令和 4 年度

修士論文

不整形建築物に作用する津波荷重に関する実験的・解析的研究

～定常ケースと衝撃ケースの検討～

指導教員　川口 淳　准教授

三重大学大学院工学研究科建築学専攻

竹村　颯真

不整形建築物に作用する津波荷重に関する実験的・解析的研究
～定常ケースと衝撃ケースの検討～

目次

第 4 章　考察

第 5 章　結

参考文献

謝辞

付録

第 1 章　序

第 1 章 序

1.1 研究背景

1.1.1 研究背景

2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震では、建築物への甚大な津波被害が生じた。また、今後 30 年以内に高確率で起こるとされる南海トラフ地震においても、内閣府による被害予想 [1] によると東北地方太平洋沖地震と比べ、同等以上の建築物への津波被害が生じる可能性があるとされている。これらのことから、津波避難タワーや津波避難ビルの指定、建設が現在、進められており、これらを設計するために、津波荷重の正確な算定が必要とされている。

日本建築学会による「建築物荷重指針・同解説」[2] では、抗力と慣性力による津波荷重の算定方法を提示しているが、任意の地点での浸水深に加え、流速のデータが必要となる。そのため、一般的には浸水深のみで算定できる国土交通省による「津波避難ビル等の構造上の要件の解説」[3] を用いる場合が多い。しかし、現行の国土交通省のガイドライン [3] では、建築物の見付け幅を基にしているため、不整形建築物を対象とした場合でも用いることができるか不明瞭となっている。

1.1.2 「津波避難ビル等の構造上の要件の解説」における津波荷重

国土交通省の現行のガイドライン [3] は、東京大学生産技術研究所による平成 23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書 [4] 、中間報告書その 2[5] を基に、内閣府の「津波避難ビル等に係るガイドライン」[6] を修正、加筆をしたものである。現行のガイドライン [3] では、水平方向の津波波力を(1.1)式より算定している。また、その概略図を図 1-1 に示す。

(1.1)式では、設計用浸水深 h(m)に建物の立地条件によって決まる水深係数 a を乗じた波圧高さの静水圧を鉛直方向および建物幅方向に積分し、求めている。水深係数 a は 3.0 を基本とし、津波が来襲する方向に津波を軽減する効果が見込まれる遮蔽物がある場合について 2.0 に、更にその上で、海岸から 500m 以上離れている場合について 1.5 に低減できる。

$$Q_z = \rho g \int_{z_1}^{z_2} (ah - z) B dz \tag{1.1}$$

ここで、

Q_Z:構造設計用の進行方向の津波波力（kN）

ρ:水の単位体積質量（t/m³）

g：重力加速度（m/s²）

B：当該部分の受圧面の幅（m）

z_1：受圧面の最小高さ（$0 \leq z_1 \leq z_2$）（m）

z_2：受圧面の最高高さ（$z_1 \leq z_2 \leq ah$）（m）

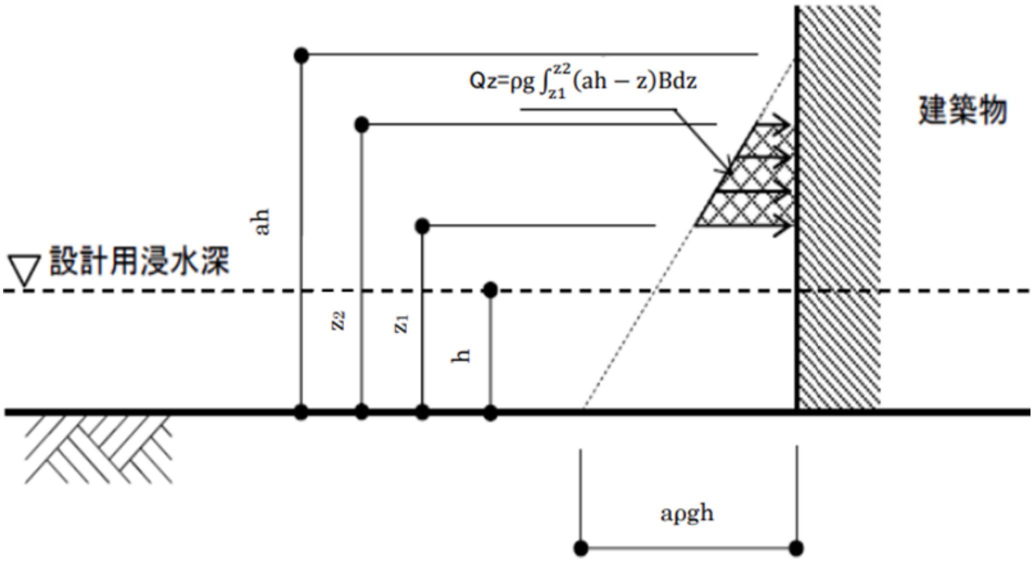


図 1-1 ガイドラインによる津波波力算定方法の概略図

出典・文献 3),国土交通省(2012)p. I -10

1.1.3 「建築物荷重指針・同解説」における津波荷重

建築学会による荷重指針 2) では、想定する津波荷重を津波先端部の荷重、津波非先端部の荷重、静水時の荷重、漂流物による荷重の 4 つに分類し、算定する。

図 1-2 に津波荷重算定フロー図を示す。算定ルートは浸水深、流速の把握状況によって、A)～C)の 3 つに分類される。また、数値流体計算によって津波荷重を直接的に算定するルートも示した。

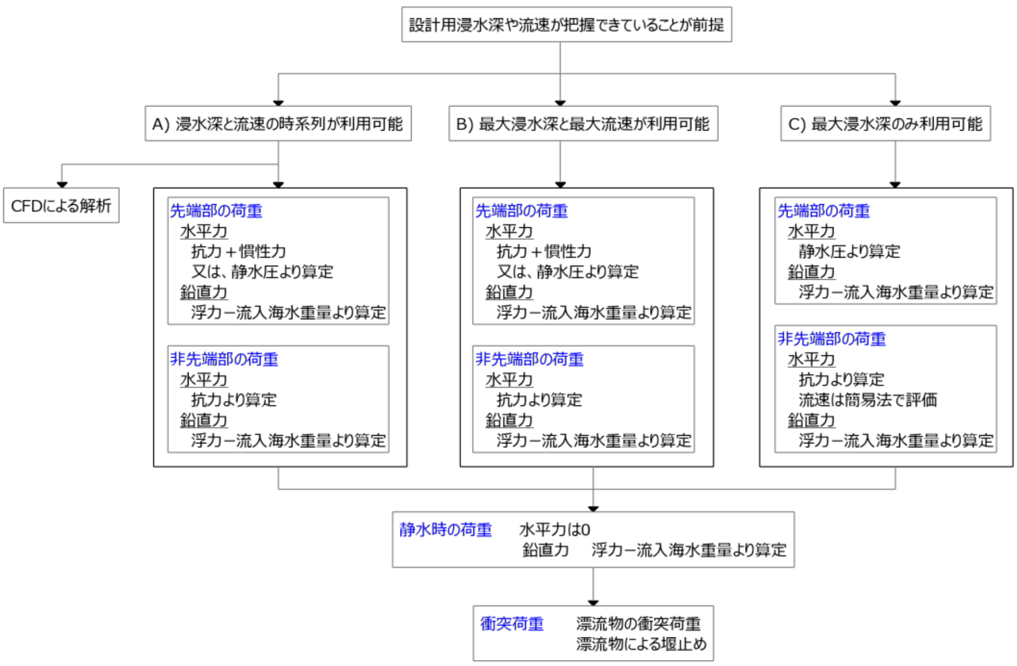


図 1-2 津波荷重算定フロー図

以下に、1) 津波先端部の荷重（以下、衝撃ケースという）、2) 津波非先端部の荷重（以下、定常ケースという）について、A)～C)の 3 つのルートに分けて、簡潔に解説する。

1) 津波先端部の荷重（衝撃ケース）

・水平力

A) 浸水深 *h(t)*と流速 *v(t)*の時系列が利用可能

(1.2)式によって、求める。

$$F_x = \left\{ \frac{1}{2} C_D \rho B h(t) v(t)^2 + C_M \rho B W h(t) \dot{v}(t) \right\}_{max} \tag{1.2}$$

ここで、

F_X：津波波力(kN)

C_D：抗力係数

C_M：質量係数

W：建築物の奥行き幅(m)

(1.2)式は抗力（第一項）と慣性力（第二項）の足し合わせで求められる。

慣性力が十分小さく無視できる定常ケースと比較する場合、慣性力項の効果を抗力係数に反映した(1.3)式を使用する方が便利である。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{D1} \rho B \{h(t) v(t)^2\}_{max} \tag{1.3}$$

$$C_{D1} = 2.0 + \frac{5.4 h_{\max}}{D}$$

ここで、

C_{D1}：慣性力を考慮した抗力係数

D：海岸線からの距離(m)

また、過去の研究[7]より、(1.4)式でフルード数 Fr から水深係数 a を求め、静水圧による(1.1)式を用いる算定方法も提示されている。

$$a = 1 + 0.5(1+\zeta) Fr^2 \tag{1.4}$$

ここで、ζはエネルギー補正値で 0.4 とする。

B) 最大浸水深 $h_{\max}$ と最大流速 $v_{\max}$ が利用可能

A)の場合と同様に考える。(1.2)式を変形し、(1.5)式で表す。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{D2} \rho B h h_{max} v_{max}^2 \tag{1.5}$$

$$C_{D2} = 1.3 + \frac{6.3 h_{\max}}{D}$$

ここで、

C_{D2}：慣性力を考慮した抗力係数

C) 最大浸水深 $h_{\max}$ のみ利用可能

国土交通省のガイドライン[3]と同様に静水圧による(1.1)式によって、算定する。

・鉛直力

全算定ルートで同様に、(1.6)式より求める。

$$F_Y = F_B - F_W \tag{1.6}$$

ここで、

F_Y：鉛直荷重(kN)

F_B：浮力(kN)

F_W：建築物内部に流入した海水の重量(kN)

ここでは、鉛直荷重は上向きを正とする。

浮力 F_B は(1.7)式で求める。津波作用構面における浸水深 h_f(m)、反対側構面における浸水深 h_r(m)と建築物の奥行き幅からなる台形部分を水没部として算定する。

$$F_B = \frac{1}{2}\rho g(h_f + h_r)A \tag{1.7}$$

ここで、

A：建築物の水没部の水平投影面積(m²)

津波先端部においては図 1-3 のように背面に津波が流れていないため、h_rは零となる。

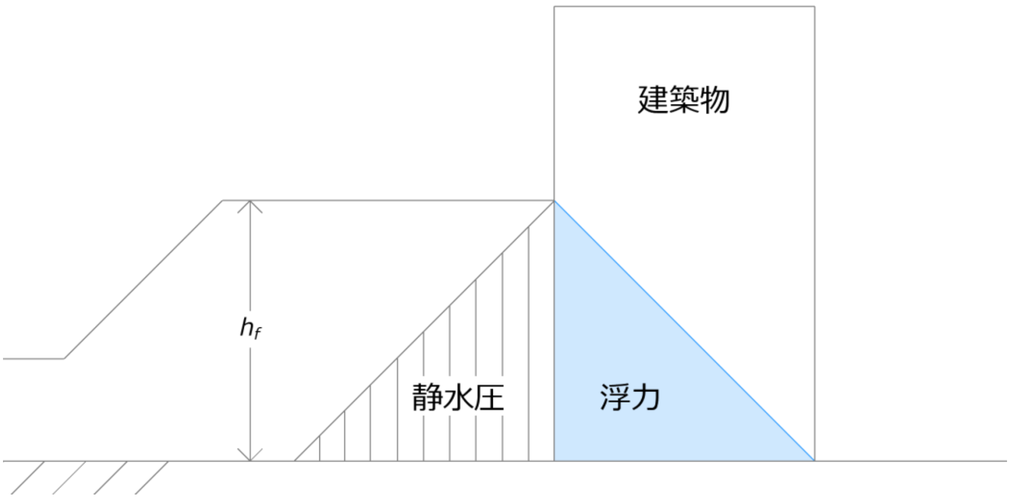


図 1-3 津波先端部での浮力

2) 津波非先端部の荷重（定常ケース）

・水平力

A) 浸水深 $h(t)$と流速 $v(t)$の時系列が利用可能

衝撃ケースと同様に(1.2)式より算定するが、定常ケースにおいては慣性力が小さく、抗力が支配的となるため、慣性力を無視でき、(1.8)式より求める。

$$F_x = \frac{1}{2}\rho C_D B\{h(t)v(t)^2\}_{max} \tag{1.8}$$

B) 最大浸水深 h_{max} と最大流速 v_{max} が利用可能

A)と同様に考え、(1.9)式で算定する。

$$F_x = \frac{1}{2}C_D\rho Bhh_{max}v_{max}^2 \tag{1.9}$$

C) 最大浸水深 h_{max} のみ利用可能

A)、B)と同様に考え、抗力より算定する。流速 v はフルード相似則より簡略的に(1.10)式で求める。

$$v = Fr\sqrt{gh_{\max}} \tag{1.10}$$

荷重指針[2)] ではフルード数 Fr を 0.7~2.0 程度を想定しており、安全側として 2.0 を採用することが望ましい。

また、静水圧による(1.1)式から反対側構面に働く静水圧を差し引き、抗力を求める方法も考えられる。

この場合、反対側構面における浸水深は最大浸水深 h_{max} を採用し、(1.11)式で算定する。

$$F_x = \frac{1}{2}a^2\rho Bgh_{max}^2 - \frac{1}{2}\rho Bgh_{max}^2 \tag{1.11}$$

・鉛直力

津波先端部と同様にして、(1.6)式、(1.7)式より求める。

津波非先端部では、図 1-4 のように反対側構面に津波が流れ込むため、h_r は零とはならない。

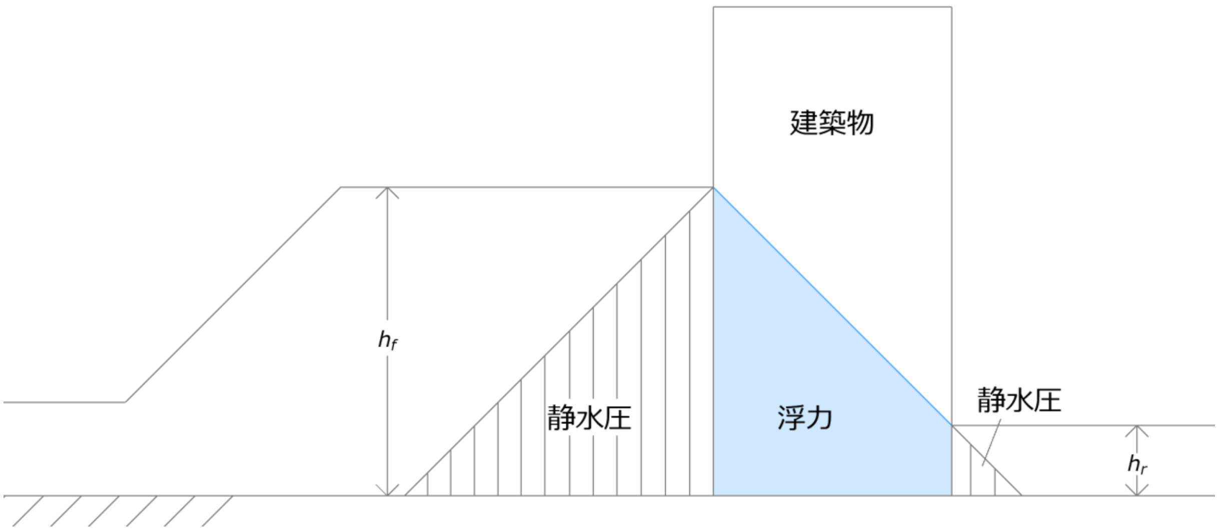


図 1-4 津波先端部での浮力

1.2 既往研究

1.2.1 「中間報告書」での検討

先述の東京大学生産技術研究所による中間報告書[4)] は、東日本大震災の被害調査を基に津波避難ビル等構造設計法及び立地条件等を見直し、技術的整理を行うことを目的としている。この報告書では、構造設計 WG、避難計画 WG、建築制限 WG を設け、それぞれにおいて詳細な検討を行っている。

以下に、構造設計 WG で得られた成果について解説する。図 1-5 に津波荷重と被害形態・程度の対応関係を示す。図の縦軸は計測浸水深 η_m、横軸は構造物耐力相当の静水圧が作用したときの浸水深 $a\eta_m$ を計測浸水深 η_m で除した比として定義した水深係数 a を示している。図中の○と◇印は被害のない工作物と残存する建築物、×と＊印は崩壊した工作物と建築物、△印は軽微な損傷が見られる工作物を示している（以下、中間報告書 [4]、中間報告書その 2[5] に関する図において同様とする）。ここでは、○及び◇印と×及び＊印の境界を探ることで津波波力を推定している。

図 1-5(a)に遮蔽物による波力低減効果が期待できる場合を示す。計測浸水深が概ね 10m 以下の場合、*1 と*2 を除き、被害の有無の境界となる波力は水深係数 a=1 の深さの静水圧相当の波力と考えられる。

図 1-5(b)に遮蔽物による波力低減効果が期待できない場合を示す。図には、×が水深係数 a=1~1.5 の間に数個プロットされており、水深係数 a=1.5 以上の深さの静水圧相当の波力が作用したと考えられる。

以上より、海側に波力低減を期待できる遮蔽物がある場合と無い場合とでは、津波波力に差があると思われ、ある場合は計測浸水深の 1 倍の深さの静水圧相当の波力、無い場合は計測浸水深の 1.5 倍以上の深さの静水圧相当の波力が作用したとしている。

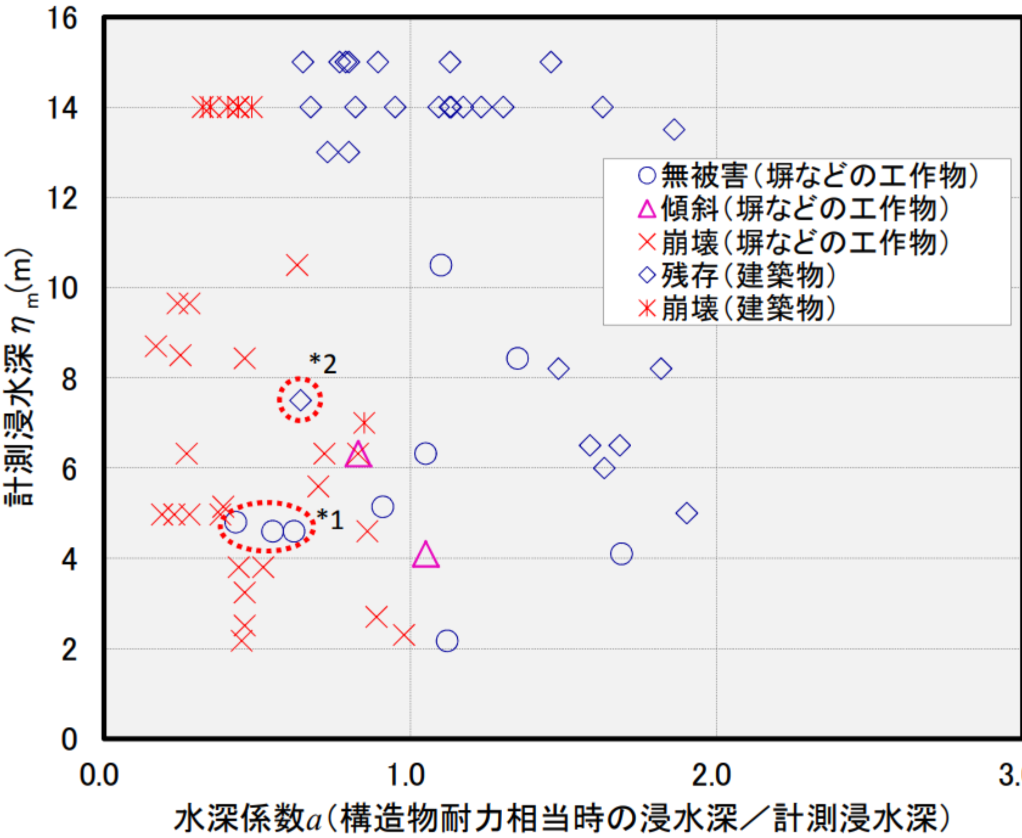


図 1-5(a) 計測浸水深と被害程度の関係（遮蔽物がある場合）

出典・文献 [4],東京大学生産技術研究所(2011)p.1-5

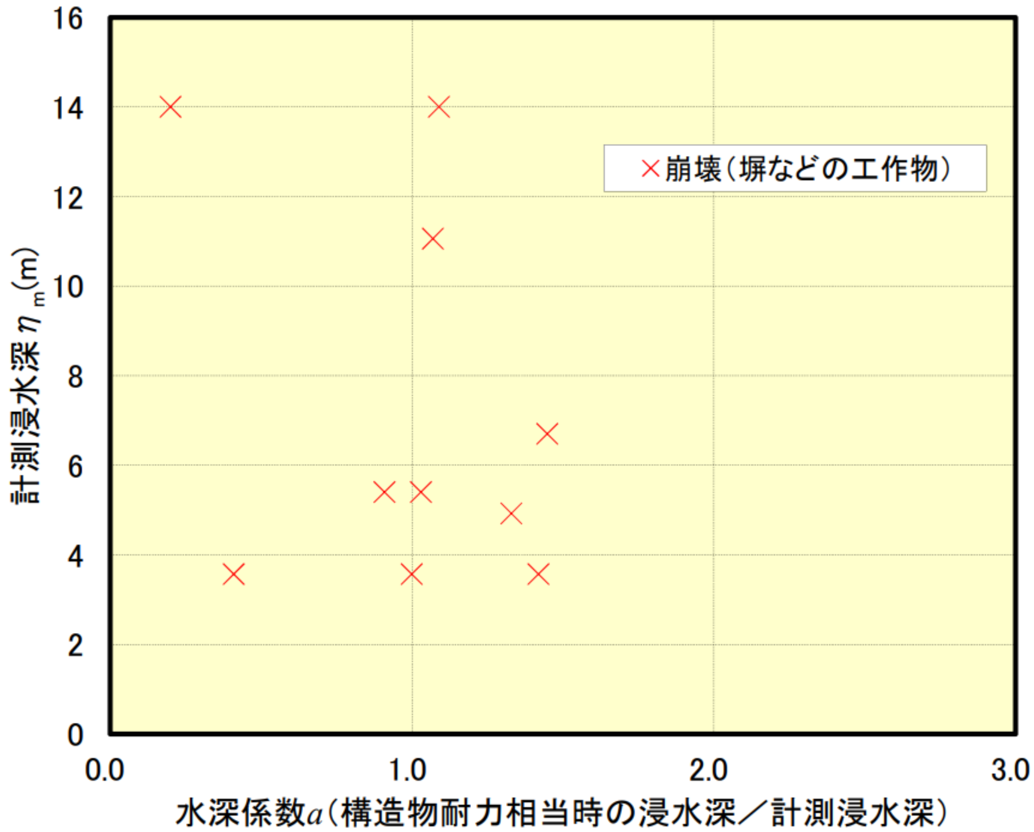


図 1-5(a) 計測浸水深と被害程度の関係（遮蔽物がある場合）

出典・文献[4],東京大学生産技術研究所(2011)p.1-5

中間報告書その 2[5] では、水深係数 a に関する議論を中心に行い、設計用津波荷重算定式の試案をまとめている。その 2 では、構造物の耐力と被害程度の関係から抗力式を用いて流速を推定し、津波来襲時の記録映像から算定された流速の実数値や既往の流速推定式に基づく流速の測定値との比較を行い、抗力式による流速の推定値の妥当性を確認している。その上で、流速と水深係数 a には一定の関係があることを用いて、静水圧式の妥当性の検討を行っている。

(1.9)式で表せる抗力は、対象構造物の多くが四角形であることから、C_D=2.0 とし、(1.12)式のように変形できる。

$$F_x = \rho v^2 A_D \tag{1.12}$$

ここで、

A_D：受圧部分の見附面積(m^2)

一方、構造物に中間報告書その 1[4] で求めた構造物耐力相当の津波波力が作用するとき、図 1-6 のように、構造物が等圧分布波圧 ω を受けると仮定すると、その水平力 V は(1.13)式で表される。

$$\mathrm{V} = \omega A_D \tag{1.13}$$

よって、$F_x = \mathrm{V}$とすると、構造物の耐力相当時の流速 v は(1.14)式で表される。

$$v = \sqrt{\omega/\rho} \tag{1.14}$$

また、構造物の耐力相当時のフルード数 Fr はフルード相似則から構造物の耐力相当時の計測浸水深 η_{m} を用いて、(1.15)式のように表される。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g\eta_{\mathrm{m}}}} = \frac{\sqrt{\omega/\rho}}{\sqrt{g\eta_{\mathrm{m}}}} \tag{1.15}$$

以上より、中間報告書その 1[4] での被害程度・津波波力から得られる構造物の耐力相当時の等圧分布波圧 ω と計測浸水深 η_{m} を用いて、(1.14)式、(1.15)式から、構造物の耐力相当時の流速 v とフルード数 Fr を算出している。

この抗力式から算出される流速は、津波来襲時の記録映像から算定された流速の実数値や既往の流速推定式に基づく流速の測定値と近い値となっており、概ね妥当であるとされている。

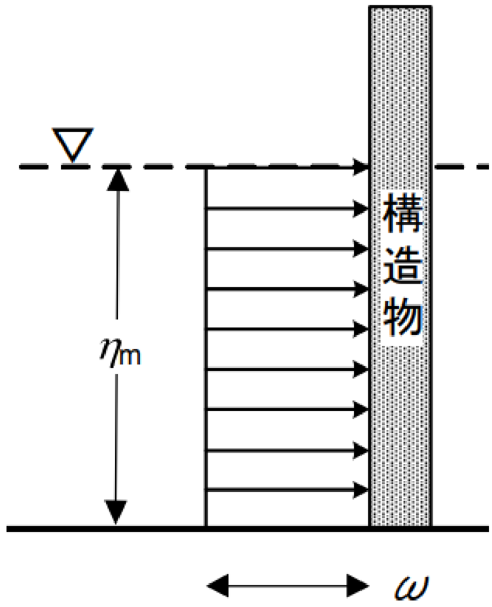


図 1-6 等圧分布波圧 ω を受ける構造物

出典・文献[5],東京大学生産技術研究所(2011)p.2-5（一部修正）

また、推定したフルード数 Fr と水深係数 a の関係を、静水圧式による波力が抗力式による波力と一致すると仮定し、検討している。(1.1)式について、z_1=0、z_2=ah とすると静水圧式による単位幅あたりの波力は(1.16)式のように表される。

$$Q_z = \rho g \int_0^{ah} (ah - z) B dz = \frac{a^2}{2} h^2 \rho g \tag{1.16}$$

一方で、抗力式による単位幅あたりの波力は(1.12)式とフルード相似則より、(1.17)式のように表される。

$$\begin{aligned} F_x &= v^2 A_D \\ &= \rho v^2 (h \times 1) = Fr^2 h^2 \rho g \end{aligned} \tag{1.17}$$

$Q_z = F_x$とすると、水深係数 a とフルード数 Fr の間に(1.18)式が得られる。

$$a = Fr\sqrt{2} \tag{1.18}$$

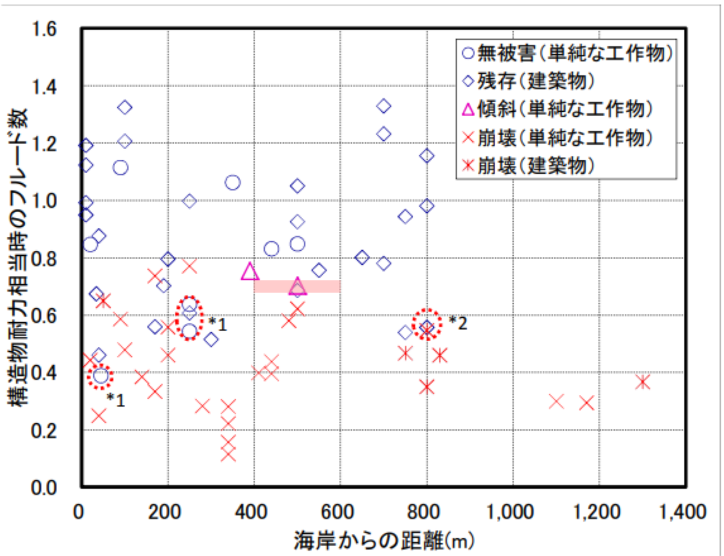
被害程度・津波波力から(1.15)式によって算出されるフルード数 Fr、(1.18)式から算出される水深係数 a を表 1-1 にまとめる。表より、中間報告書[4]による静水圧式による検討と同様に、抗力式による検討でも遮蔽物がない場合は、ある場合の概ね 1.5 倍の水深係数となった。

表 1-1 抗力式から算出されるフルード数 Fr、水深係数 a のまとめ

条件	遮蔽物あり	遮蔽物なし
三陸地方	F_r=0.65 ⇒ a=0.92	F_r=0.9 以上 ⇒ a=1.27 以上
平野部	F_r=0.8 ⇒ a=1.13	F_r=1.2 以上 ⇒ a=1.7 以上

出典・文献[5],東京大学生産技術研究所(2011)p.2-18

また、被害調査において、海岸付近の建物の被害と比べて、内陸の浸水域では被害の程度が軽微である傾向が見られた。これより、海岸からの距離とフルード数の関係の分析を試みている。図 1-8 に横軸に海岸からの距離、縦軸にフルード数をとってまとめたものを示す。図より、海岸から 500m 付近における被害の有無の境界となるフルード数は 0.7 程度となっており、海岸から 500m 以遠では、フルード数は 0.7 から徐々に低減している。



*1 津波進行方向と平行な工作物でその両面への水圧作用により a<1 でも無被害と推定される
*2 側面開口が大きく建物内部への津波流入により a<1 でも無被害と推定される

図 1-8 海岸からの距離とフルード数の関係

出典・文献[5],東京大学生産技術研究所(2011)p.2-12

以上の調査・検討より、水深係数 a の設定例を以下のように提案している。
①遮蔽物無しの場合、後述する朝倉らの研究結果[8] を参考に水深係数 a を 3.0 とする。
②遮蔽物有りの場合、遮蔽物の有無による水深係数の比が 1.5 程度であることから、水深係数 a を 2.0($=3/1.5$)とする。
③図 1-8 によると 500m 以遠では$Fr=0.7$程度以下即ち、$a=1.0$程度以下と見なせそうであり、これに割増率を考慮して水深係数 a を 1.5 とする。

1.2.2 既往研究

朝倉らの研究[8] では、護岸を越流した津波の遡上特性から陸上構造物に作用する波力の評価手法を提案することを目的とし、水理模型実験を実施している。この研究では、長さ 60m、幅 0.7m、高さ 1.5m の実験水路を用い、ソリトン分裂波を含む合計 84 ケースの実験を行っている。ソリトン分裂波は、文献[9] によると、図 1-9 のように津波が溯上して行く過程で，様々な要因により，周期の短い複数の波に分裂し，波高が増幅する現象であり、波力が急激に大きくなることが予想される。実験は模型を設置しないで行う遡上実験と波圧・波力実験からなっている。

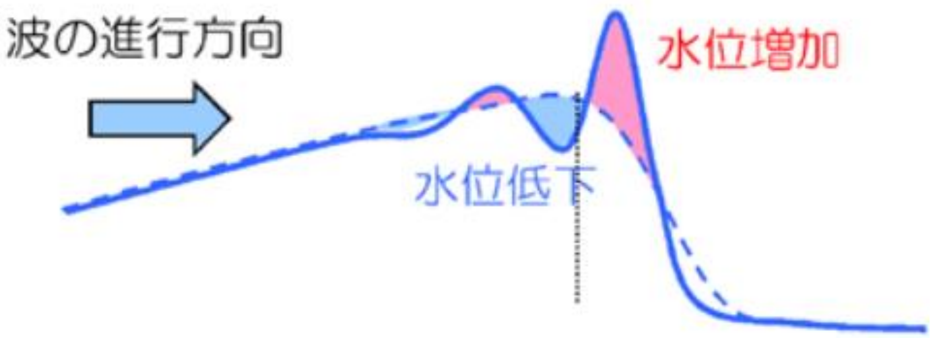


図 1-9 ソリトン分裂波

出典・文献[9],大藪ら (2013)p.117

波圧の評価を非分裂波とソリトン分裂波に分けて行っている。図 1-10 に非分裂波の無次元化最大波圧分布を示す。図 1-10 は、縦軸に計測高さ Z を最大遡上水深 $\eta_{\max}$ で除した無次元量、横軸に計測最大波圧 $P_{\max}$ を静水圧 $\rho g \eta_{\max}$ で除した無次元量をとって、まとめている。図中には、ガイドライン[3] における水深係数$a=1.0$ での静水圧、水深係数$a=3.0$での静水圧を直線で示す。図より水深係数 a を 3.0 とすると、ほとんどの実験ケースを包絡できるため、構造物に働く水平波力を(1.19)式で評価できるとしている。

$$F_x=\frac{1}{2}\,3\eta_{\max}3\rho g\eta_{\max}=4.5\rho g\eta_{\max}^2 \tag{1.19}$$

ソリトン分裂波について、無次元化最大波圧分布は構造物上方 2/3 では、非分裂波と概ね同様の分布形となっているが、構造物下部ではソリトン分裂波の方が 1.8 倍程度大きくなったと評価している。これよりソリトン分裂波の水平波力は、非分裂波に対して約 20% 増加するとしている。

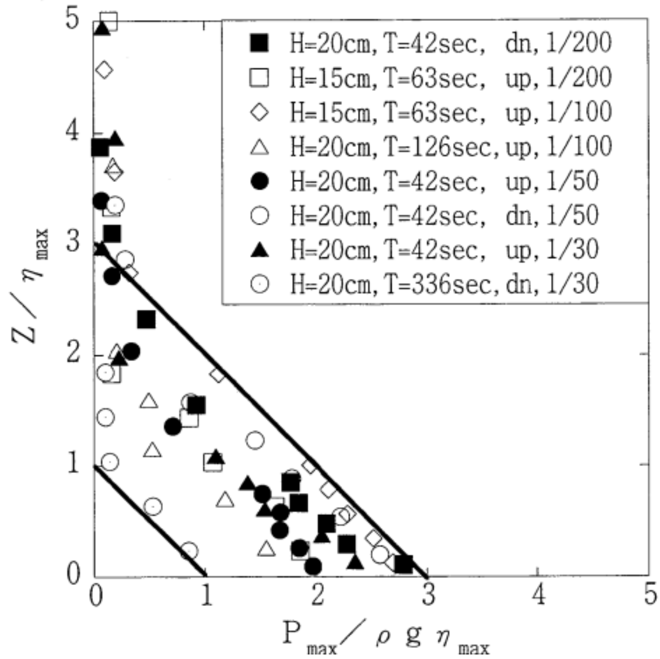


図 1-10 非分裂波の無次元化最大波圧分布

出典・文献[8],朝倉ら (2000)p.914

先述の通り、現行のガイドライン[3]の静水圧式は、浸水深を唯一の変数とした手軽に取り扱えるものとなっているが、流速の影響が考慮されていない等の問題点がある。一方で、荷重指針[2]の抗力式による評価は、流速が考慮されたものとなっているが、必要される流速のデータが提供されている場合は少ない。

そのため、文献[10]は抗力式の評価に必要な運動量流束 M（＝浸水深 h×流速 v の 2 乗）の最大値を浸水深のみを変数とする関数で表すことで、流速依存性を考慮でき、かつ、簡便に使用できる津波荷重の評価式を提案している。

浸水深が建物高さより低い場合、静水圧式、抗力式は下式のように表されることを改めて示す。ここでは、抗力係数 C_D を 2.0 としている。

$$Q_z = \frac{1}{2}\rho g B h^2 a^2 \tag{1.20}$$

$$F_x = \rho B h v^2 = \rho B M \tag{1.21}$$

ここに、

$$M = hv^2 = Fr^2 g h^2 \tag{1.22}$$

である。ここで抗力式は、津波を準定常的な流れとし、慣性項を除いた(1.8)式を使用している。このとき、中間報告書その 2[5]と同様に、$Q_z = F_x$とすれば、(1.18)式で表される水深係数とフルード数の関係が成り立つ。

文献[10)] では、運動量流束 M とフルード数 Fr には、津波の発生機構や伝播経路等によって決まる上限値が存在すると仮説を立てている。そのため、運動量流束 M とフルード数 Fr の上限値を M_{max}、Fr_{max} とすると、運動量流束 M は

$$M \leq M_{max} \tag{1.23}$$

となり、(1.22)式の関係から

$$M \leq {Fr_{max}}^2 g h^2 \tag{1.24}$$

となる制限を受ける。

よって、浸水深が浅い$h \leq \frac{\sqrt{M_{max}/g}}{Fr_{max}}$の場合、(1.24)式が上限値を決め、浸水深が深くなると(1.23)式が上限を決めることとなる。

ここでは、中間報告書その 2[5)] による東日本大震災、文献[11)] によるスマトラ島沖地震の津波被害調査より、運動量流束 M とフルード数 Fr の最大値を提案している。中間報告書その 2[5)] の流速と浸水深の相関図に、運動量流束とフルード数の等高線を重ね描きしたものを図 1-11 に示す。図に示す通り、調査データは鎖線で示す運動量流束 1000m^3/s^2 以下、フルード数 1.4 以下に分布している。また、東日本大震災とスマトラ島沖地震では、無被害と被害の境目となる水深係数 a は浸水深によらず一定であり、2 以下となっていたことを指摘している。

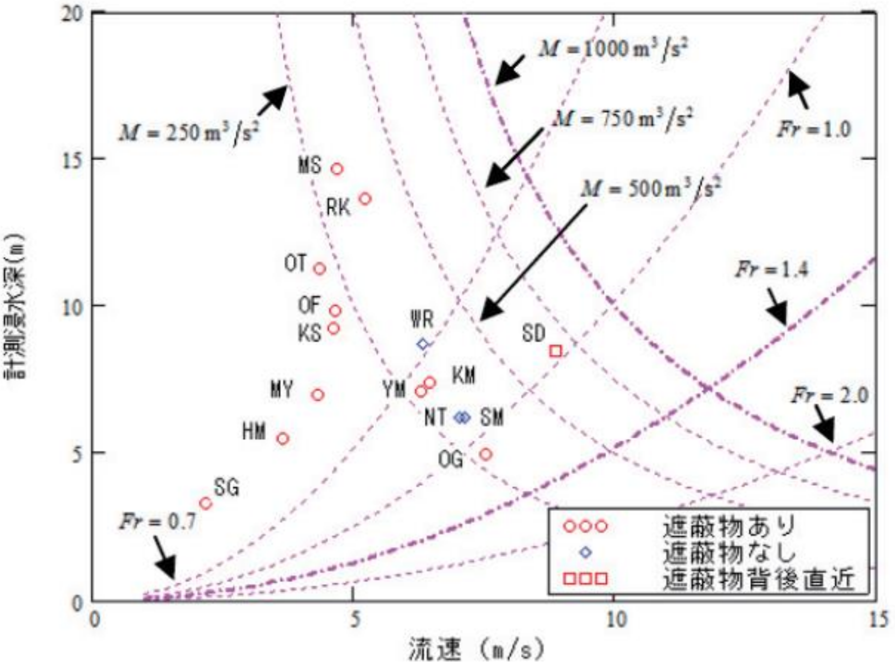


図 1-11 流速と浸水深の関係

出典・文献[10)],松井 (2013)p.1661

この 2 つのことより、浸水深が高い場合の運動量流束の上限値 M_{max} を 1000m^3/s^2 とする。また、中間報告書その 2[5] と文献 [11] より、無被害と被害の境目となる水深係数は浸水深に関わらず、一定であり、遮蔽物がある場合 2 以下であることから、(1.18)式で表される水深係数とフルード数の関係より、

$$Fr_{max} = 2/\sqrt{2} = \sqrt{2}$$
$$M = {Fr_{max}}^2 gh^2 = 2gh^2$$

とする。

このとき、評価式の境目となる浸水深は

$$h = \frac{\sqrt{M_{max}/g}}{Fr_{max}} = \frac{\sqrt{1000/9.8}}{\sqrt{2}} \approx 7$$

となる。

また、遮蔽物が無い場合、中間報告書その 2[5] を参考にして、運動量流束 M を遮蔽物がある場合の 2.25(= 1.5^2)倍とする。

以上より、運動量流束 M と浸水深 h の関係を(1.25)式、(1.26)式と図 1-12 のようにまとめている。

（遮蔽物がある場合）

$$M = 2gh^2 \ (h \leq 7m) \ , \ M = 1000m^3 / s^2 \ (h > 7m) \tag{1.25}$$

（遮蔽物が無い場合）

$$M = 4.5gh^2 \ (h \leq 7m) \ , \ M = 2250m^3 / s^2 \ (h > 7m) \tag{1.26}$$

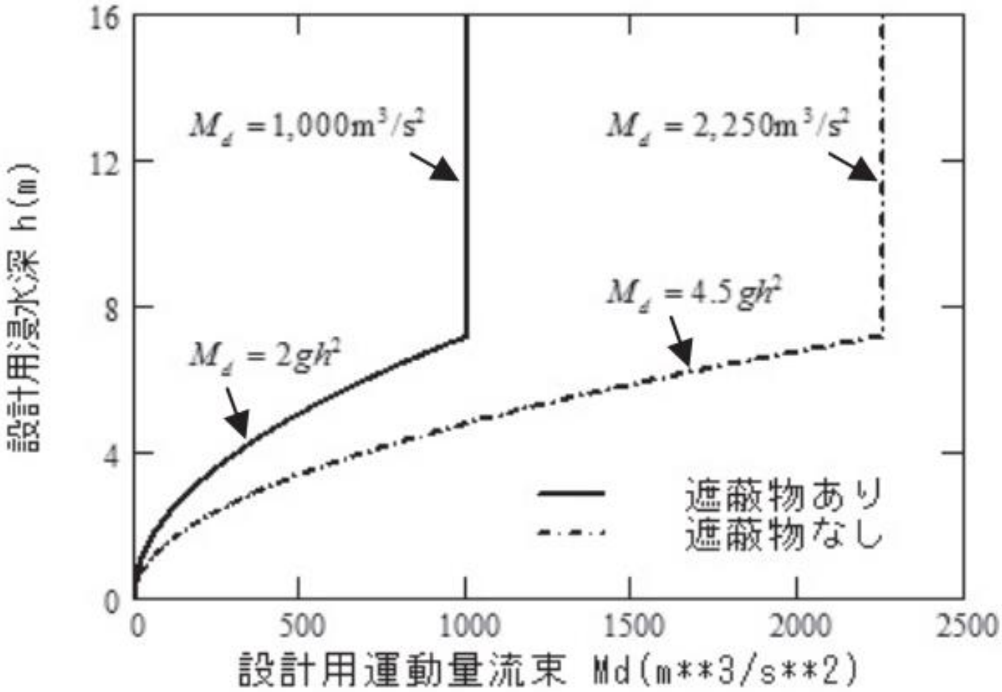


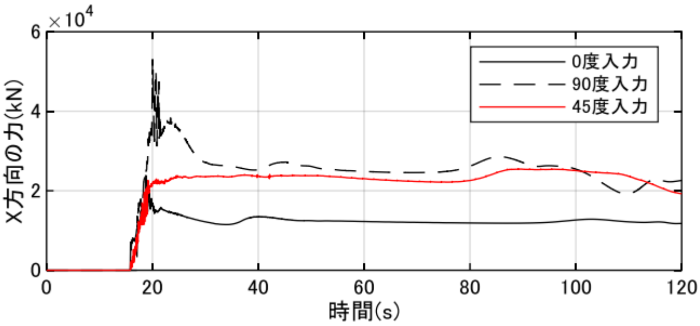
図 1-12 運動量流束と浸水深の関係

出典・文献 [10],松井 (2013)p.1661

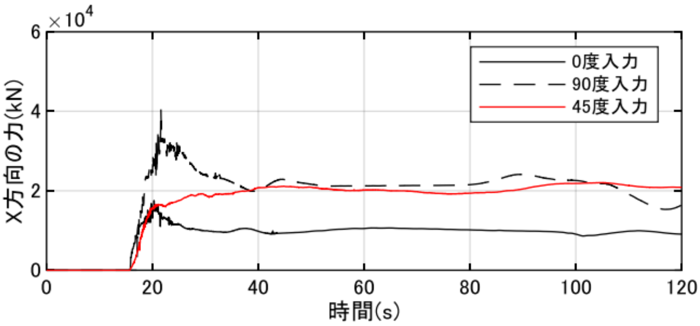
文献[12]では、3 次元流体解析を用いて、斜め 45 度から作用する津波によって免震建物に生じる荷重を評価している。ここでは、建物高さ 20m、平面規模を 70m×35m とした免震建物を対象として、解析をしている。また、建物下部の免震層空間の有無で 2 ケースに分け、解析をしている。ここでは、建物短辺方向に作用する「0 度入力」、「45 度入力」、建物長辺方向に作用する「90 度入力」について検討している。

解析結果について、各条件の時刻歴波圧を図 1-13 に示す。衝撃ケースの荷重は、免震層空間の有無に関わらず、90 度入力が最も大きく、0 度入力と 45 入力はその半分程度の値になったとしている。一方で、定常ケースの荷重は、45 度入力と 90 度入力が同程度、0 度入力はその半分程度としている。これは、津波入力方向に対する見付け幅が影響したとしている。また、免震層空間がある場合の方が全般的に荷重は小さくなった。

45 度入力では衝撃波力の増大が見られなかった。45 度入力の衝突直後の様子を見ると、建物によって津波がかき分けられており、浸水深の上昇が小さかったため、衝撃波力の増大が無かったとしている。



(a) 免震層部空間なし



(b) 免震層部空間あり

図 1-13 建物に生じる荷重の比較

出典・文献[12],山本ら (2022)p.44

文献[13)] [14)] では、円筒形構造物に作用する津波荷重の適切な評価方法の提示を目的に、水理実験と数値流体解析を行っている。ここでは、実験水路内の貯水槽に水を溜め、ゲートを瞬間的に引き上げることで津波を再現し、貯水高さ h_w100mm、140mm、180mm の 3 パターンで実験をしている。模型は、水路上部から鋼板によって吊るすことで固定する。この研究では、津波の流速、浸水深および模型に作用する水平波力、模型周囲の波圧を計測している。水平波力は鋼板の曲げモーメント勾配より計測している。波圧は図 1-14 に示すように、模型鉛直方向に上段、中段、下段の 3 箇所、模型周方向に津波に正対する方向を 0.0°として、計測角 θ を $\theta = 0.0°\sim180.0°$ までの 9 箇所、合計 27 箇所で計測している。

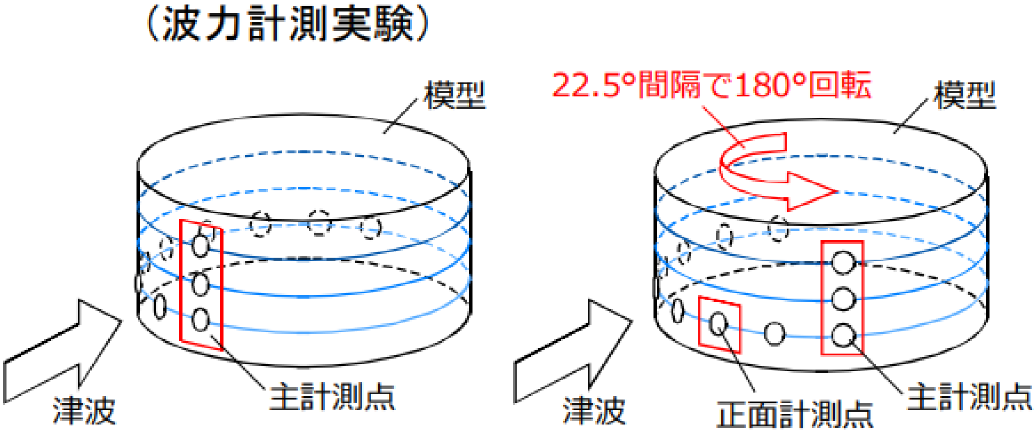


図 1-14 波圧計測箇所

出典・文献[13)],小幡ら (2018)p.77

実験では、上段、中段、下段いずれにおいても、計測角 θ が大きくなるにつれ、計測波圧は徐々に低下している。

また、数値流体解析を実験水路と同様の解析モデルに対して、行っている。この解析では、汎用数値流体解析ソフト OpenFOAM[15)] を用いている。

解析の結果、流速と波圧は実験値よりも小さいものの、流速の変動、時刻歴波圧の形状は概ね一致しているとしている。図 1-15 に実験と解析における周方向の最大波圧（貯水高さ h_w 180mm）を示す。図中には実験値を実線、解析値を破線で示す。図より、計測角 θ が大きくなるにつれて最大波圧が小さくなり、$\theta = 112.5°$より大きい範囲では、最大値はほぼ一定となっていることが分かる。また、実験では $\theta = 0.0°$で最大値を示しているのに対し、解析では $\theta = 22.5°$においても、$\theta = 0.0°$と同様の値を示している。

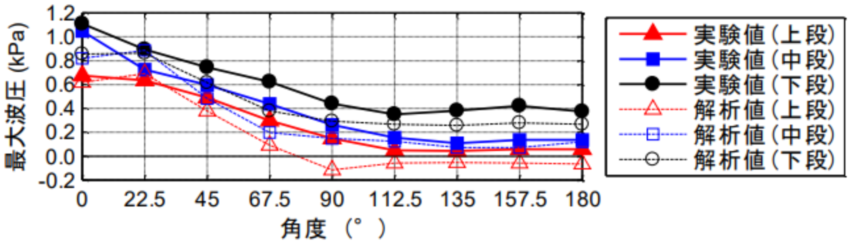


図 1-15 周方向の最大波圧（貯水高さ h_w180mm）

出典・文献[14)],小幡ら (2018)p.80

文献[16) 17)]では、文献[13) 14)]に続き、連棟配置された円筒形構造物に作用する津波波力の基本的な特性を明らかにすることを目的としている。ここでは、図 1-16 に示すように、単棟(Case1)に加え、ダミー模型を用いた 2 棟直線配置(Case2)、3 棟正三角形配置(Case3-T)、3 棟直線配置(Case3-L)を対象に、水理実験と数値流体解析を行っている。また、各配置において、図中の基準線に対する津波入射方向 β、そこから円周方向の計測角 θ、隣棟間隔 *S/D* を変化させている。

