 with parameter l'/l (TYPE B)

なくなり、 F/F_0 は1に収束するはずであるがその境界の l'/l の値は実験では明らかにされていない。

次に $l'/l=0.0$ すなわち3つのブロックが並列する場合について検討する。この結果が Fig. 17 の×印で示されている。これより、 b'/b の増加に伴い F/F_0 は約2から1へと直線的に減少している。その流況を Photo. 4(a)~(d)に示す。(a)ではブロック間隔が小さいためにその間の通過流量は少なく、三者が一体となって大きな後流域を生じている。ブロック前面でのせき上げが顕著で、このときの前面と背面との水位差は約1.8 cm で単体の時には1.0 cm 弱であることから F/F_0 はかなり大きくなるはずで、このことが Fig. 17 にあらわれている。間隔が広がるにつれて (b)~(d)に見られるように間隔を通過する流量が増加し、(d)では各ブロックが単独で配置されたような流況を示しており、その結果が Fig. 17 にも現われている。

を示したものである。Fig. 16 から F/F_0 が1を越える、すなわち前方の家屋ブロックによる流体力が増大させられる時の b'/b は、1.3~1.5 の所であり、その時の流れの状態は、後方にあるブロックの前面の流れが左右に分岐し始める Photo 2(c) の状態よりも少し前のようなのである。

つぎに TYPE B の実験結果を Fig. 17 に示す。また、 $l'/l=2.0$ および 4.0 の流れの状況を Photo. 3(a)~(d) に示す。 b'/b の変化が F/F_0 に与える影響について検討しよう。 $l'/l=0.0$ および 1.5 の場合を除き、 F/F_0 は b'/b の増加とともに大きくなっている。しかし、 b'/b が大きくなればブロックは単体として流体力を受けるようになり、 F/F_0 は1に漸近する。このことから、 $b'/b=F/F_0$ 曲線はある b'/b で最大値をとるはずである。 $l'/l=1.5$ では $b'/b=1.5$ 付近で F/F_0 がピークを持っている。 l'/l が 1.5 より大きい場合でも実験装置の規模の制約上測定できなかったが、ある b'/b の所でピークをとったものと思われる。これは、前の二個のブロックによる縮流の効果が最もでる b'/b と l'/l に規定される場合であると考えられる。 b'/b が小さい時、すなわち前のブロックの間隔が狭いとき、これらが流水の遮蔽効果を生じ、広い後流ができて F/F_0 が小さくなる。 l'/l の変化に伴う F/F_0 の変化は、概して l'/l の値が小さければ F/F_0 は増加し、大きくなるにつれて減少する。 l'/l が無限に大きくなれば前の物体の影響は



(a) $l'/l=2.0$
 $b'/b=1.0$



(b) $l'/l=2.0$
 $b'/b=2.0$

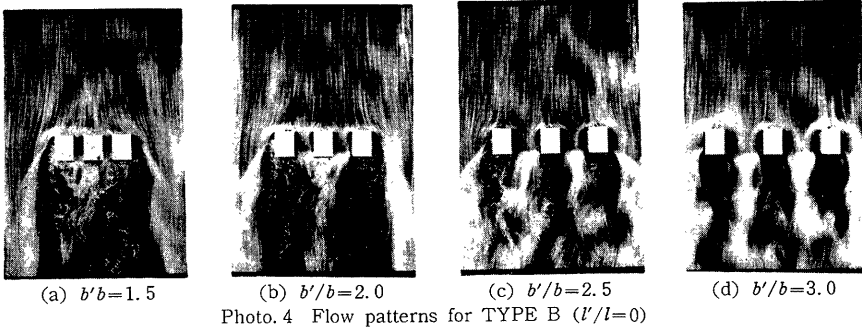


(c) $l'/l=4.0$
 $b'/b=1.0$



(d) $l'/l=4.0$
 $b'/b=2.5$

Photo. 3 Flow patterns for TYPE B



以上、並列配置でかつ間隔が狭いほど大きな流体力を受け、危険性が高い配置となることがわかった。また、流体力が大きくなる場合は家屋ブロックが互いにかなり接近している場合に現われている。流れの規模の考察が十分でないため、実際現象との対応がつけにくい、 R_c 数による抗力係数の変化が角柱では小さいことから、ある程度定性的には、危険な配置の形態がこの結果から予測できるものと思われる。