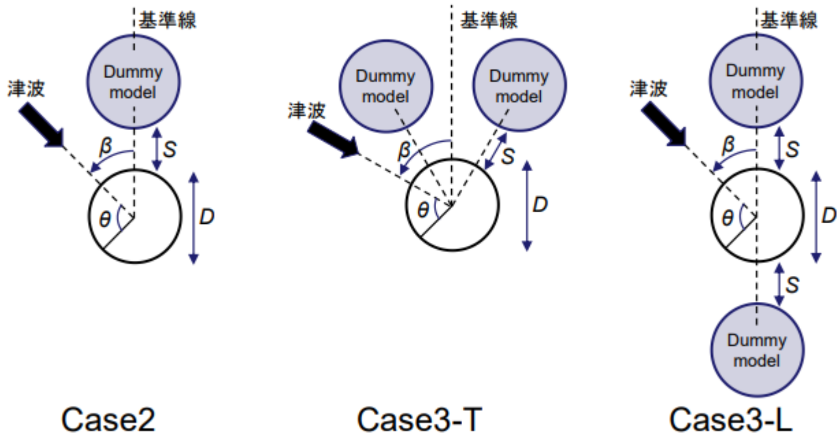
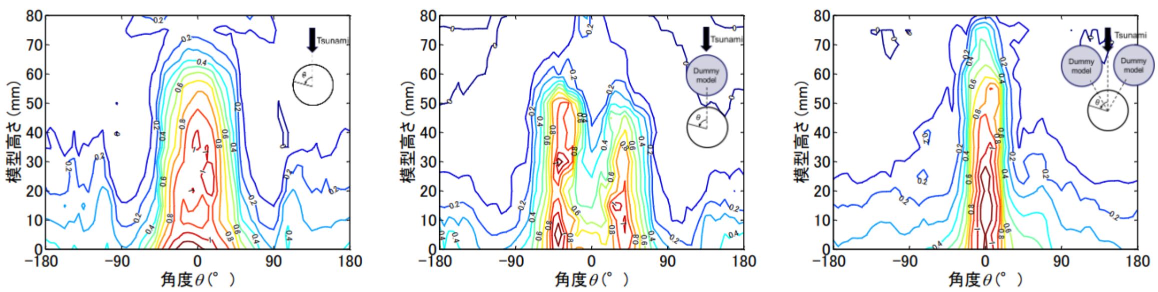


図 1-16 連棟配置ケース

出典・文献[16)],小幡ら (2020)p.149

実験結果について、3 つのいずれのケースにおいても同様の傾向が見られた。津波に対してダミー模型が計測模型の前方に位置する$\beta = 0°$のようなケースでは、ダミー模型が先に衝突することで、津波先端部が計測模型に直接衝突せず、波力が小さくなったとしている。これを連棟配置における「シールド効果」と呼んでいる。一方で、$\beta = 90°$のようなケースでは、単棟よりも棟数が多いことで津波が堰き止められ、浸水深が上昇し、波力が大きくなったとしている。これを連棟配置による「堰き止め効果」と呼んでいる。

数値流体解析には、文献[14)]と同様に、汎用数値流体解析ソフト OpenFOAM[15)]を用いている。また、実験で行った波圧計測等に加え、実験で検討することが困難な図 1-17 に示すような波圧分布図の作成等を行っている。



Case1　　Case2 β=0°　　Case3-T β=0°

図 1-17 波圧分布

出典・文献[17)],小幡ら (2020)p.149

文献[18) 19)]では、建物の平面形状が津波波力に与える影響を整理することを目的とし、ケーススタディと水理実験を行っている。ここでは、長さ 20m、幅 600mm の循環式の開水路を使い、非先端部の津波を再現し、定常ケースについて模型波圧実験を行っている。対象模型は計 8 種で、その平面形状を図 1-18 に示す。実験結果について、定常ケースでは模型形状の変化による波圧の差はほとんどなく、水深係数 3.0 の時の静水圧を下回ったとしている。

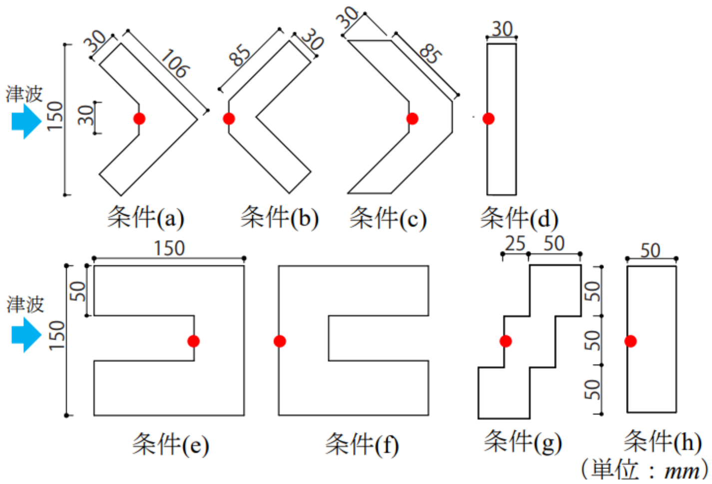


図 1-18 模型平面形状

出典・文献[19)],加藤ら (2020)p.153

これに続き文献[20)]では、図 1-19 に示す自作の開水路で津波先端部の津波を再現し、模型波圧実験を行っている。衝撃ケースでは、定常ケースと異なり、模型形状の変化による波圧の差が見られ、波圧の大きさも定常ケースより大きい結果となった。しかし、再現した津波の流速、浸水深が定常ケースでの津波と比べて大きく異なっていたため、定常ケースとの比較ができず、再実験の必要性があるとしている。

また、水路幅(300mm)が模型幅(150mm)に対して小さく、模型と側壁に津波が堰き止められ、文献[16) 17)]における「堰き止め効果」によって波圧に影響が出たとも考えることができ、結果の妥当性に疑問が残ると考えられる。

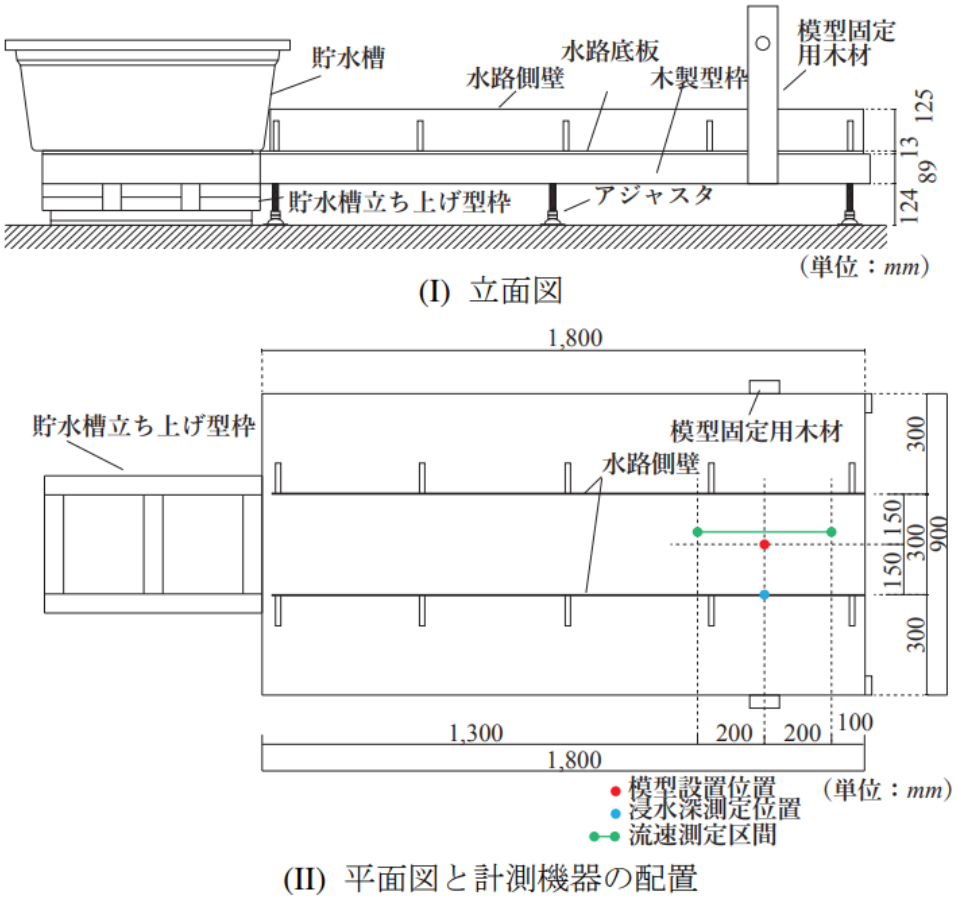


図 1-19 自作開水路

出典・文献[20],加藤ら (2021)p.45

1.3 研究目的

現行の国土交通省のガイドライン[3]では、建築物の見付け幅を基にしているため、文献[18]でも言及している通り、不整形建築物を対象とした場合でも用いることができるか不明瞭となっている。

そのため本研究では、文献[19][20]と同様の模型を対象に、再度、衝撃ケースの水理実験を行い、また定常ケースと衝撃ケースについて、数値流体解析を行う。その上で、実験結果と解析結果の比較、妥当性の検討を行う。以上より、建築物平面形状が津波荷重に与える影響を定常ケースと衝撃ケースそれぞれにおいて、明確化し、整理することを本研究の目的とする。

本研究では、押し波と引き波を検討対象とする。押し波では、衝撃ケースと定常ケースを検討する。引き波では津波が遡上後、海側に戻ることになるため、押し波の非先端部の津波荷重が逆方向に作用するものとする。また、漂流物の衝突による荷重は考慮しない。

本研究はフルード相似則に則って縮尺を行った。フルード数 Fr は流速 v(m/s)、浸水深 h(m)、重力加速度 g(m/s^2)を用いて、下式で表される無次元量である。二つの流れ場のフルード数が等しい場合、その二つの流れ場は力学的に相似となる。

荷重指針[2] では、$Fr = 0\text{~}2$程度の津波を想定しているため、本研究でもその範囲のフルード数を検討対象とした。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$$

1.4 研究方法

本研究では、図 1-20 に示す模型を対象に水理実験、数値流体解析を行う。模型条件は、文献[19][20] からベンチマークとなる模型が模型(a)となるように順番を入れ替えている。すべての模型で、津波入力方向の見付け幅(150mm)と高さ(200mm)を統一した。模型(a)~(d)では、各辺の厚さを 30mm、模型(e)~(h)では、各辺の厚さを 50mm とした。また、模型(b)では、見付け幅を 150mm とするために各辺の厚さの影響により、凹面部分の長さが短くなってしまうため、条件(d)のような形状も検討する。

本研究では文献[8] を参考に、津波入力方向に対して模型前面の波圧を無次元化し、津波荷重の評価を行う。水理実験では、ゲート開放型開水路を用い、衝撃ケースについて、波圧計測を行う。数値流体解析では、汎用数値流体解析ソフト OpenFOAM[15] を用い、定常ケースと衝撃ケースについて、波圧計測を行う。

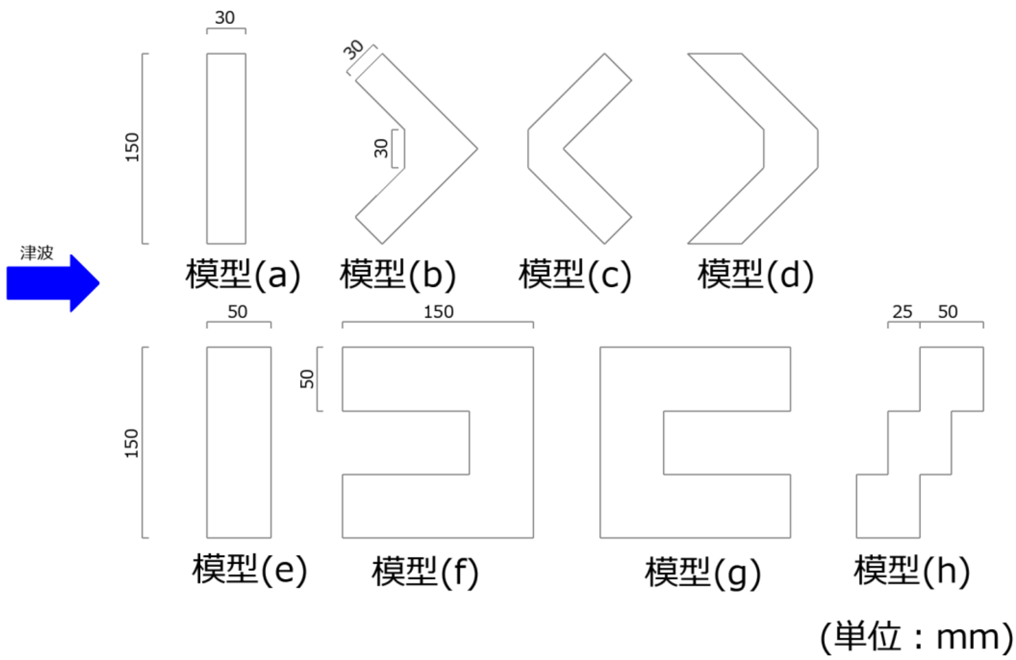


図 1-20 模型平面形状

第 2 章　水理実験

第 2 章 水理実験

2.1 実験概要

2.1.1 実験水路

図 2-1 に水路平面図、図 2-2 に水路断面図、図 2-3 に貯水槽立面図を示す。また、水路の写真を写真 2-1 に示す。水路は、長さ 5.1m、幅 0.9m、高さ 0.6m のコンクリート枠内に作成した。アジャスターで水平を確保した木材型枠の上に、合板の水路底部を設置した。水路側壁には塩ビ板を用いた。貯水槽には合板を用い、開口高さを 100mm、開口幅を 200mm とした。水路内には、流速が大きくなることが予想されたので、減速装置として幅 700mm、奥行き 100mm、高さ 25mm の sin 波断面を持つ障害物を、貯水槽開口部から 3.3m 地点に設けた。模型は水路上部から模型固定装置によって、押さえて固定した。ゲートには、合板をビニール袋で包んだものを用いた。

本研究では、貯水槽に水を 175L 溜め、ゲートを開放することによって水路に水を流し、津波を再現した。平面図の通り、流速測定区間を貯水槽開口部から 3.8~4.2m、浸水深測定位置と模型設置位置を貯水槽開口部から 4.0m とした。

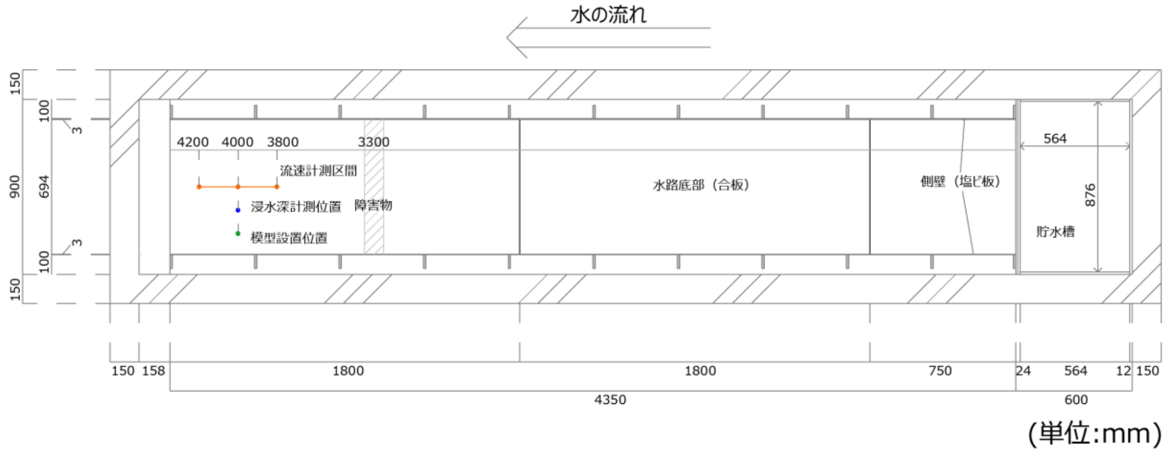


図 2-1 水路平面図

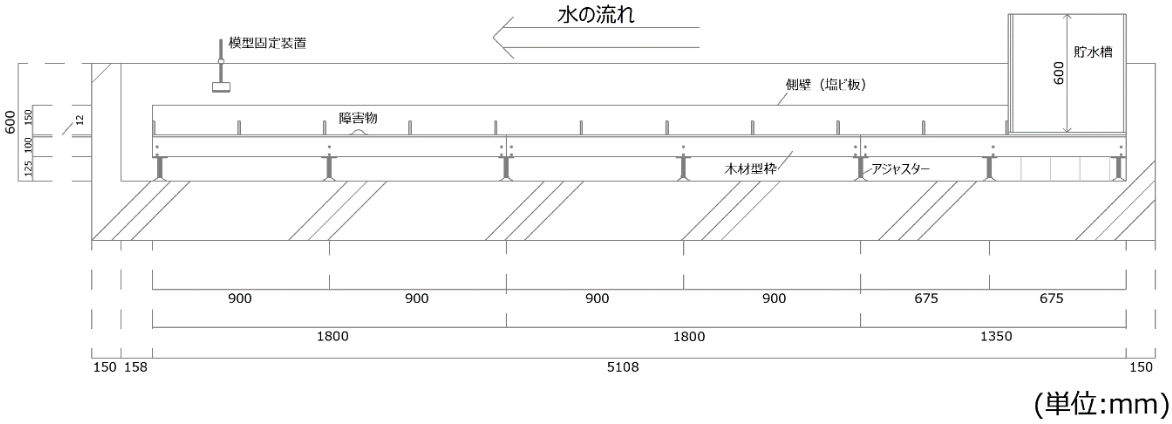


図 2-2 水路断面図

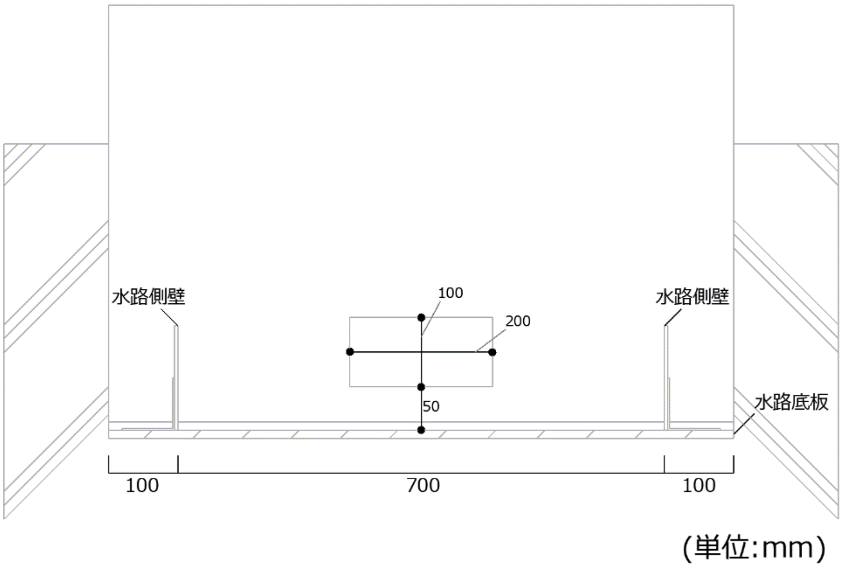


図 2-3 貯水槽立面図

写真 2-1 水路の写真

模型固定装置の概略図を図 2-4 に示す。水路上部にアルミ角パイプを短手方向に架け、コンクリート枠に L 型金具によって固定する。そして、5mm 厚のゴムシートとナット付角座金を取り付けた木材を、アルミ角パイプに通したネジ節鉄筋を締め上部から抑えることで模型を固定する。

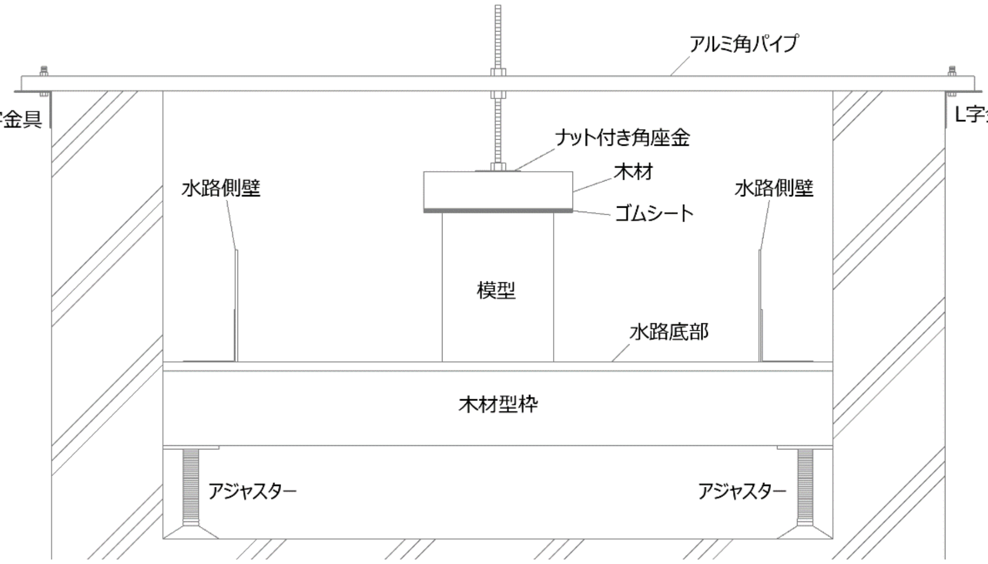


図 2-4 模型固定装置の概略図

2.1.2 津波条件

津波条件を表 2-1 に示す。表には、先行研究[19] における定常ケースの津波条件を併せて、示す。

浸水深は、浸水深計測位置である貯水槽開口部から 4.0m 地点の側壁にテープメジャーを貼り、ビデオカメラで撮影することで浸水深を計測した。流速は、流速計測区間である貯水槽開口部から 3.8m~4.2m の間を、津波が通過した時間から求めた。通過に要した時間は、水路上部から撮影したビデオカメラの映像より求めた。

表 2-1 津波条件

津波条件	流速(m/s)	浸水深(mm)	Fr数
衝撃ケース	1.25	44	1.9
定常ケース[19]	0.60	53	0.8

2.1.3 模型条件

図 2-5 に模型平面形状、写真 2-2 に模型写真を示す。図中の赤印は波圧計測位置を示す。水理実験では、平面形状による影響を大きく受けると予想される模型中央で、波圧を計測した。模型は、塩ビ板の枠内部にモルタルを流し込むことで、作成した。模型(f)、模型(g)では、同じ模型を向きを変えて、用いた。模型は、貯水槽開口部から 4.0m 地点の水路中央に波圧計測位置が重なるように設置した。

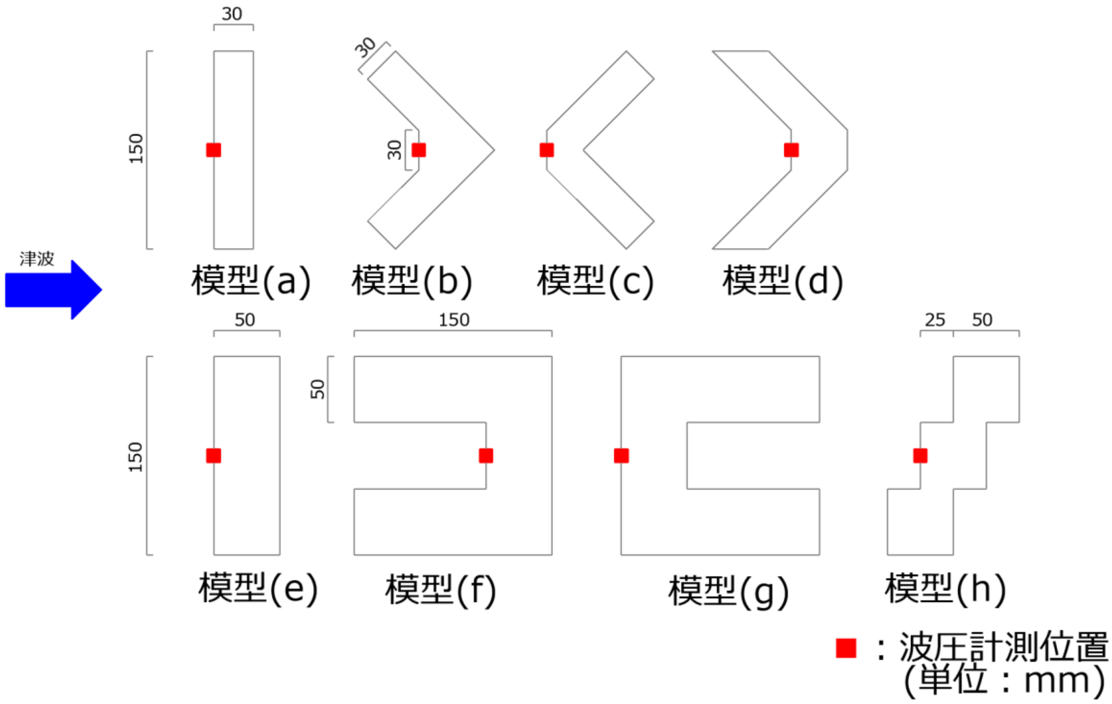
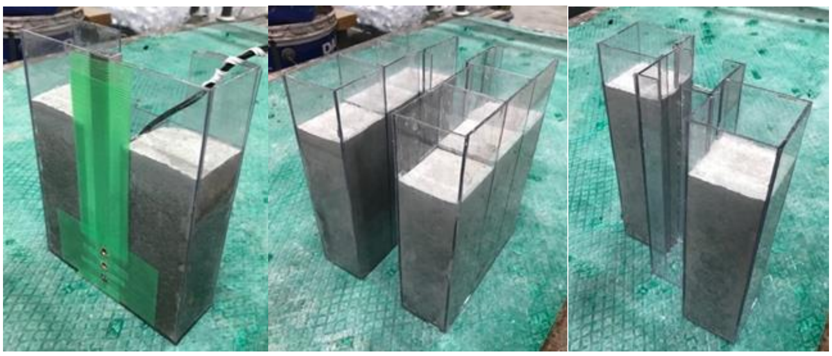


図 2-5 模型平面形状

模型(a)　模型(b)　模型(c)　模型(d)



模型(e)　模型(f)、(g)　模型(g)

写真 2-2 模型写真

波圧の測定には小型間隙水圧計（株式会社東京測器研究所,KPE-200KPB）を使用した。図 2-6 に波圧計設置器具の三面図を示す。波圧計は高さ 75mm まで 15mm 間隔で 5 器、設置した。波圧計は上から CH1、CH2、CH3、CH4、CH5 とした。

各模型の前面に 15mm 幅のスリットを設けて、そこに波圧計設置器具を差込み、養生テープで固定することで設置した。

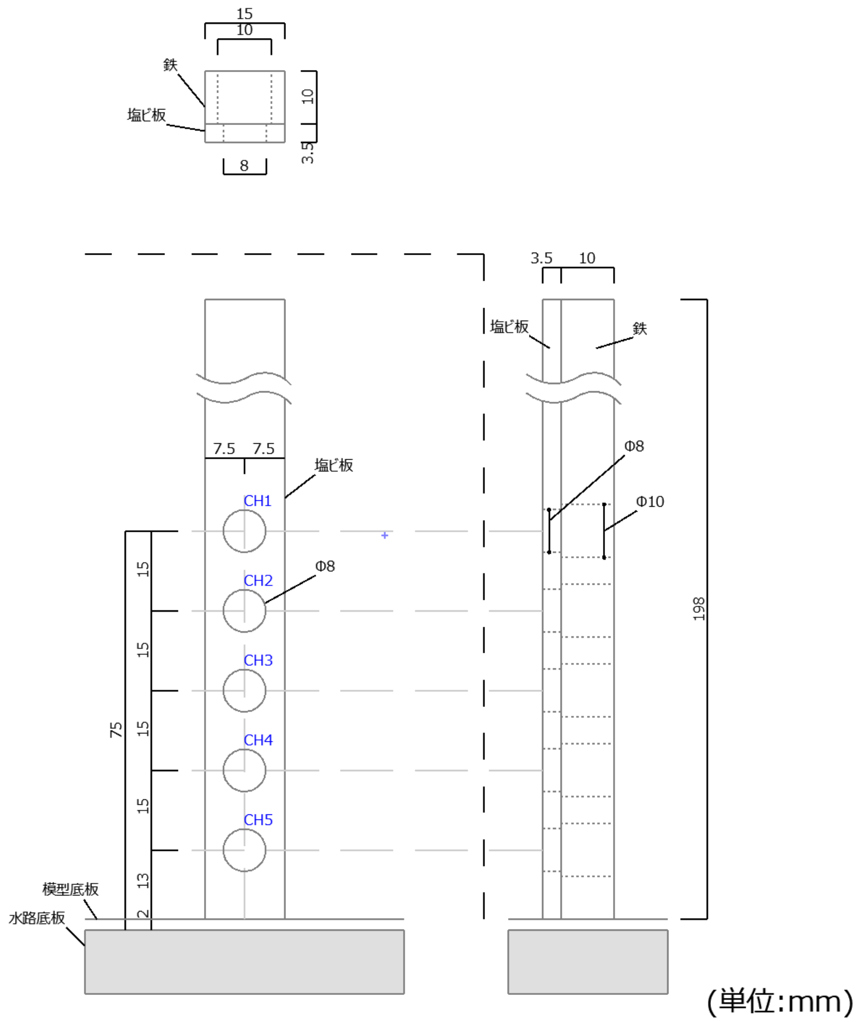


図 2-6 波圧計設置器具の三面図

2.2 実験結果

波圧の計測は原則 5 回行った。模型(e)のみ、一回目の計測に不具合が生じていたため、8 回計測を行った。図 2-7 に時刻歴波圧を、一例として模型(a)の一回目について示す。図に示す通り、衝突直後の各波圧計の最大値を衝撃ケースとして評価した。他の模型、他の回数の時刻歴波圧と実験結果をまとめた表を付録 A に記載する。

無次元化波圧分布について、各模型での回数の比較を図 2-8、平均値での各模型の比較を図 2-9 に示す。計測に不具合が生じていた模型(e)の一回目は、平均値を出す際に除外した。図には、縦軸に計測高さを通過波の浸水深で除した値として定義した無次元化浸水深、横軸に最大波圧を通過波の浸水深による静水圧で除した値として定義した無次元化波圧を取った。図中の灰色の直線は水深係数 2.0 時、黒色の直線は水深係数 3.0 時の静水圧を示す。

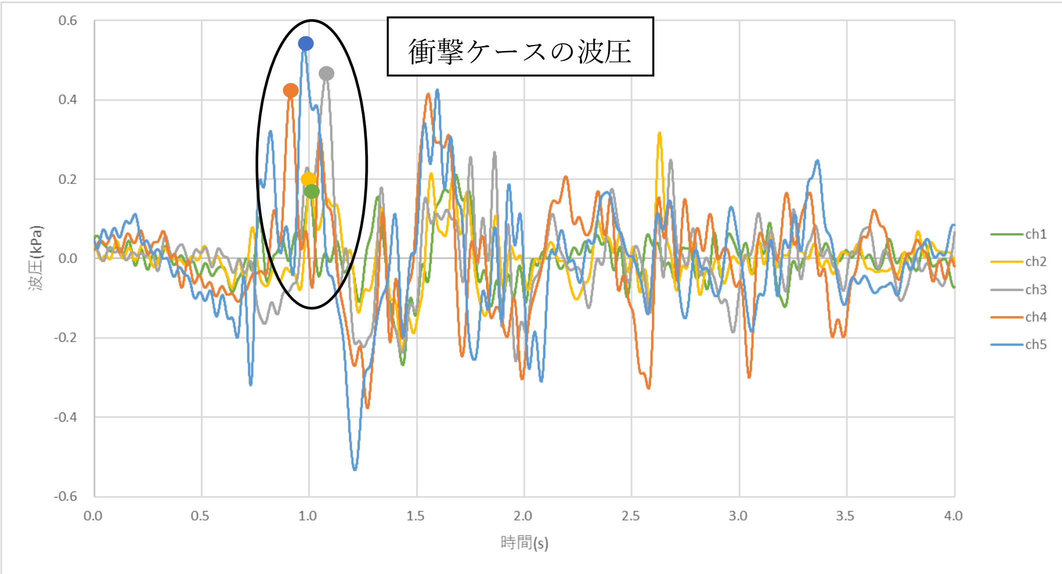


図 2-7 時刻歴波圧（模型(a)、一回目）

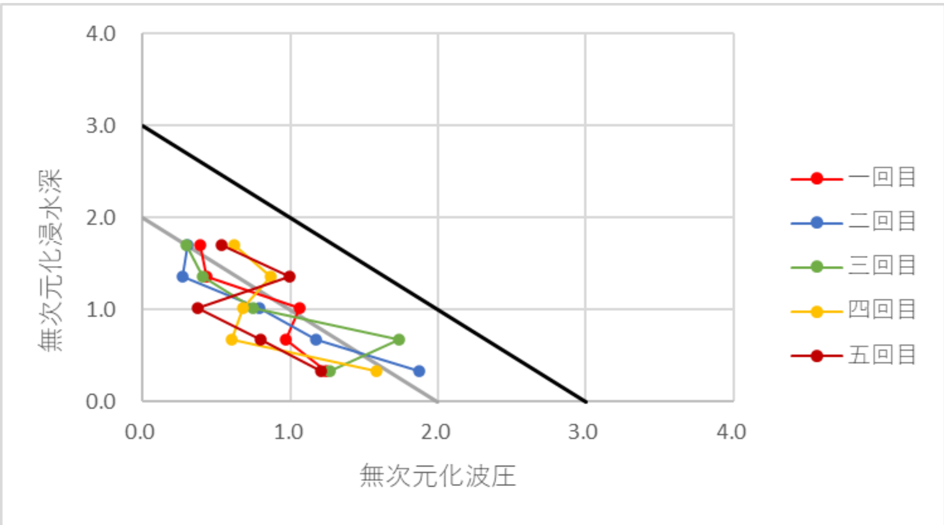


図 2-8-1 無次元化波圧分布（模型(a)）

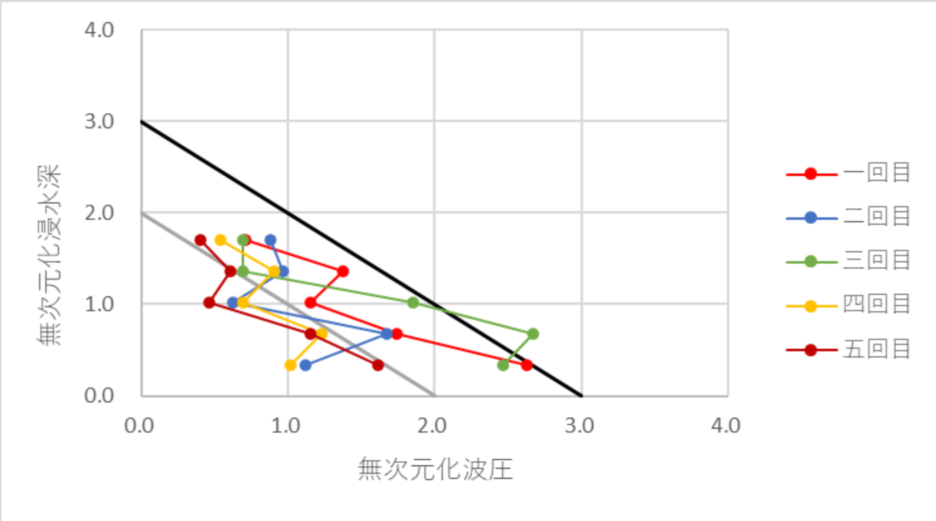


図 2-8-2 無次元化波圧分布（模型(b)）

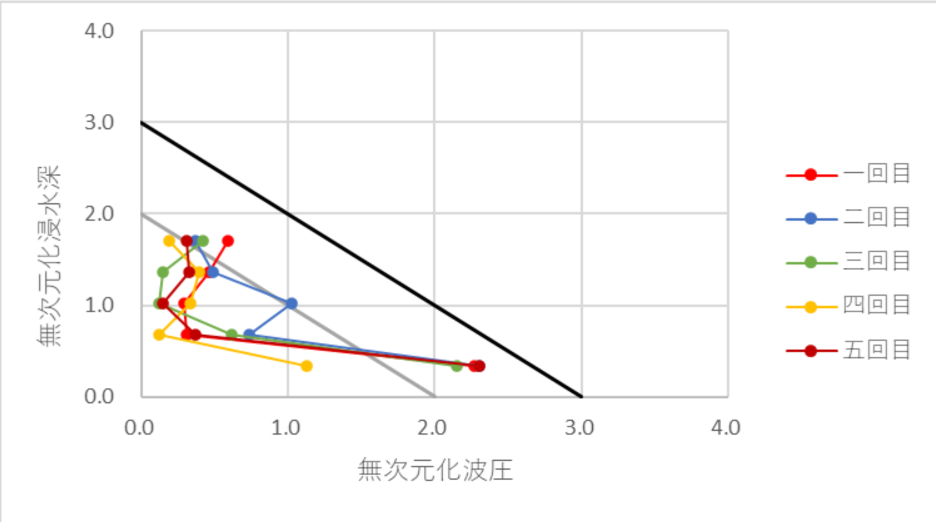


図 2-8-3 無次元化波圧分布（模型(c)）

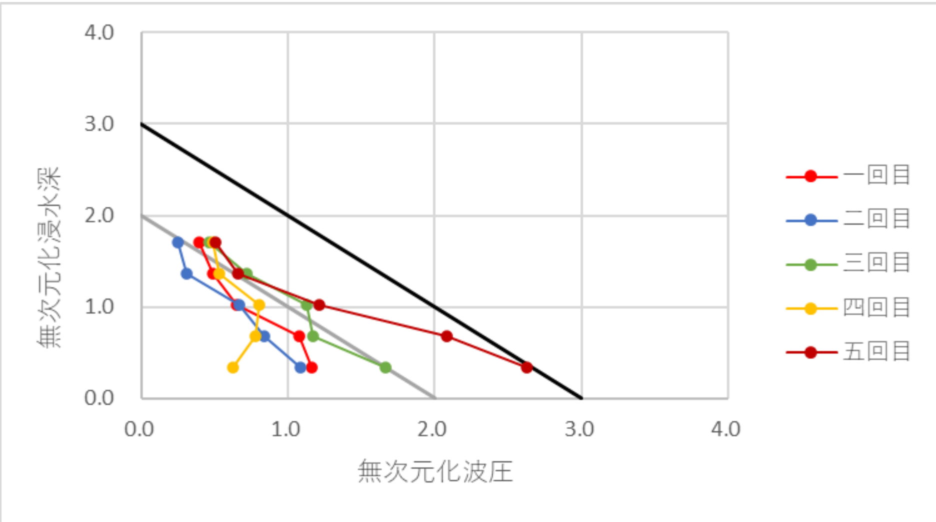


図 2-8-4 無次元化波圧分布（模型(d)）

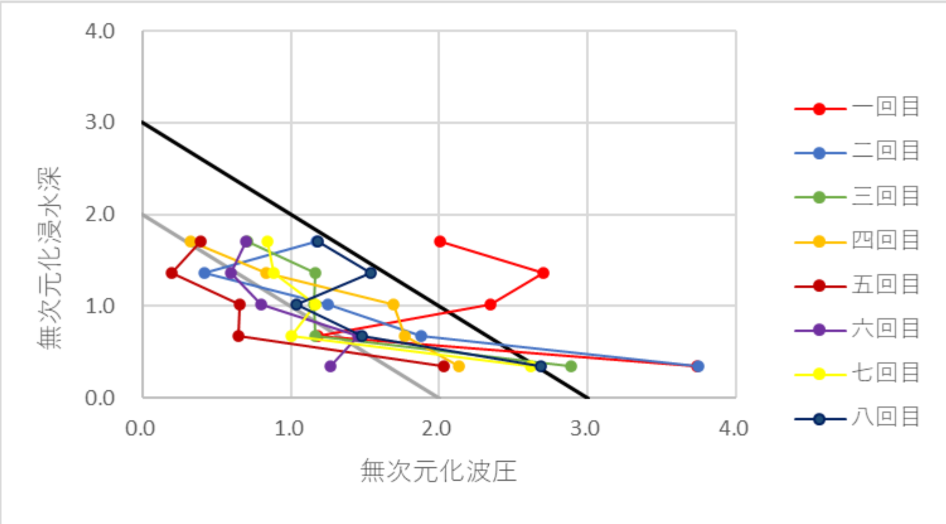


図 2-8-5 無次元化波圧分布 （模型(e)）

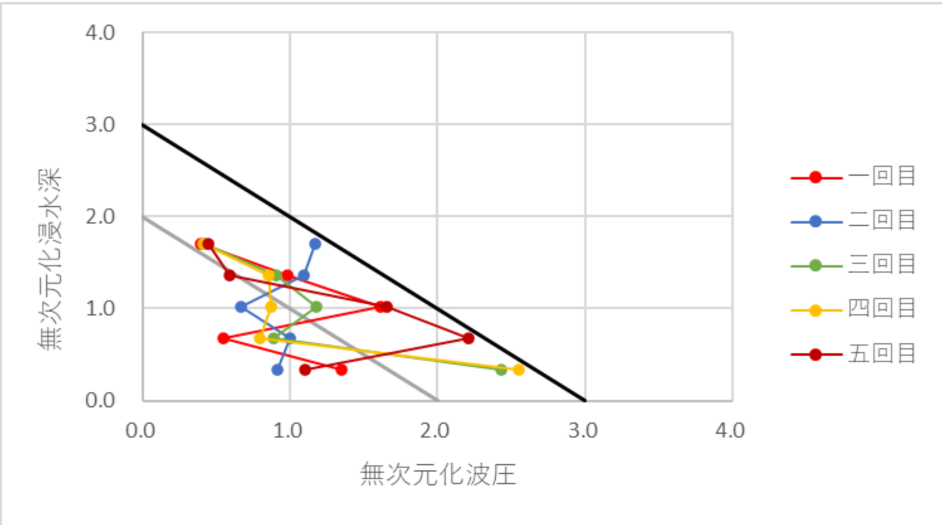


図 2-8-6 無次元化波圧分布 （模型(f)）

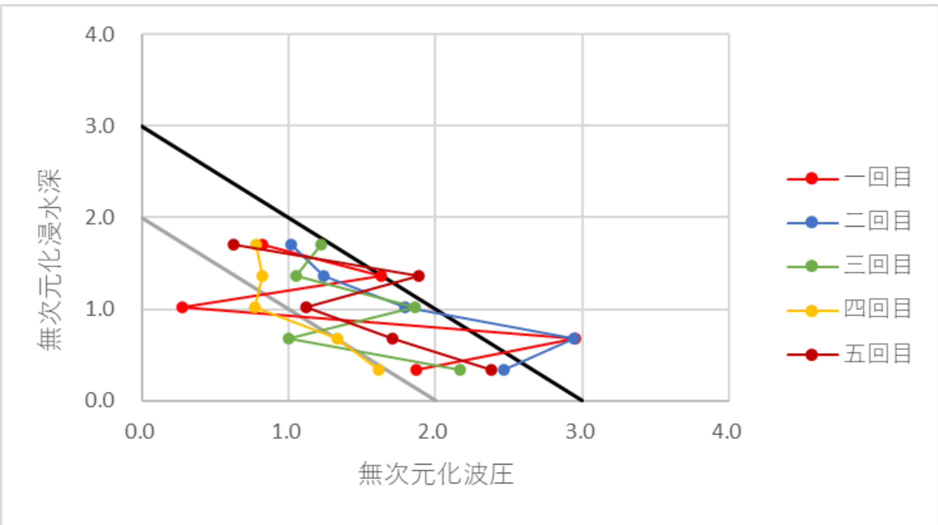


図 2-8-7 無次元化波圧分布 （模型(g)）

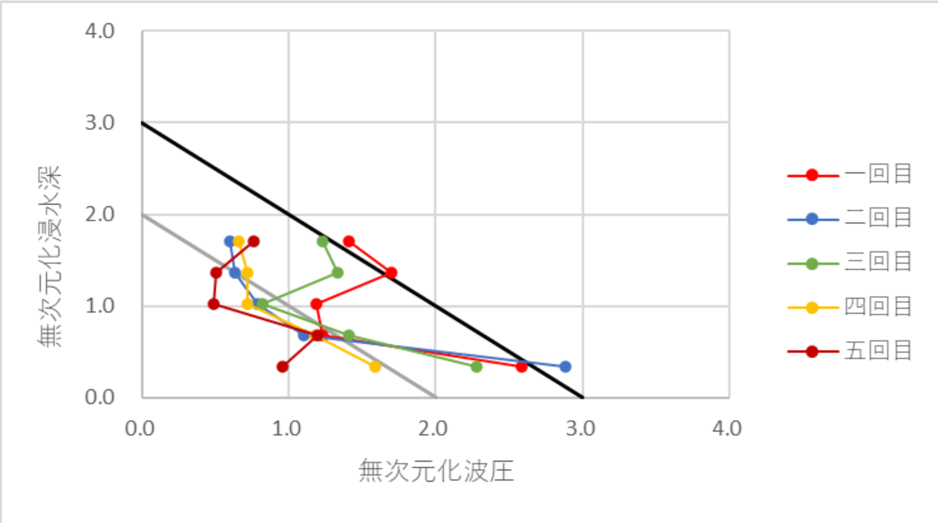


図 2-8-8 無次元化波圧分布 （模型(h)）

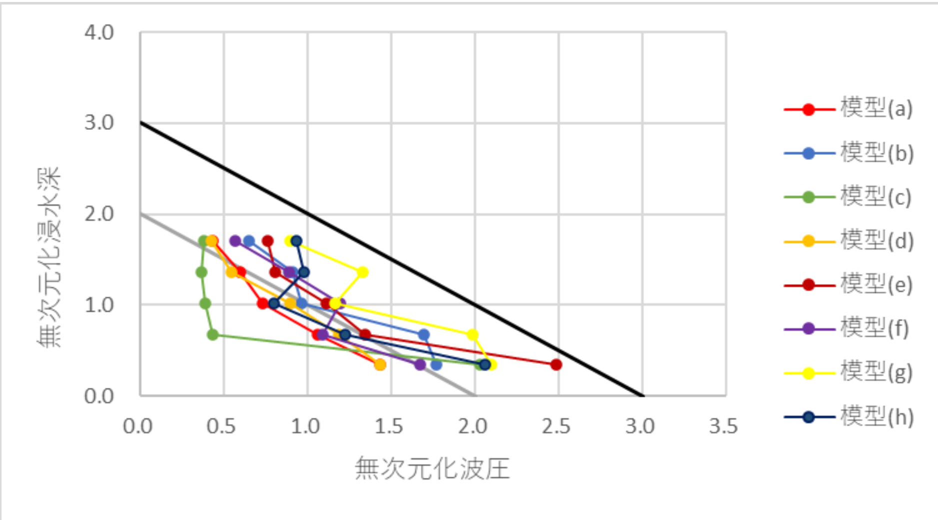


図 2-9-1 無次元化波圧分布 （模型(a)～模型(h)）

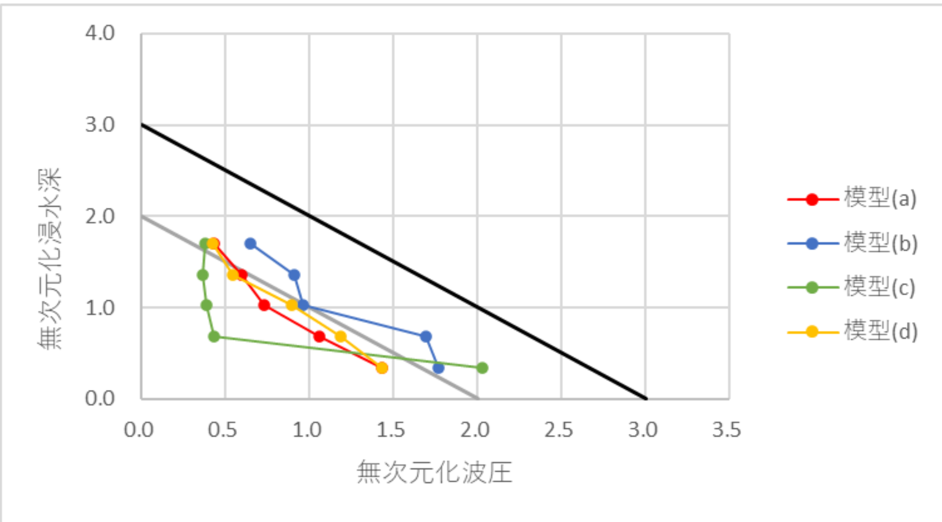


図 2-9-2 無次元化波圧分布 （模型(a)～模型(d)）

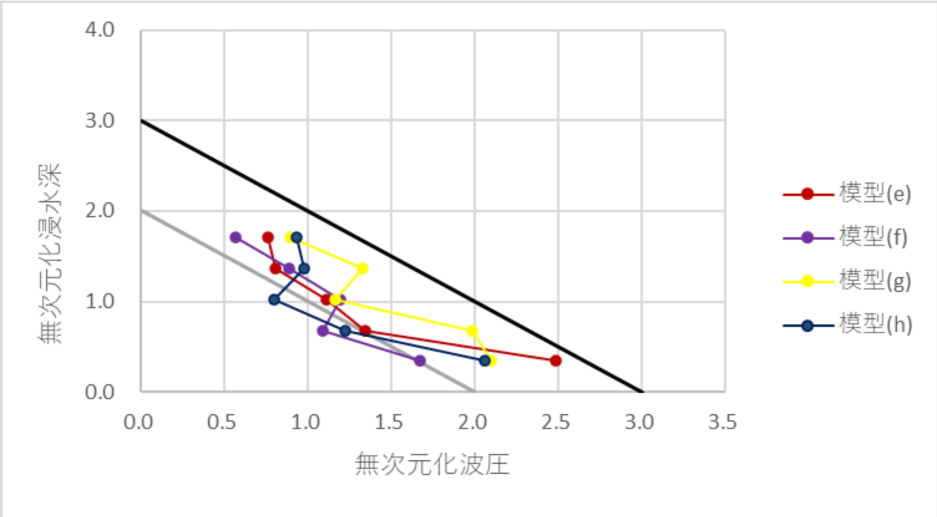


図 2-9-3 無次元化波圧分布（模型(e)～模型(h)）

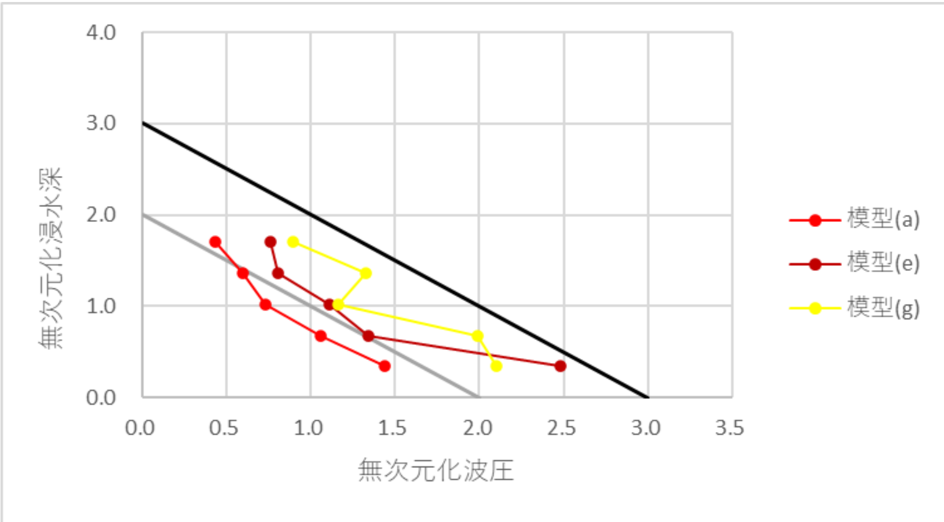


図 2-9-4 無次元化波圧分布（模型(a)、模型(e)、模型(g)）

2.3 考察

2.3.1 模型形状による影響

図 2-8 に示す通り、どの模型においても、回数毎にばらつきが大きく生じていた。特に、階段状平面を持つ模型(h)の一回目、三回目では、模型上部にある CH1、CH2 の波圧が CH3 より大きくなり、他の回数での分布形と大きく異なる分布形となった。また、模型(b)三回目、模型(e)一回目、二回目、三回目、模型(g)一回目、二回目、五回目、模型(h)二回目で水深係数 3.0 時の静水圧を超える結果となった。

図 2-9 を見ると、同じ模型厚さ 30mm である模型(a)～模型(d)では、直方体模型(a)と比べて、模型(b) 、模型(d)で波圧が大きい結果となった。また、模型(d)より模型(b)の方が大きい波圧となった。一方で、模型(c)では、模型(a)と比べて、模型下部にある CH5 では波圧が大きくなったが、CH1~CH4 では波圧が小さくなった。これは凹型の平面形状を持つ模型(b)、(d)では、津波が上流側の凹型突出部分当たることで大きく跳ね上り、波圧が大きくなったことに対し、模型(c)では凸型の平面形状を持つため津波の跳ね上がりが小さく、高い位置での波圧が小さくなったためだと考えられる。

同じ模型厚さ 50mm である模型(e)～模型(h)では、模型(h)で模型上部の波圧が大きく、分布形が上部で切立つ形となった。このことから、階段状平面のような複雑な平面を持つ建築物の津波荷重の評価は、静水圧式では難しいと考えられる。

受圧面が同じ長方形である模型(a)、模型(e)、模型(g)では、CH5 において模型(e)の波圧が模型(g)の波圧より大きいものの、奥行きが大きくなるにつれ、波圧が大きくなる傾向があった。このことから、建築物の奥行きが津波荷重に影響を及ぼす要因となると考えられる。

2.3.2 定常ケースとの比較

先行研究[19]における定常ケースの模型波圧実験での無次元化波圧分布を図 2-10 に示す。ここでは、先行研究[19]から模型条件をベンチマークとなる模型が模型(a)となるように順番を入れ替えている。また、先行研究[19]では模型設置時の浸水深で無次元化を行っているが、本研究において、衝撃ケースの波圧の評価を模型を設置していないときの通過波の浸水深で行ったため、図 2-10 には比較のため、定常ケースでの模型を設置していないときの通過波の浸水深で無次元化を行ったものを示す。

先行研究[19]では、実験回数ごとに結果に大きな差は無かったとしている。図 2-10 を見ると、定常ケースでは、模型ごとに実験結果に大きな差は無いことが分かる。また、波圧の大きさは水深係数 2.0 時より大きく、水深係数 3.0 時を越えない結果となった。これより、定常ケースでは、現行のガイドライン[3]における水深係数を 3.0 とすることで、どの模型でも安全側に評価できる結果となった。

一方で、衝撃ケースでは先述した通り、模型形状によって波圧分布の形や波圧の大きさが異なる結果となった。また、波圧が水深係数 3.0 時を超える実験条件がいくつか存在しており、現行のガイドライン[3]では、安全側に評価ができない結果となった。

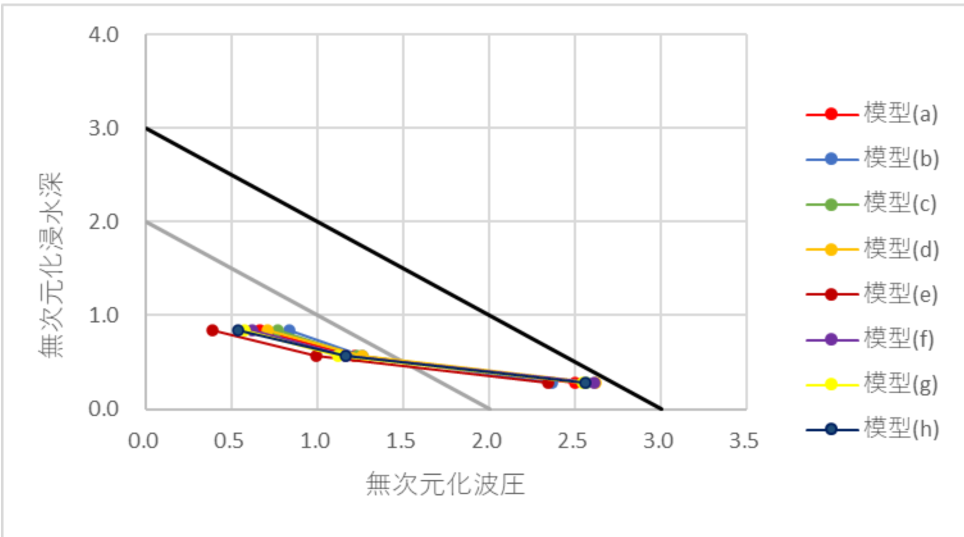


図 2-10 無次元化波圧分布（定常ケース[19]）

第 3 章　数値流体解析

第 3 章 数値流体解析

3.1 解析概要

3.1.1 解析手法

本解析には、汎用数値流体解析ソフト OpenFOAM[15)] にある VOF(Volume of Fluid)法による不混和流体の非圧縮性・等温多相流のソルバーである multiphaseInterFoam を用いた。ここでは、空気と水の 2 つの流体を設定した。空気と水の物性値を表 3-1 に示す。水理実験を 2 月下旬に行ったため、気温、水温を 5℃として、物性値を設定した。VOF 法とは、図 3-1 に示すように、要素内で流体が占める流体体積率を計算し、自由表面を表現する手法である。

表 3-1 流体の物性値

流体	密度(kg/m^3)	動粘度(m^2/s)
空気	1.250	1.399×10^{-5}
水	1000	1.519×10^{-6}

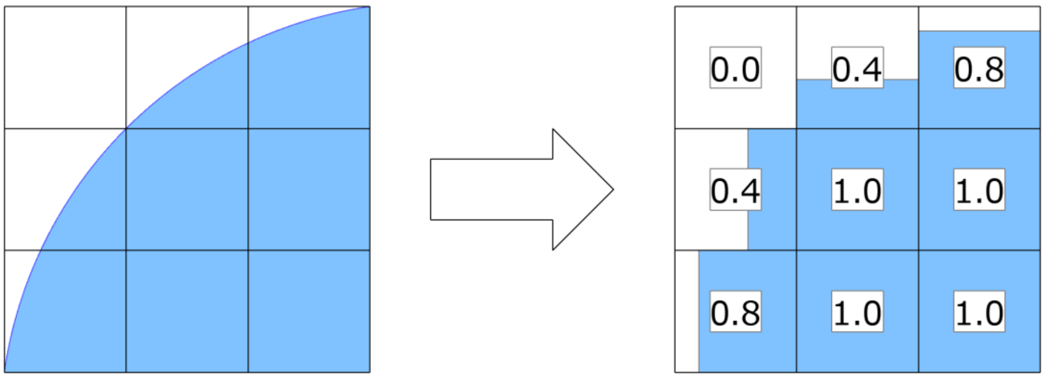


図 3-1 VOF 法の概要

本解析における支配方程式は連続の式と Navier-Stokes 方程式である。
連続の式は流体の密度 ρ、速度ベクトル $\boldsymbol{v}$、ベクトル演算子 ∇を使い、(3.1)式で表される。連続の式は質量保存測より導出される。非圧縮性流体を考える場合、密度は一定であり、$\partial\rho/\partial t = 0$となるため、(3.1)式は(3.2)式と表すことができる。

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\boldsymbol{v}) = 0 \tag{3.1}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{v} = 0 \tag{3.2}$$

非圧縮性流体における Navier-Stokes 方程式は流体の密度 ρ、速度ベクトル $\boldsymbol{v}$、圧力 p、ベクトル演算子 ∇、ラプラス演算子 ∇^2を使い、(3.3)式で表される。Navier-Stokes 方程式は運動方程式より導出される。ここで、左辺第一項は時間微分項、左辺第二項は移流項、右辺第一項は圧力項、右辺第二項は粘性項、右辺第三項は外力項となる。

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \nabla)\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \boldsymbol{v} + f \tag{3.3}$$

ここで、 ν は動粘性係数、f は単位体積、単位質量あたりの外力を表す。

乱流モデルは通常、3 次元非定常解析で用いられるとされる LES(Large Eddy Simulation)の標準 Smagorinsky モデルとし、Smagorinsky 定数 C_s は 0.167 とした。

時間刻みはクーラン数 C が 0.7 以下になるように可変とした。

OpenFOAM では、偏微分方程式の離散化手法として有限体積法が用いられている。ここでは、時間スキームに 1 次精度陰解法、空間スキームに 2 次精度中心差分を用いた。また、計算アルゴリズムには、PIMPLE 法を用いた。

流体力学、数値計算手法の詳細な説明は、付録 C に記載する。

3.1.2 解析モデル

本解析は、図 3-2 に示す 2 つの解析モデルを対象とした。モデル①では、水理実験と同様の水路において、175L の水塊のダムブレークによって、津波を再現した。モデル②では、衝撃ケースの水理実験における通過波と同様の浸水深 h(=44mm)、流速 v(=1.25m/s)の水流を一定に流すことで、津波を再現した。模型は図に示す通り、モデル①では貯水槽開口部から 4000mm 地点、モデル②では津波入力面から 100mm 地点のモデル中央に設置した。

モデル①では、津波先端部の再現のために、3 秒まで解析を行った。モデル②では、一定量の水流を流し続けることができるため、衝撃ケースと定常ケース、両者について解析できると考えた。従って、モデル②では 15 秒まで解析を行った。

メッシュ数はメッシュ角が 10mm となるように、モデル①においては約 2,700,000、モデル②においては、約 63,000 とした。

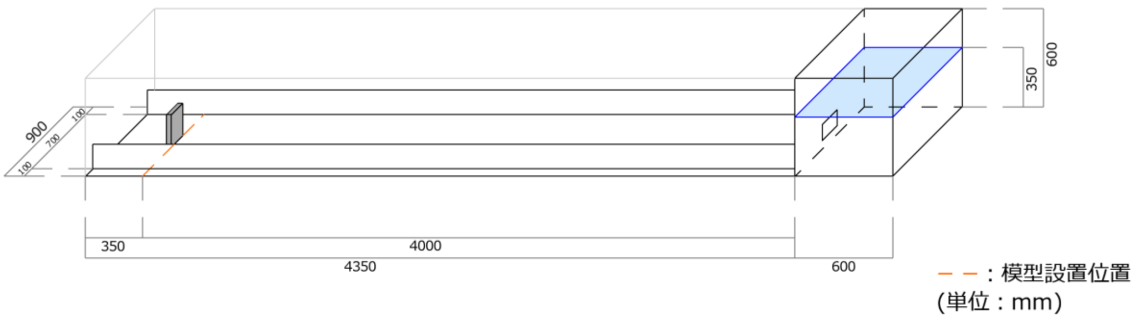


図 3-2-1 解析モデル①

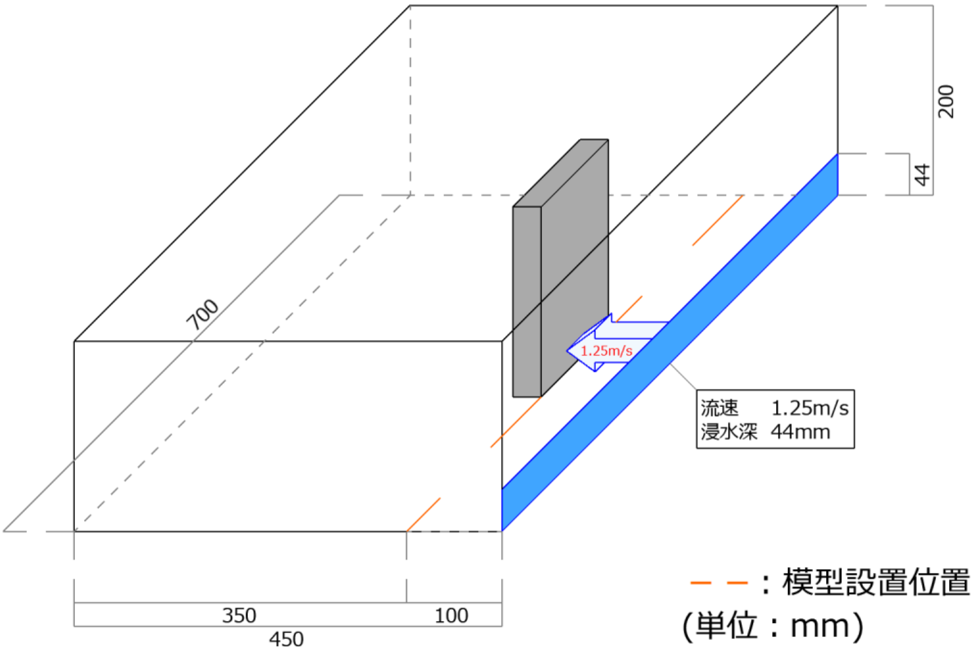


図 3-2-2 解析モデル②

境界条件について、モデル①では水路、模型の壁を no-slip 条件とし、水路上部側、水路下流側を自由流入出条件とした。モデル②では水路底部、水路側壁、模型の壁を no-slip 条件とし、水路上部側、水路上流側、水路下流側を自由流入出条件とした。

津波条件を表 3-2 に示す。モデル①の津波条件は、後述する通過波の解析によって、決定した。表に示すようにモデル①では、実験水路の再現が難しく、実験の津波条件と大きく異なる津波となり、本研究で対象とするフルード数$Fr = 0\sim2$よりも大きいフルード数となった。このことから、水理実験との比較のため、実験と同じ条件の津波を直接流すモデル②の検討を行った。

表 3-2 津波条件

モデル	流速(m/s)	最大浸水深(mm)	Fr数
モデル①	2.25	35	3.8
モデル②	1.25	44	1.9

図 3-3、図 3-4 に模型平面形状と波圧サンプリング位置を示す。図に示す通り、波圧計測位置を水理実験から増加させ、模型幅方向に 25mm 間隔で A~E の 5 列、模型鉛直方向に 15mm 間隔で 1~5 の 5 行、合計 25 箇所に設定した。模型(f)と模型(h)では、B 列、D 列が側壁部となるため、計測を行わなかった。

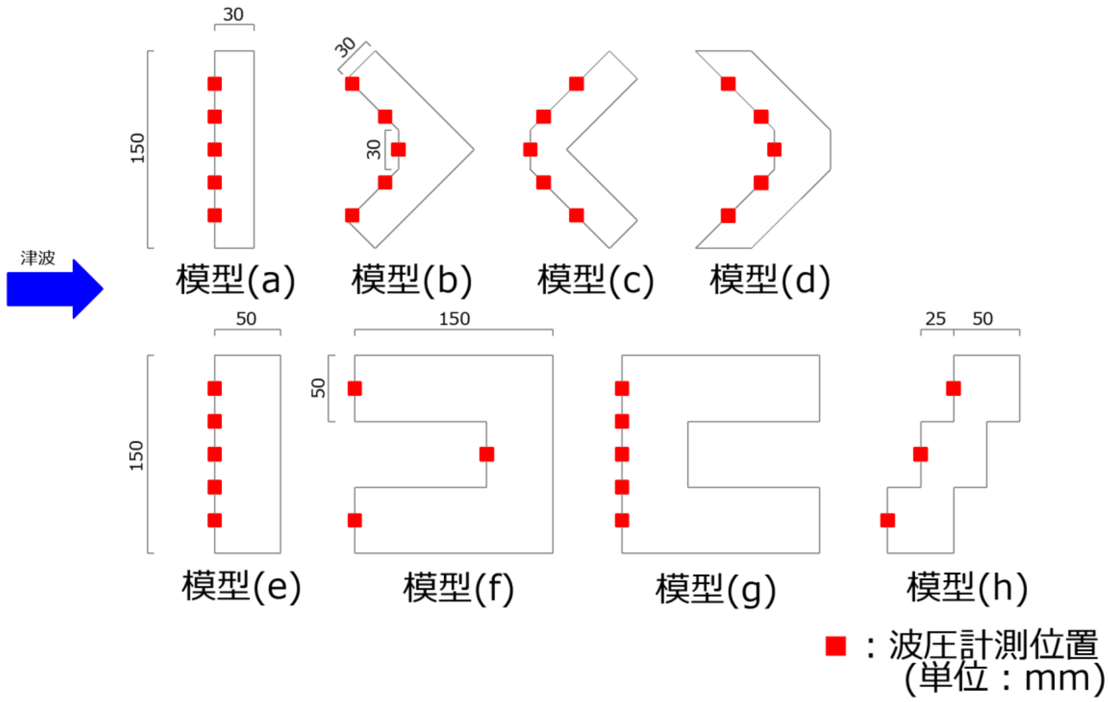


図 3-3 模型平面形状

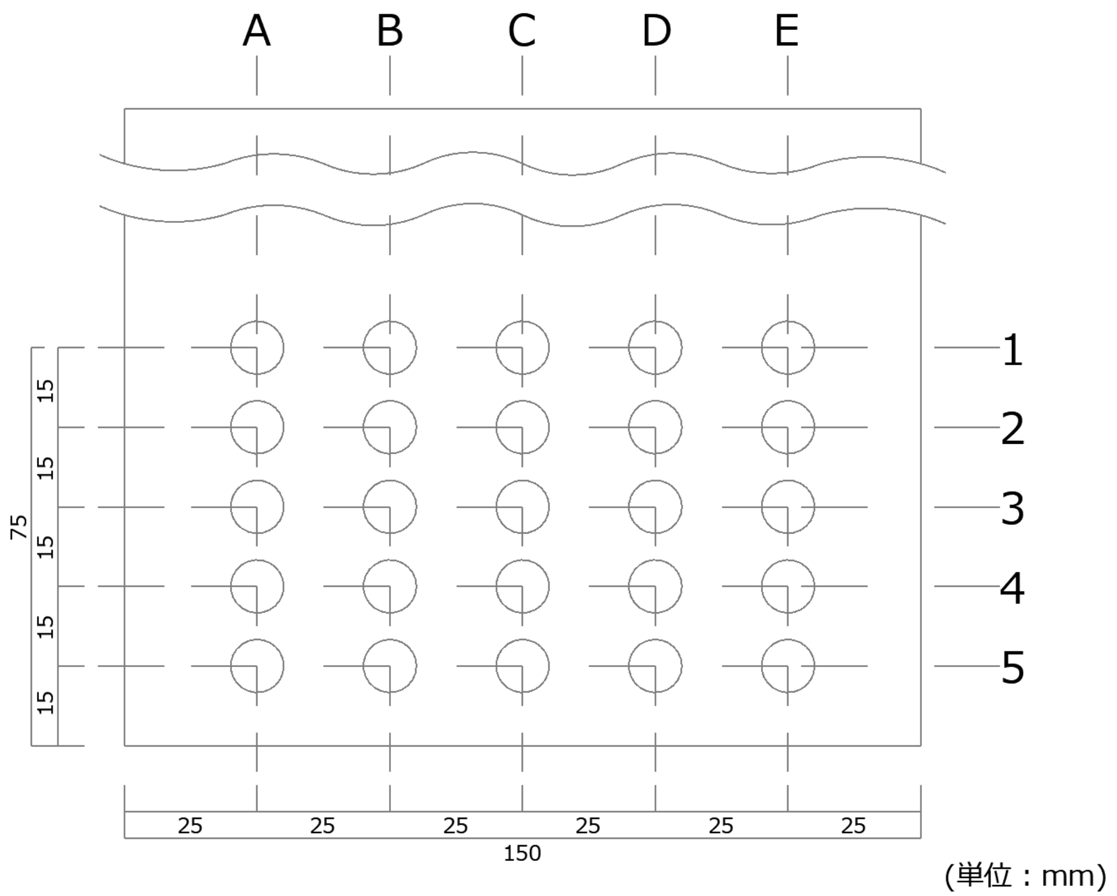


図 3-4 波圧計測位置

3.2 通過波の解析

モデル①の津波条件を決定するため、模型を置いていない状態での通過波の解析を行った。解析手法、解析モデルは前節の通りとする。

図 3-5 に速度計測位置、浸水深計測位置を示す。ここでは、水の流体体積率が 0.5 となる点を津波の波面として扱う。津波の速度は、速度計測位置の水路底部において、流体体積率が 0.5 となった時刻の速度とする。また、2 つの浸水深計測位置において、体積率 0.5 となる高さを 0.01 秒刻みで記録し、図 3-6 に示す時刻歴浸水深を作成した。これより、2 つの地点での最大浸水深を求め、これらの平均値を津波の浸水深とする。

以上より、津波条件を前節の表 3-2 のように決定した。

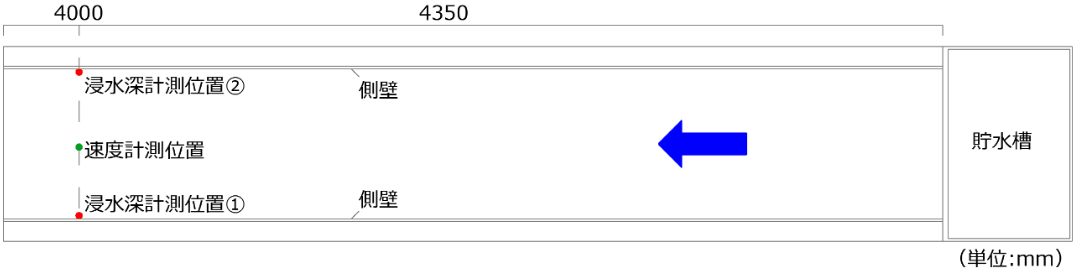


図 3-5 速度、浸水深計測位置

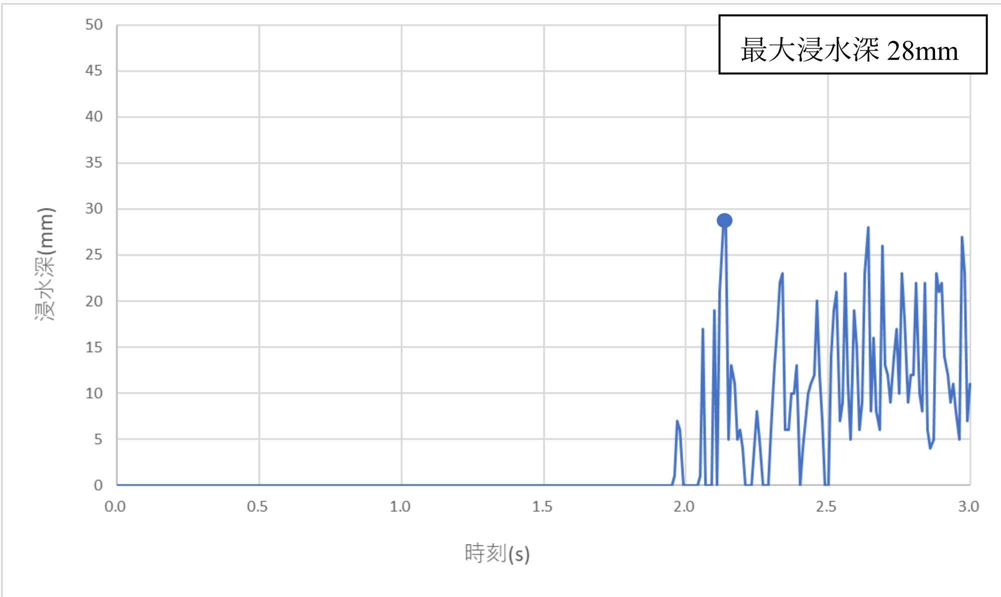


図 3-6-1 時刻歴浸水深（計測位置①）

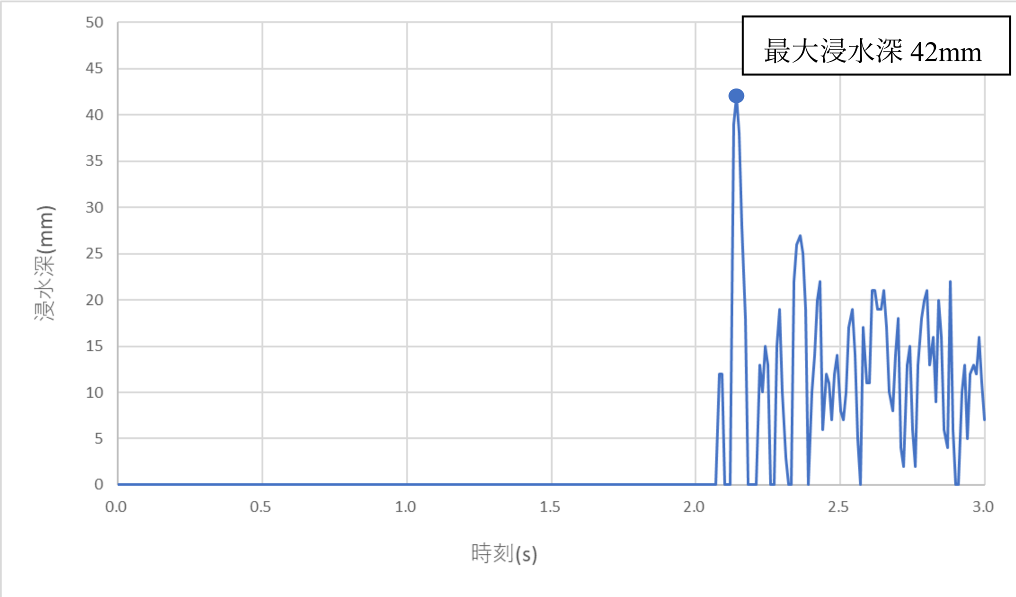


図 3-6-2 時刻歴浸水深（計測位置②）

3.3 解析モデル①

3.3.1 解析結果

図 3-7 に時刻歴波圧を、一例として模型(a)の A 列について示す。図に示す通り、水理実験と同様に、衝突直後の各波圧計の最大値を衝撃ケースとして評価した。他の模型、他の列の時刻歴波圧と解析結果をまとめた表を付録 B に記載する。

無次元化波圧分布について、各模型での列の比較を図 3-8、C 列での各模型の比較を図 3-9 に示す。図には、縦軸に無次元化浸水深、横軸に無次元化波圧を取った。図中の灰色の直線は水深係数 2.0 時、黒色の直線は水深係数 3.0 時の静水圧を示す。

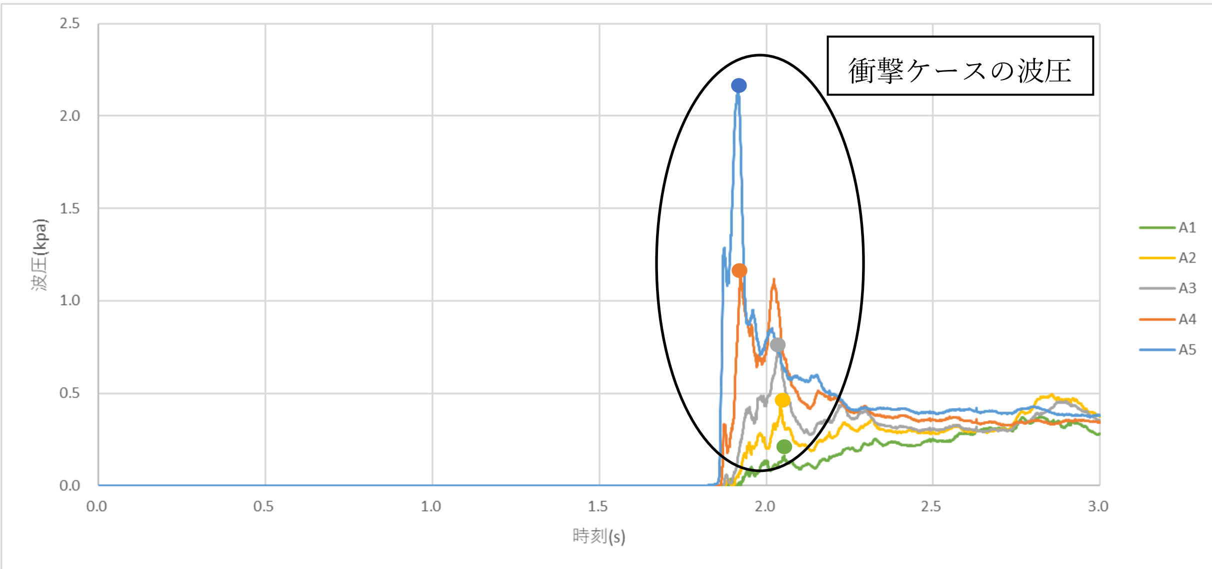


図 3-7 時刻歴波圧（模型(a)、A 列）

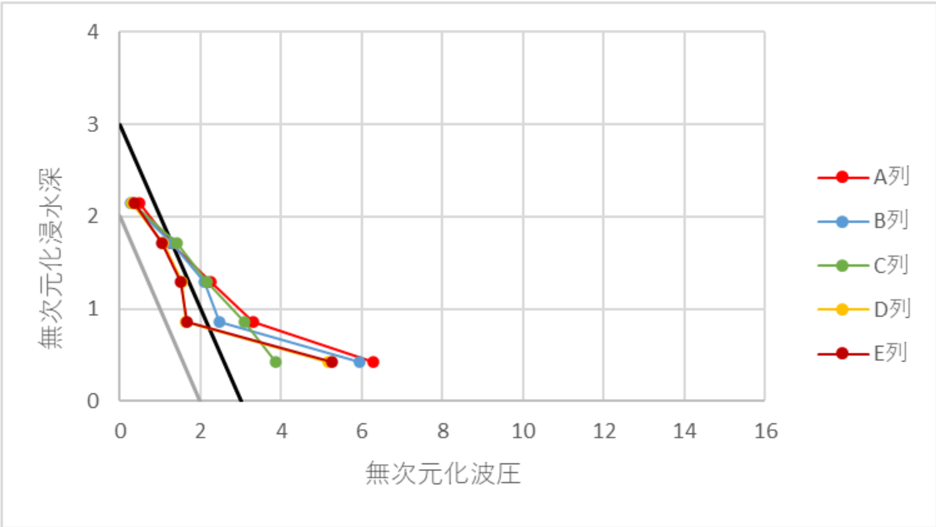


図 3-8-1 無次元化波圧分布（模型(a)）

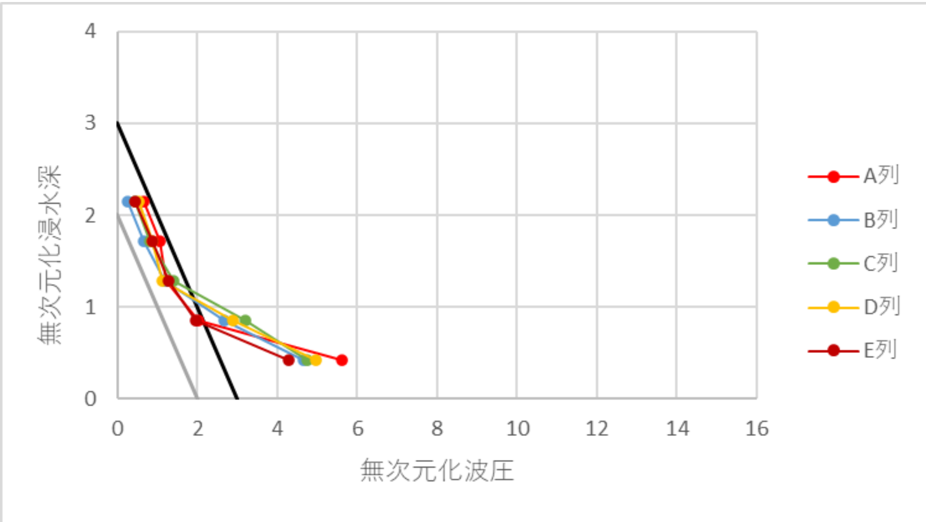


図 3-8-2 無次元化波圧分布（模型(b)）

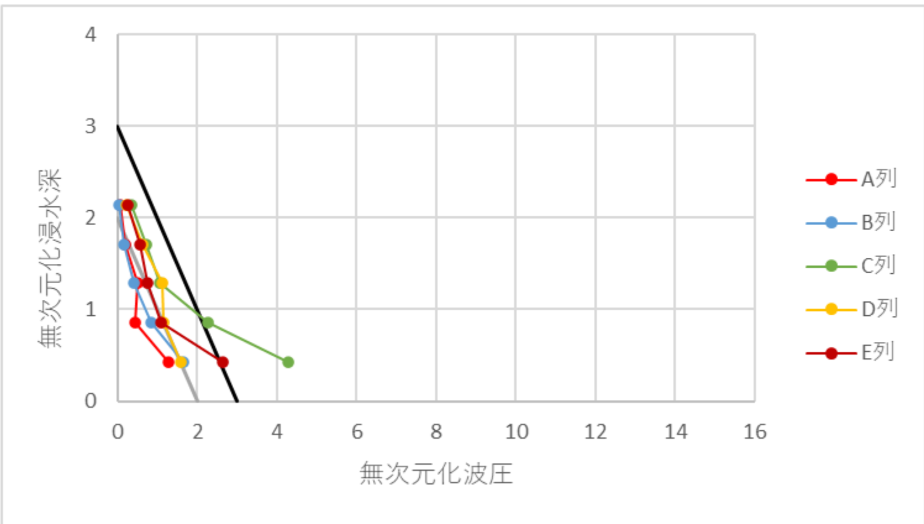


図 3-8-3 無次元化波圧分布（模型(c)）

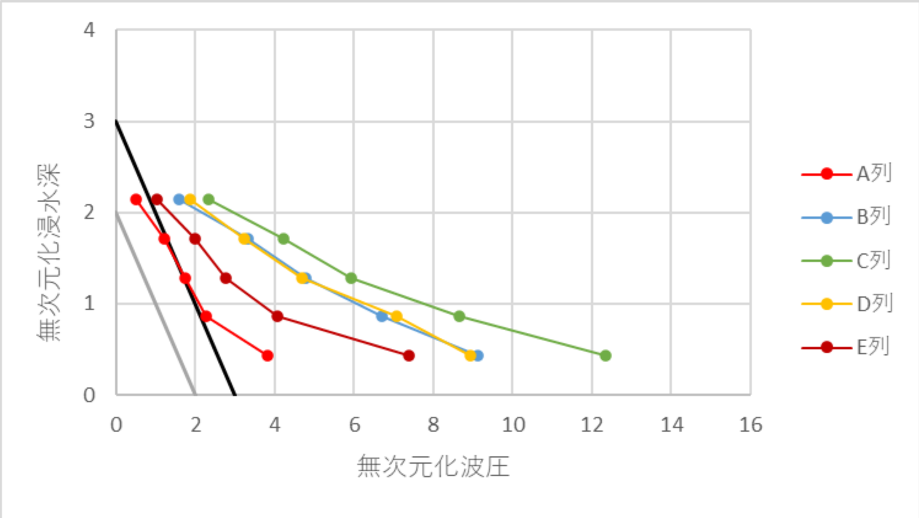


図 3-8-4 無次元化波圧分布（模型(d)）

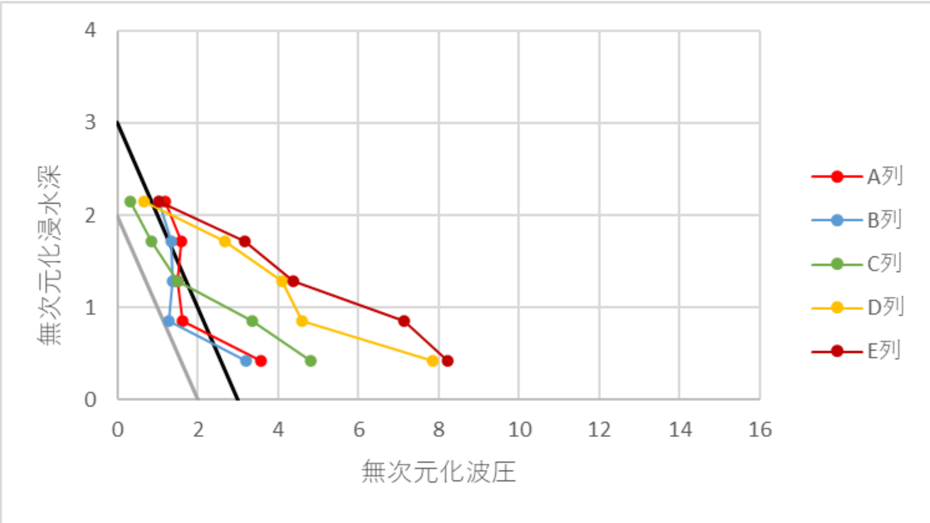


図 3-8-5 無次元化波圧分布（模型(e)）

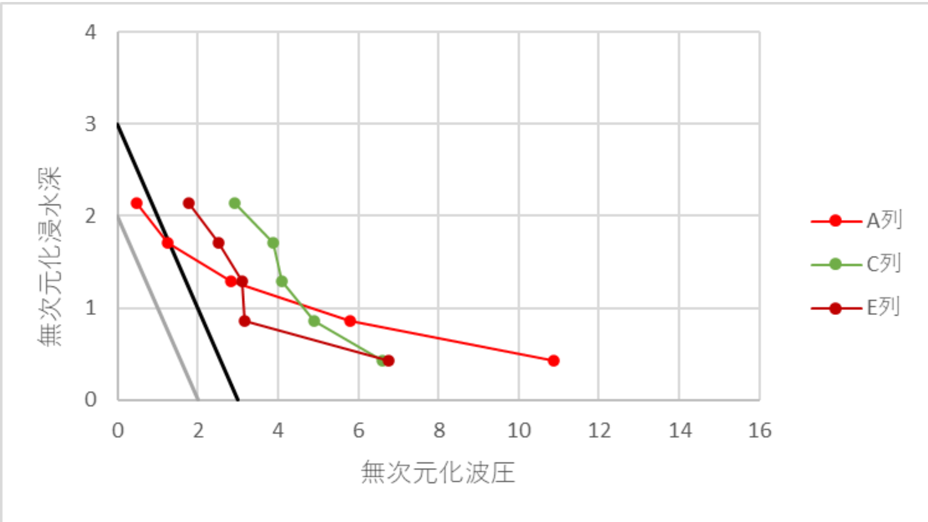


図 3-8-6 無次元化波圧分布（模型(f)）

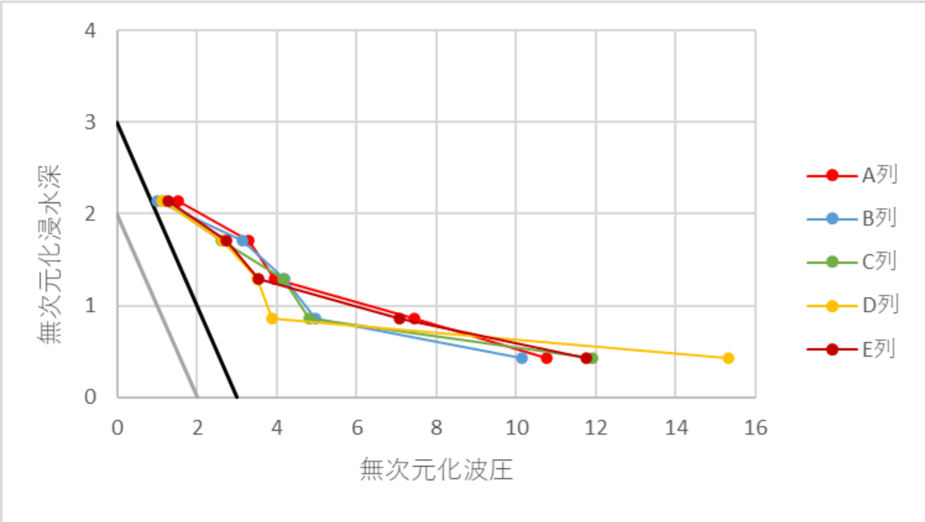


図 3-8-7 無次元化波圧分布（模型(g)）

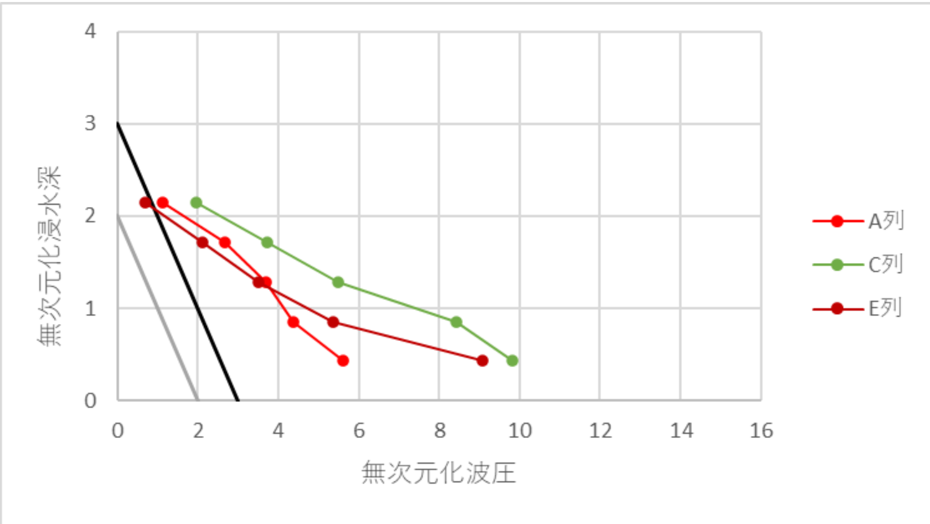


図 3-8-8 無次元化波圧分布（模型(h)）

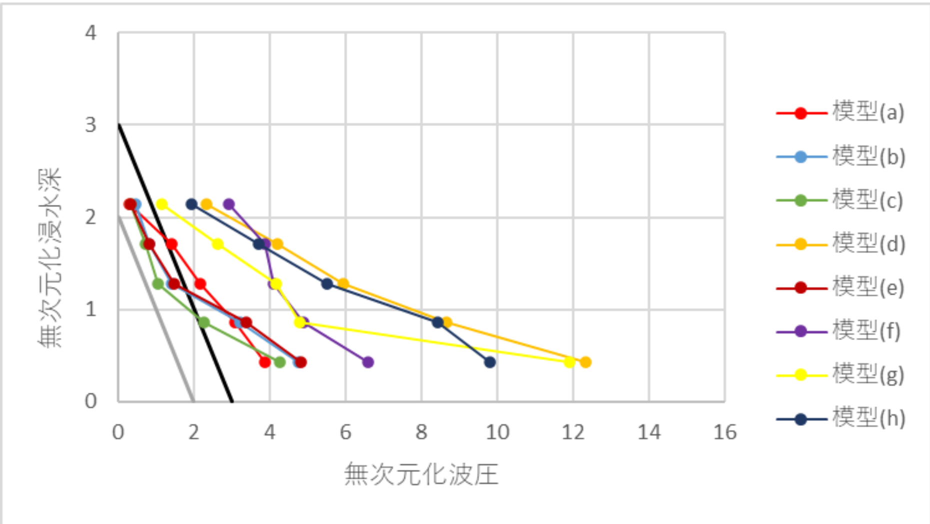


図 3-9 無次元化波圧分布（C 列）

3.3.2 考察

解析結果について、図 3-8 を見ると、解析モデル①では、波圧の計測結果に左右差が生じていることが分かり、結果の妥当性に疑問が残るが、模型形状による影響が見られた。

図 3-8 を見ると、直方体である模型(a)では、模型中央にある C 列ではその他の列と比べて、模型下部において波圧が小さくなったことが分かる。模型(c)では、模型中央と比べて、凸面部分の波圧が小さくなっている。また、模型(d)では、模型中央に近付くにつれ、波圧が大きくなっている。このことから、津波に対して斜めになっている部分では、津波荷重を軽減できると考えられる。

模型(e)では、D 列、E 列の波圧が大きい結果となった。模型(f)では、模型下部で A 列の波圧が大きくなった。一方で、C 列では、模型上部の波圧が他の列と比べて、大きくなっており、分布形が急になっていた。これは、模型(f)が水を溜め込みやすい平面形状をしているからだと考えられる。模型(g)では、全列で模型下部の波圧が大きくなった。特に、D 列は解析モデル①の解析において、一番大きな波圧となった。模型(h)では、計測位置が下流側にある A 列で波圧が小さくなった。また、C 列の波圧が E 列より大きかった。

図 3-9 より、解析モデル①において、模型中央にある C 列では、模型(a)と比較して、模型(d)、模型(f)、模型(g)、模型(h)で波圧が大きくなり、模型(c)で波圧が僅かに小さくなった。一方で、模型(b)、模型(e)では、大きな差は生じなかった。また、模型(f)を除いて、波圧の大きさに差はあるが、分布形は静水圧分布よりも緩やかな傾きとなった。

3.4 解析モデル②

3.4.1 解析結果

図 3-10 に時刻歴波圧を、一例として模型(a)の A 列について示す。図に示す通り、水理実験、解析モデル①の解析と同様に、衝突直後の各波圧計の最大値を衝撃ケースとして評価した。また、波圧が安定している 5.0 秒から 15.0 秒までの平均値を定常ケースとして評価した。他の模型、他の列の時刻歴波圧と解析結果をまとめた表を付録 B に記載する。

無次元化最大波圧分布について、各模型での列の比較を衝撃ケースについて図 3-11、定常ケースについて図 3-12 に示す。C 列での各模型の比較を衝撃ケースについて図 3-13、定常ケースについて図 3-14 に示す。図には、縦軸に無次元化浸水深、横軸に無次元化波圧を取った。図中の灰色の直線は水深係数 2.0 時、黒色の直線は水深係数 3.0 時の静水圧を示す。