6. 結 語

以上、本研究において、洪水氾濫を対象とした時の木造家屋の破壊危険度の評価を行ない、外力となる流体力との関係から破壊危険曲線を求めた。ついで、家屋の部分的な破壊に関して、流水の動圧に対する窓ガラスの耐力を例にとり、破壊危険度評価を行なった。最後に、家屋群の影響について検討した。以下、本研究で得られた主要な結果と問題点をまとめて結語とする。

- (1) 洪水氾濫による家屋の被害は、木造家屋が最も受けやすく、現在多く用いられている木造家屋の基礎形式から考えて、流水による外力のモーメントが破壊危険指標になり得ることがわかった。
- (2) 実大家屋の破壊試験の結果と家屋モデルを用いた流体力に関する水理模型実験の結果より、流れに直角方向の家屋幅をパラメーターとして、水深と流速とで表わされる家屋の破壊危険曲線が得られた。これを実際の災害のデータに適用した結果、洪水氾濫に対してはある程度これで説明されたが、津波に対しては、波力や引き波と寄せ波等の影響があり、流体力のみでは破壊危険度が十分説明できないのではないかと推察された。
- (3) 家屋の部分破壊として、流水の動圧に対する窓ガラスの強度について検討した結果、家屋の変形による破壊危険度に比べてかなり小さい外力で破壊する危険性があることが定量的に明らかにされた。
- (4) 1戸の家屋が前方の家屋の後流域に完全に入った状態では、単独配置の場合より受ける力の絶対値は小さい。しかし、前の家屋ではく離れた流線が後ろの家屋の前面に衝突するような状態になると、単独配置で受ける力よりもかえって大きくなる。その大きさは、3戸の家屋が並列する場合を除き、最大で1.6倍程度となる。3戸が並列に配置された場合は実験範囲内では2倍程度にもなる配置があり、極めて危険な状態が出現することがわかった。しかし、実家屋の配置に適用するには、流れの規模が問題となるので、水理条件の検討を行ない、さらに詳細で定量的な予測をする必要がある。
- (5) 実家屋の規模および形は様々であり、耐力も様々である。また、流水から受ける力もけた行方向ばかりではない。したがって、ここで用いた地震力を対象とした在来軸組工法による木造家屋の耐力試験結果を、一般的な木造家屋に対する流水の外力としてどこまで適用できるか問題があろう。しかし、流水に対する木造家屋の耐力が明らかにできれば更に詳細な危険度評価を行なうことができよう。
- (6) 今回得られた危険度指標は、定常流の水理量で評価されたものである。しかし、実際の洪水氾濫は非

定常現象である。したがって、実際の氾濫現象に対して危険度評価を、たとえば氾濫の数値シミュレーションを介して行なう場合、家屋構造物をどのように取り扱うのが問題となろう。

(7) 家屋の部分的な破壊原因は流木やその他の浮遊物の衝突が支配的であろう。家屋の部分的な破壊が構造物全体の変形や破壊を誘発助長することもあり、これらに関する影響評価も行なう必要がある。

最後に、本研究の一部は、文部省科学研究費（自然災害特別研究(2) 課題番号59025034）の補助を受けた。関係各位に記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 建築基準法施工令, 昭和25年政令第388号.
- 2) 建設省土木研究所: 建築物の耐水化に関する研究—アメリカにおける建築物の耐水化と技術基準—, 土木研究所資料第1916号, 1983, pp. 149-221.
- 3) 河田恵昭・中川 一: 昭和58年山陰豪雨による三隅川の洪水氾濫と家屋被害, 第21回自然災害シンポジウム講演要旨集, 1984, pp. 369-372.
- 4) 相田 勇: 陸上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合—東大地震研究所彙報, Vol. 52, 1977, pp. 441-460.
- 5) 室田達郎・有馬孝礼・佐藤雅俊・斎藤完治・岡田 恒・益田恵吾: 在来軸組工法木造住宅の地震時挙動に関する実大静的繰り返し水平加力試験, 建設省建築研究所建築研究資料 No. 28, 1981, pp. 1-47.
- 6) 杉山英男・野口弘行・菊池重昭・鈴木秀三・久保田勤・竹村喜次: 枠組壁工法による木造建物 (TS型) の実大水平加力試験の結果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 10月, 1973, pp. 477-478.
- 7) 石崎澄雄: 窓の耐風設計について, 京大防災研年報, 第19号 B, 1976, pp. 269-278.