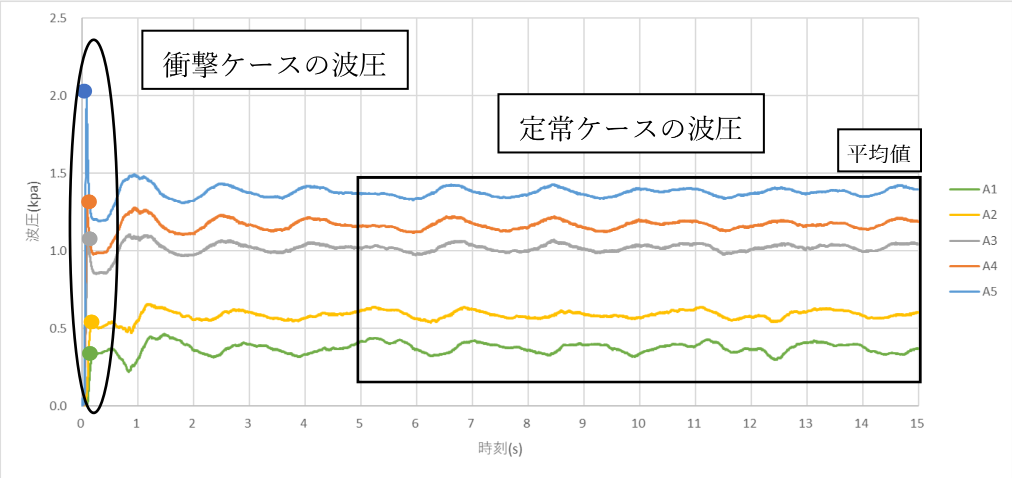


図 3-10 時刻歴波圧（模型(a)、A 列）

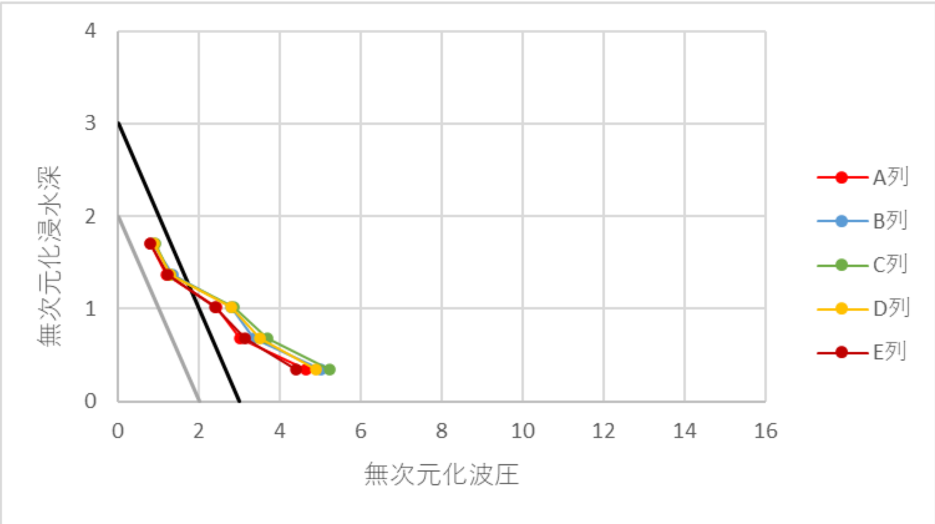


図 3-11-1 無次元化波圧分布（模型(a)、衝撃ケース）

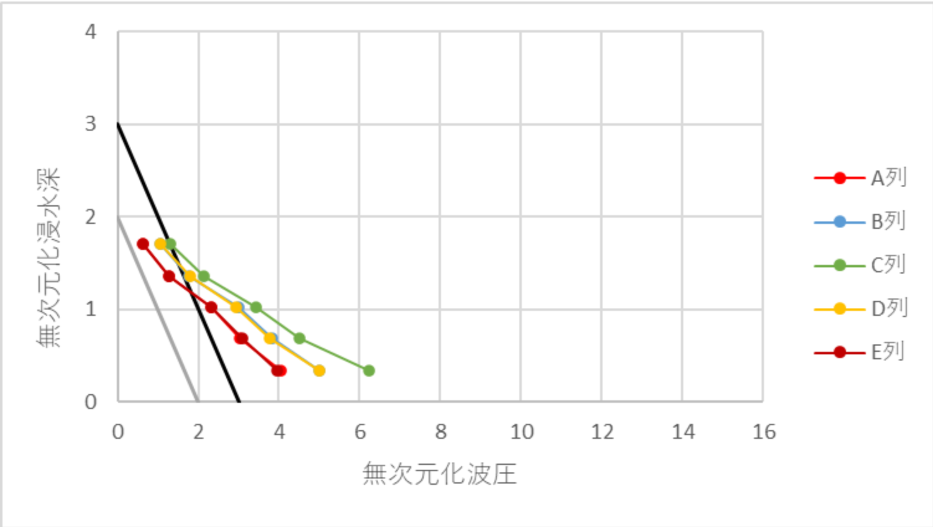


図 3-11-2 無次元化波圧分布（模型(b)、衝撃ケース）

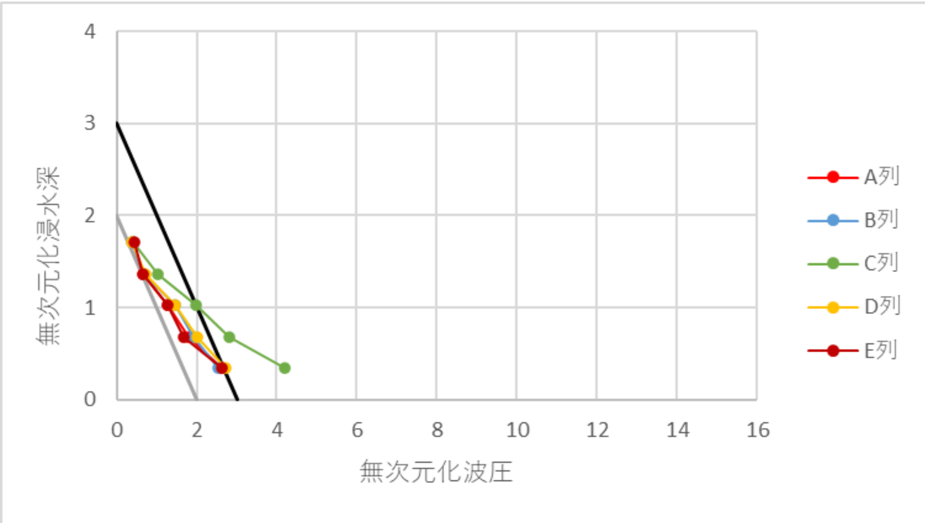


図 3-11-3 無次元化波圧分布（模型(c)、衝撃ケース）

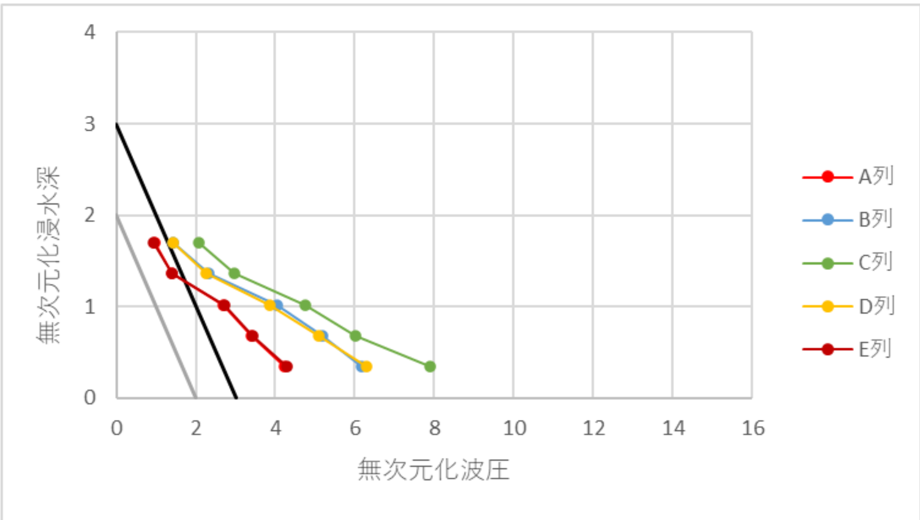


図 3-11-4 無次元化波圧分布（模型(d)、衝撃ケース）

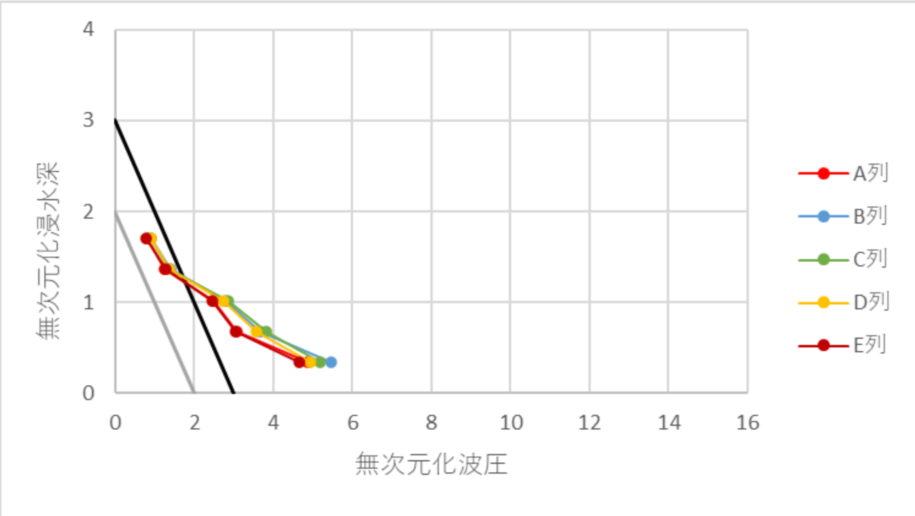


図 3-11-5 無次元化波圧分布（模型(e)、衝撃ケース）

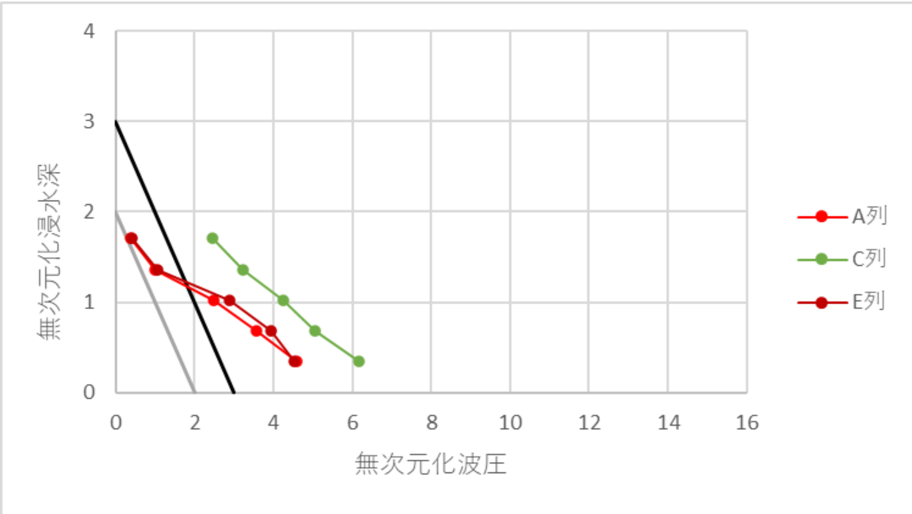


図 3-11-6 無次元化波圧分布（模型(f)、衝撃ケース）

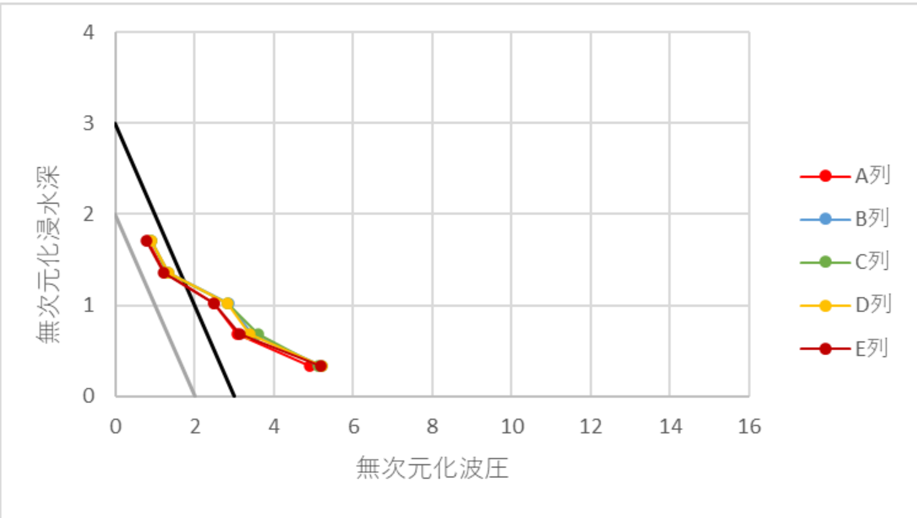


図 3-11-7 無次元化波圧分布（模型(g)、衝撃ケース）

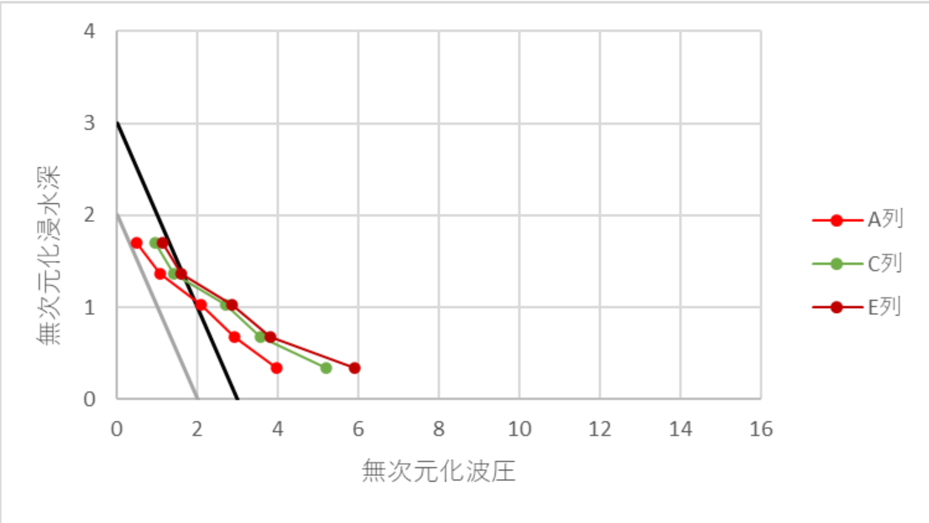


図 3-11-8 無次元化波圧分布（模型(h)、衝撃ケース）

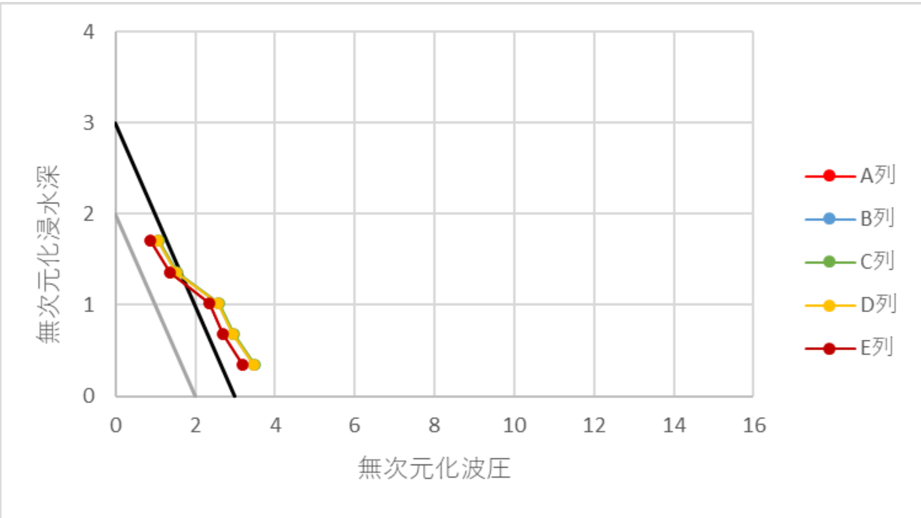


図 3-12-1 無次元化波圧分布（模型(a)、定常ケース）

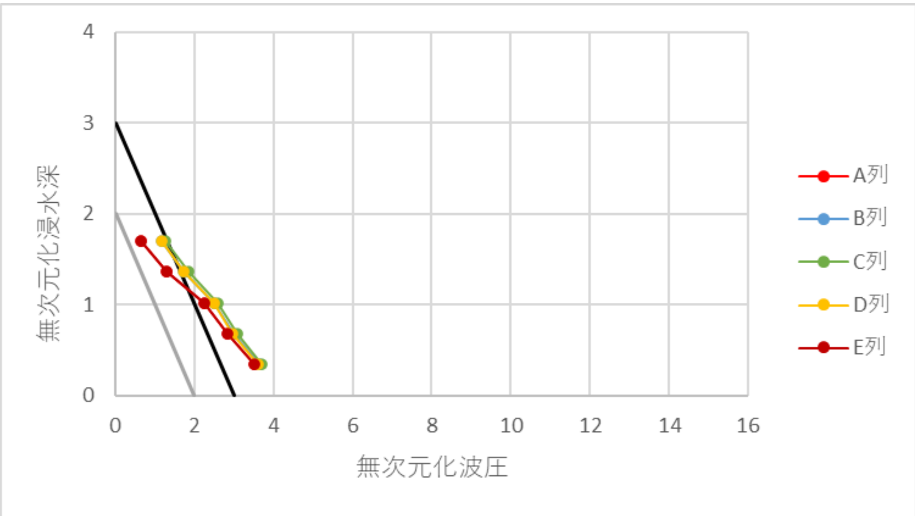


図 3-12-2 無次元化波圧分布（模型(b)、定常ケース）

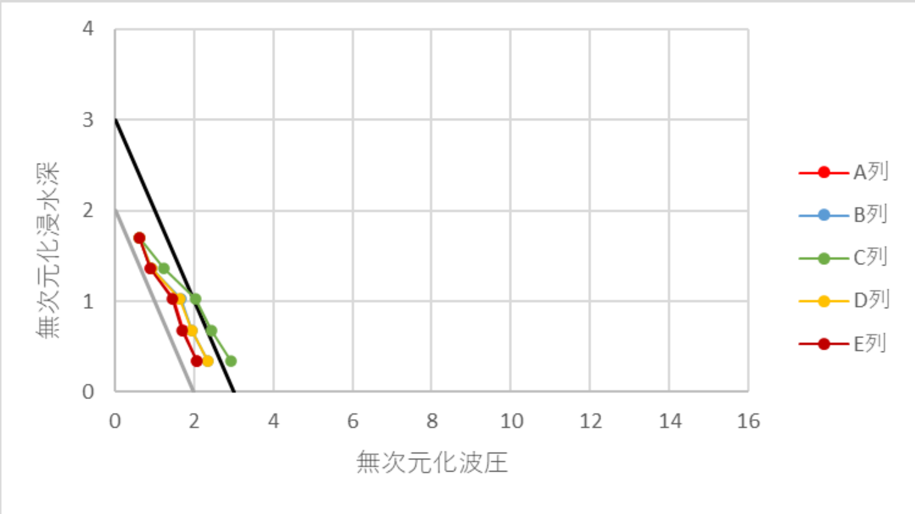


図 3-12-3 無次元化波圧分布（模型(c)、定常ケース）

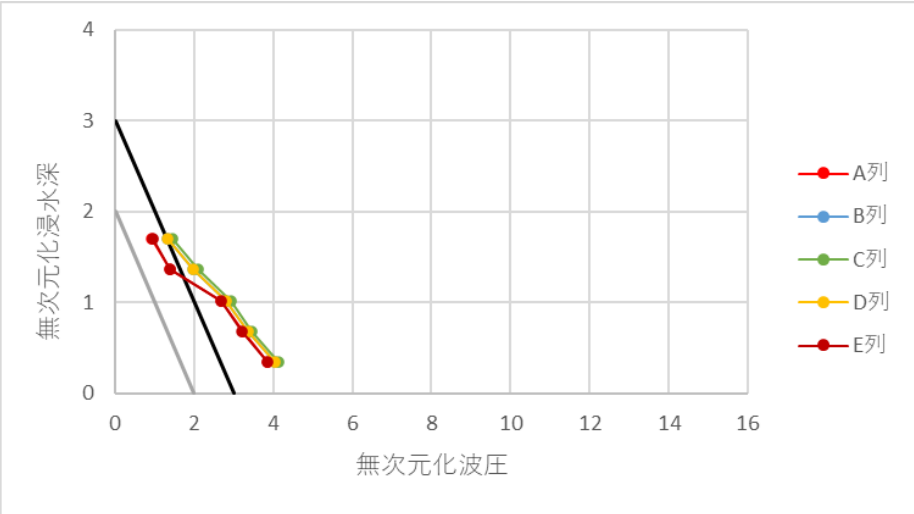


図 3-12-4 無次元化波圧分布（模型(d)、定常ケース）

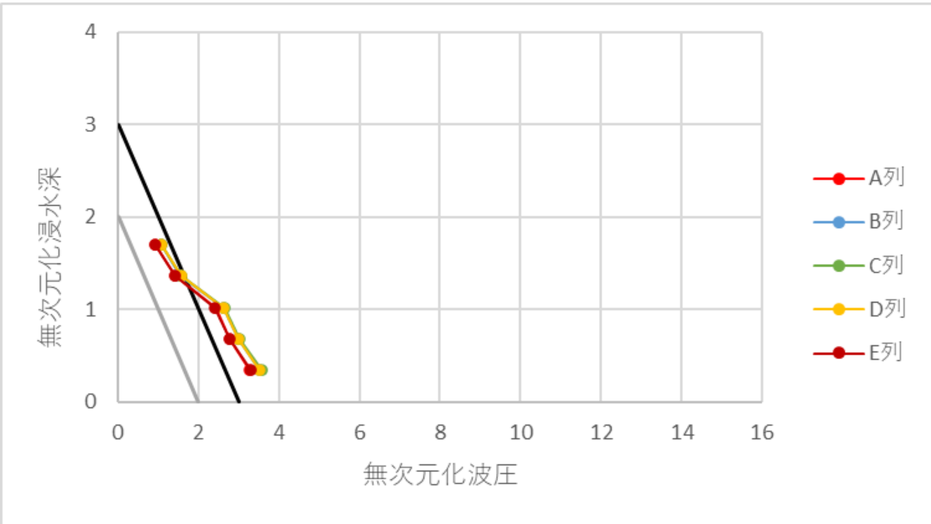


図 3-12-5 無次元化波圧分布（模型(e)、定常ケース）

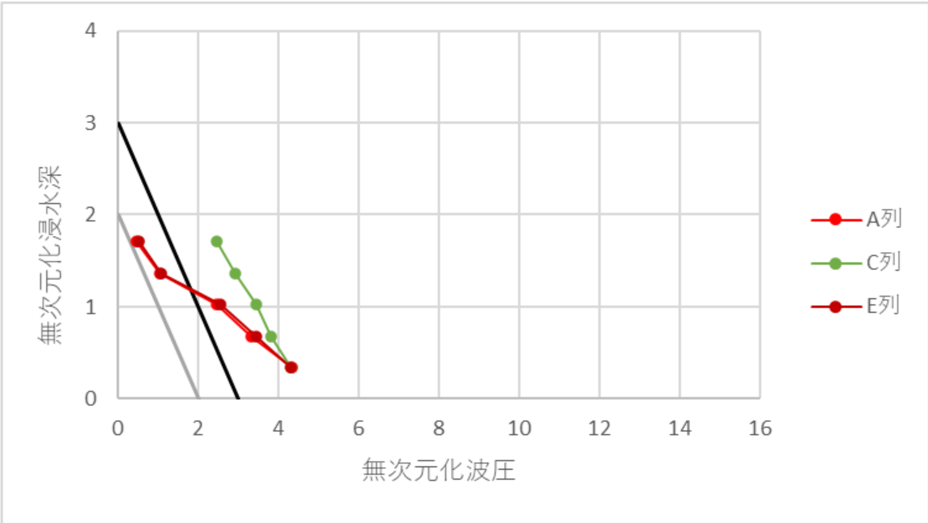


図 3-12-6 無次元化波圧分布（模型(f)、定常ケース）

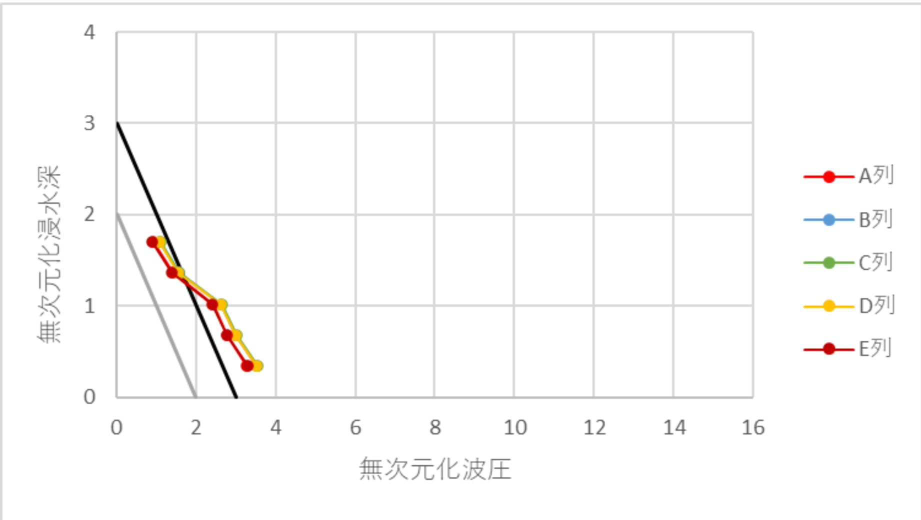


図 3-12-7 無次元化波圧分布（模型(g)、定常ケース）

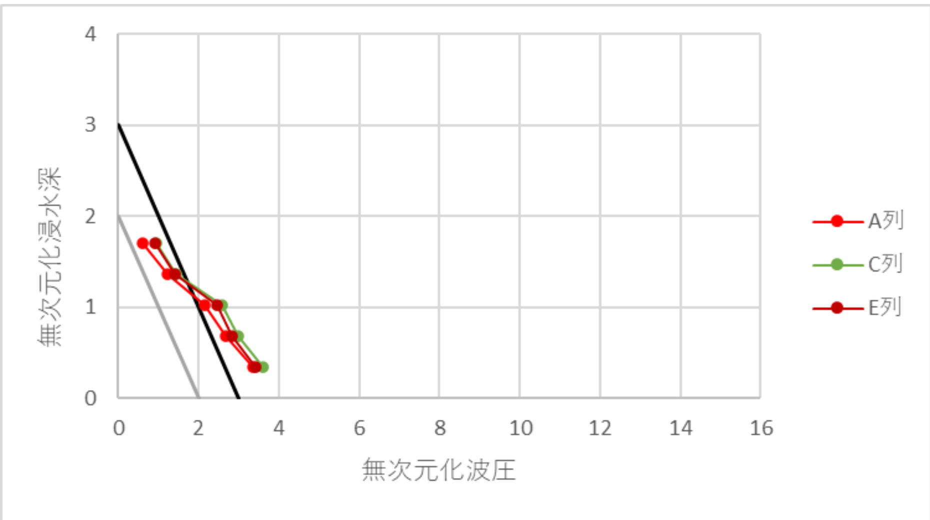


図 3-12-8 無次元化波圧分布（模型(h)、定常ケース）

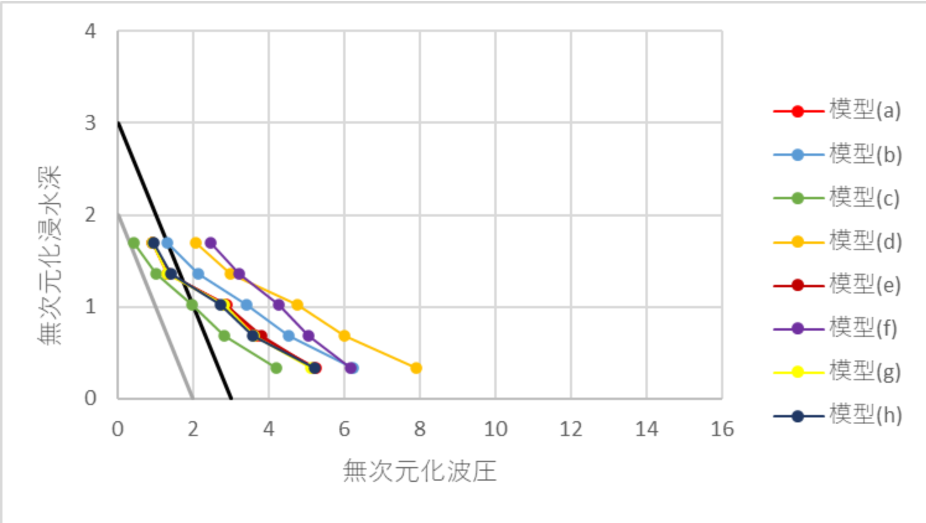


図 3-13 無次元化波圧分布（C 列、衝撃ケース）

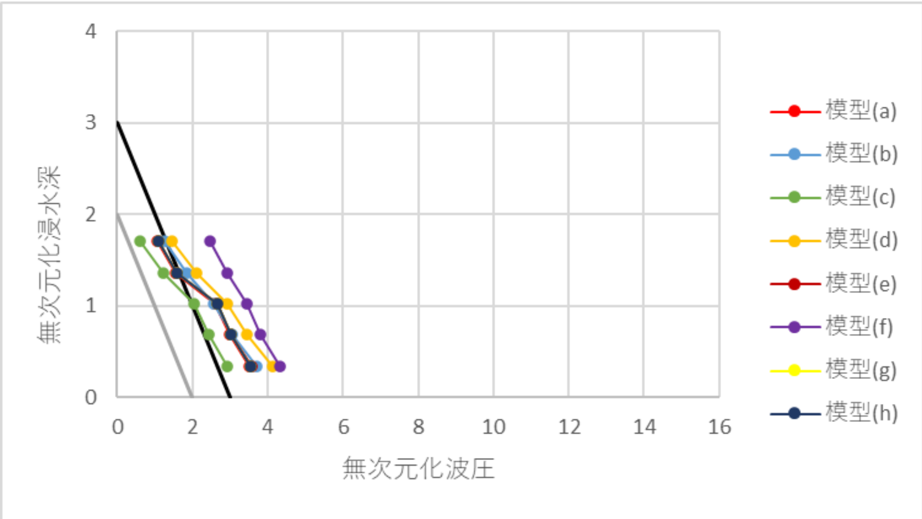


図 3-14 無次元化波圧分布（C 列、定常ケース）

3.4.2 考察

図 3-11、図 3-12 を見ると、解析モデル①と異なり、解析モデル②では、波圧の計測結果に大きな左右差は生じなかった。

衝撃ケースについて、考察する。図 3-11 を見ると、模型(b)、模型(d)では、模型中央に近付くにつれ、波圧が大きくなった。模型(c)では、凸面部分の波圧が模型中央にある C 列と比べて、小さくなった。このことより、解析モデル①と同様に、津波に対して斜めになっている部分では、津波荷重を軽減できると考えられる。

模型(f)では、模型中央にある C 列で波圧が大きくなった。これは、解析モデル①と同様に、模型(f)が水を溜め込みやすい平面形状をしているからだと考えられる。模型(h)では、計測位置が下流側にある A 列で波圧が小さくなった。

図 3-13 より、解析モデル②の衝撃ケースにおいて、模型中央にある C 列では、模型(a)と比較して、模型(b)、模型(d)、模型(f)で波圧が大きくなり、模型(c)で波圧が小さくなった。また、同じ L 字平面凹面側の模型(b)、模型(d)では、凹面部分が長い模型(d)の方が、波圧の大きい結果となった。一方で、水理実験と解析モデル①の解析とは異なり、受圧面が同じ長方形となっている模型(a)、模型(e)、模型(g)では、波圧に大きな差は無かった。
また、図 3-13 を見ると、波圧の大きさに差はあるが、分布形はどの模型においても静水圧分布よりも緩やかな傾きとなった。

定常ケースについて、考察する。図 3-12 を見ると、模型(b)、模型(d)では、模型中央にある C 列に対して、凹面部分の外側にある A 列、E 列で模型上部の波圧が小さくなった。
模型(c)では、模型中央にある C 列に対して、凹面部分にある A 列、B 列、D 列、E 列で模型下部の波圧が小さくなった。このような模型中央に対し、模型の斜め部分の波圧が小さくなる傾向は衝撃ケースと同様に、定常ケースでも見られた。

模型(f)では、模型中央にある C 列の模型上部の波圧が大きくなった。この傾向も、衝撃ケースと同様に、定常ケースでも見られた。

また、図 3-14 を見ると、衝撃ケースよりも差は小さいが、定常ケースにおいても模型形状による影響があった。模型(a)と比較して、模型(d)、模型(f)で波圧が大きくなり、模型(c)で波圧が小さくなった。特に、模型(f)では、模型上部の波圧が大きなっていることが分かる。また、どの模型においても衝撃ケースと比べて、模型下部の波圧が小さくなったことにより、水深係数 3.0 時の静水圧分布に近付いた。

第 4 章　考察

第 4 章 考察

4.1 実験結果と解析結果の検討

図 4-1 に実験結果、図 4-2 に解析モデル①の解析結果、図 4-3 に解析モデル②の解析結果として、衝撃ケースにおける模型中央の無次元化波圧分布を改めて示す。これらの図を見ると、波圧の大きさに差はあれど、どのケースにおいても模型平面形状による影響を受けていることが分かる。

L 字平面模型(b)、(c)、(d)について、考察する。ベンチマークとなる模型(a)と比較して、凹面側にあたる模型(b)では、実験と解析モデル②で波圧が大きくなった。模型(d)では、全 3 ケースで波圧が大きくなっており、特に、解析では大幅に大きくなっている。このことから、L 字平面の凹面側には、模型中央にかかる津波荷重を増大させる影響があることが分かる。また、実験では模型(b)の波圧の方が模型(d)の波圧より大きかったものの、解析では模型(d)の波圧の方が模型(b)の波圧より大幅に大きかったことから、凹面部分の長さが模型中央にかかる津波荷重に影響を及ぼすと考えられる。

一方で、凸面側にあたる模型(c)では、模型(a)と比べて、全 3 ケースで波圧が小さくなった。得に、実験と解析モデル①では、模型上部の波圧が小さくなっていることが分かる。これは、模型が津波をかき分け、衝突直後の模型前面の浸水深が上昇しなかったためだと考えられる。また、模型(b)、(c)、(d)の解析において、前章でも述べた通り、津波入力方向に対して斜めになっている部分では、模型中央に比べて、波圧が小さくなっている。この影響は既往研究 [12] においても、指摘されている。

コの字平面の凹面側にあたる模型(f)では、模型(a)と比較して、全 3 ケースで波圧が大きくなった。特に、解析では模型上部の波圧が大きくなっている。これは、模型(f)が水を堰き止めやすい形状をしており、浸水深が上昇したためだと考えられる。

受圧面が同じ長方形である模型(a)、(e)、(g)では、実験と実験を模した解析モデル①で奥行きが大きくなるほど、波圧が大きくなる傾向があった。一方で、解析モデル②では、分布形に大きな差は無かった。実験と解析モデル①では、流速を小さく、浸水深を大きくするために障害物を設けており、そのために津波が荒れたと考えられ、その影響を受けたと考えられる。

階段状平面模型(h)について、実験では上部が切立つような分布形になった。一方で、解析において、解析モデル①では、模型(a)と比べて大きな波圧となったのに対し、解析モデル②では、模型(a)と大きな差は無かった。また前章で述べた通り、列ごとの波圧分布を見ると、どちらの解析モデルでも下流側にある A 列の波圧が他の列と比べて小さくなった。これは、上流側にある模型が津波に先に衝突することで、A 列での衝撃波力を小さくしたと考えられる。

また、波圧の大きさに着目すると、実験と比べて、解析モデル①、②の方が大きい波圧となった。解析モデル①では、実験と比べて、流速が大きいため計測波圧が大きくなったこと、通過波の浸水深が小さいため無次元化で評価すると無次元化波圧が大きくなったことが原因だと考えられる。一方で、解析モデル②では一定の流量を確保しているため、後続の水量が多く、波圧が大きくなったと考えられる。

解析モデル①、②では、現行のガイドライン[3)]における水深係数を3としたときの静水圧を大きく超える結果となった。また、実験においても2章で述べたように、水深係数を3としたときの静水圧を超える実験条件がいくつか存在していた。このことより、衝撃ケースでは、現行のガイドライン[3)]における静水圧式での津波荷重の評価は難しいと言えるだろう。

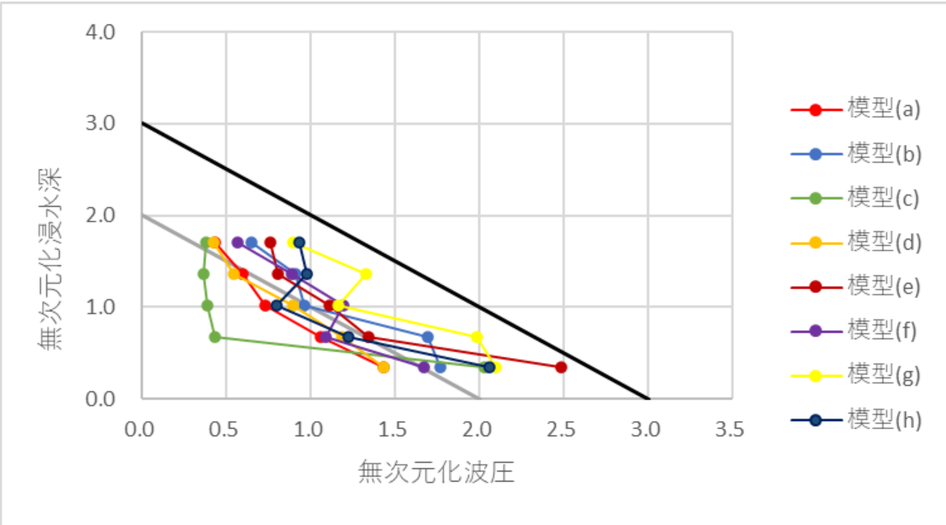


図 4-1 無次元化波圧分布（実験、衝撃ケース）

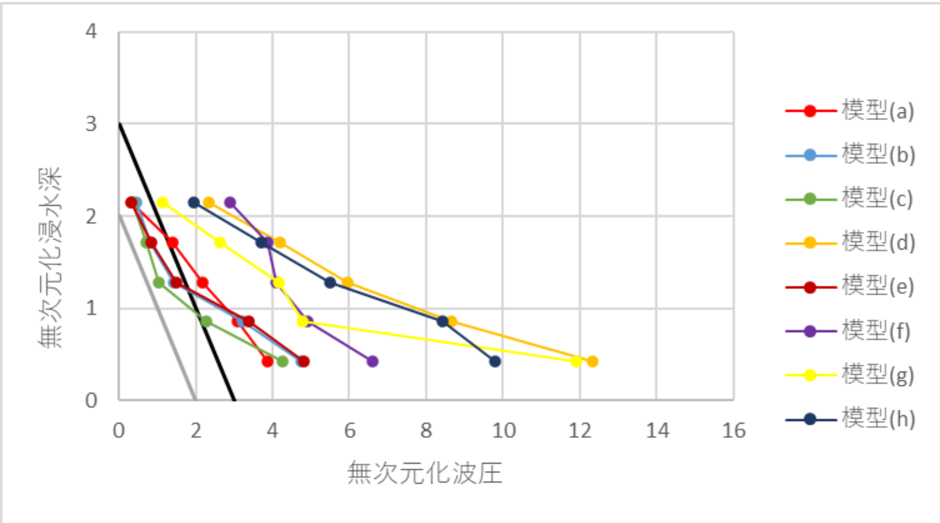


図 4-2 無次元化波圧分布（解析モデル①、衝撃ケース）

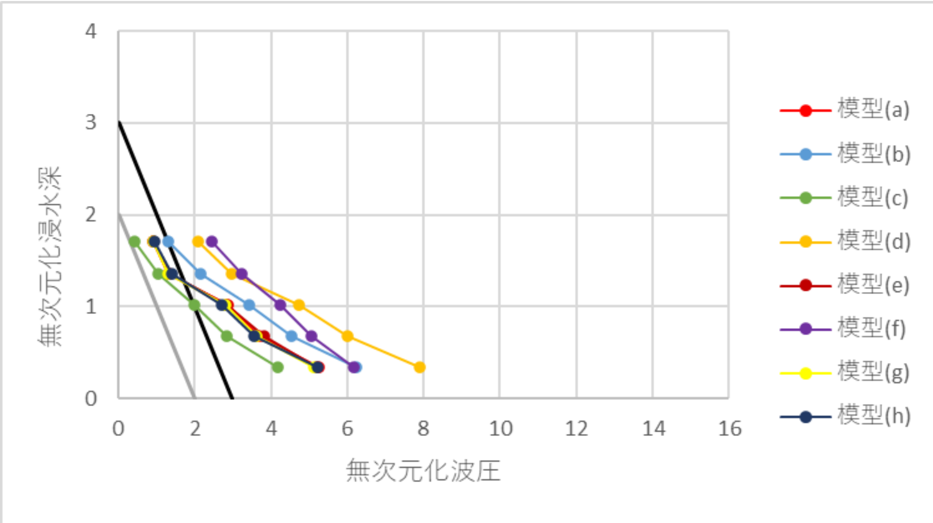


図 4-3 無次元化波圧分布（解析モデル②、衝撃ケース）

次に、定常ケースの実験結果と解析結果の検討を行う。図 4-4 に先行研究 [19] の実験結果、図 4-5 に解析モデル②の解析結果として、定常ケースにおける模型中央の無次元化波圧分布を改めて示す。ここで実験結果は、2 章と同様に通過波の浸水深で無次元化したものを示す。

これらの図を見ると、実験では津波荷重に与える模型形状による影響はほとんど無いと言える。一方で、解析では衝撃ケースと似た模型形状による影響が見られ、模型(a)と比べて、模型(d)、模型(f)で波圧が大きく、模型(c)で波圧が小さくなった。

また、波圧の大きさを見ると、実験では現行のガイドライン [3] における水深係数を 3 としたときの静水圧を越えないが、解析では超える波圧分布となった。これは、実験と解析で通過波の流速、浸水深が異なること、先述の衝撃ケースと同様に、後続の水量が多いことが影響したと考えられる。

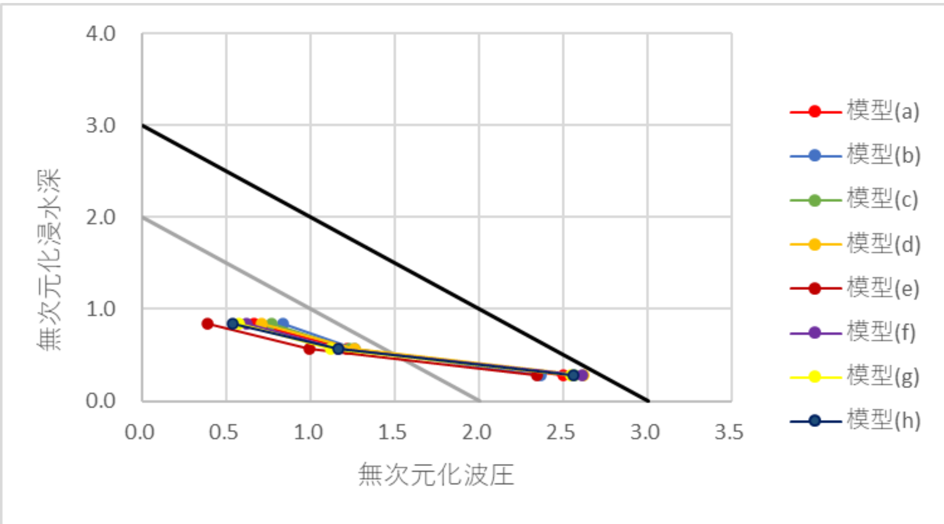


図 4-4 無次元化波圧分布（実験、定常ケース [19] ）

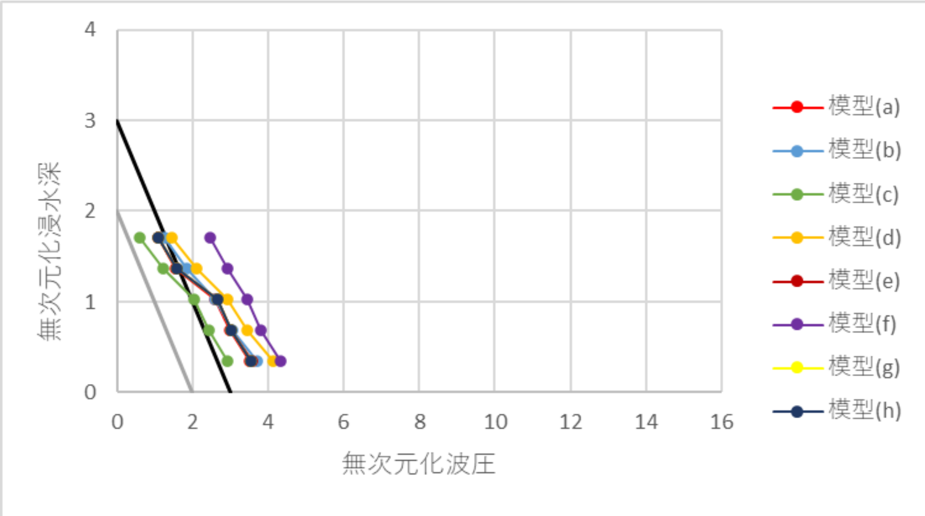


図 4-5 無次元化波圧分布（解析モデル②、定常ケース）

4.2 模型形状による影響

前節で考察した模型形状による影響の妥当性をより詳しく調べるため、模型前面に波圧の等値線を描き込んだものを波圧分布図として示す。解析モデル①について図 4-6、解析モデル②の衝撃ケースについて図 4-7、解析モデル②の定常ケースについて図 4-8 に示す。図には模型中央最下段 C5 で最大波圧が確認された時刻の波圧分布を示す。

図 4-6 を見ると、解析モデル①では前章で先述の通り、波圧に左右差があり、津波が模型に真っ直ぐに当たっていないと推測される。特に、模型(e)、模型(g)を見ると、大きな波圧が右側に集中していることが分かる。

衝撃ケースについて、考察する。図 4-6、図 4-7 を見ると、L 字平面凹面側の模型(b)、模型(d)では模型中央に近付くにつれ、波圧が大きくなっている。この影響は、模型(b)よりも模型(d)で顕著に見られ、凹面部分の長さが津波荷重に影響を与える要因になると考えられる。

図 4-6 を見ると、L 字平面凸面側の模型(c)では、左側凸面分の波圧がほとんどなく、図 4-7 を見ると、凸面部分の波圧は外側に行くほど小さくなっている。このことから、津波に対し、斜めになっている部分は津波を受け流し、津波荷重を軽減する効果があると考えられる。

図 4-7 を見ると、コの字平面凹面側の模型(f)では、模型中央で波圧が大きくなったことが確認できる。これは、模型(f)が水を溜め込み、波圧が大きくなったと考えられる。

また、図 4-8 を見ると、定常ケースでもこれらの模型形状による影響はあったことが分かるが、その程度は衝撃ケースよりも小さいものとなっている。

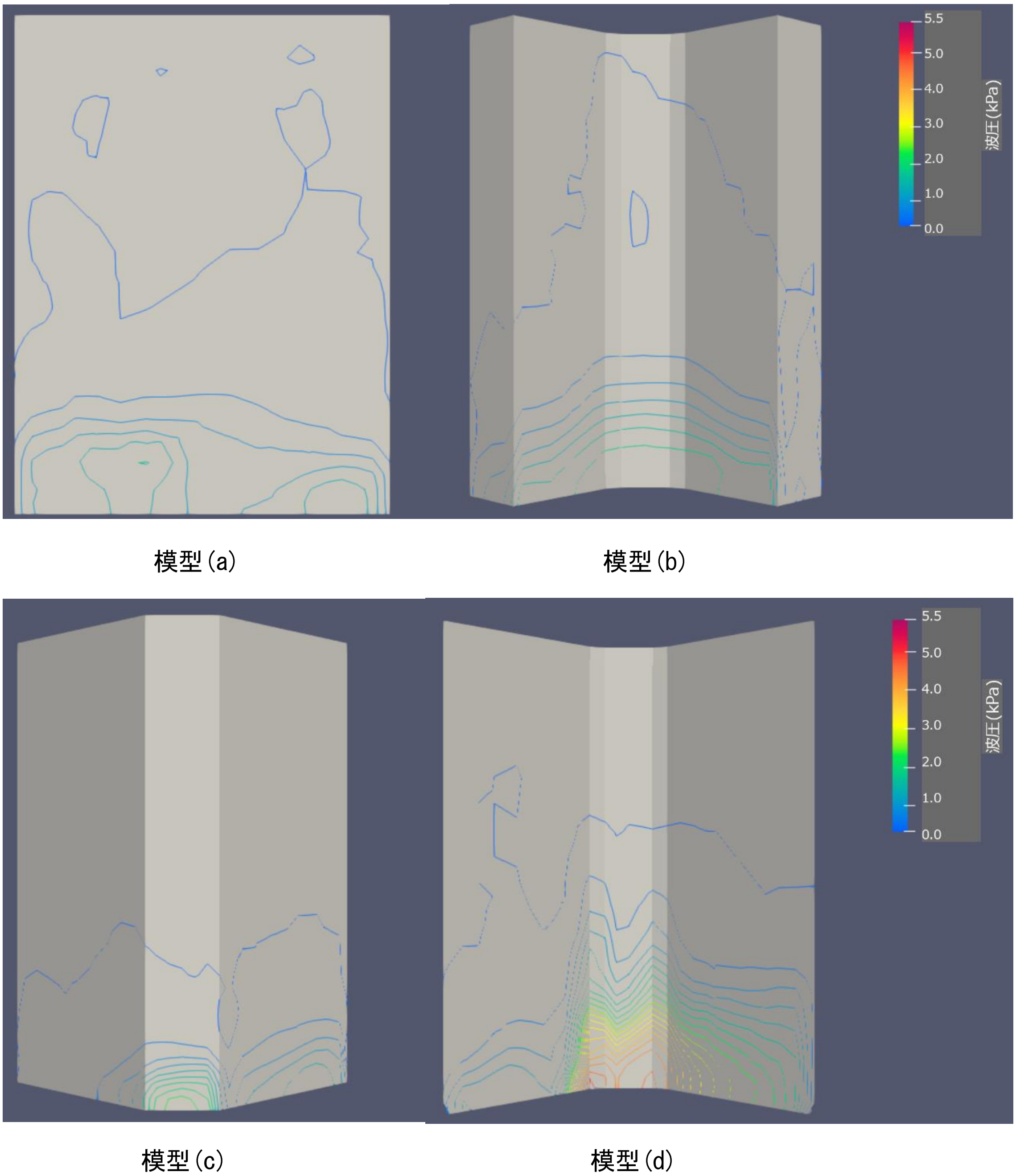
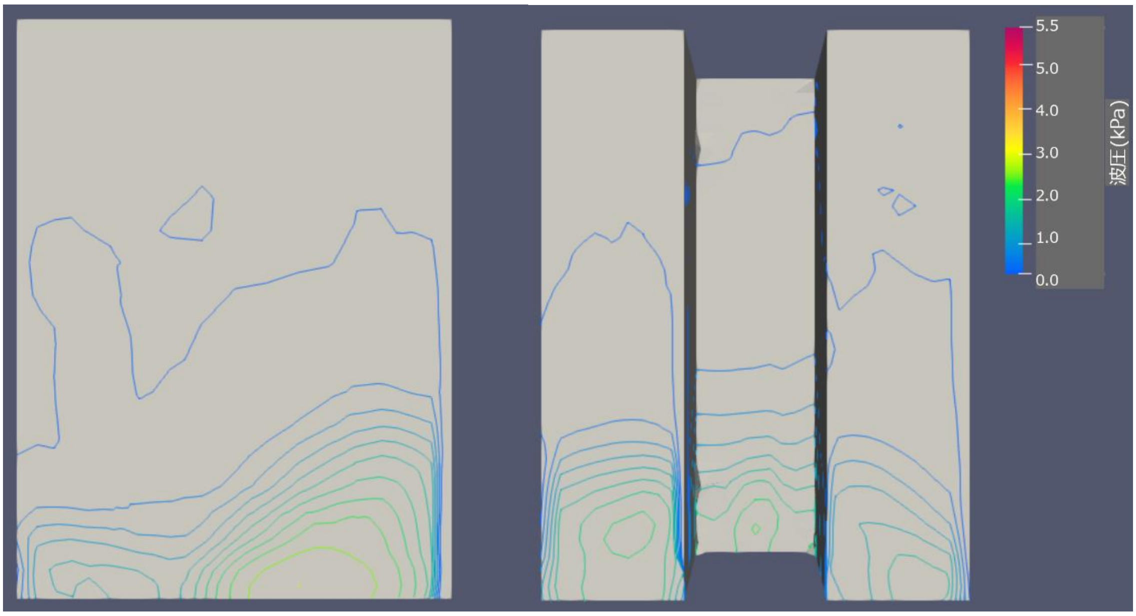
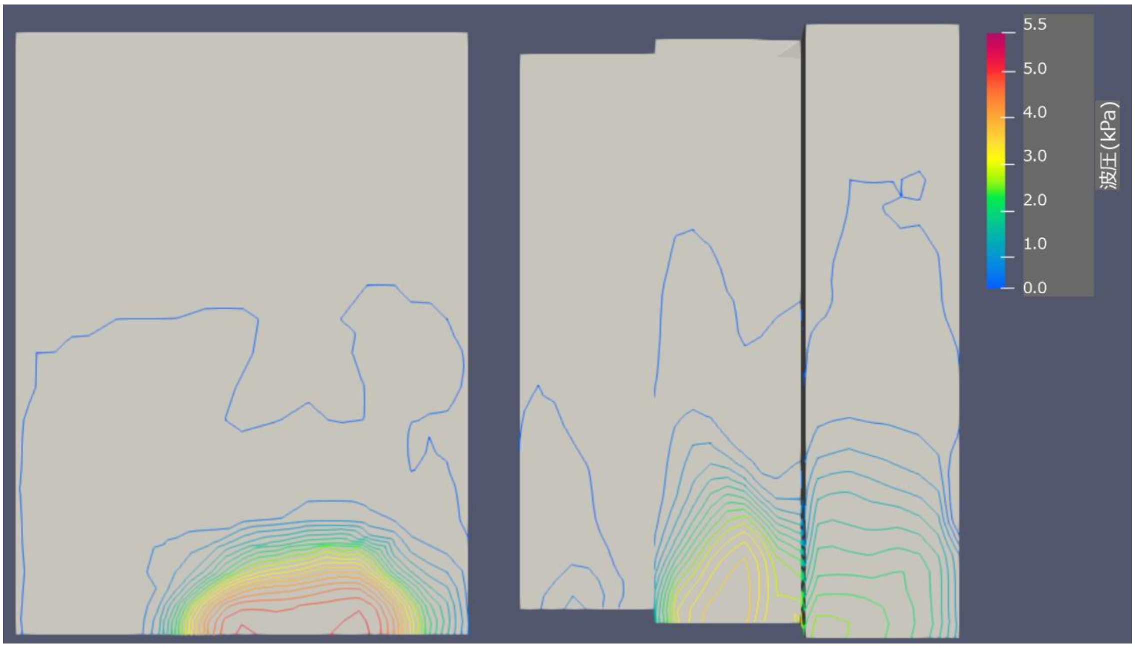


図 4-6 波圧分布図・解析モデル①

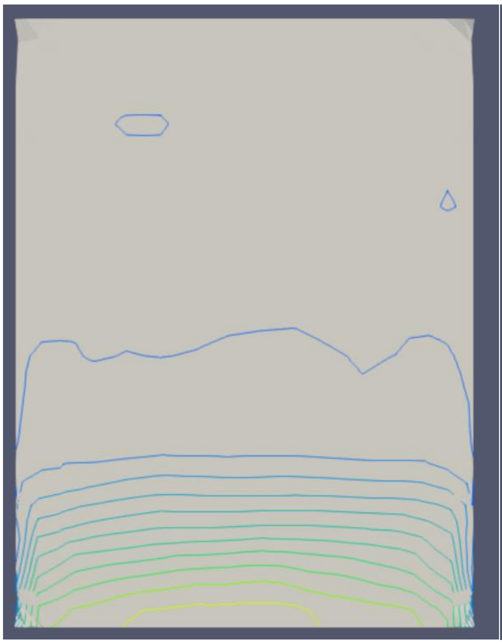


模型(e)　　模型(f)

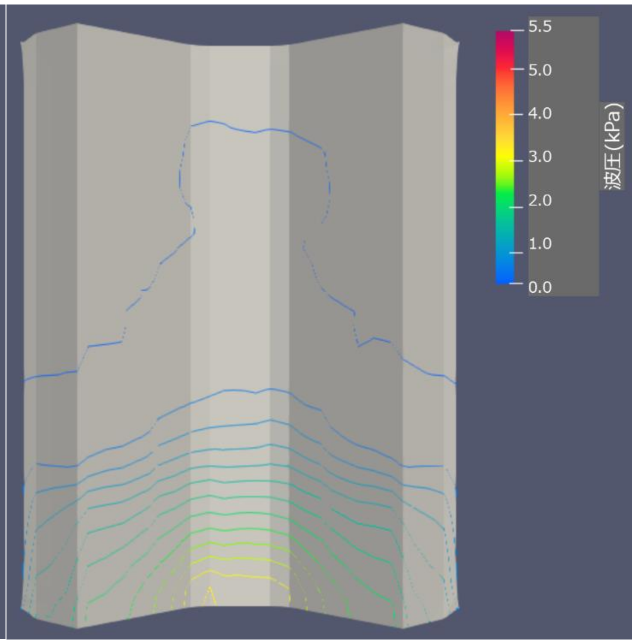


模型(g)　　模型(h)

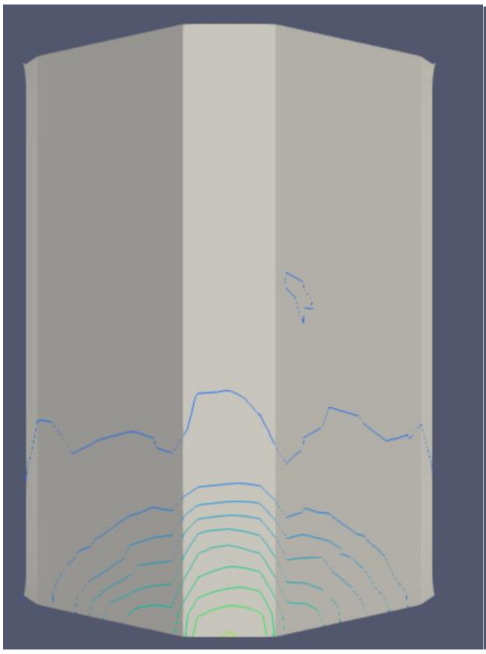
図 4-6 波圧分布図・解析モデル①



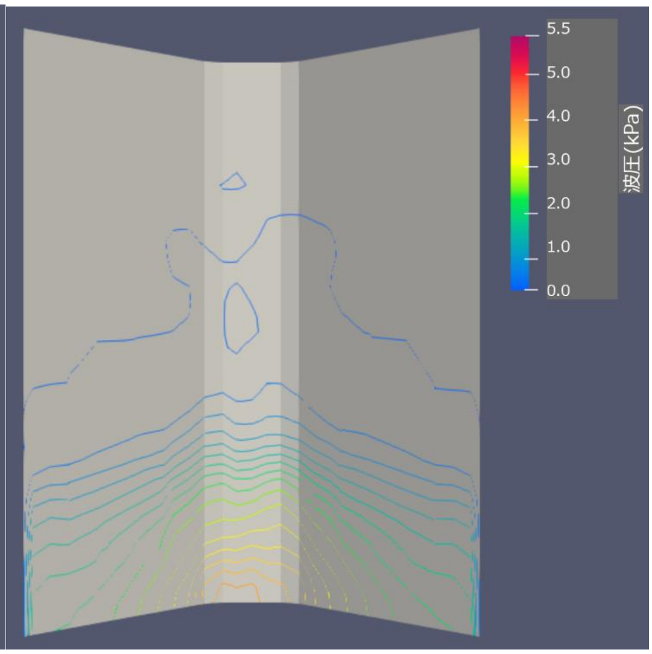
模型(a)



模型(b)

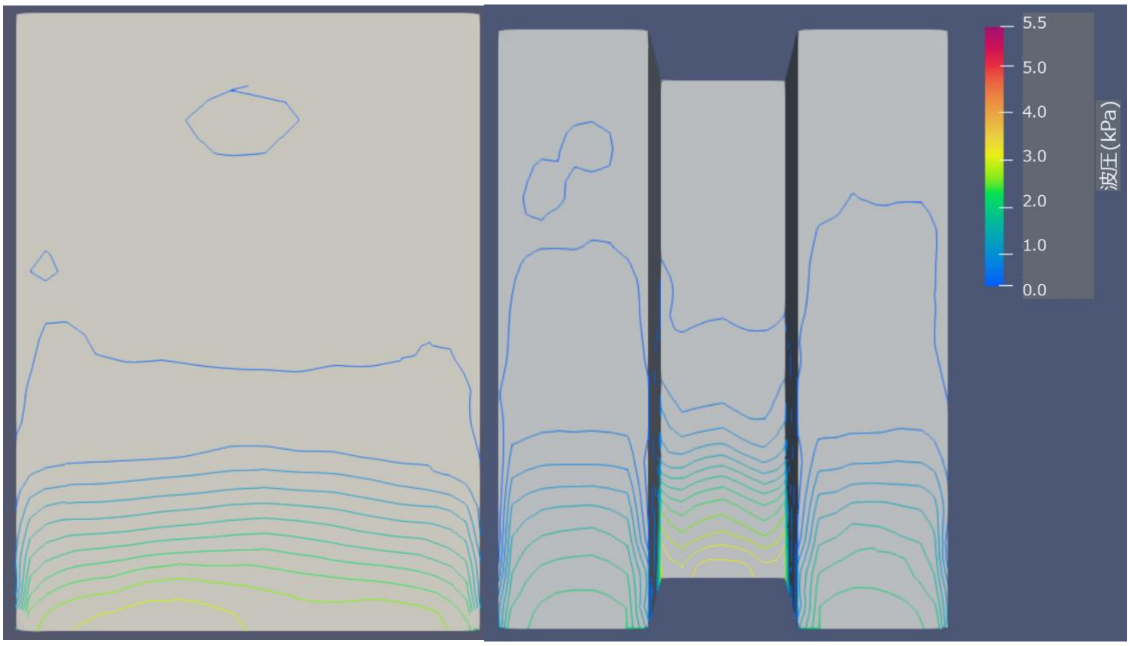


模型(c)

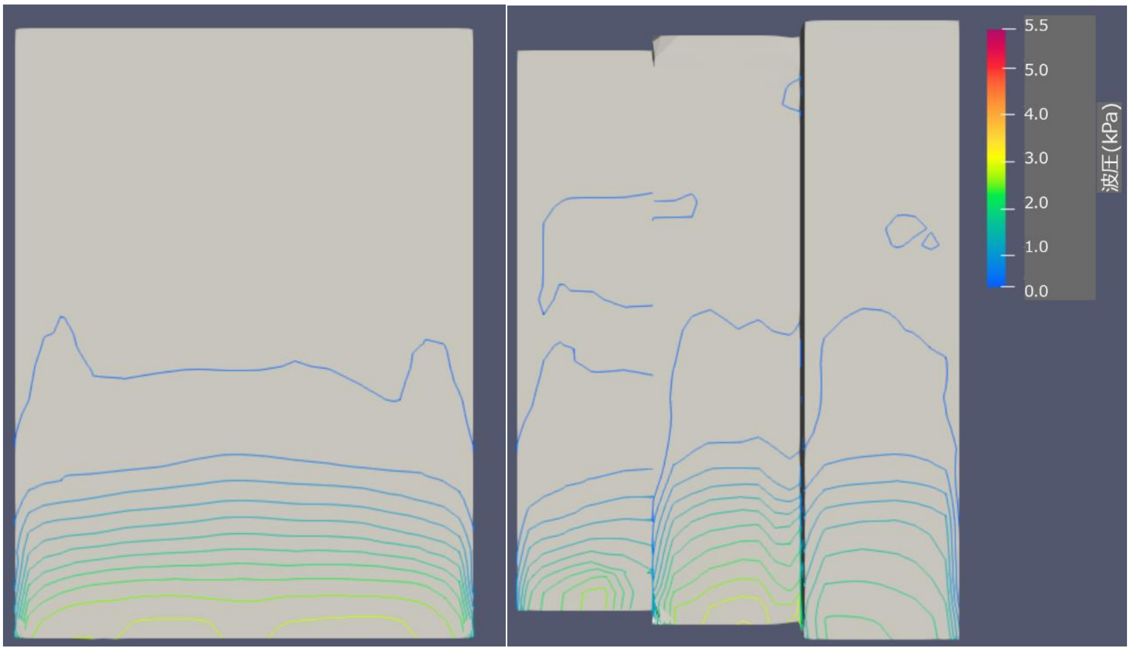


模型(d)

図 4-7 波圧分布図・解析モデル②・衝撃

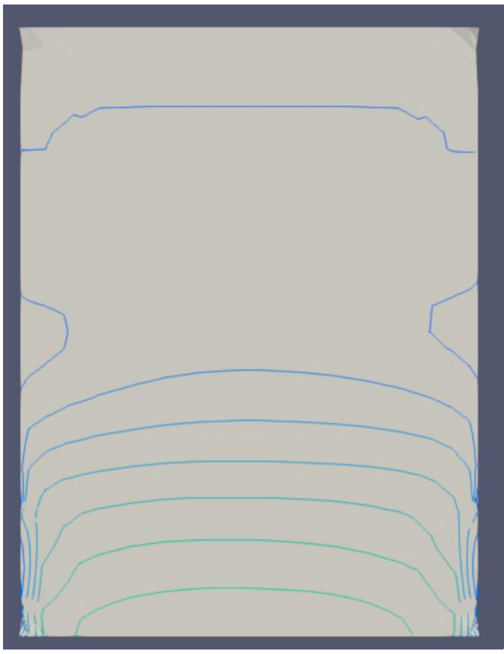


模型(e)　模型(f)

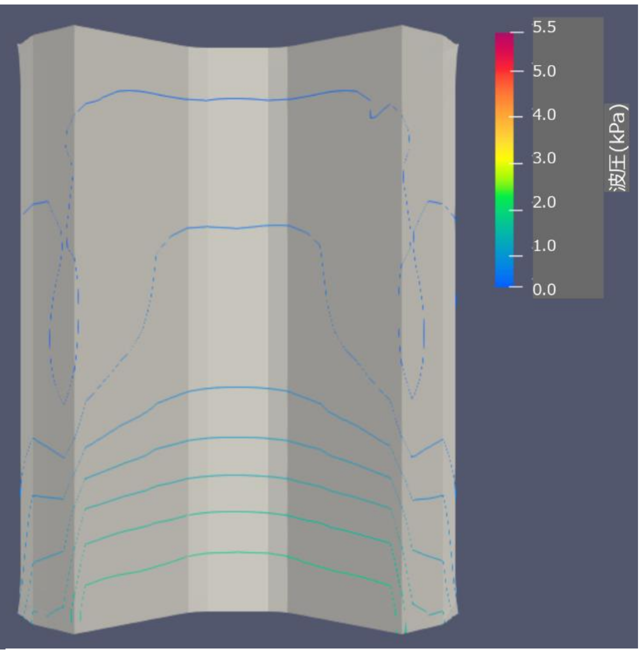


模型(g)　模型(h)

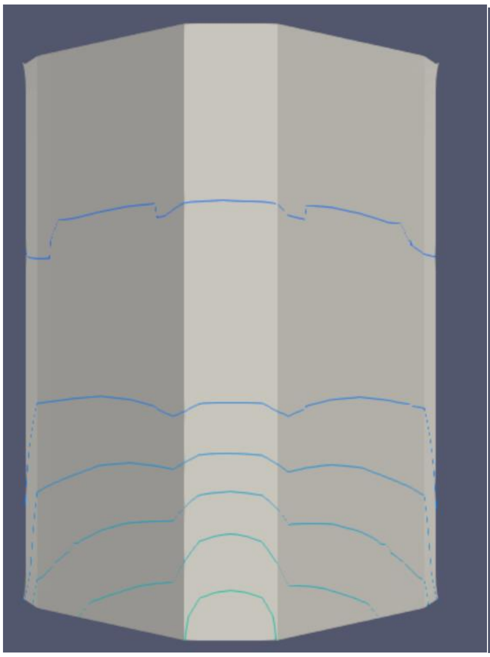
図 4-7 波圧分布図・解析モデル②・衝撃



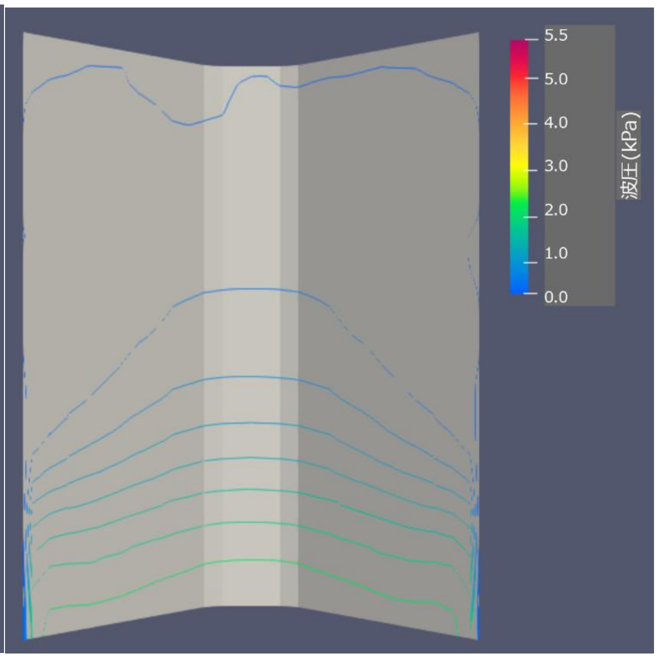
模型(a)



模型(b)



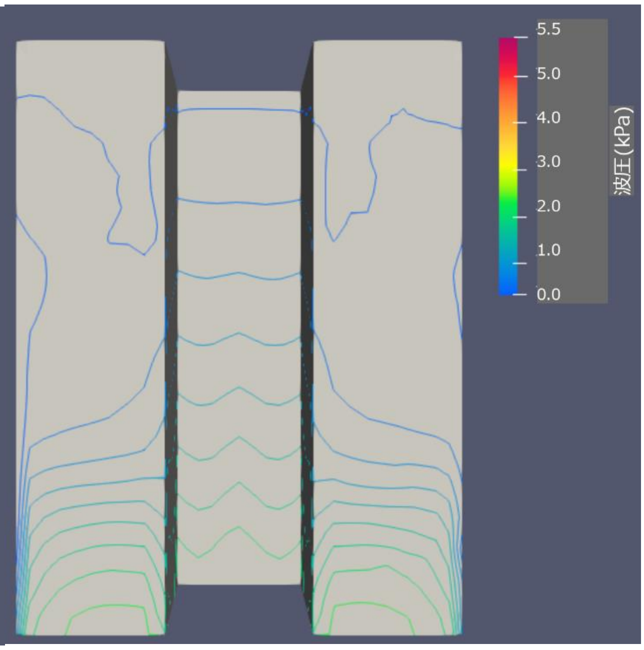
模型(c)



模型(d)

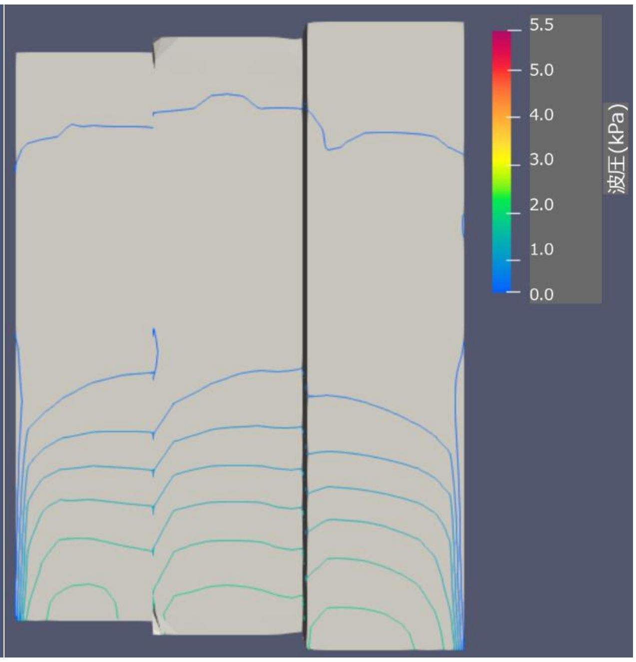
図 4-8 波圧分布図・解析モデル②・定常

模型(e)



模型(f)

模型(g)



模型(h)

図 4-8 波圧分布図・解析モデル②・定常

4.3 津波荷重の算定

これまでに津波条件、建築物平面形状が津波荷重に与える影響があることが分かった。そのため、各模型のような平面形状の建築物に作用する津波荷重の算定を試みる。

図 4-9 のような水理実験や数値流体解析から得られた無次元化波圧分布を線形近似したものを考える。このとき、分布直線と y 軸との交点を高さ係数 a、x 軸との交点を水圧係数 b と定義すると、見付け幅 B に作用する津波荷重 Q_i は静水圧式より(4.1)式で表される。ここでは煩雑さを避けるため、津波が建物を越えない場合を考える。

$$Q_i = \frac{1}{2}\rho g B a b h^2 \tag{4.1}$$

ここで、ρ (t/m³)を水の単位体積質量、g(m/s²)を重力加速度、h(m)を通過波の浸水深とする。

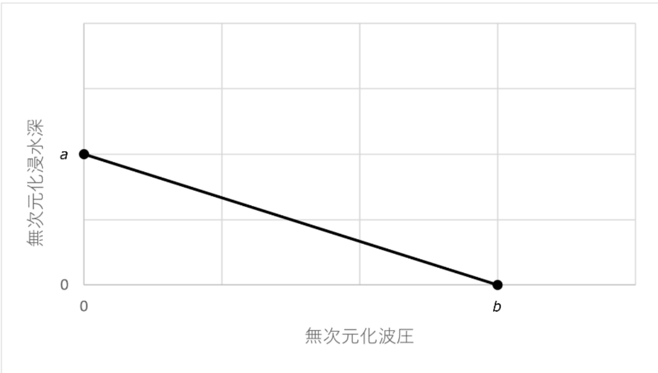


図 4-9 無次元化波圧分布例

このとき、図 4-10 のように建築物を見付け幅方向に n 分割した場合、建築物全体に作用する津波荷重 Q_z は(4.1)式より、(4.2)式で表される。

$$Q_z = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2}\rho g B_i a_i b_i h^2 \tag{4.2}$$

ここで、B_i (m)を i 面の見付け幅、a_i を i 面の高さ係数、b_i を i 面の水圧係数とする。(4.2)式は水理実験や数値流体解析から無次元化波圧分布を得られることが前提となっているが、衝撃ケースによる津波荷重の増大、平面形状による影響を考慮できるものとなっている。

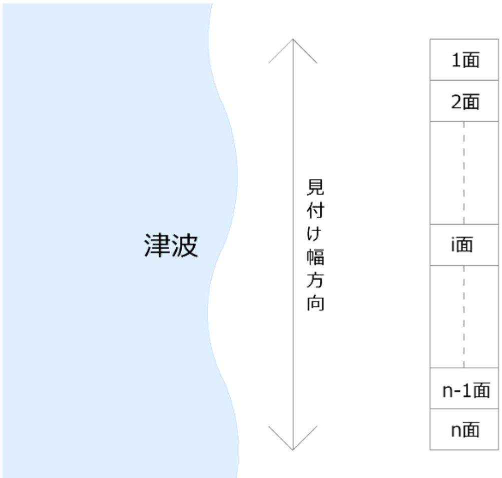


図 4-10 建築物の見付け幅方向の分割

(4.2)式を国土交通省のガイドライン[3)]と比較する。ガイドライン[3)]で水深係数を 3.0 とする、即ち、$a = b = 3$とするとき、単位幅あたりの津波荷重 Q_z は $4.5\rho gh^2$ となる。また、同様にして、水深係数を 2.0 とするとき、単位幅あたりの津波荷重 Q_z は $2.0\rho gh^2$ となる。

ここで、列ごとの無次元化波圧分布が分かり、波圧に左右差の生じなかった解析モデル②を津波荷重算定に用いる。図 4-11 に示す通り、模型の見付け幅を 1m に拡大し、模型(a)～模型(e)、模型(g)で 5 等分、模型(f)、模型(g)で 3 等分した場合を考える。このとき、模型(a)～模型(e)、模型(g)で A 列が 1 面、B 列が 2 面、C 列が 3 面、D 列が 4 面、E 列が 5 面を代表する波圧分布形とし、模型(f)、模型(g)で A 列が 1 面、C 列が 2 面、E 列が 3 面を代表する波圧分布形とする。

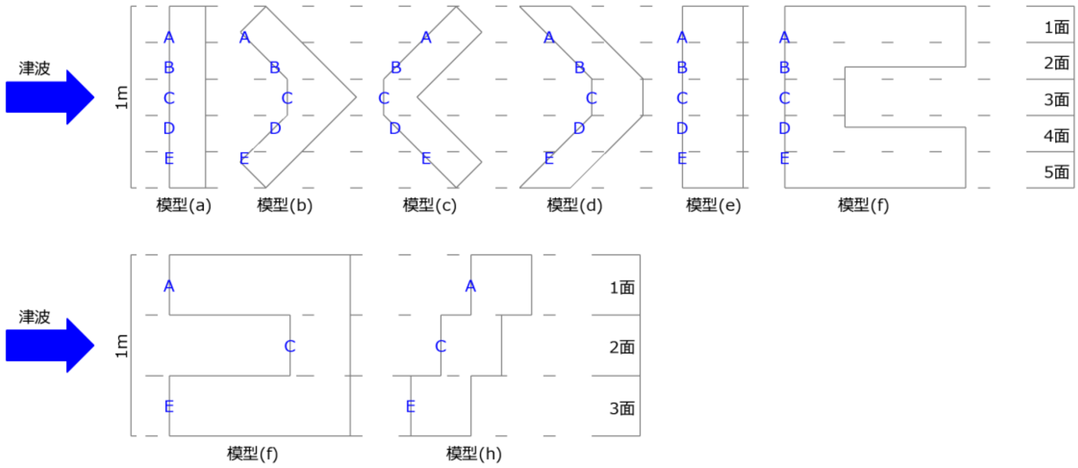


図 4-11 津波荷重算定用模型

図 4-12 に衝撃ケースの近似無次元化波圧分布、図 4-13 に定常ケースの近似無次元化波圧分布を示す。ここで、解析モデル②では、波圧の左右差がほとんど生じなかったため、階段状平面の模型(h)を除いて、A 列と E 列、B 列と D 列を同じ分布形として、評価した。

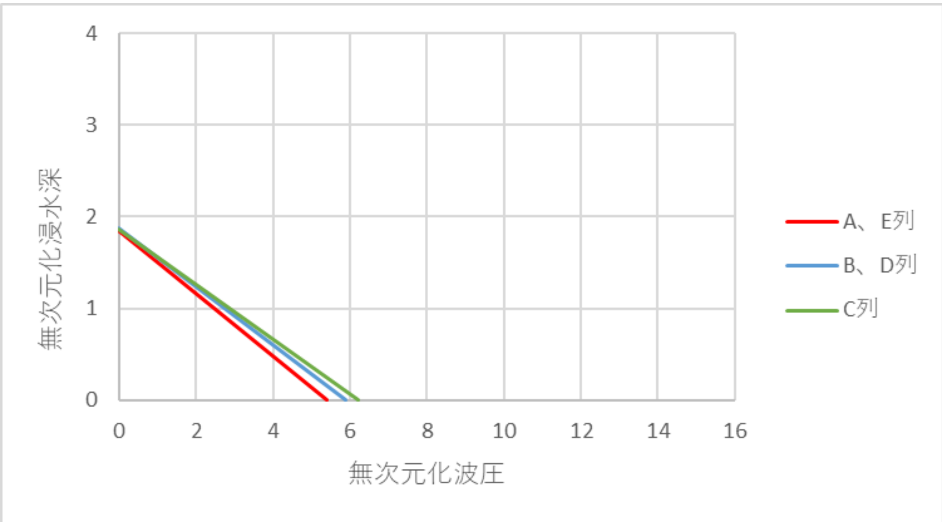


図 4-12-1 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(a)）

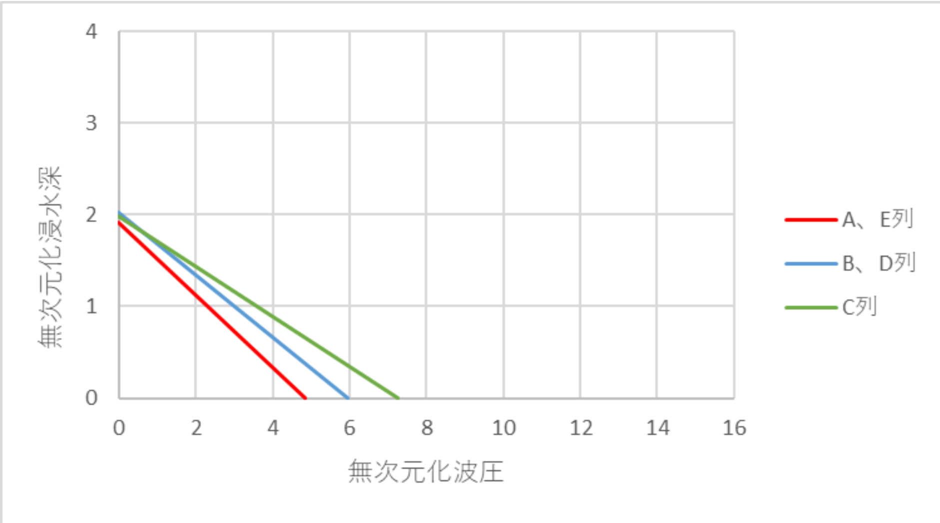


図 4-12-2 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(b)）

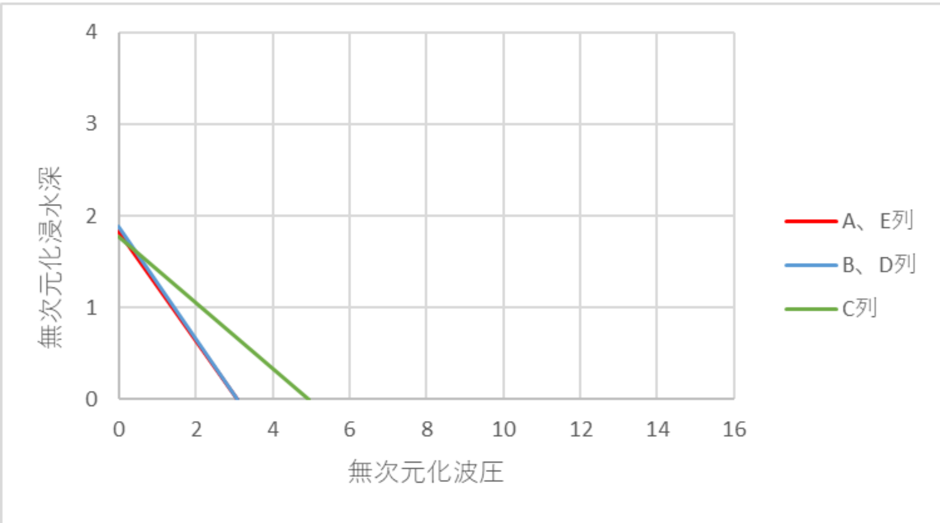


図 4-12-3 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(c)）

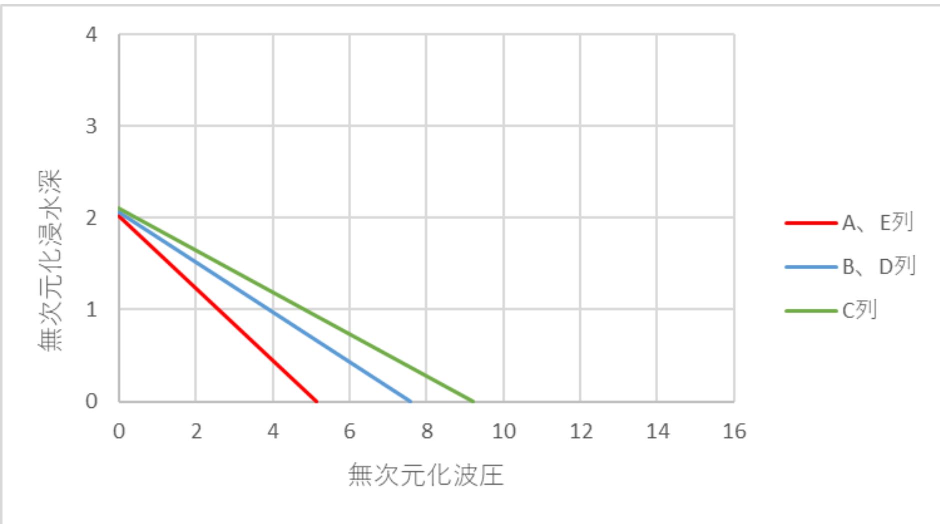


図 4-12-4 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(d)）

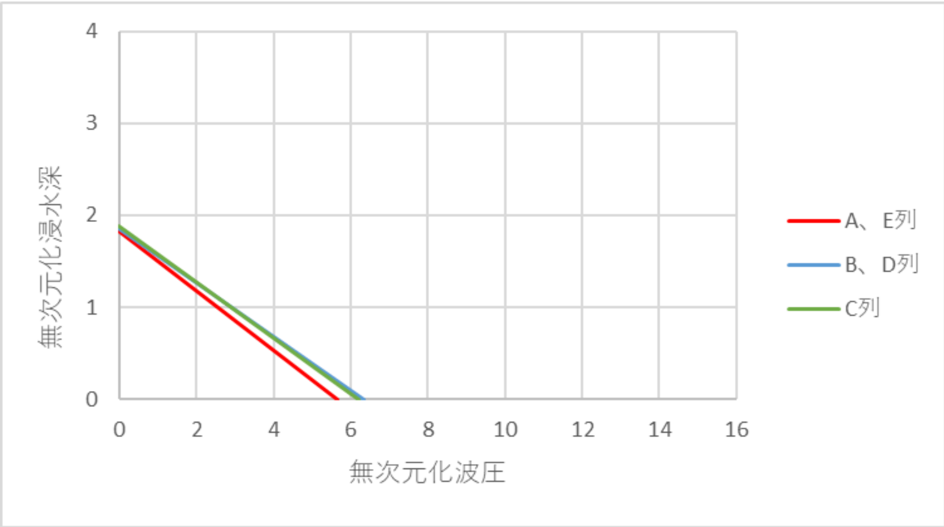


図 4-12-5 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(e)）

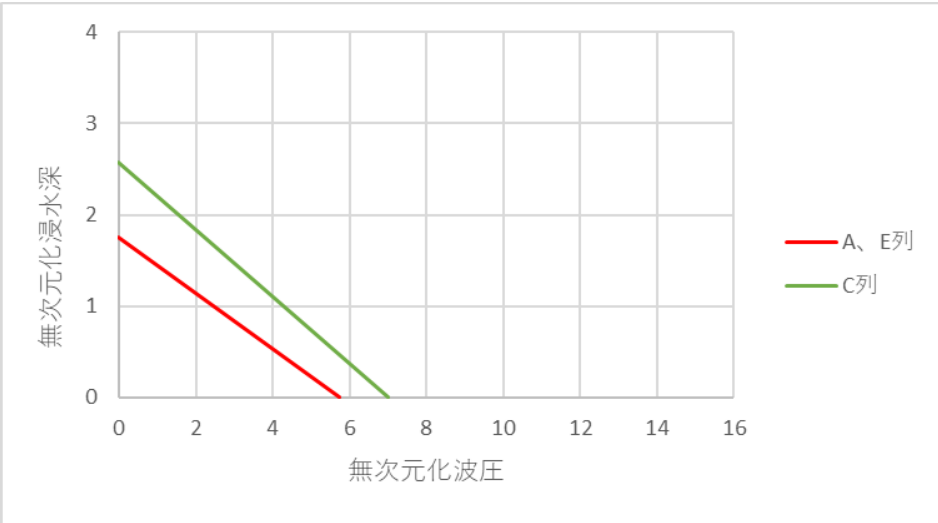


図 4-12-6 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(f)）

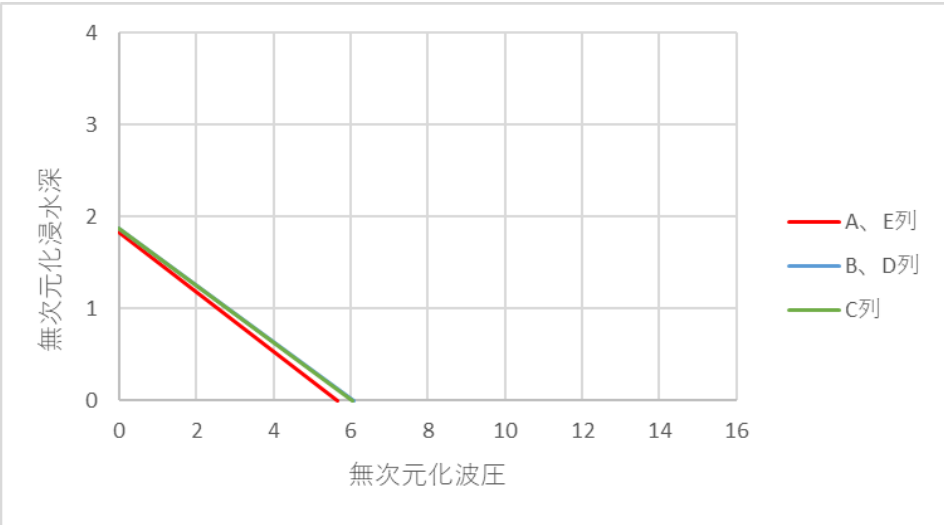


図 4-12-7 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(g)）

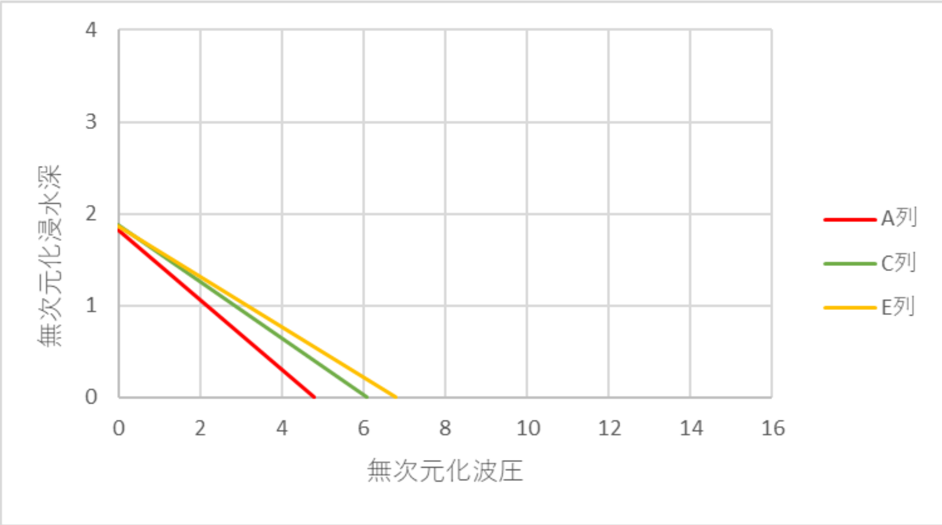


図 4-12-8 近似無次元化波圧分布（衝撃・模型(h)）

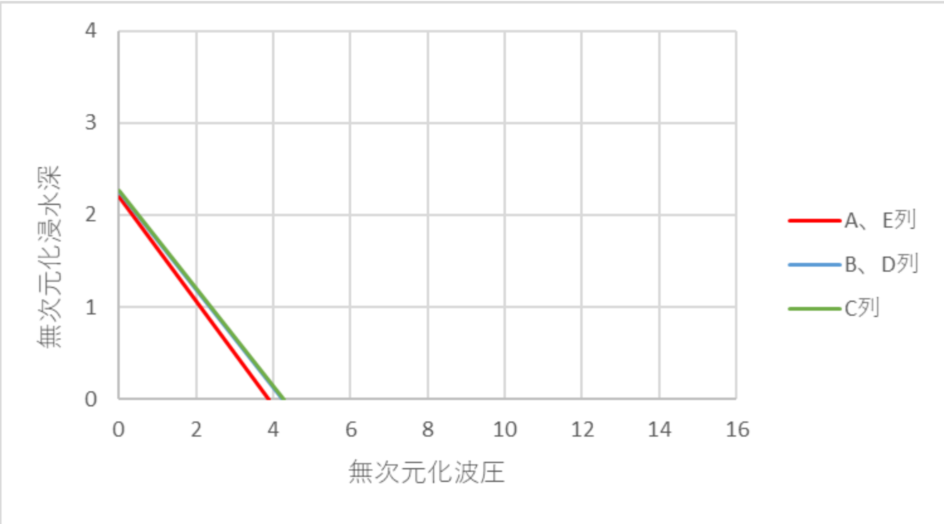


図 4-13-1 近似無次元化波圧分布（定常・模型(a)）

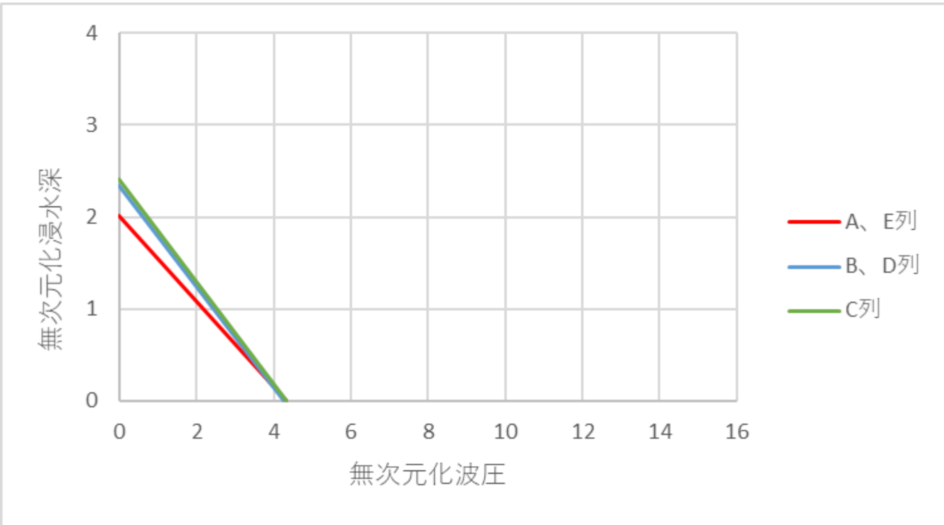


図 4-13-2 近似無次元化波圧分布（定常・模型(b)）

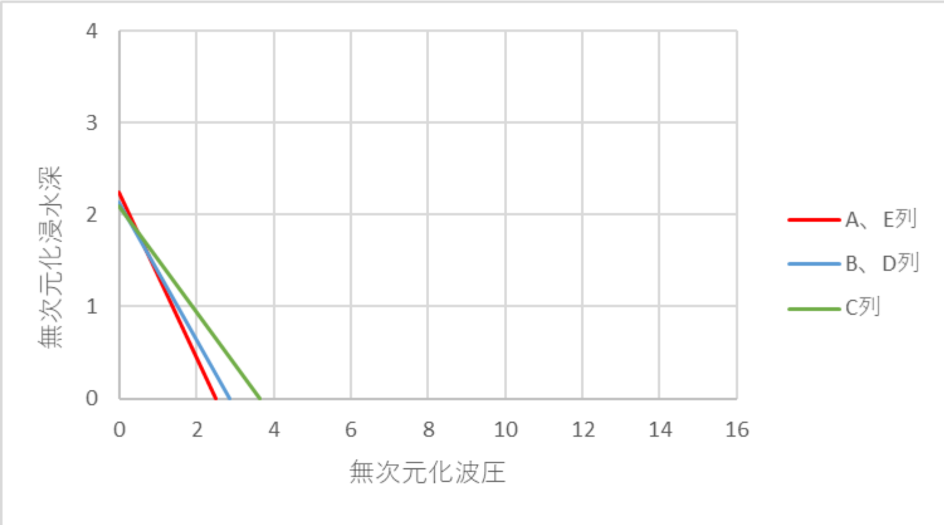


図 4-13-3 近似無次元化波圧分布（定常・模型(c)）

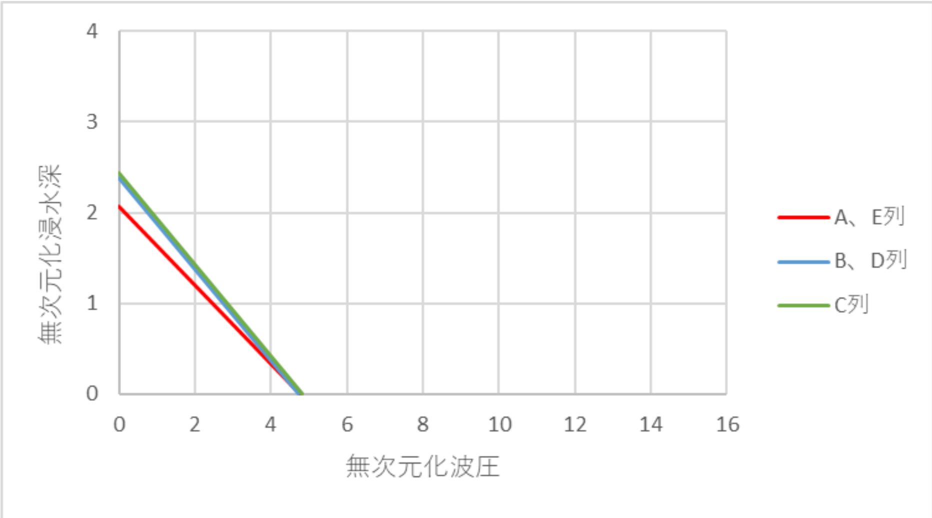


図 4-13-4 近似無次元化波圧分布（定常・模型(d)）

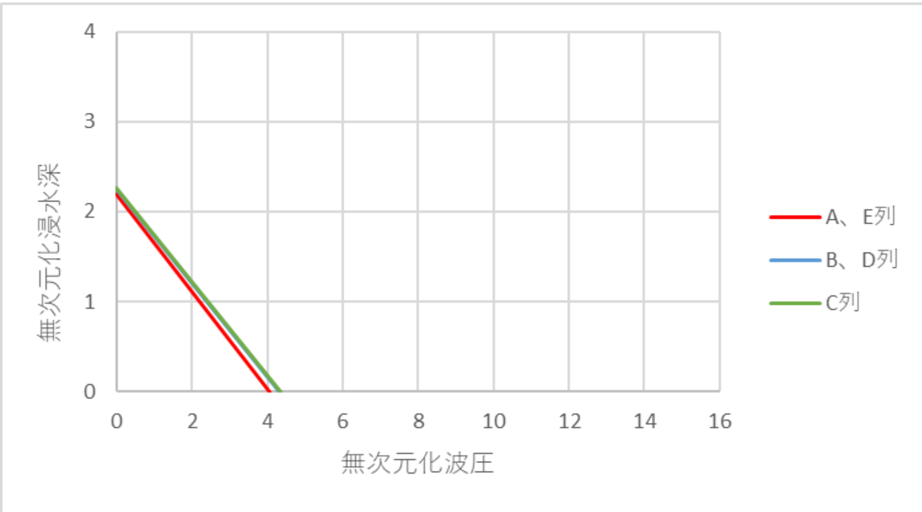


図 4-13-5 近似無次元化波圧分布（定常・模型(e)）

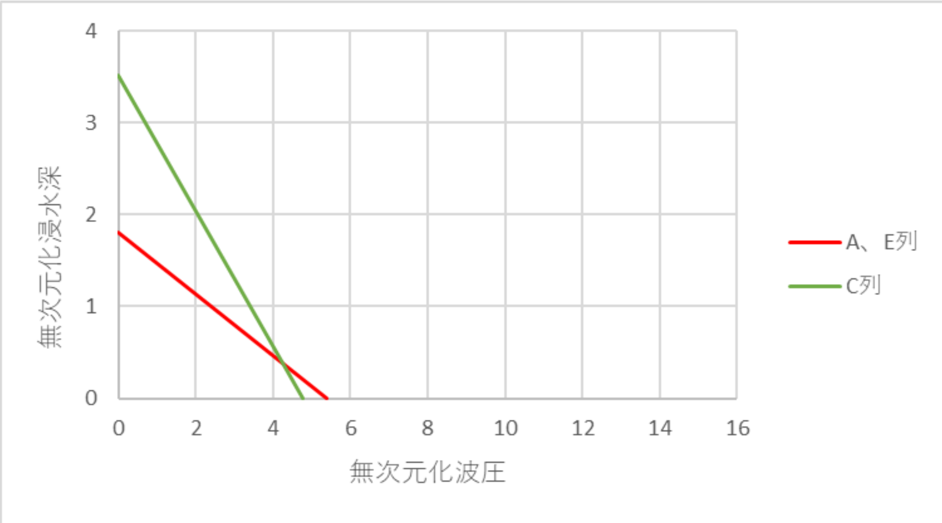


図 4-13-6 近似無次元化波圧分布（定常・模型(f)）

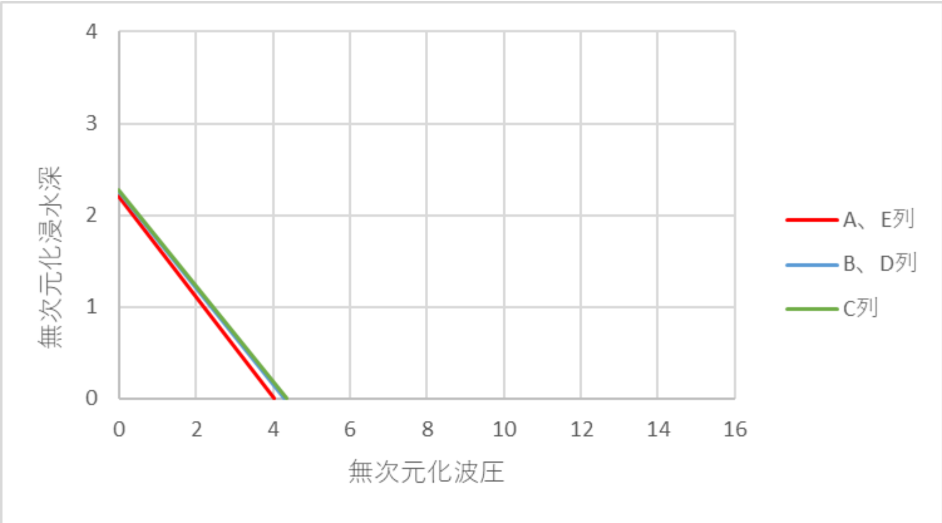


図 4-13-7 近似無次元化波圧分布（定常・模型(g)）

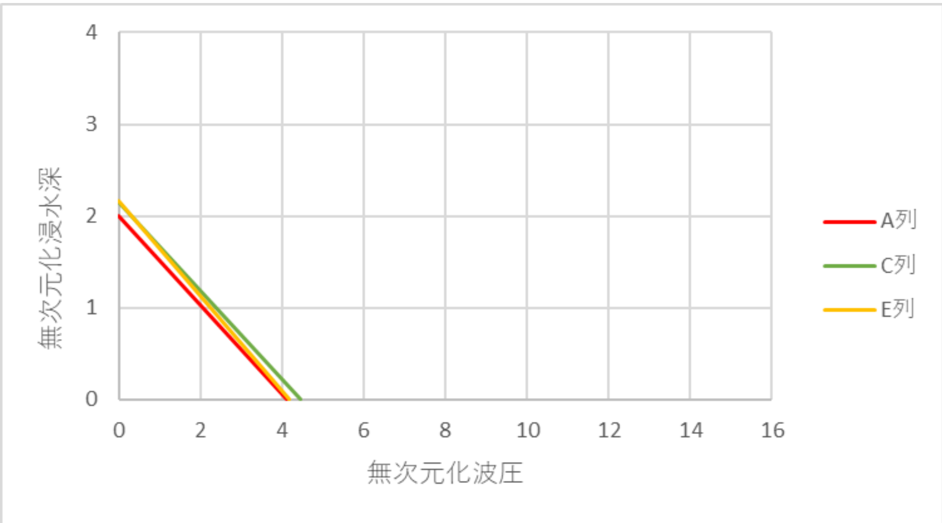


図 4-13-8 近似無次元化波圧分布（定常・模型(h)）

ここで、模型(a)の定常ケースの津波荷重の算定を行う。

図 4-13-1 より、模型(a)の定常ケースの高さ係数 a_i と水圧係数 b_i は以下のようになる。

$$a_1 = a_5 = 2.19 \ \ , \ \ a_2 = a_4 = 2.25 \ \ , \ \ a_3 = 2.26$$

$$b_1 = b_5 = 3.90 \ \ , \ \ b_2 = b_4 = 4.24 \ \ , \ \ b_3 = 4.27$$

よって、(4.2)式を用いると、直方体模型(a)のような長方形の平面を持つ建築物に作用する単位幅あたりの津波荷重 Q_z は以下のようになる。

$$Q_z = \sum_{k=1}^{5} \frac{1}{2} \rho g B_i a_i b_i h^2$$

$$= \frac{0.2}{2} \rho g h^2 (2 \cdot 2.19 \cdot 3.90 + 2 \cdot 2.25 \cdot 4.24 + 2.26 \cdot 4.27)$$

$$\approx 4.58 \rho g h^2$$

このとき、ガイドライン 3) で水深係数を 3.0 としたとき、単位幅あたりの津波荷重 Q_z は $4.5\rho g h^2$ であるので、模型(a)の定常ケースの津波荷重はガイドライン 3) で水深係数を 3.0 としたときの津波荷重と概ね同じと評価できる。

同様にして、他の津波条件、模型形状で高さ係数 a_i と水圧係数 b_i より、単位幅あたりの津波荷重 Q_z を算定したものを表 4-1 に示す。表に示す通り、衝撃ケースでは、模型(c)を除いて、ガイドライン 3) で水深係数を 3.0 としたときの津波荷重より大幅に大きい津波荷重となった。一方で、定常ケースでは模型(d)、模型(f)でのみ、水深係数を 3.0 としたときの津波荷重を大幅に超える結果となった。

表 4-1 津波荷重算定結果

津波条件	模型	列	高さ係数 a_i	水圧係数 b_i	単位幅あたりの津波荷重 Q_z(kN)	津波条件	模型	列	高さ係数 a_i	水圧係数 b_i	単位幅あたりの津波荷重 Q_z(kN)
衝撃	a	A,E列	1.85	5.39	5.36ρgh²	定常	a	A,E列	2.19	3.90	4.58ρgh²
		B,D列	1.88	5.88				B,D列	2.25	4.24	
		C列	1.86	6.22				C列	2.26	4.27	
	b	A,E列	1.92	4.84	5.70ρgh²		b	A,E列	2.01	4.31	4.77ρgh²
		B,D列	2.02	5.94				B,D列	2.34	4.26	
		C列	1.99	7.26				C列	2.41	4.33	
	c	A,E列	1.83	3.08	3.16ρgh²		c	A,E列	2.25	2.48	3.10ρgh²
		B,D列	1.88	3.09				B,D列	2.13	2.87	
		C列	1.77	4.94				C列	2.09	3.63	
	d	A,E列	2.02	5.14	7.15ρgh²		d	A,E列	2.07	4.77	5.41ρgh²
		B,D列	2.07	7.57				B,D列	2.38	4.74	
		C列	2.11	9.21				C列	2.44	4.83	
	e	A,E列	1.83	5.65	5.58ρgh²		e	A,E列	2.20	4.07	4.72ρgh²
		B,D列	1.85	6.35				B,D列	2.25	4.31	
		C列	1.88	6.20				C列	2.26	4.36	
	f	A,E列	1.76	5.74	6.38ρgh²		f	A,E列	1.80	5.37	6.03ρgh²
		C列	2.58	7.01				C列	3.52	4.78	
	g	A,E列	1.83	5.66	5.48ρgh²		g	A,E列	2.21	4.03	4.71ρgh²
		B,D列	1.87	6.08				B,D列	2.26	4.29	
		C列	1.88	6.06				C列	2.27	4.36	
	h	A列	1.83	4.78	5.47ρgh²		h	A列	4.10	2.00	4.47ρgh²
		C列	1.88	6.08				C列	4.43	2.15	
		E列	1.86	6.79				E列	4.18	2.17	

第 5 章　結

5.1 まとめ
5.2 今後の課題

第 5 章 結論

5.1 まとめ

本研究では、津波荷重に与える平面形状による影響を水理実験と数値流体解析より、衝撃ケースと定常ケースについて検討した。その結果、衝撃ケースと定常ケースの両方で似た模型形状による影響が見られ、衝撃ケースの方が顕著に現れた。L 字平面やコの字平面の凹面側などの津波を一か所に集めやすい平面形状では、津波荷重が増大することが分かった。一方で、L 字平面の凸面側などの津波をかき分けやすい平面形状では、津波荷重が低下した。また、平面形状を考慮した津波荷重の算定を行い、その結果、現行のガイドライン [3)] の静水圧式では、衝撃ケースの評価が難しい結果となった。

5.2 今後の課題

本研究の実験と解析では、似たような平面形状による影響があった一方で、波圧の大きさが大きく異なった。そのため今後、実験結果と解析結果が合うように実験方法、解析設定を見直し再度、実験及び解析を行うことが必要となる。

本研究では前章に示す通り、水理実験や数値流体解析等より得られる無次元化波圧分布から津波荷重を算定した。しかし、この算定荷重は本研究で対象とした平面形状でのみ使用でき、T 字平面などの他の平面形状などを考慮し、一般的に用いることができない。そのため、より多くの不整形模型を使った水理実験、数値流体解析を行い、津波条件、平面形状による影響を考慮した簡便に、広く用いることができる津波荷重算定方法の確立が求められる。

参考文献

参考文献

1) 内閣府政策統括官, 南海トラフ巨大地震の被害予想について, 2019.6
2) 日本建築学会:建築物荷重指針・同解説,日本建築学会,2015.2
3) 国土交通省国土技術政策総合研究所:津波避難ビル等の構造上の要件の解説,2012.3
4) 東京大学生産技術研究所:平成 23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書,2011.7
5) 東京大学生産技術研究所:平成 23 年度建築基準整備促進事業「40.津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討」中間報告書その 2,2011.7
6) 内閣府: 津波避難ビル等に係るガイドライン,2005.6
7) 有川太郎・大家隆行:防波堤背後の建物に作用する津波力に関する実験的研究,土木学会論文集（海岸工学）,Vol.70,No.2,pp.I-806～I-810,2014
8) 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷毅・高尾誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則:護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究,海岸工学論文集,第 47 巻, pp.911～915,2000
9) 大藪剛士・日吉智: ソリトン分裂波を考慮した津波シミュレーション,全地連「技術フォーラム 2013」長野,No.117,2013
10) 松井徹哉: 流速依存性を考慮した建築物への津波作用外力の評価式の提案:日本建築学会構造系論文集,第 78 巻,第 691 号,pp.1659～1664,2013.9
11) 中埜良昭: 2004 年スマトラ島沖地震津波の被害調査結果に基づく津波避難施設の設計外力評価, 日本建築学会技術報告集,第 13 巻,第 25 号,pp.337～340,2007.6
12) 山本雅史・木下貴博・井上修作・曽根孝行・鴨下直登・高山峯夫・森田慶子: 3 次元流体解析に基づく免震建物の津波荷重の評価（その 3）斜め 45 度方向から建物に作用する津波荷重, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.43～44,2022.7
13) 小幡昭彦・亀谷裕紀・佐藤公亮・寺本尚史・植松康: 円筒形構造物に作用する津波力に関する基礎的検討 その 1 : 水理実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.77～78,2018.7
14) 亀谷裕紀・小幡昭彦・髙舘祐貴・佐藤公亮・植松康: 円筒形構造物に作用する津波力に関する基礎的検討 その 2 : 数値流体解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.79～80,2018.7
15) The OpenFOAM Foundation: https://openfoam.org/,参照 2023.1.21

16) 寺本尚史・亀谷裕紀・小幡昭彦・佐藤公亮・植松康: 連棟配置された円筒形構造物に作用する津波力に関する検討 その1: 水理模型実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.149～150,2020.9

17) 亀谷裕紀・寺本尚史・小幡昭彦・佐藤公亮・植松康: 連棟配置された円筒形構造物に作用する津波力に関する検討 その2: 数値流体解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.151～152,2020.9

18) 加藤光・川口淳: 既存 RC 建物の耐津波性能評価方法に関する研究(その 1) ～不整形建築物を対象としたケーススタディと水理実験計画～, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.85～86,2019.7

19) 加藤光・川口淳: 既存 RC 建物の耐津波性能評価方法に関する研究(その 2) ～不整形建築物を対象とした水理実験の概要と波圧計測結果～, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.153～154,2020.9

20) 加藤光・川口淳・竹村颯真: 既存建物の耐津波性能評価方法に関する研究（その 1）～衝撃ケースおける水理実験の概要と波圧計測結果～, 日本建築学会大会学術講演梗概集,構造I, pp.45～46,2021.7

謝辞

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた川口淳准教授に感謝致します。また、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂いた川口研究室の皆様に感謝します。

付録

付録 A　実験結果
付録 B　解析結果
付録 C　数値計算手法

付録　　参考文献

付録

付録 A 実験結果

実験結果について、図 A-1~43 に時刻歴波圧を示す。表 A-1~8 に実験結果を示す。表には、最大波圧、無次元化波圧、計測高さ、無次元化浸水深を示す。また、模型(e)の一回目では、計測に不具合が生じていたため、平均値を出す際には除外した。

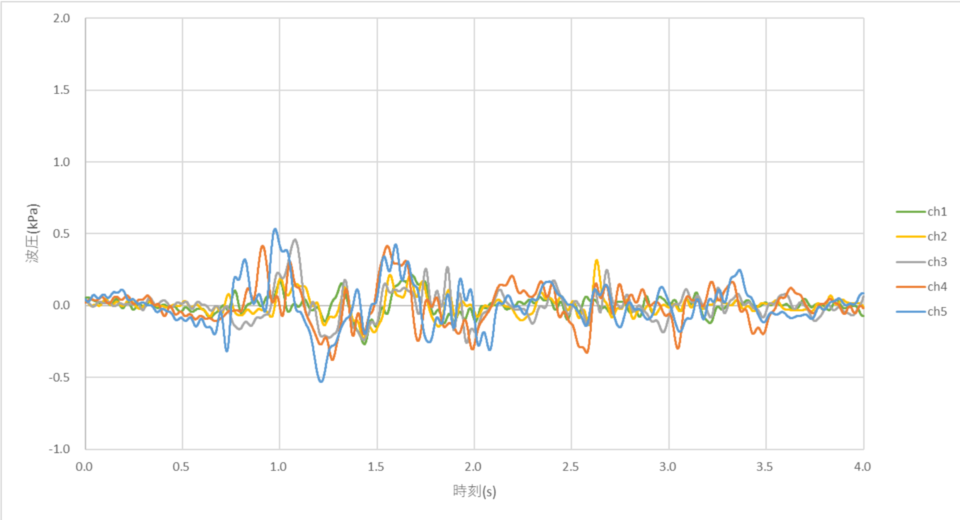


図 A-1 時刻歴波圧（模型(a)、一回目）

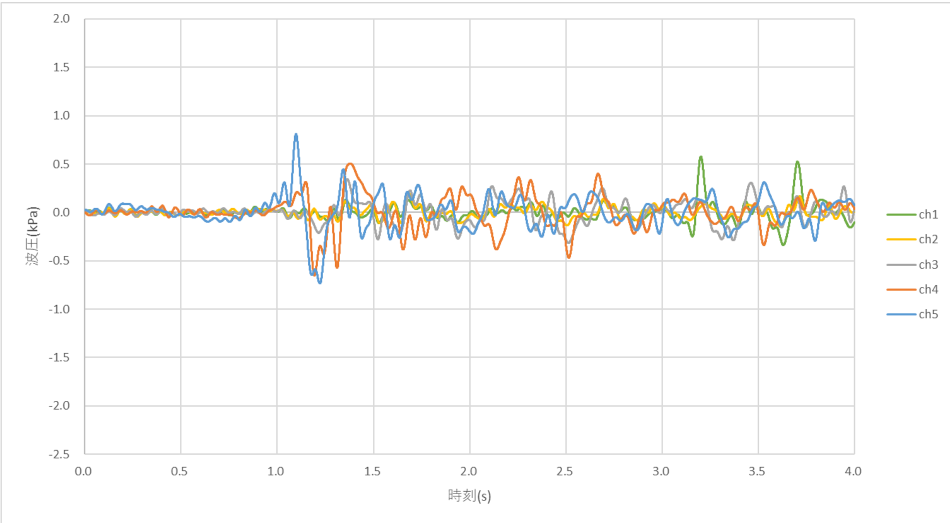


図 A-2 時刻歴波圧（模型(a)、二回目）

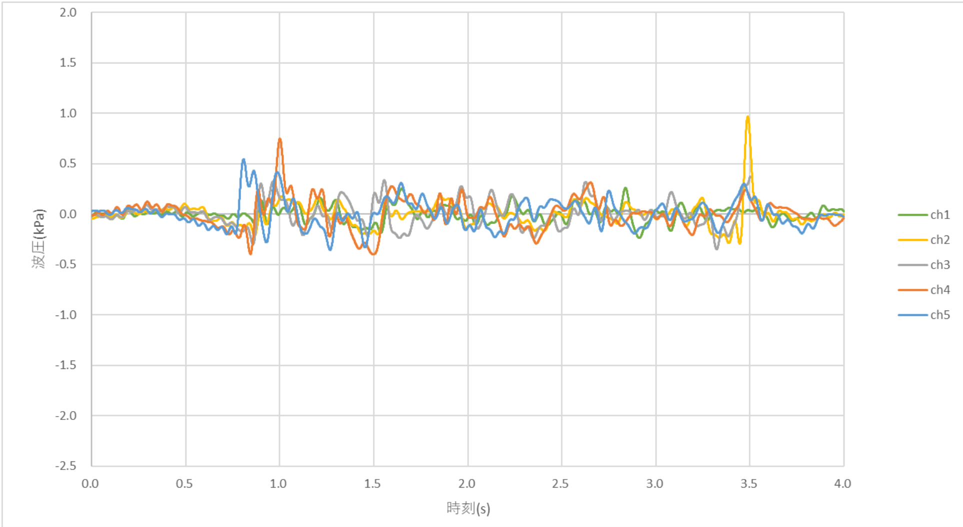


図 A-3 時刻歴波圧（模型(a)、三回目）

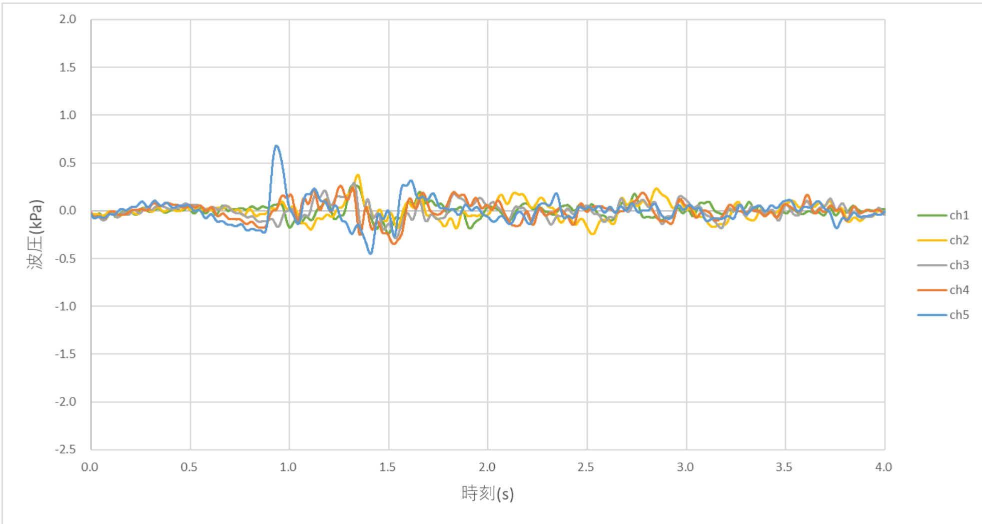


図 A-4 時刻歴波圧（模型(a)、四回目）

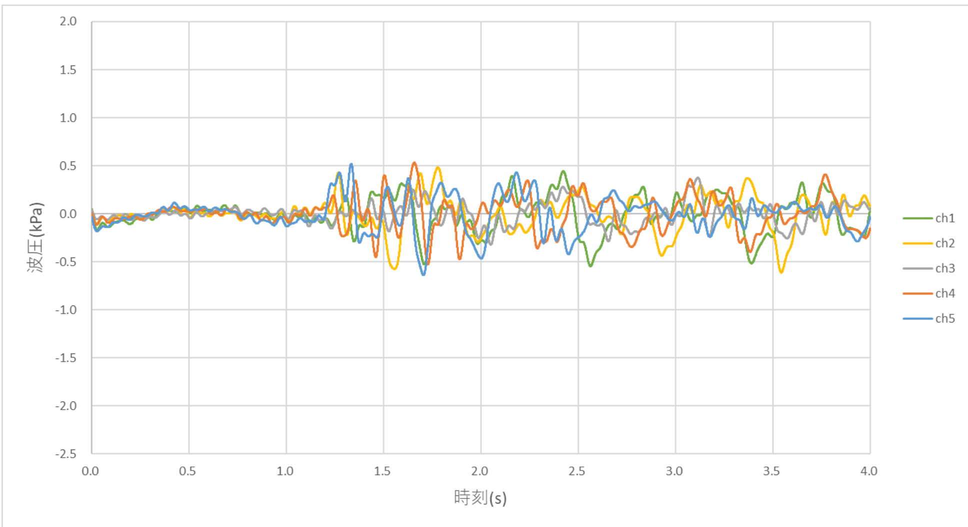


図 A-5 時刻歴波圧（模型(a)、五回目）

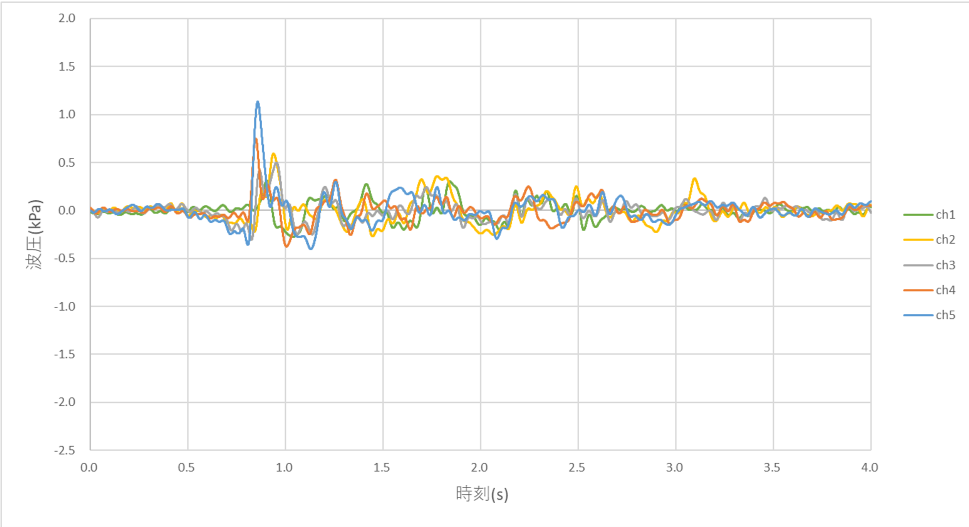


図 A-6 時刻歴波圧 (模型(b)、一回目)

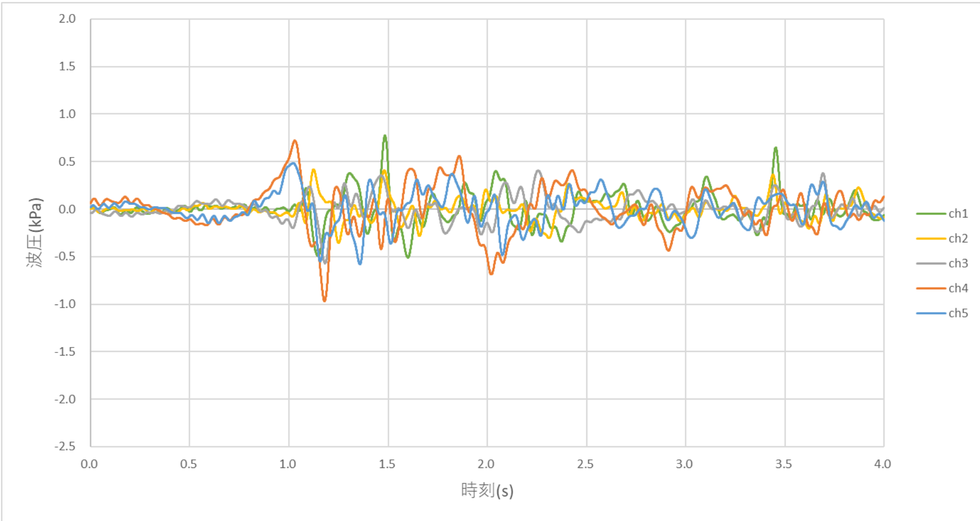


図 A-7 時刻歴波圧 (模型(b)、二回目)

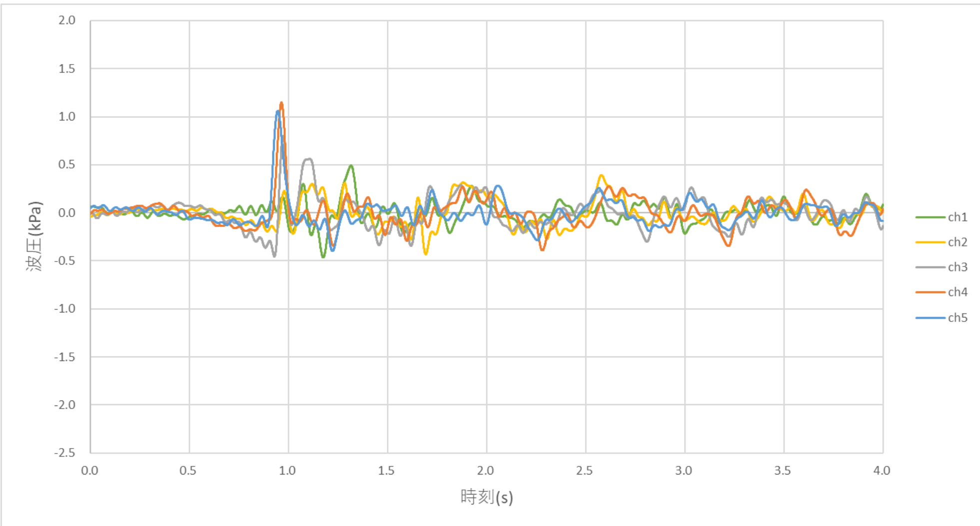


図 A-8 時刻歴波圧 (模型(b)、三回目)

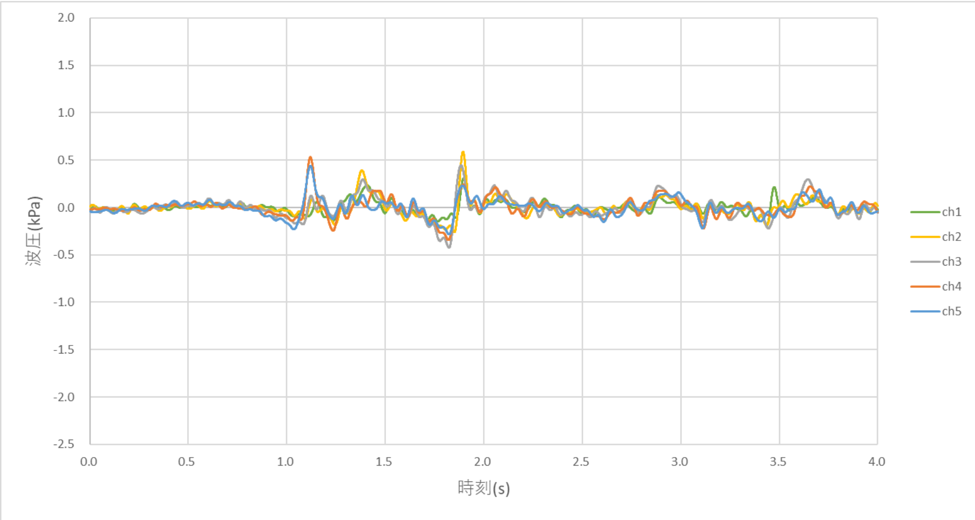


図 A-9 時刻歴波圧（模型(b)、四回目）

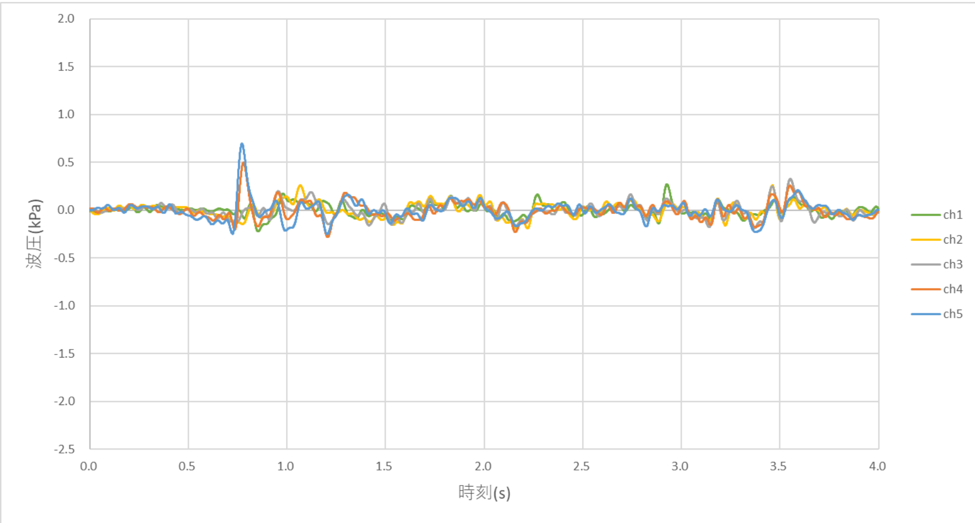


図 A-10 時刻歴波圧（模型(b)、五回目）

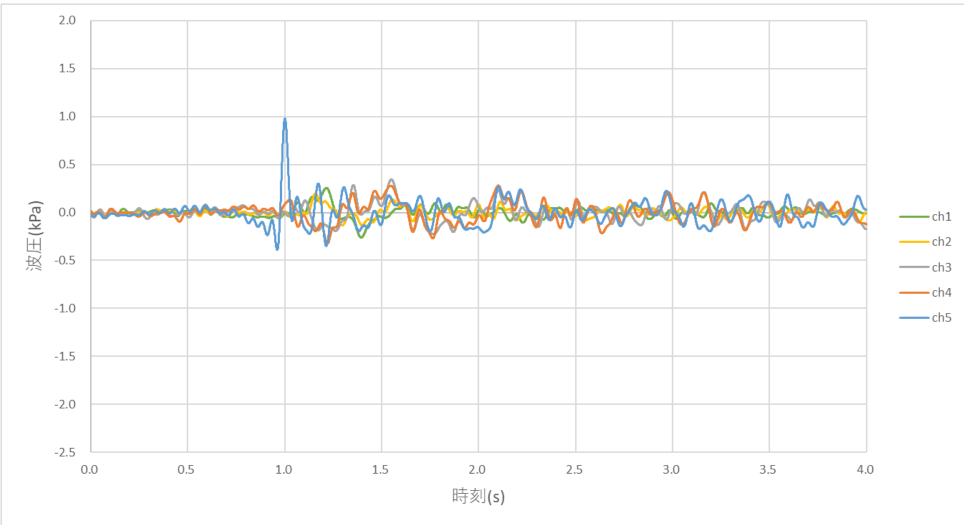


図 A-11 時刻歴波圧（模型(c)、一回目）

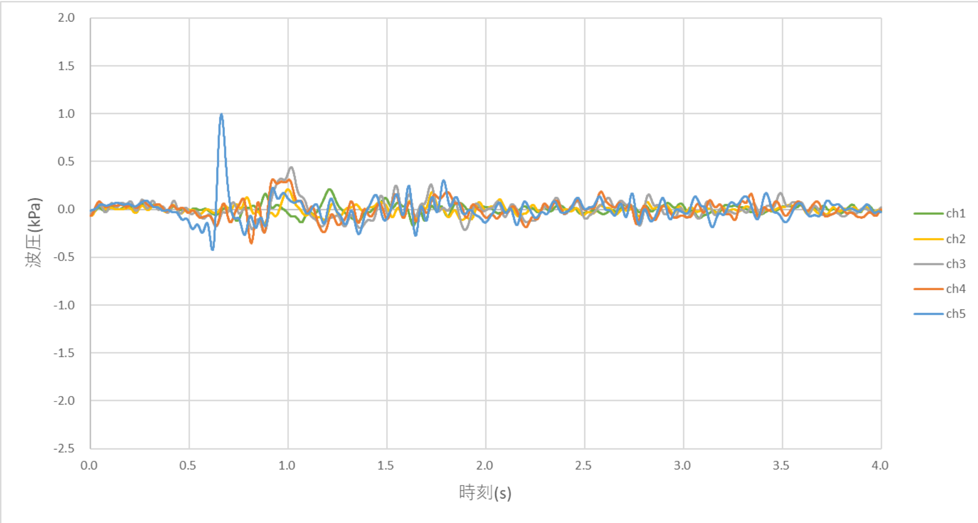


図 A-12 時刻歴波圧（模型(c)、二回目）

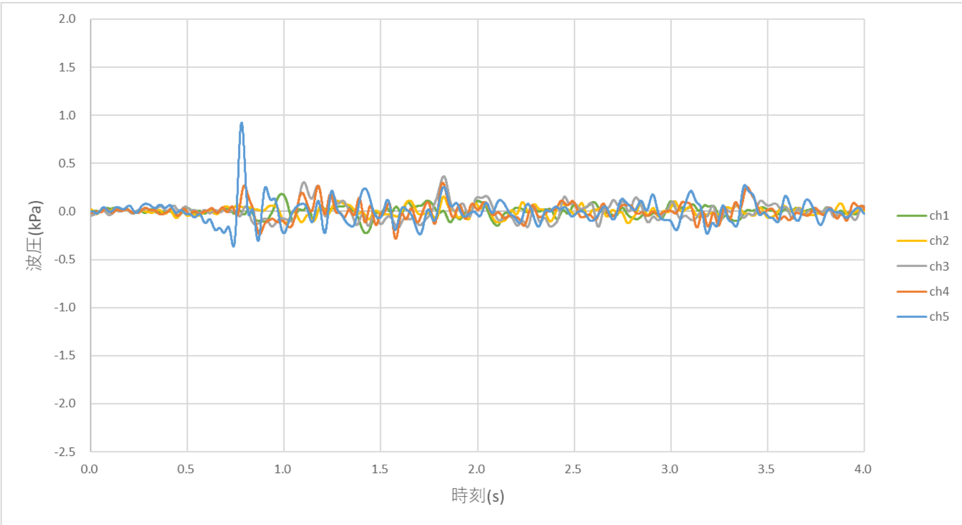


図 A-13 時刻歴波圧（模型(c)、三回目）

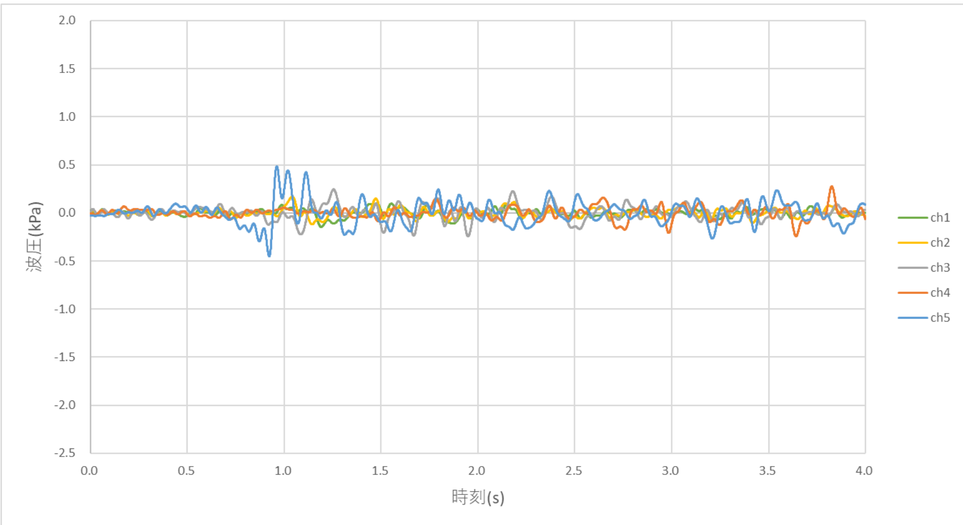


図 A-14 時刻歴波圧（模型(c)、四回目）

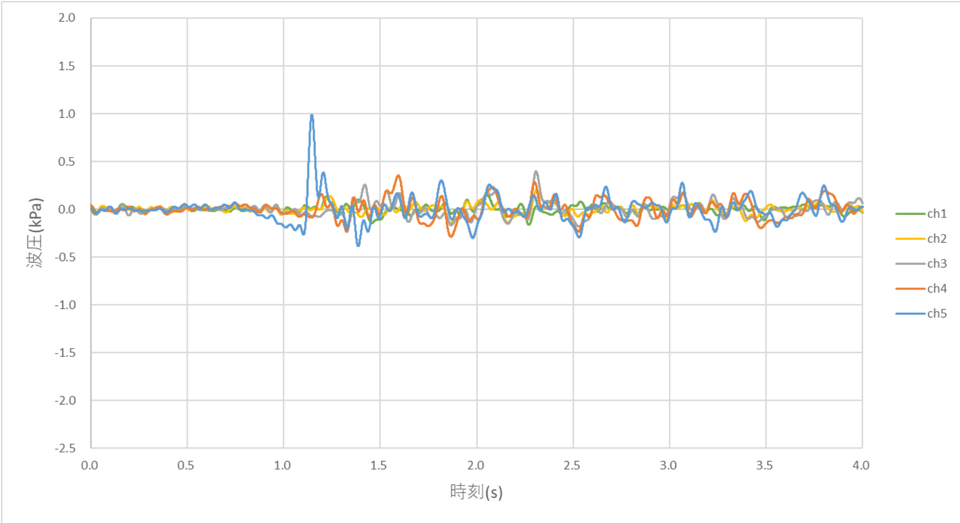


図 A-15 時刻歴波圧（模型(c)、五回目）

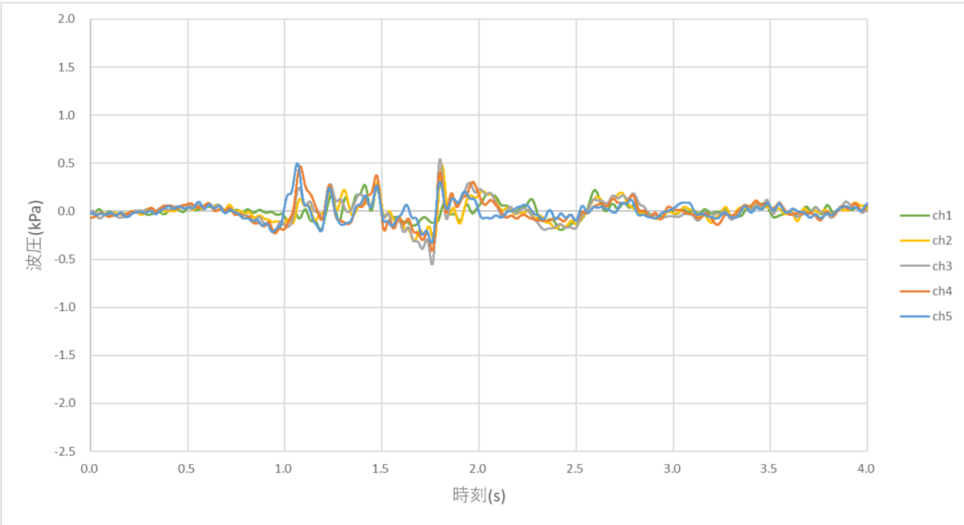


図 A-16 時刻歴波圧（模型(d)、一回目）

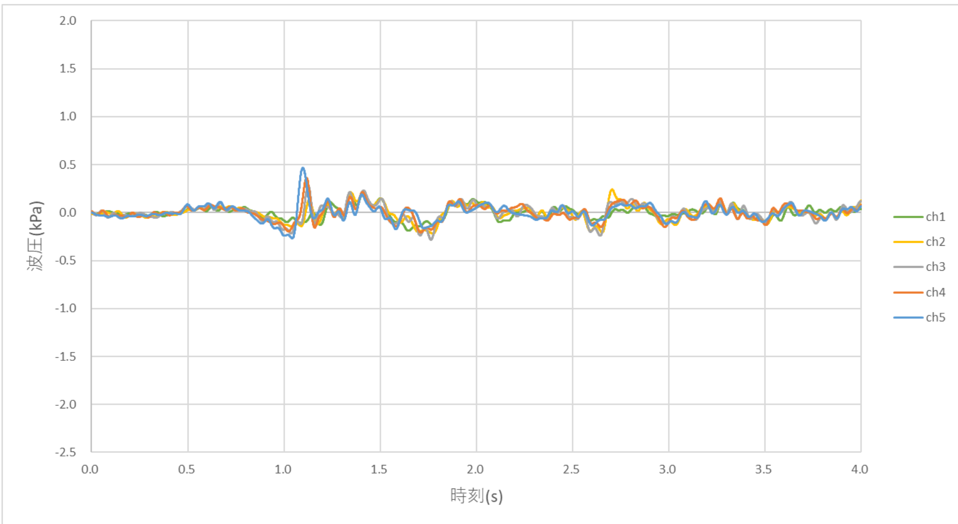


図 A-17 時刻歴波圧（模型(d)、二回目）

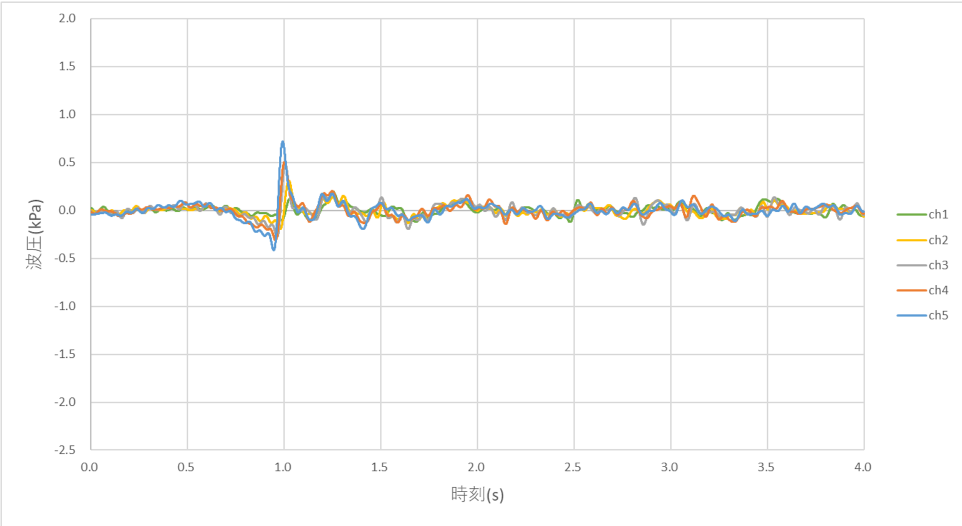


図 A-18 時刻歴波圧（模型(d)、三回目）

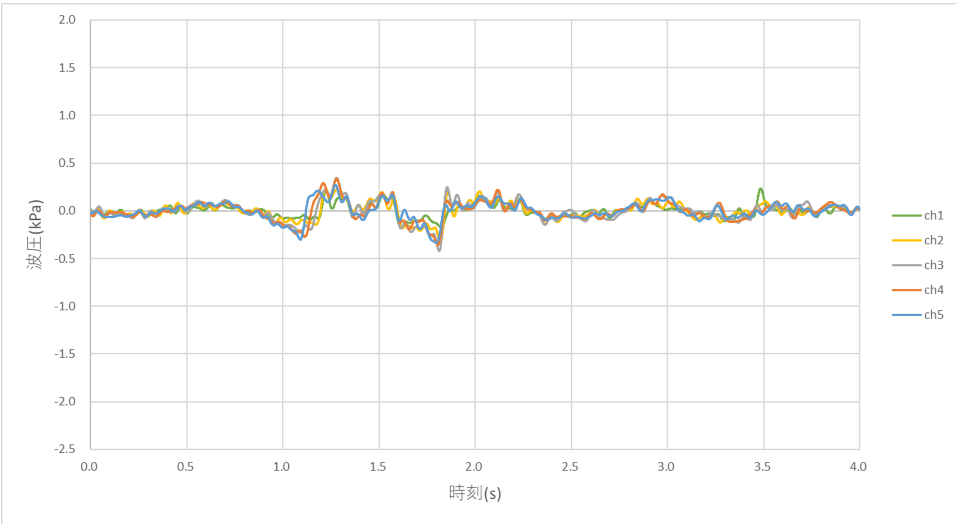


図 A-19 時刻歴波圧（模型(d)、四回目）

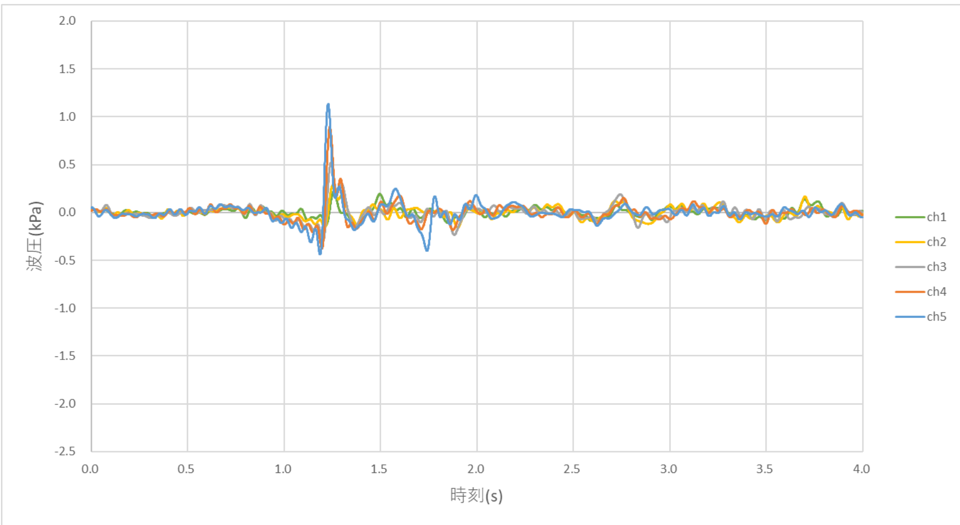


図 A-20 時刻歴波圧（模型(d)、五回目）

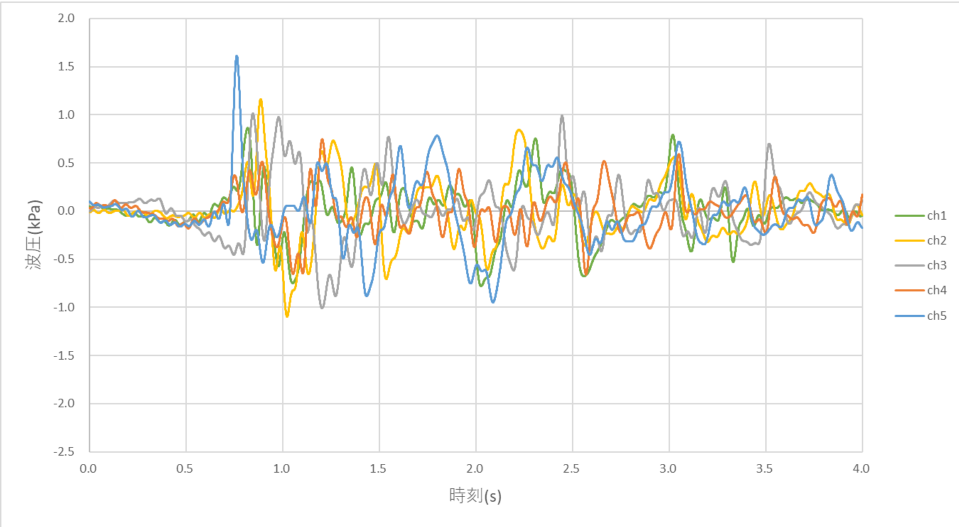


図 A-21 時刻歴波圧（模型(e)、一回目）

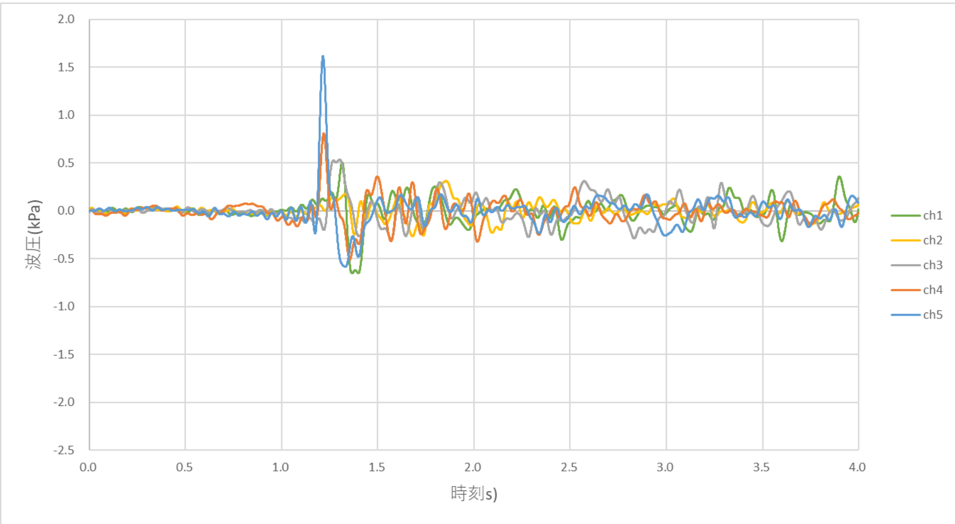


図 A-22 時刻歴波圧（模型(e)、二回目）

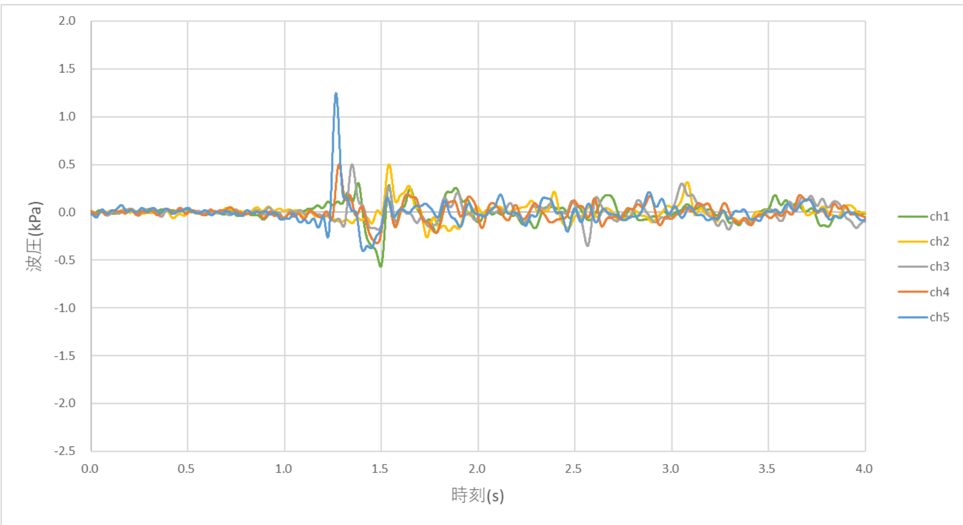


図 A-23 時刻歴波圧（模型(e)、三回目）

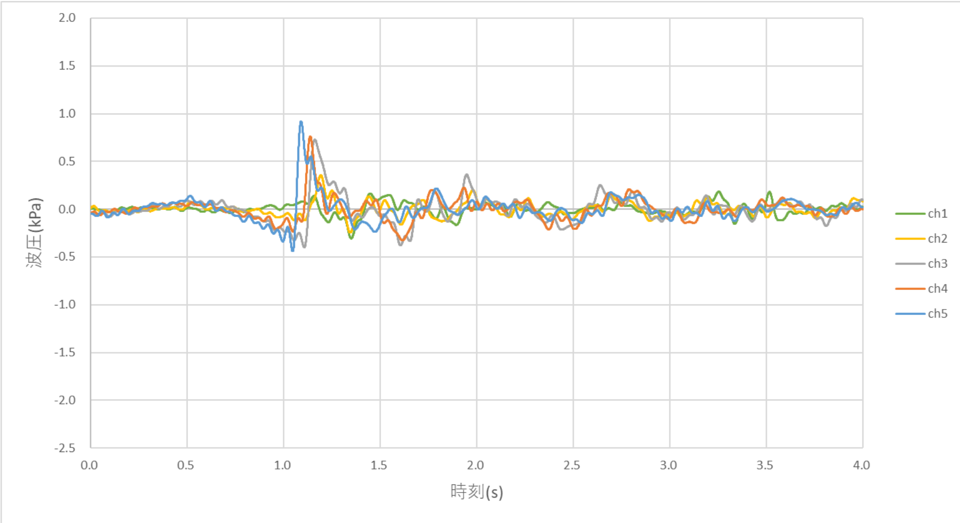


図 A-24 時刻歴波圧（模型(e)、四回目）

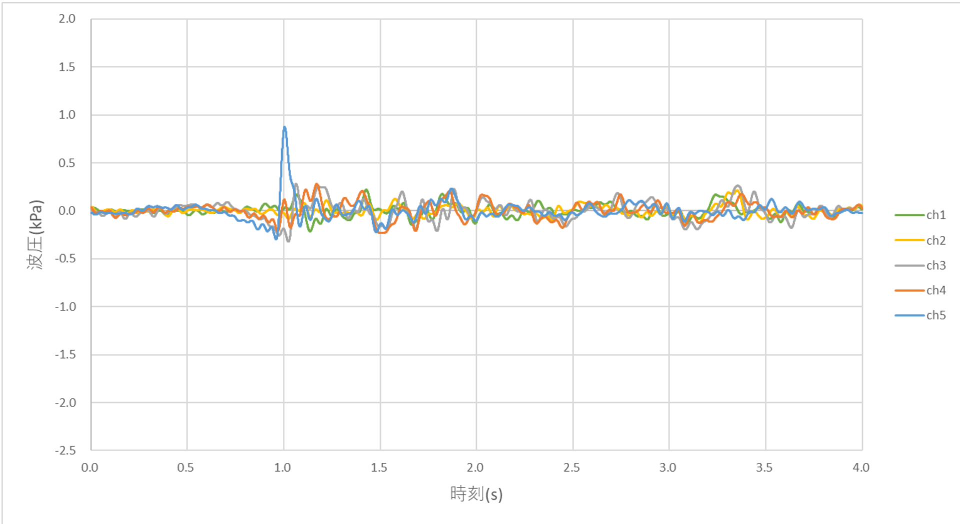


図 A-25 時刻歴波圧（模型(e)、五回目）

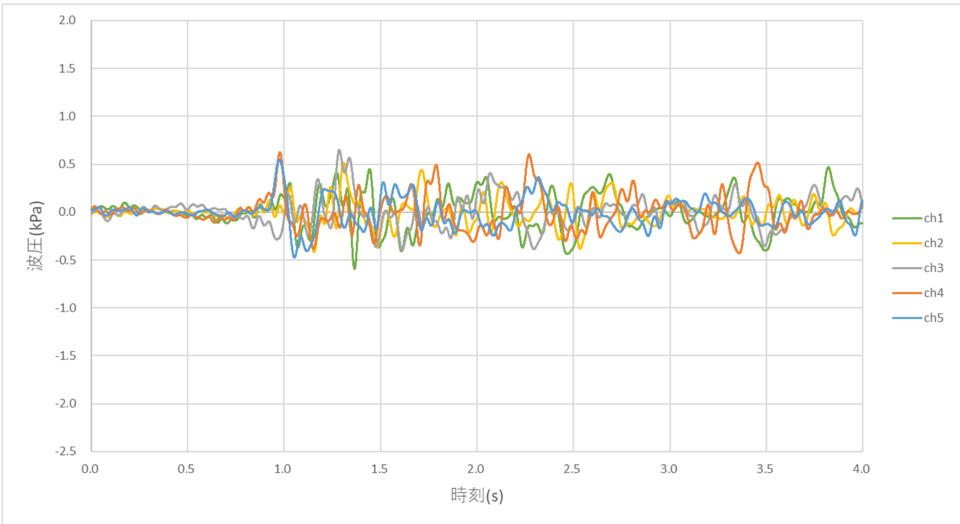


図 A-26 時刻歴波圧（模型(e)、六回目）

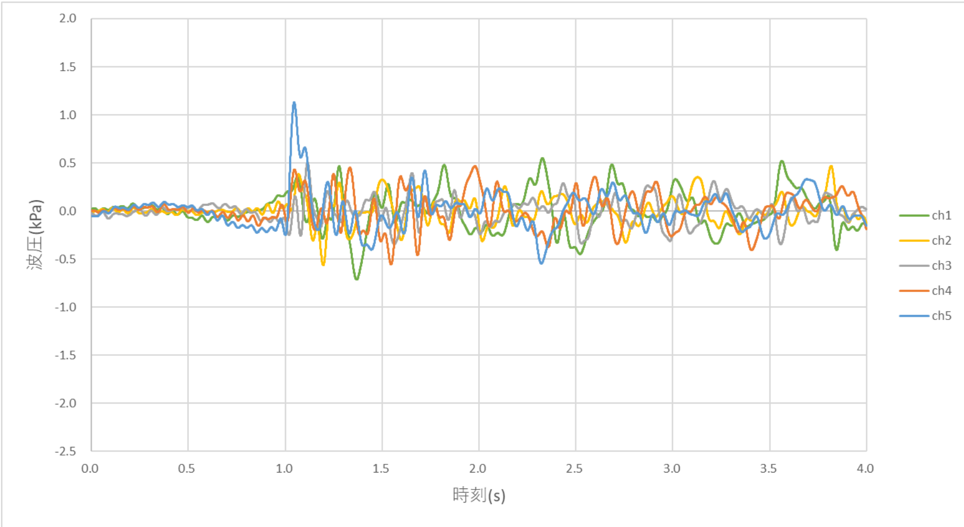


図 A-27 時刻歴波圧 （模型(e)、七回目）

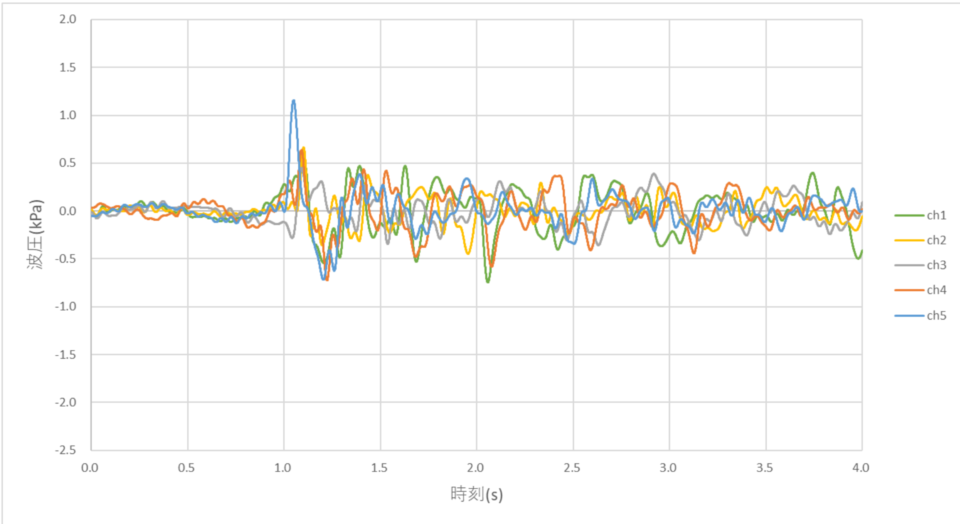


図 A-28 時刻歴波圧 （模型(e)、八回目）

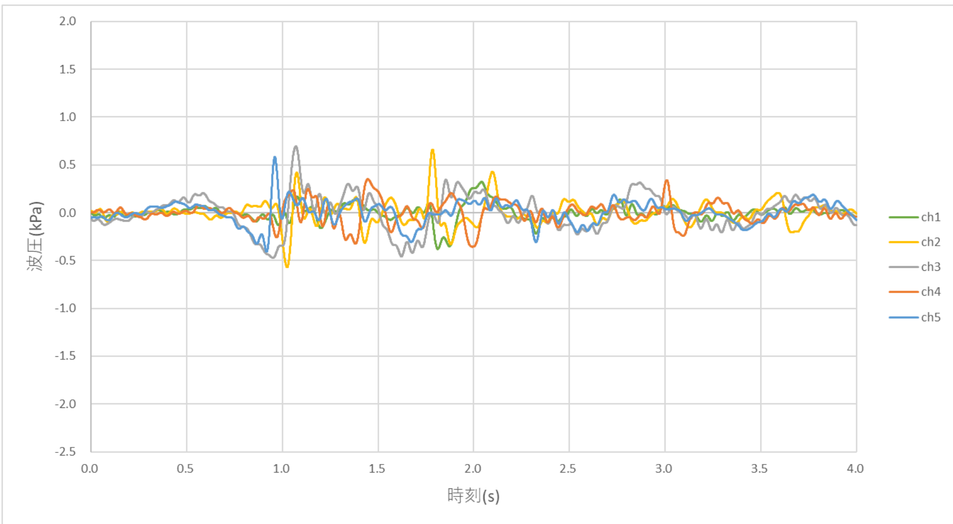


図 A-29 時刻歴波圧 （模型(f)、一回目）

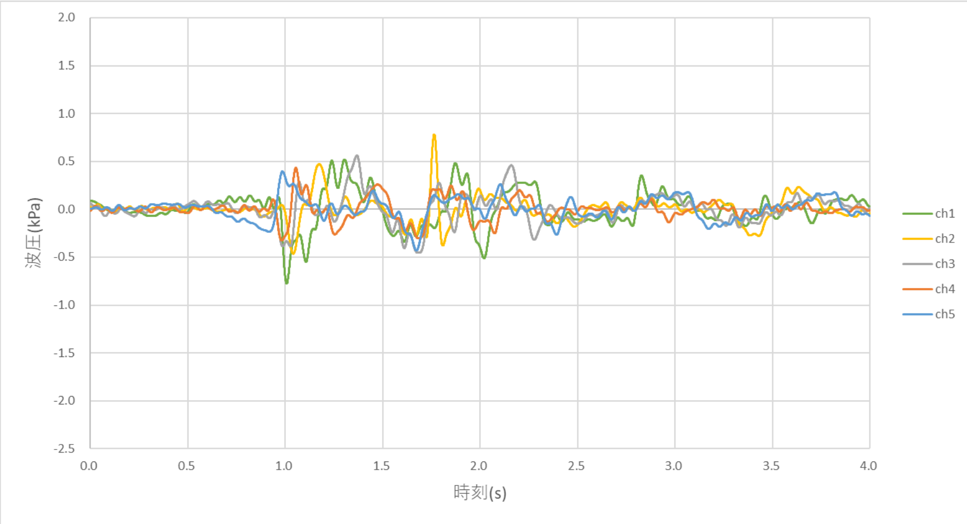


図 A-30 時刻歴波圧（模型(f)、二回目）

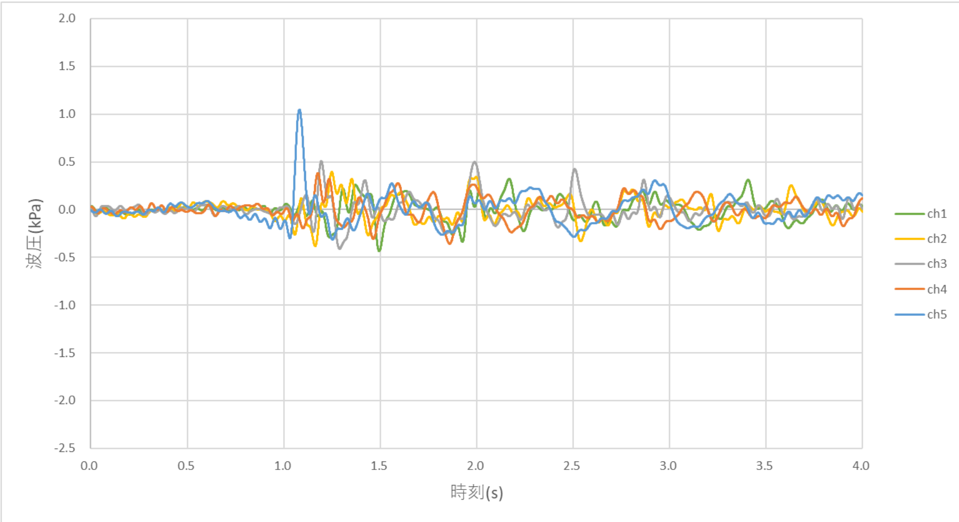


図 A-31 時刻歴波圧（模型(f)、三回目）

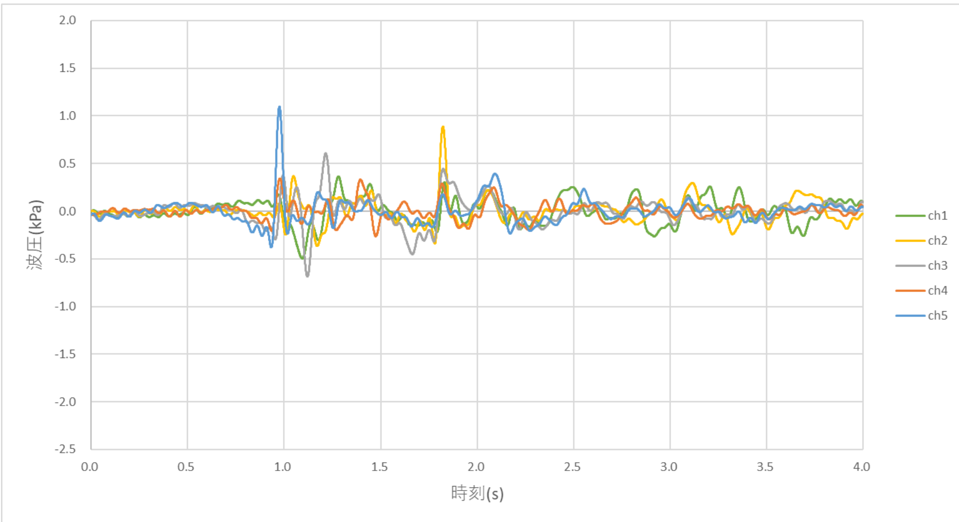


図 A-32 時刻歴波圧（模型(f)、四回目）

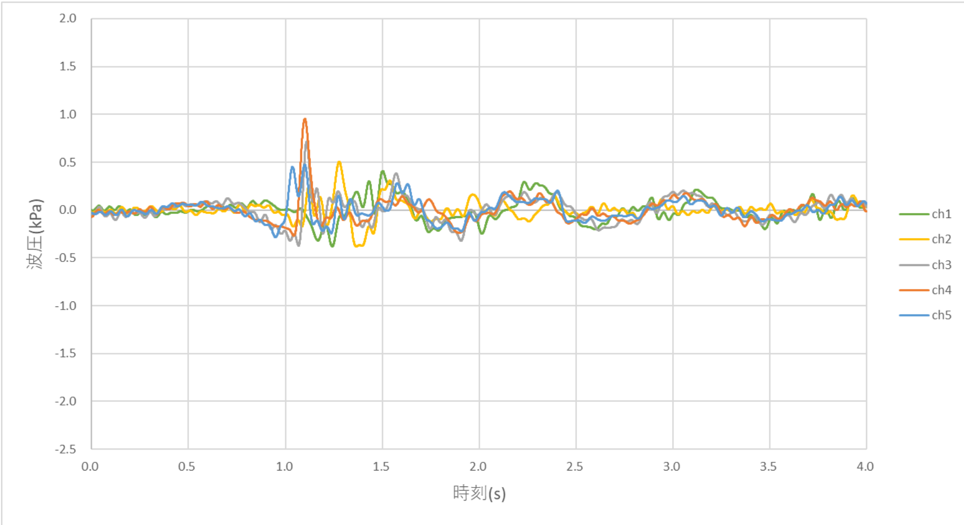


図 A-33 時刻歴波圧（模型(f)、五回目）

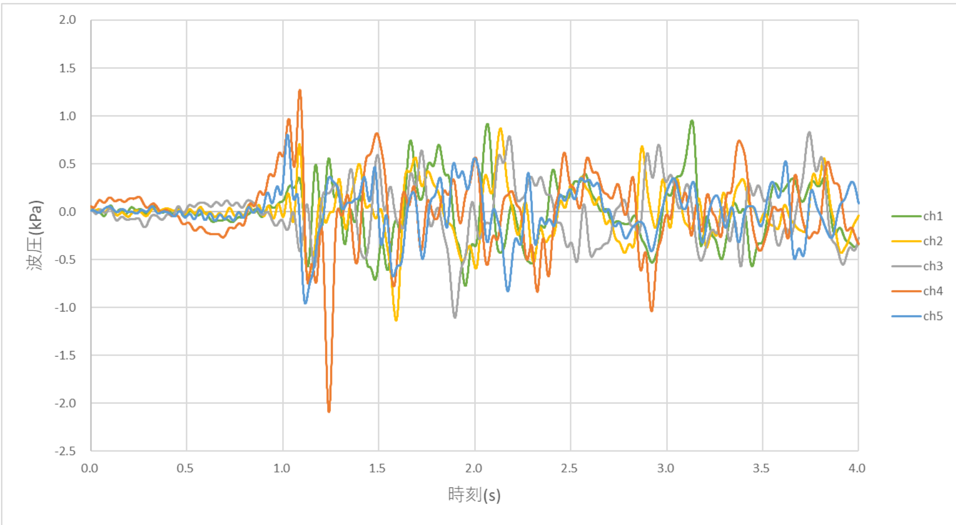


図 A-34 時刻歴波圧（模型(g)、一回目）

図 A-35 時刻歴波圧（模型(g)、二回目）

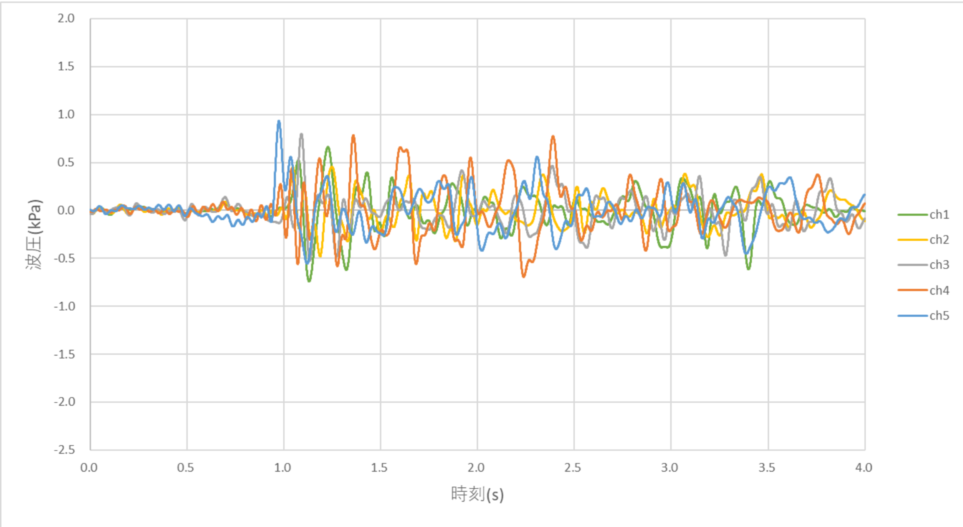


図 A-36 時刻歴波圧（模型(g)、三回目）

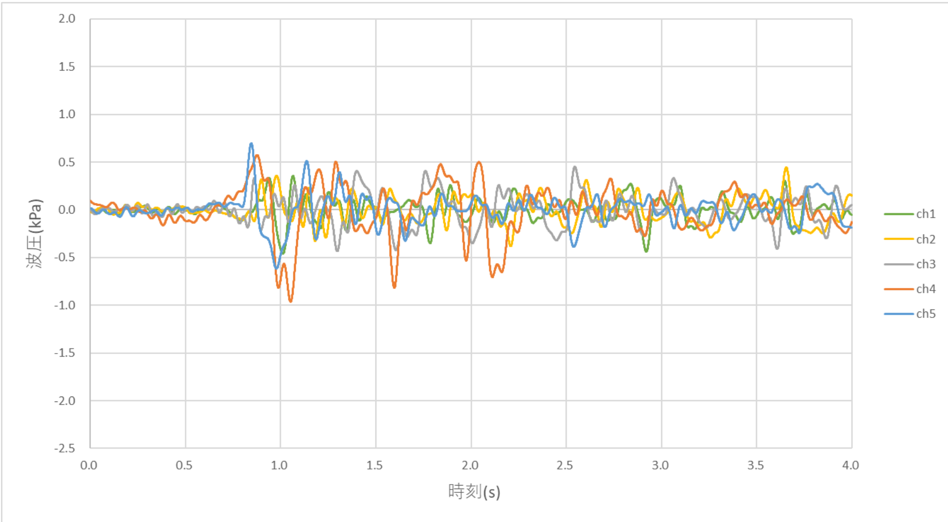


図 A-37 時刻歴波圧（模型(g)、四回目）

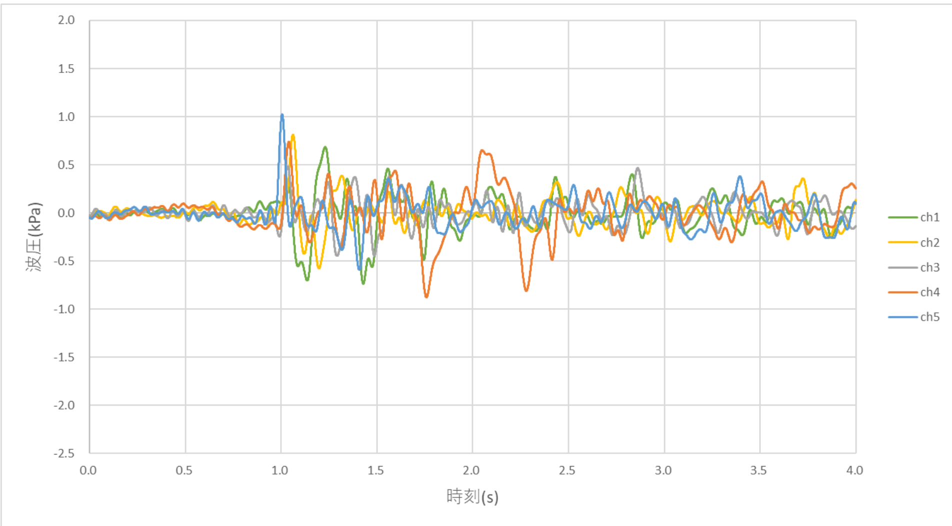


図 A-38 時刻歴波圧（模型(g)、五回目）

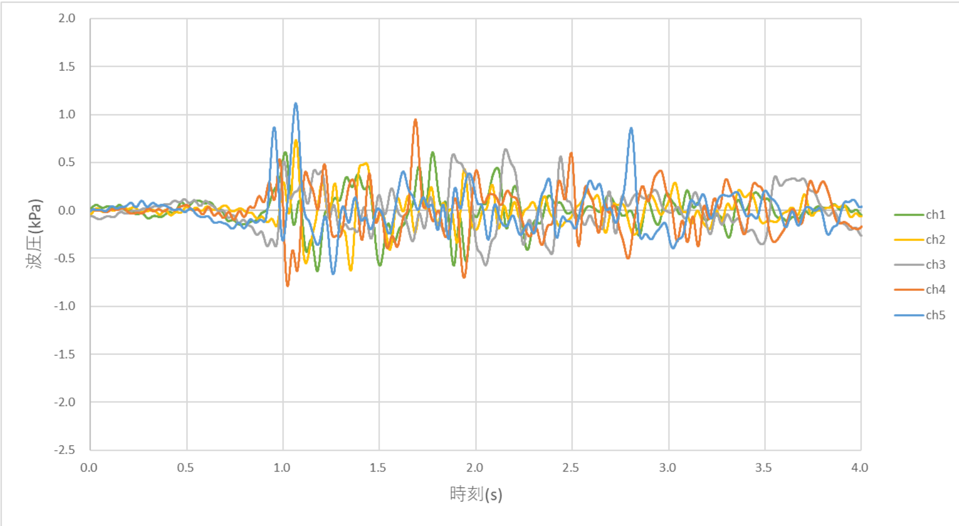


図 A-39 時刻歴波圧（模型(h)、一回目）

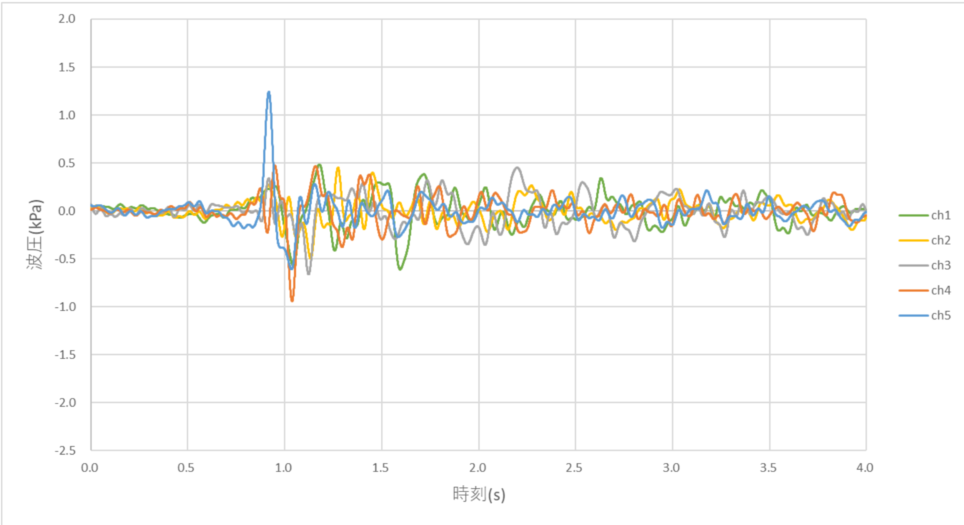


図 A-40 時刻歴波圧（模型(h)、二回目）

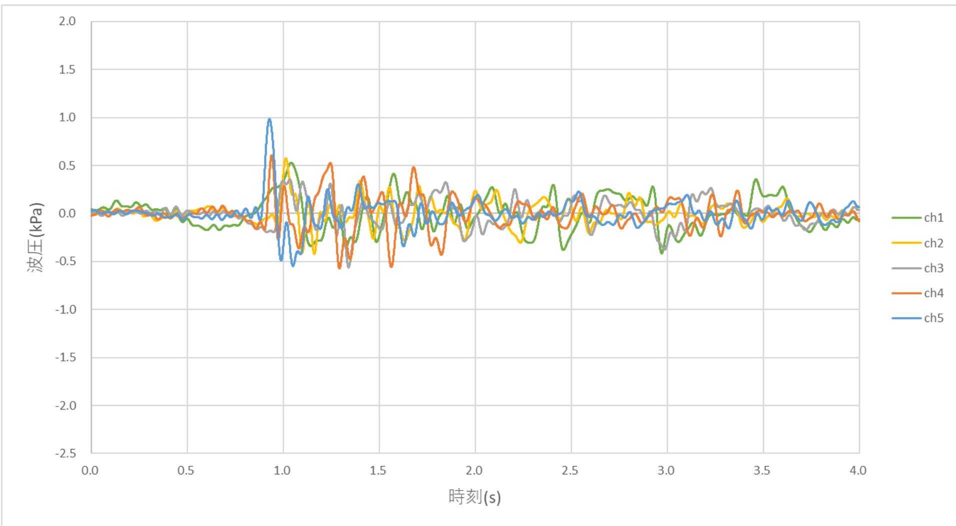


図 A-41 時刻歴波圧（模型(h)、三回目）

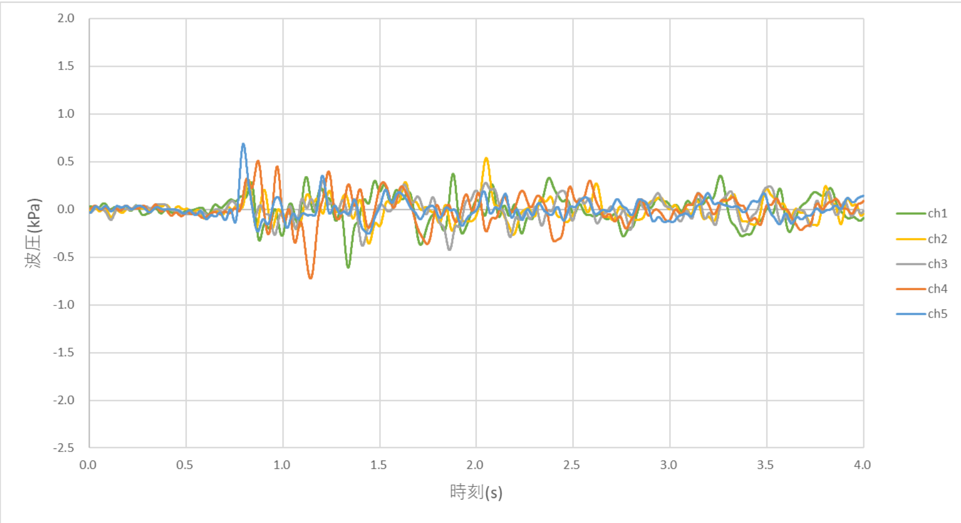


図 A-42 時刻歴波圧（模型(h)、四回目）

図 A-43 時刻歴波圧（模型(h)、五回目）

表 A-1 実験結果（模型(a)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.169	0.392	15	0.341
	CH2	0.188	0.436	30	0.682
	CH3	0.459	1.064	45	1.023
	CH4	0.417	0.967	60	1.364
	CH5	0.534	1.238	75	1.705
二回目	CH1	0.131	0.304	15	0.341
	CH2	0.117	0.271	30	0.682
	CH3	0.342	0.793	45	1.023
	CH4	0.505	1.171	60	1.364
	CH5	0.809	1.876	75	1.705
三回目	CH1	0.129	0.299	15	0.341
	CH2	0.174	0.404	30	0.682
	CH3	0.324	0.751	45	1.023
	CH4	0.748	1.735	60	1.364
	CH5	0.548	1.271	75	1.705
四回目	CH1	0.269	0.624	15	0.341
	CH2	0.375	0.870	30	0.682
	CH3	0.293	0.679	45	1.023
	CH4	0.260	0.603	60	1.364
	CH5	0.681	1.579	75	1.705
五回目	CH1	0.231	0.536	15	0.341
	CH2	0.430	0.997	30	0.682
	CH3	0.160	0.371	45	1.023
	CH4	0.345	0.800	60	1.364
	CH5	0.522	1.211	75	1.705
平均	CH1	0.186	0.431	15	0.341
	CH2	0.257	0.596	30	0.682
	CH3	0.316	0.732	45	1.023
	CH4	0.455	1.055	60	1.364
	CH5	0.619	1.435	75	1.705

表 A-2 実験結果（模型(b)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.308	0.714	15	0.341
	CH2	0.592	1.373	30	0.682
	CH3	0.498	1.155	45	1.023
	CH4	0.750	1.739	60	1.364
	CH5	1.132	2.625	75	1.705
二回目	CH1	0.381	0.884	15	0.341
	CH2	0.417	0.967	30	0.682
	CH3	0.271	0.628	45	1.023
	CH4	0.721	1.672	60	1.364
	CH5	0.484	1.122	75	1.705
三回目	CH1	0.300	0.696	15	0.341
	CH2	0.300	0.696	30	0.682
	CH3	0.800	1.855	45	1.023
	CH4	1.150	2.667	60	1.364
	CH5	1.062	2.463	75	1.705
四回目	CH1	0.234	0.543	15	0.341
	CH2	0.391	0.907	30	0.682
	CH3	0.298	0.691	45	1.023
	CH4	0.532	1.234	60	1.364
	CH5	0.438	1.016	75	1.705
五回目	CH1	0.174	0.404	15	0.341
	CH2	0.261	0.605	30	0.682
	CH3	0.199	0.462	45	1.023
	CH4	0.497	1.153	60	1.364
	CH5	0.697	1.616	75	1.705
平均	CH1	0.279	0.648	15	0.341
	CH2	0.392	0.910	30	0.682
	CH3	0.413	0.958	45	1.023
	CH4	0.730	1.693	60	1.364
	CH5	0.763	1.769	75	1.705

表 A-3 実験結果（模型(c)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.255	0.591	15	0.341
	CH2	0.198	0.459	30	0.682
	CH3	0.126	0.292	45	1.023
	CH4	0.134	0.311	60	1.364
	CH5	0.979	2.270	75	1.705
二回目	CH1	0.161	0.373	15	0.341
	CH2	0.209	0.485	30	0.682
	CH3	0.443	1.027	45	1.023
	CH4	0.316	0.733	60	1.364
	CH5	0.995	2.308	75	1.705
三回目	0.182	0.182	0.422	15	0.341
	0.062	0.062	0.144	30	0.682
	0.053	0.053	0.123	45	1.023
	0.267	0.267	0.619	60	1.364
	0.926	0.926	2.147	75	1.705
四回目	CH1	0.083	0.192	15	0.341
	CH2	0.170	0.394	30	0.682
	CH3	0.144	0.334	45	1.023
	CH4	0.054	0.125	60	1.364
	CH5	0.486	1.127	75	1.705
五回目	CH1	0.134	0.311	15	0.341
	CH2	0.141	0.327	30	0.682
	CH3	0.064	0.148	45	1.023
	CH4	0.161	0.373	60	1.364
	CH5	0.992	2.301	75	1.705
平均	CH1	0.163	0.378	15	0.341
	CH2	0.156	0.362	30	0.682
	CH3	0.166	0.385	45	1.023
	CH4	0.186	0.432	60	1.364
	CH5	0.876	2.031	75	1.705

表 A-4 実験結果（模型(d)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.172	0.399	15	0.341
	CH2	0.212	0.492	30	0.682
	CH3	0.280	0.649	45	1.023
	CH4	0.466	1.081	60	1.364
	CH5	0.501	1.162	75	1.705
二回目	CH1	0.109	0.253	15	0.341
	CH2	0.132	0.306	30	0.682
	CH3	0.289	0.670	45	1.023
	CH4	0.360	0.835	60	1.364
	CH5	0.467	1.083	75	1.705
三回目	CH1	0.199	0.462	15	0.341
	CH2	0.310	0.719	30	0.682
	CH3	0.486	1.127	45	1.023
	CH4	0.504	1.169	60	1.364
	CH5	0.719	1.667	75	1.705
四回目	CH1	0.212	0.492	15	0.341
	CH2	0.229	0.531	30	0.682
	CH3	0.346	0.802	45	1.023
	CH4	0.335	0.777	60	1.364
	CH5	0.270	0.626	75	1.705
五回目	CH1	0.218	0.506	15	0.341
	CH2	0.284	0.659	30	0.682
	CH3	0.524	1.215	45	1.023
	CH4	0.897	2.080	60	1.364
	CH5	1.135	2.632	75	1.705
平均	CH1	0.182	0.422	15	0.341
	CH2	0.233	0.541	30	0.682
	CH3	0.385	0.893	45	1.023
	CH4	0.512	1.188	60	1.364
	CH5	0.618	1.434	75	1.705

表 A-5 実験結果（模型(e)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.863	2.001	15	0.341
	CH2	1.165	2.702	30	0.682
	CH3	1.011	2.345	45	1.023
	CH4	0.510	1.183	60	1.364
	CH5	1.612	3.738	75	1.705
二回目	CH1	0.505	1.171	15	0.341
	CH2	0.181	0.420	30	0.682
	CH3	0.539	1.250	45	1.023
	CH4	0.808	1.874	60	1.364
	CH5	1.616	3.748	75	1.705
三回目	CH1	0.305	0.707	15	0.341
	CH2	0.501	1.162	30	0.682
	CH3	0.499	1.157	45	1.023
	CH4	0.503	1.167	60	1.364
	CH5	1.246	2.890	75	1.705
四回目	CH1	0.140	0.325	15	0.341
	CH2	0.358	0.830	30	0.682
	CH3	0.729	1.691	45	1.023
	CH4	0.763	1.769	60	1.364
	CH5	0.921	2.136	75	1.705
五回目	CH1	0.168	0.390	15	0.341
	CH2	0.084	0.195	30	0.682
	CH3	0.282	0.654	45	1.023
	CH4	0.279	0.647	60	1.364
	CH5	0.876	2.032	75	1.705
六回目	CH1	0.303	0.703	15	0.341
	CH2	0.259	0.601	30	0.682
	CH3	0.345	0.800	45	1.023
	CH4	0.625	1.449	60	1.364
	CH5	0.546	1.266	75	1.705
七回目	CH1	0.365	0.846	15	0.341
	CH2	0.383	0.888	30	0.682
	CH3	0.504	1.169	45	1.023
	CH4	0.433	1.004	60	1.364
	CH5	1.129	2.618	75	1.705
八回目	CH1	0.511	1.185	15	0.341
	CH2	0.664	1.540	30	0.682
	CH3	0.449	1.041	45	1.023
	CH4	0.639	1.482	60	1.364
	CH5	1.158	2.686	75	1.705
平均	CH1	0.328	0.761	15	0.341
	CH2	0.347	0.805	30	0.682
	CH3	0.478	1.109	45	1.023
	CH4	0.579	1.342	60	1.364
	CH5	1.070	2.482	75	1.705

表 A-6 実験結果（模型(f)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.171	0.396	15	0.341
	CH2	0.423	0.981	30	0.682
	CH3	0.695	1.611	45	1.023
	CH4	0.237	0.549	60	1.364
	CH5	0.582	1.350	75	1.705
二回目	CH1	0.506	1.174	15	0.341
	CH2	0.471	1.093	30	0.682
	CH3	0.287	0.667	45	1.023
	CH4	0.432	1.003	60	1.364
	CH5	0.394	0.915	75	1.705
三回目	CH1	0.180	0.418	15	0.341
	CH2	0.392	0.910	30	0.682
	CH3	0.507	1.175	45	1.023
	CH4	0.383	0.889	60	1.364
	CH5	1.050	2.434	75	1.705
四回目	CH1	0.176	0.409	15	0.341
	CH2	0.369	0.856	30	0.682
	CH3	0.376	0.871	45	1.023
	CH4	0.343	0.794	60	1.364
	CH5	1.100	2.552	75	1.705
五回目	CH1	0.192	0.445	15	0.341
	CH2	0.253	0.587	30	0.682
	CH3	0.715	1.657	45	1.023
	CH4	0.954	2.213	60	1.364
	CH5	0.474	1.100	75	1.705
平均	CH1	0.245	0.568	15	0.341
	CH2	0.382	0.885	30	0.682
	CH3	0.516	1.196	45	1.023
	CH4	0.470	1.090	60	1.364
	CH5	0.720	1.670	75	1.705

表 A-7 実験結果（模型(g)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.354	0.822	15	0.341
	CH2	0.703	1.630	30	0.682
	CH3	0.120	0.278	45	1.023
	CH4	1.272	2.950	60	1.364
	CH5	0.805	1.867	75	1.705
二回目	CH1	0.439	1.018	15	0.341
	CH2	0.536	1.243	30	0.682
	CH3	0.773	1.793	45	1.023
	CH4	1.268	2.942	60	1.364
	CH5	1.065	2.470	75	1.705
三回目	CH1	0.525	1.218	15	0.341
	CH2	0.454	1.054	30	0.682
	CH3	0.802	1.860	45	1.023
	CH4	0.433	1.004	60	1.364
	CH5	0.934	2.165	75	1.705
四回目	CH1	0.336	0.778	15	0.341
	CH2	0.356	0.825	30	0.682
	CH3	0.331	0.768	45	1.023
	CH4	0.574	1.332	60	1.364
	CH5	0.697	1.617	75	1.705
五回目	CH1	0.271	0.628	15	0.341
	CH2	0.814	1.888	30	0.682
	CH3	0.484	1.122	45	1.023
	CH4	0.736	1.707	60	1.364
	CH5	1.025	2.378	75	1.705
平均	CH1	0.385	0.893	15	0.341
	CH2	0.573	1.328	30	0.682
	CH3	0.502	1.164	45	1.023
	CH4	0.857	1.987	60	1.364
	CH5	0.905	2.099	75	1.705

表 A-8 実験結果（模型(h)）

		最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
一回目	CH1	0.608	1.411	15	0.341
	CH2	0.734	1.703	30	0.682
	CH3	0.512	1.187	45	1.023
	CH4	0.530	1.230	60	1.364
	CH5	1.116	2.587	75	1.705
二回目	CH1	0.257	0.596	15	0.341
	CH2	0.273	0.632	30	0.682
	CH3	0.340	0.789	45	1.023
	CH4	0.476	1.104	60	1.364
	CH5	1.245	2.887	75	1.705
三回目	CH1	0.530	1.228	15	0.341
	CH2	0.576	1.335	30	0.682
	CH3	0.353	0.819	45	1.023
	CH4	0.607	1.407	60	1.364
	CH5	0.984	2.283	75	1.705
四回目	CH1	0.285	0.661	15	0.341
	CH2	0.308	0.715	30	0.682
	CH3	0.309	0.717	45	1.023
	CH4	0.509	1.179	60	1.364
	CH5	0.686	1.592	75	1.705
五回目	CH1	0.328	0.760	15	0.341
	CH2	0.219	0.508	30	0.682
	CH3	0.210	0.487	45	1.023
	CH4	0.516	1.197	60	1.364
	CH5	0.414	0.960	75	1.705
平均	CH1	0.402	0.931	15	0.341
	CH2	0.422	0.979	30	0.682
	CH3	0.345	0.800	45	1.023
	CH4	0.528	1.224	60	1.364
	CH5	0.889	2.062	75	1.705

付録 B 解析結果

解析モデル①について、図 B-1 に時刻歴波圧を示す。表 B-1 に解析結果を示す。表には、最大波圧、無次元化波圧、計測高さ、無次元化浸水深を示す。

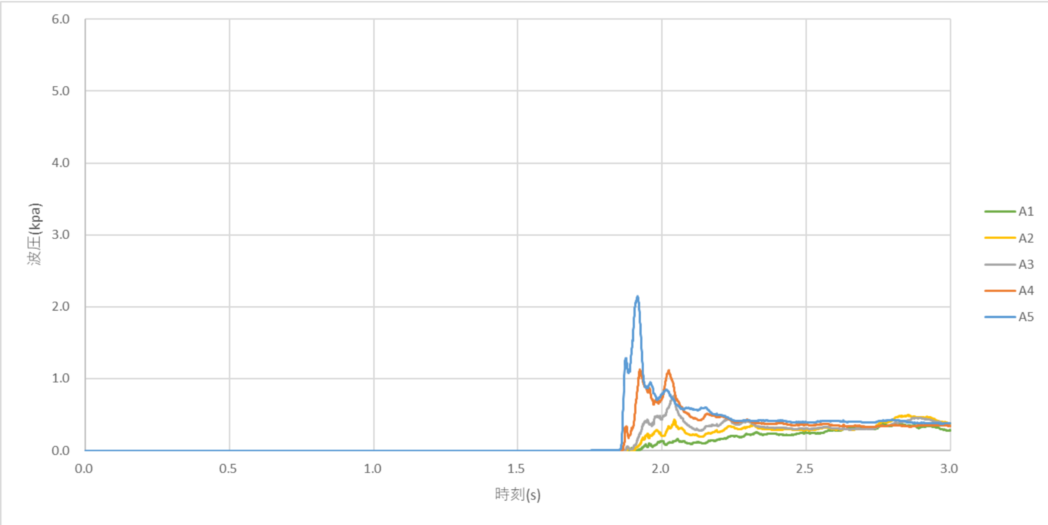


図 B-1-1 時刻歴波圧（模型(a)、A 列）

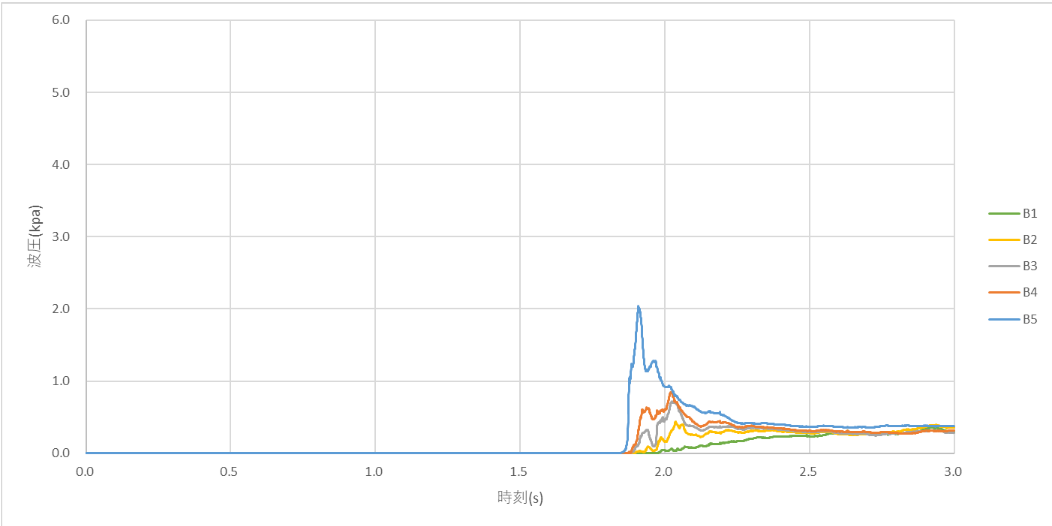


図 B-1-2 時刻歴波圧（模型(a)、B 列）

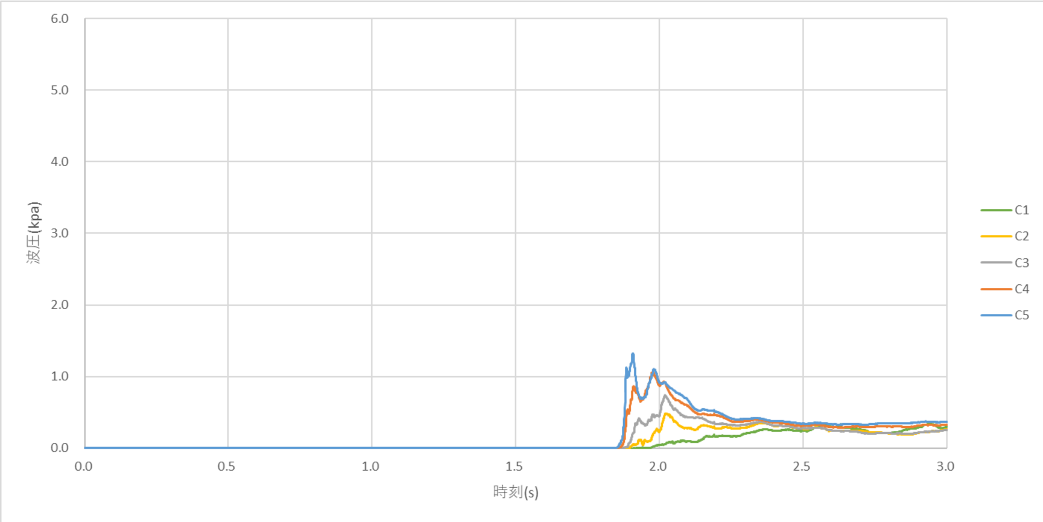


図 B-1-3 時刻歴波圧（模型(a)、C 列）

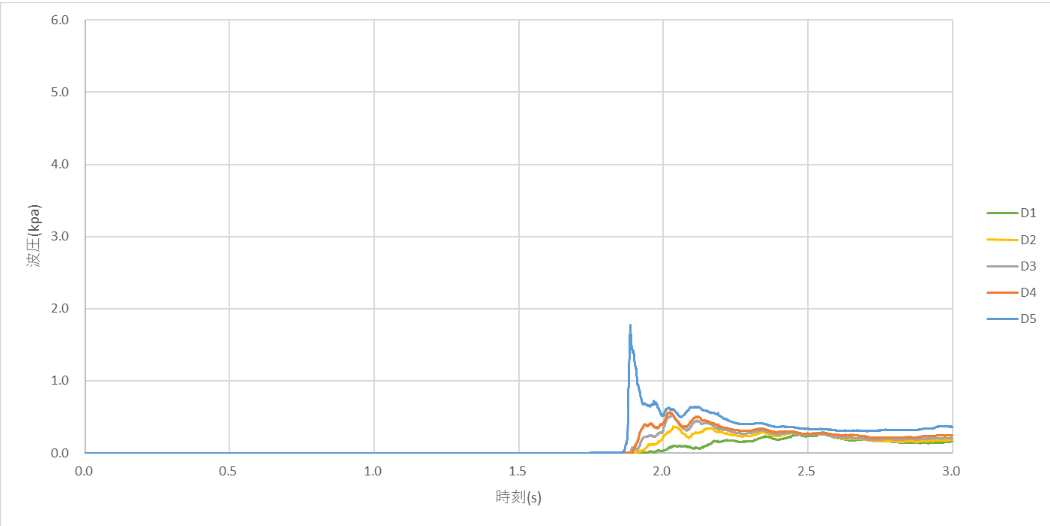


図 B-1-4 時刻歴波圧（模型(a)、D 列）

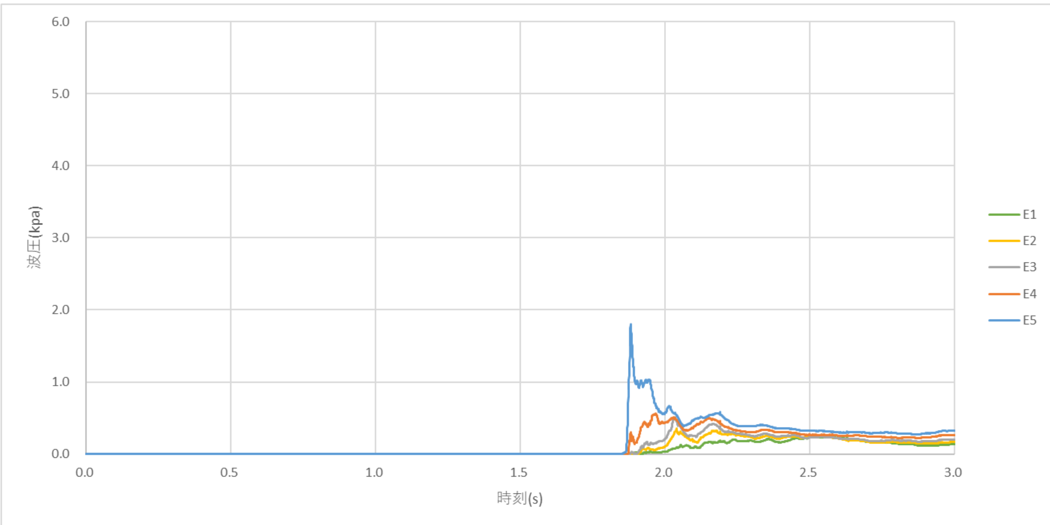


図 B-1-5 時刻歴波圧（模型(a)、E 列）

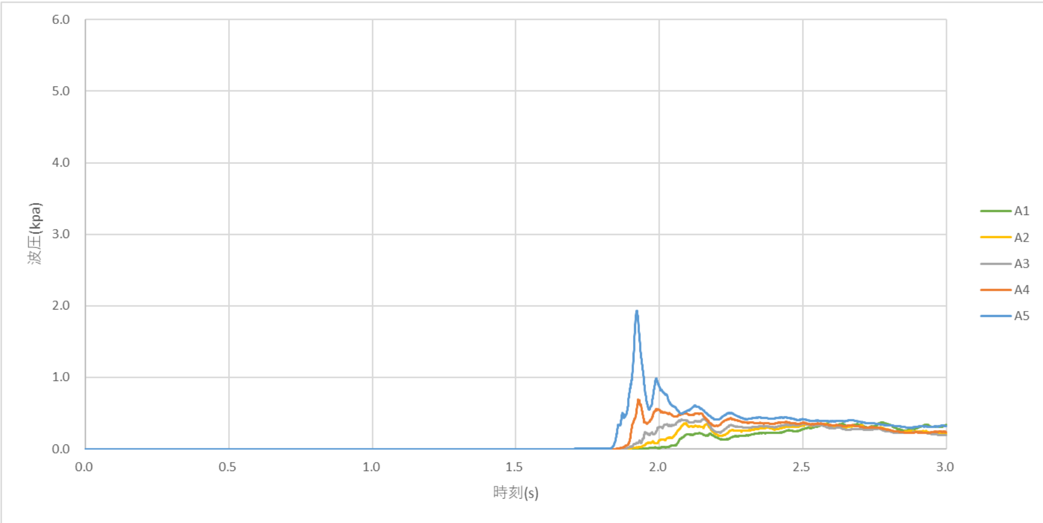


図 B-1-6 時刻歴波圧（模型(b)、A 列）

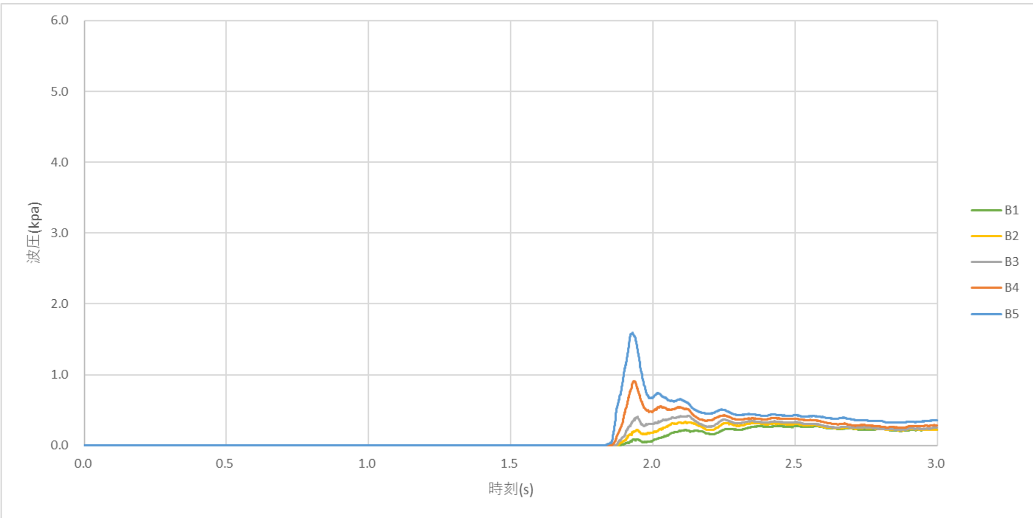


図 B-1-7 時刻歴波圧（模型(b)、B 列）

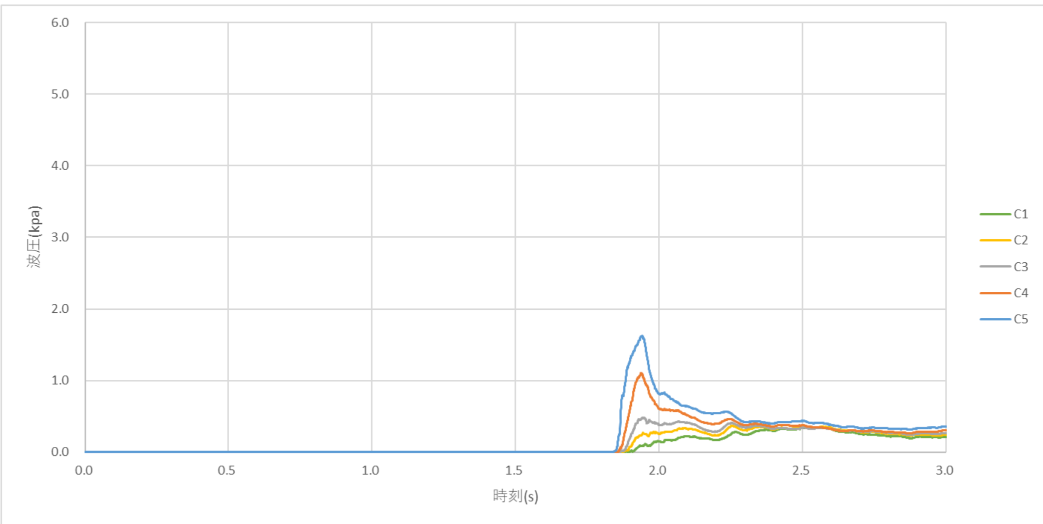


図 B-1-8 時刻歴波圧（模型(b)、C 列）

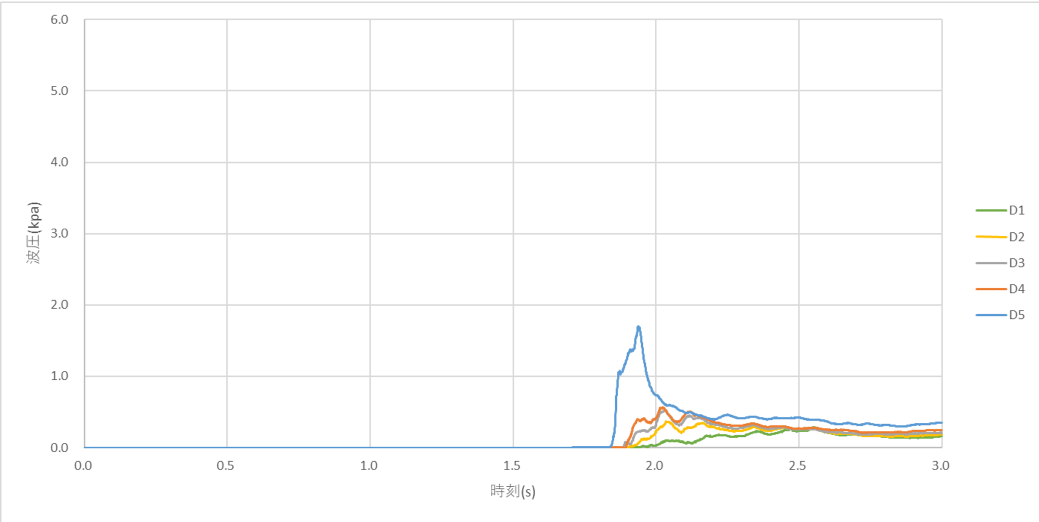


図 B-1-9 時刻歴波圧（模型(b)、D 列）

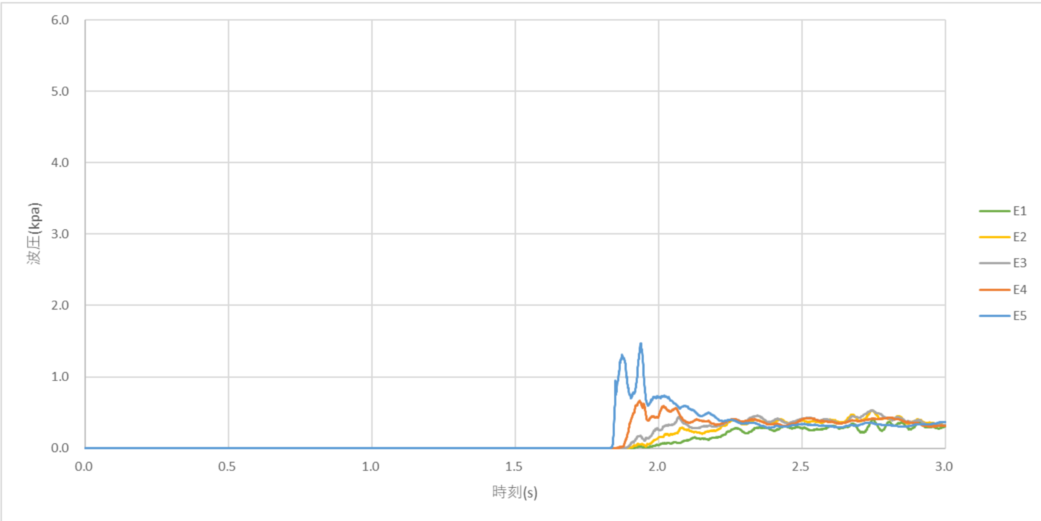


図 B-1-10 時刻歴波圧（模型(b)、E 列）

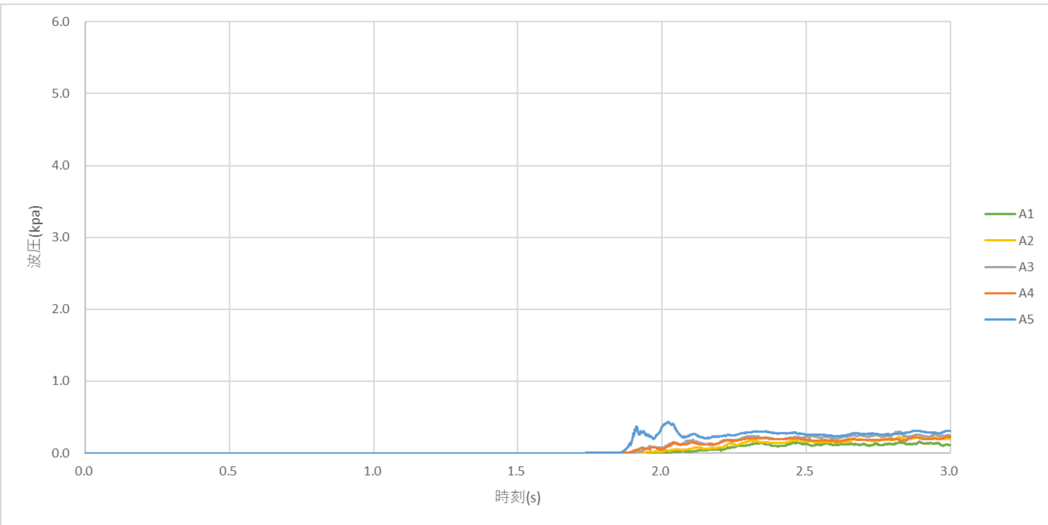


図 B-1-11 時刻歴波圧（模型(c)、A 列）

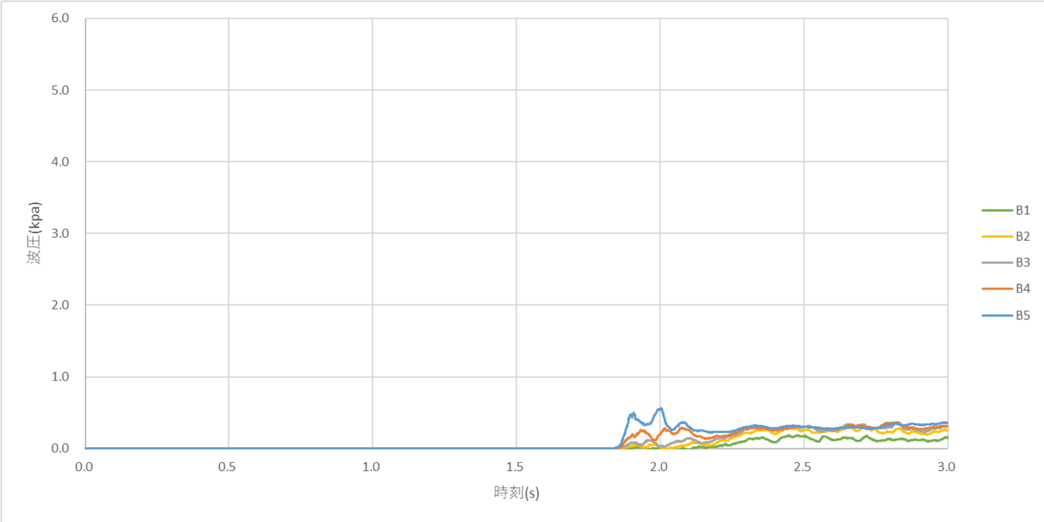


図 B-1-12 時刻歴波圧 (模型(c)、B 列)

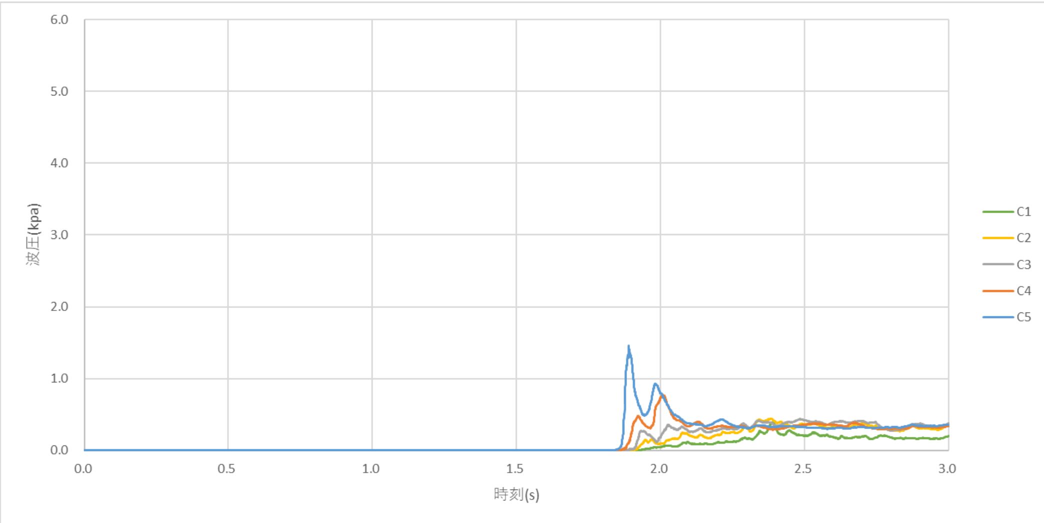


図 B-1-13 時刻歴波圧 (模型(c)、C 列)

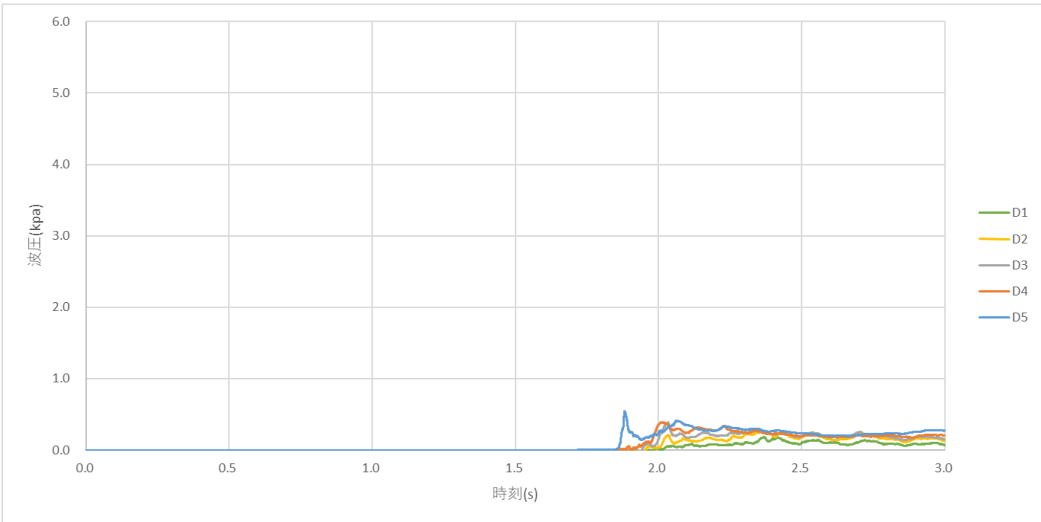


図 B-1-14 時刻歴波圧 (模型(c)、D 列)

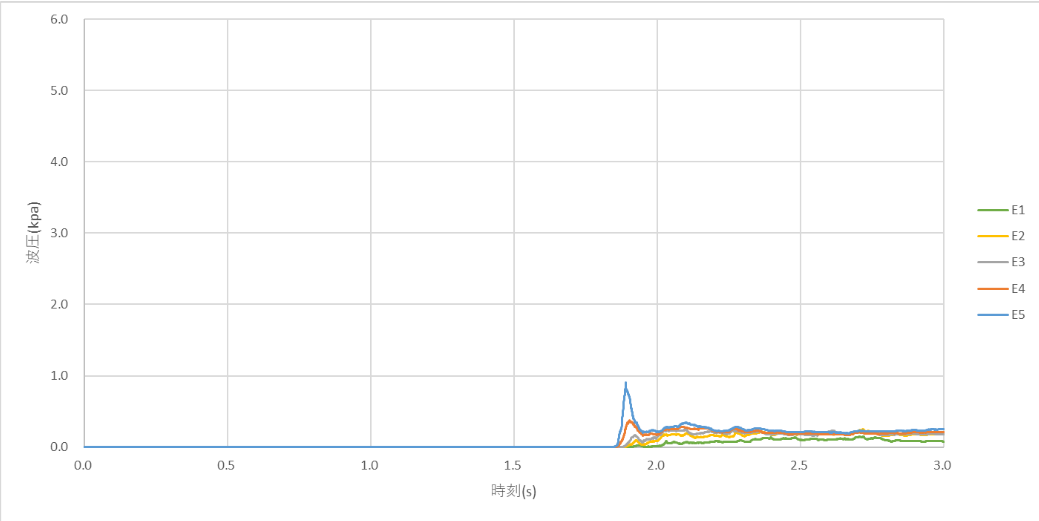


図 B-1-15 時刻歴波圧（模型(c)、E 列）

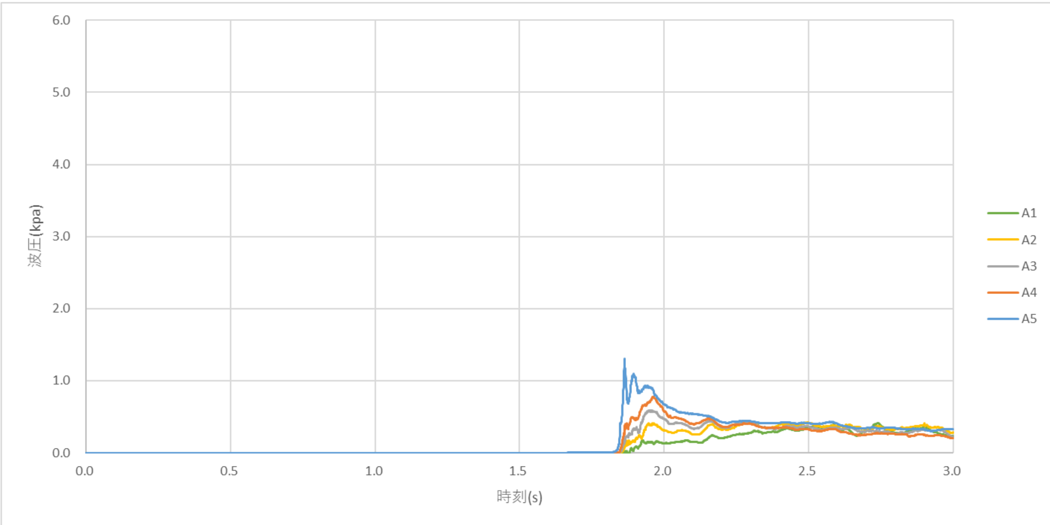


図 B-1-16 時刻歴波圧（模型(d)、A 列）

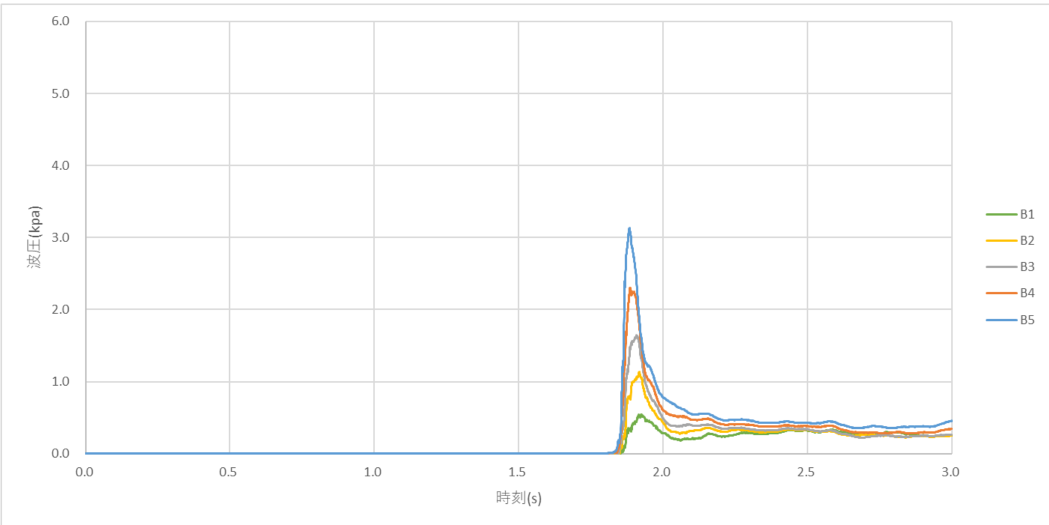


図 B-1-17 時刻歴波圧（模型(d)、B 列）

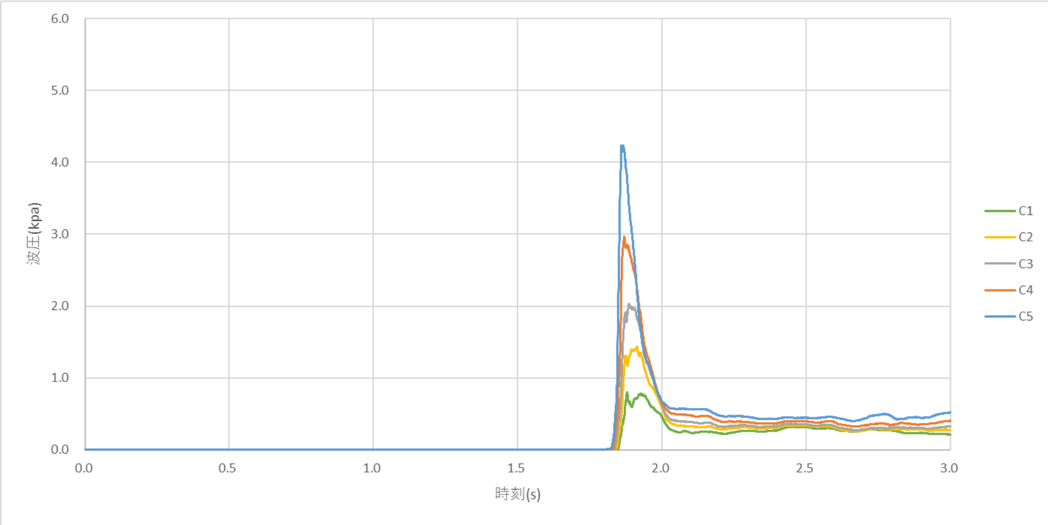


図 B-1-18 時刻歴波圧（模型(d)、C 列）

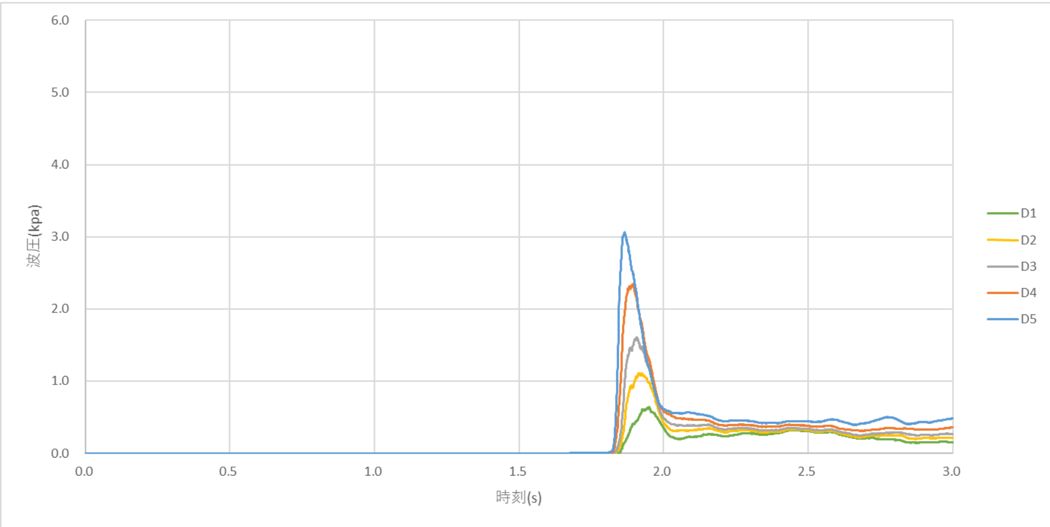


図 B-1-19 時刻歴波圧（模型(d)、D 列）

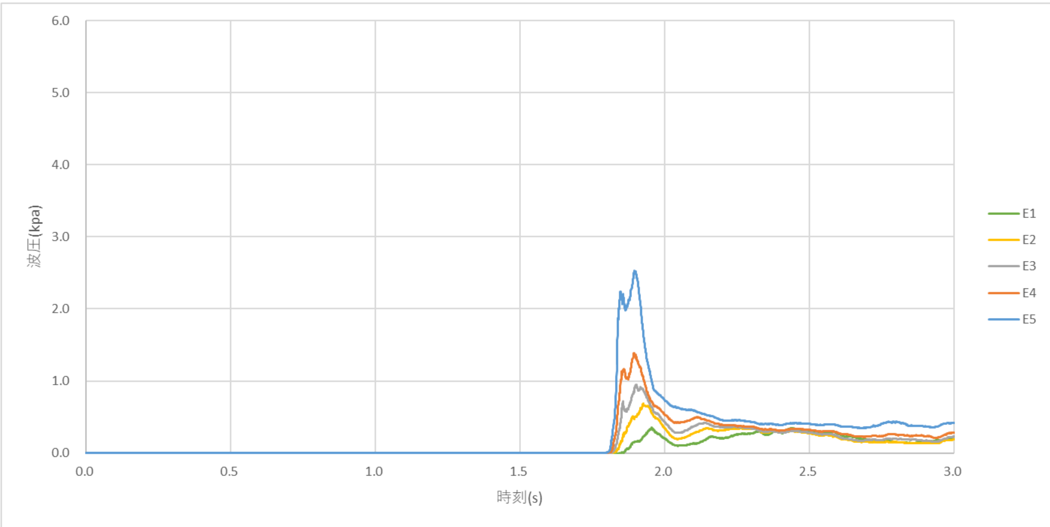


図 B-1-20 時刻歴波圧（模型(d)、E 列）

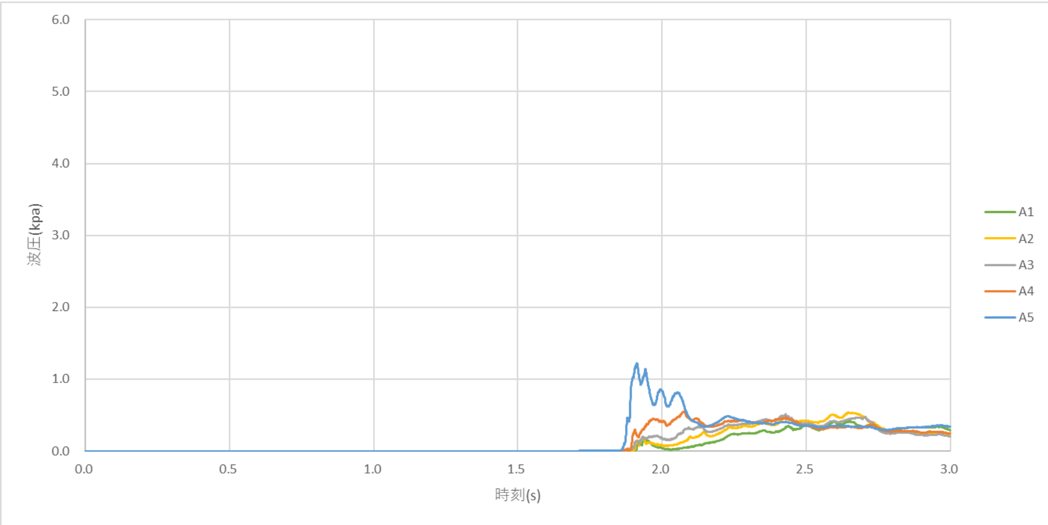


図 B-1-21 時刻歴波圧（模型(e)、A 列）

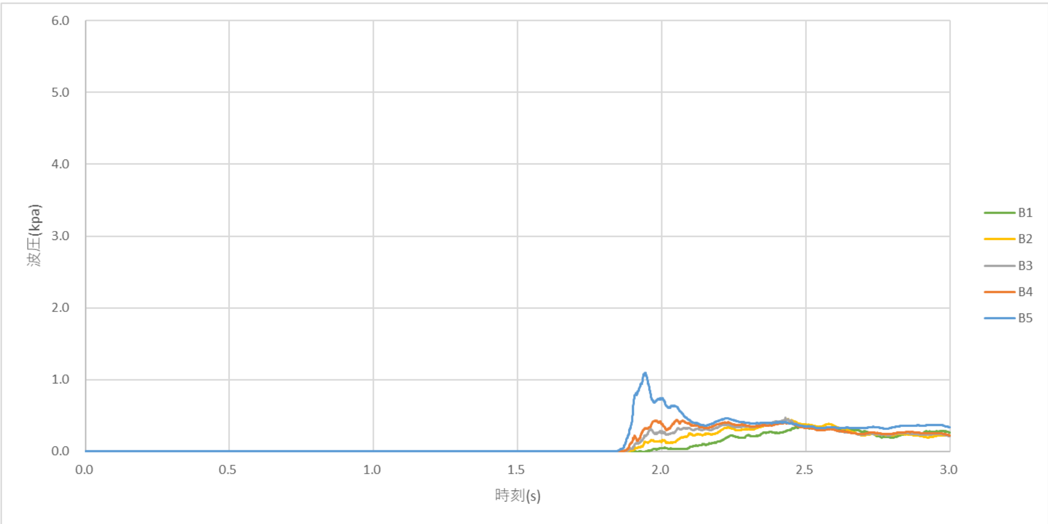


図 B-1-22 時刻歴波圧（模型(e)、B 列）

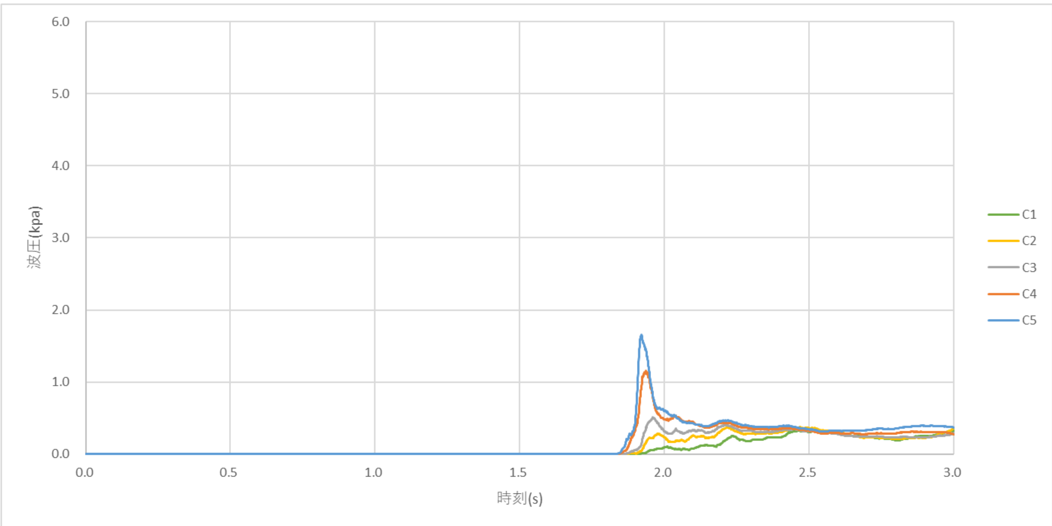


図 B-1-23 時刻歴波圧（模型(e)、C 列）

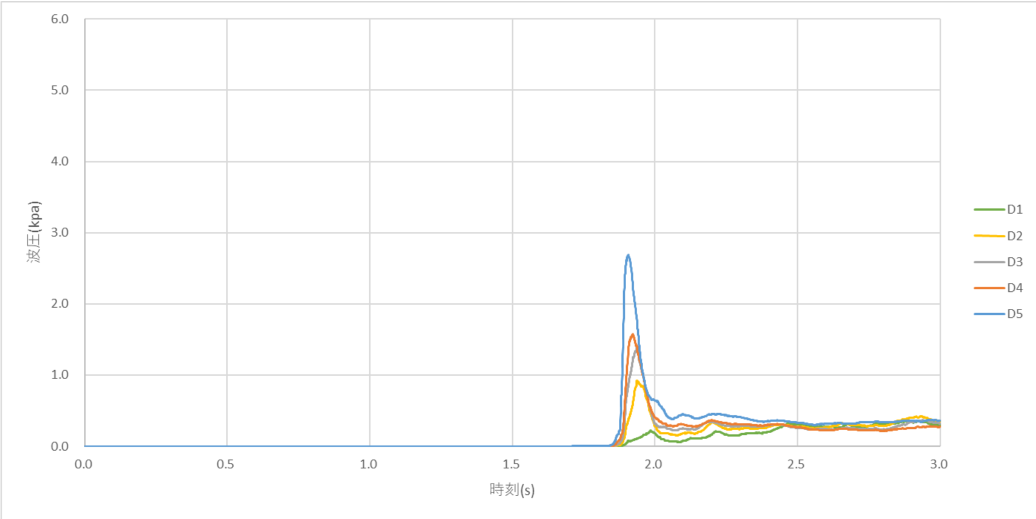


図 B-1-24 時刻歴波圧（模型(e)、D 列）

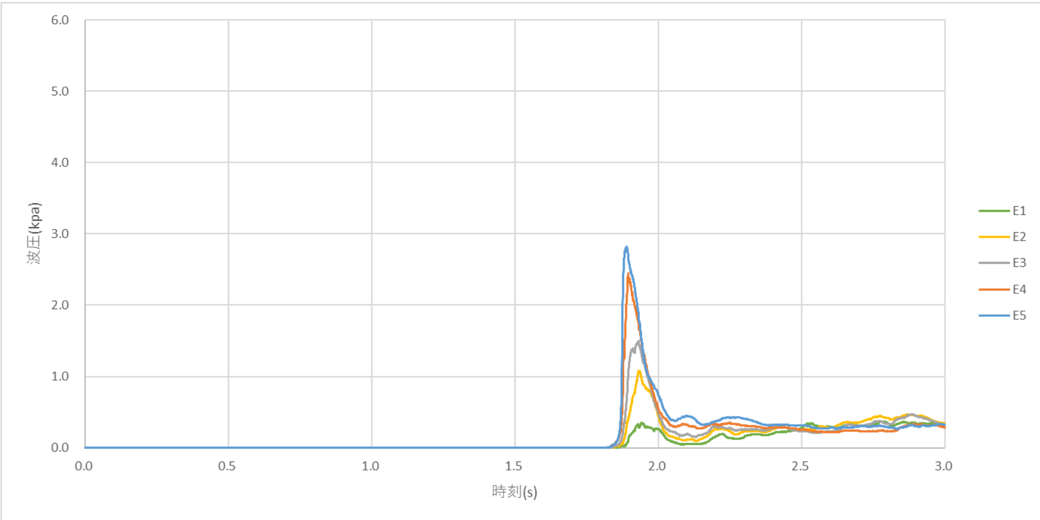


図 B-1-25 時刻歴波圧（模型(e)、E 列）

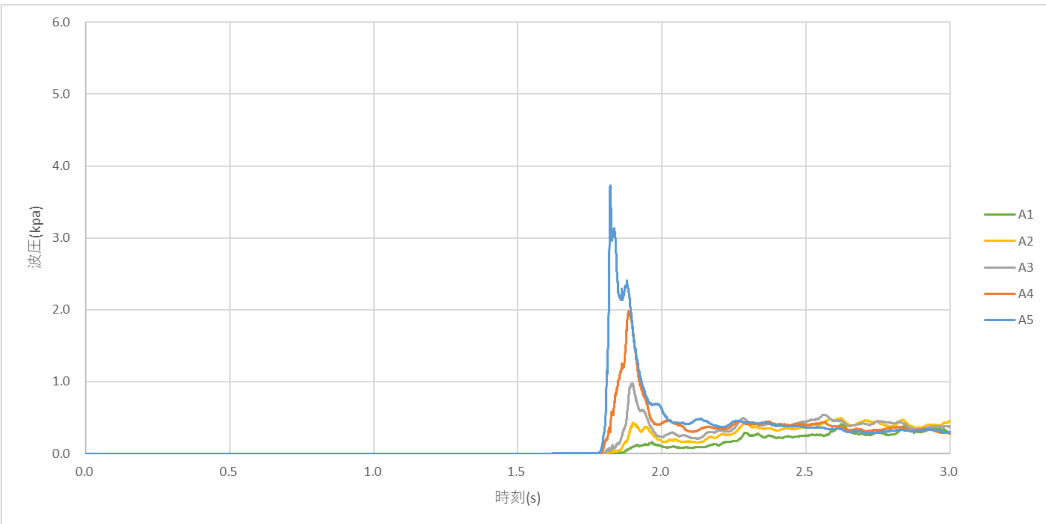


図 B-1-26 時刻歴波圧（模型(f)、A 列）

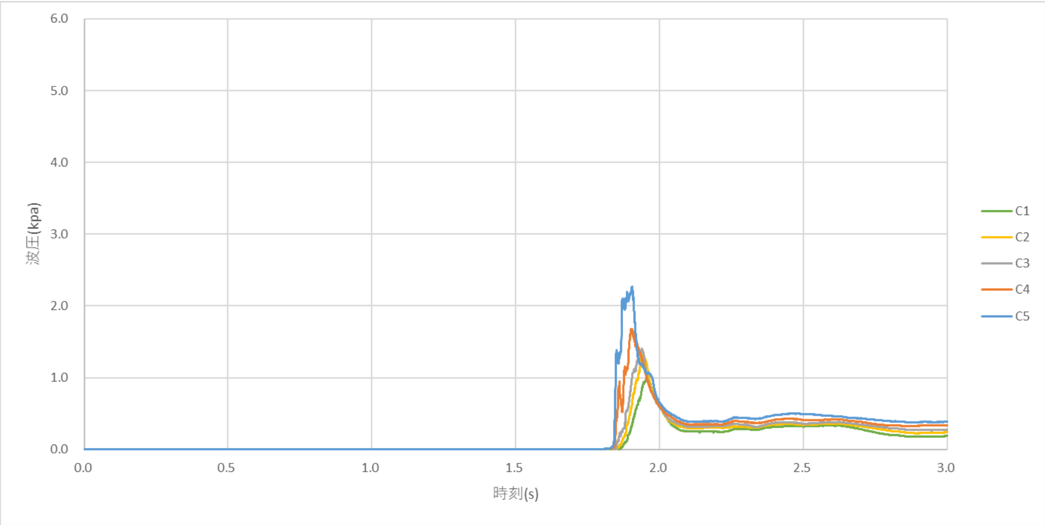


図 B-1-27 時刻歴波圧（模型(f)、C 列）

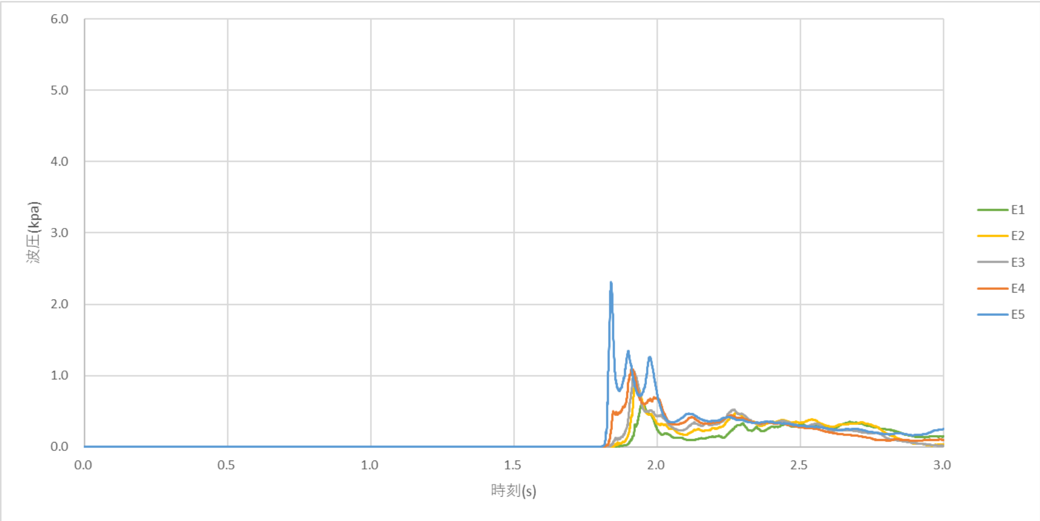


図 B-1-28 時刻歴波圧（模型(f)、E 列）

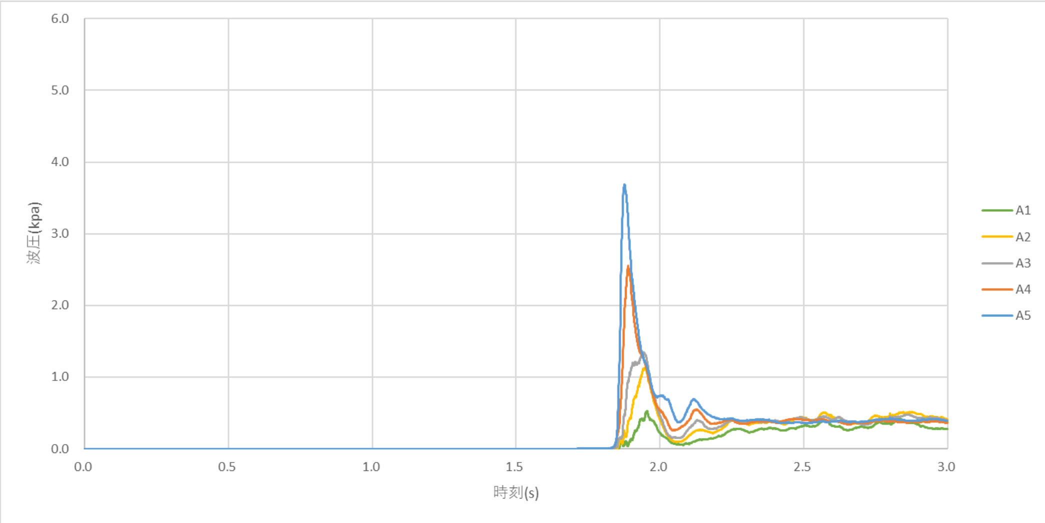


図 B-1-29 時刻歴波圧（模型(g)、A 列）

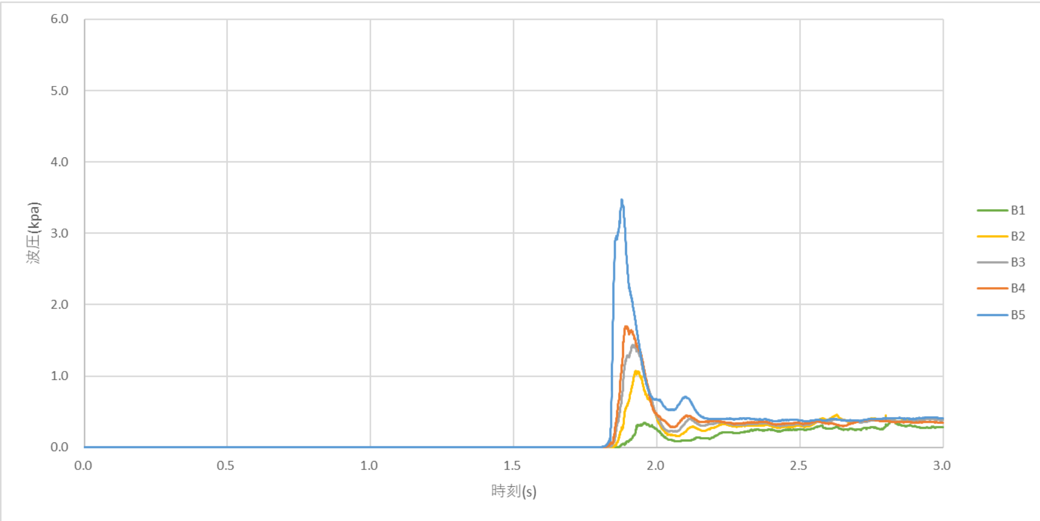


図 B-1-30 時刻歴波圧（模型(g)、B 列）

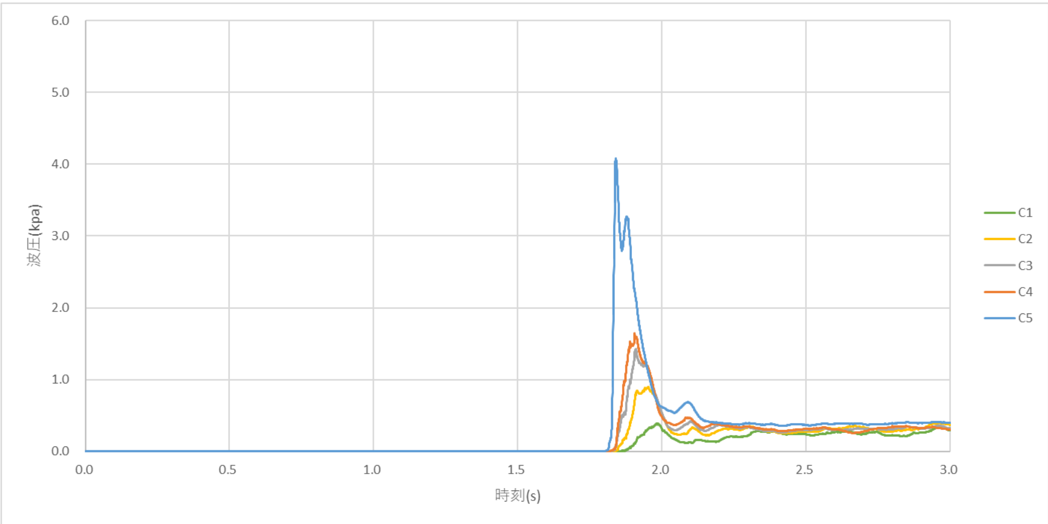


図 B-1-31 時刻歴波圧（模型(g)、C 列）

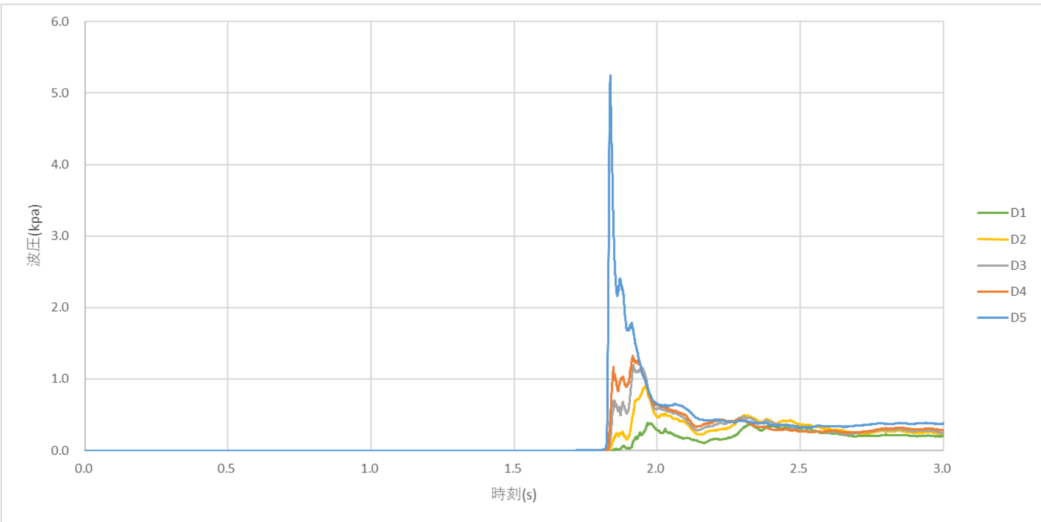


図 B-1-32 時刻歴波圧（模型(g)、D 列）

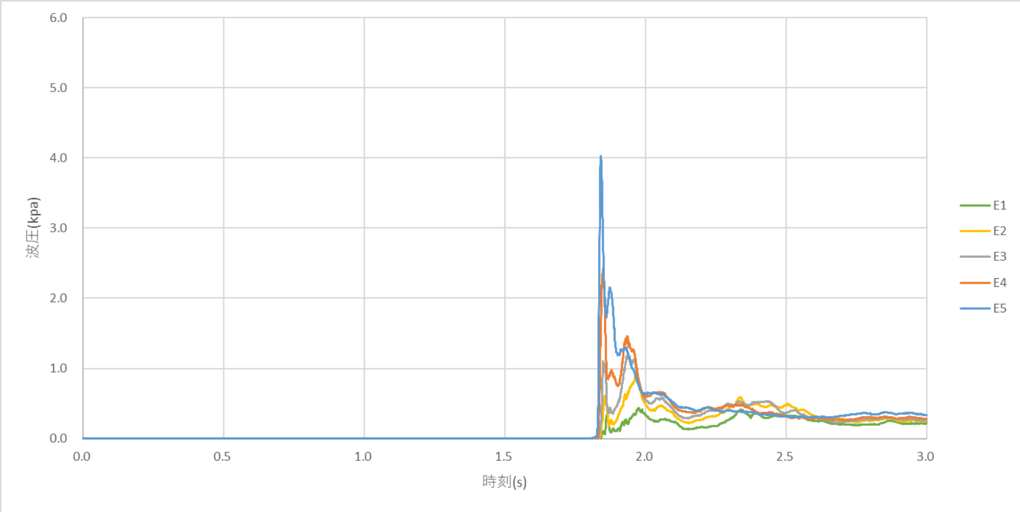


図 B-1-33 時刻歴波圧 （模型(g)、E 列）

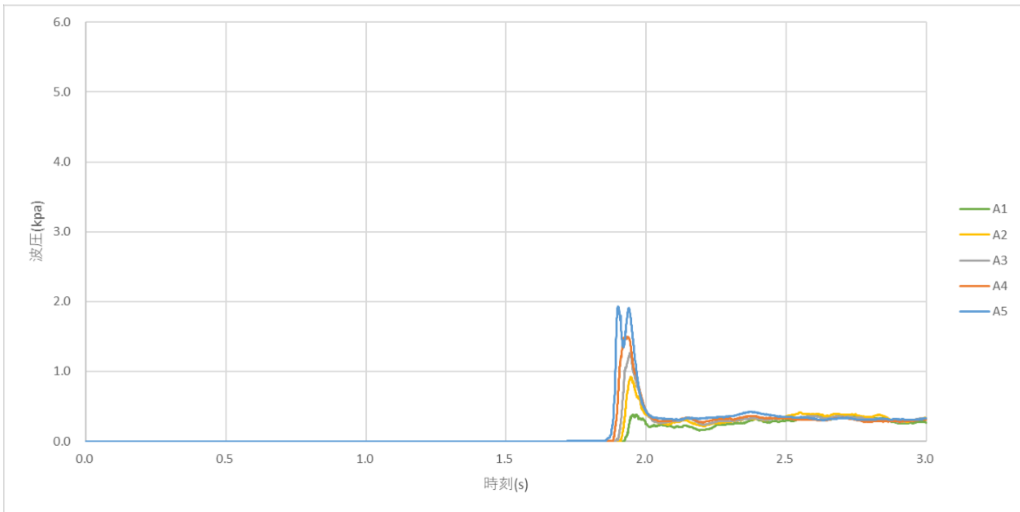


図 B-1-34 時刻歴波圧 （模型(h)、A 列）

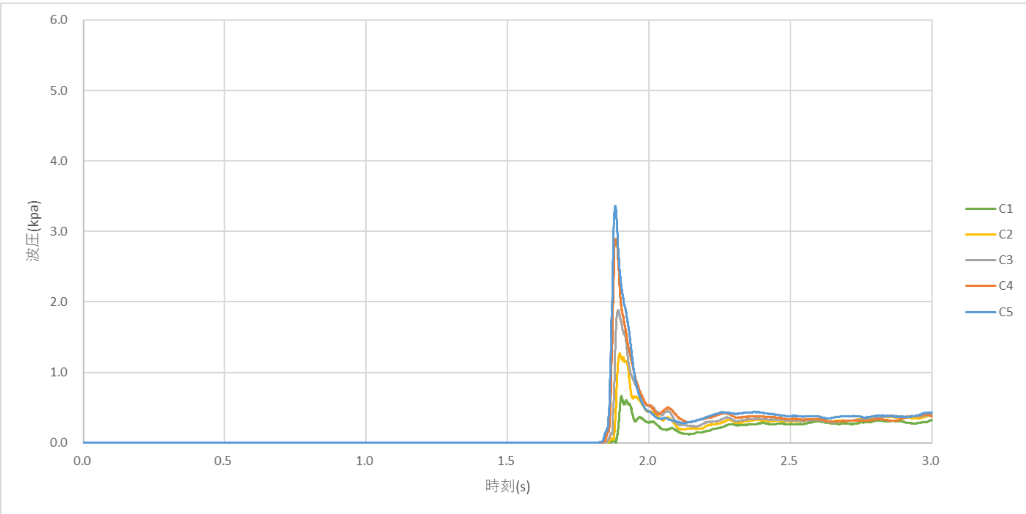


図 B-1-35 時刻歴波圧 （模型(h)、C 列）

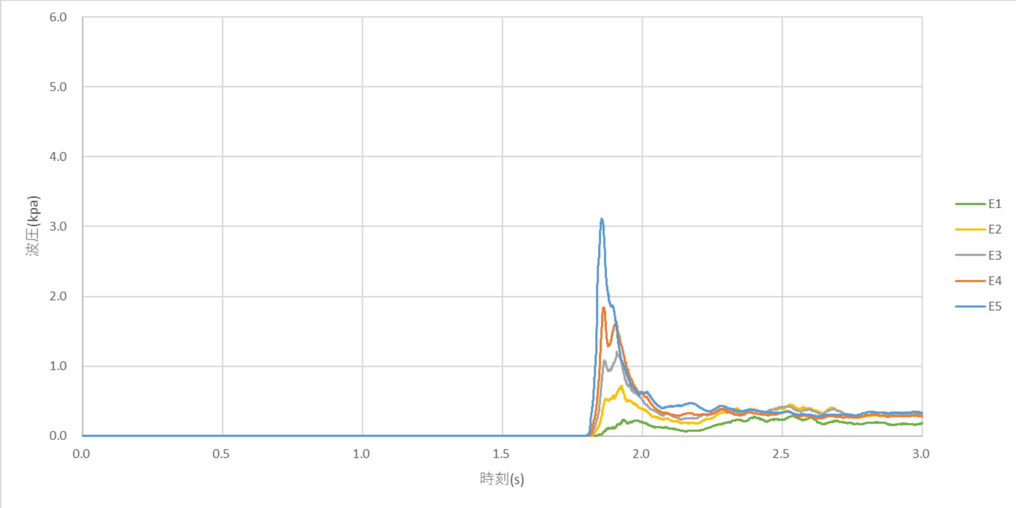


図 B-1-36 時刻歴波圧（模型(h)、E 列）

表 B-1-1 解析結果（模型(a)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.161	0.469	15	0.429
A-2	0.432	1.259	30	0.857
A-3	0.767	2.236	45	1.286
A-4	1.133	3.303	60	1.714
A-5	2.153	6.277	75	2.143
B-1	0.090	0.262	15	0.429
B-2	0.438	1.277	30	0.857
B-3	0.721	2.102	45	1.286
B-4	0.848	2.472	60	1.714
B-5	2.040	5.948	75	2.143
C-1	0.106	0.309	15	0.429
C-2	0.484	1.411	30	0.857
C-3	0.743	2.166	45	1.286
C-4	1.058	3.085	60	1.714
C-5	1.329	3.875	75	2.143
D-1	0.102	0.297	15	0.429
D-2	0.367	1.070	30	0.857
D-3	0.525	1.531	45	1.286
D-4	0.563	1.641	60	1.714
D-5	1.773	5.169	75	2.143
E-1	0.125	0.364	15	0.429
E-2	0.352	1.026	30	0.857
E-3	0.514	1.499	45	1.286
E-4	0.565	1.647	60	1.714
E-5	1.801	5.251	75	2.143

表 B-1-2 解析結果（模型(b)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.222	0.647	15	0.429
A-2	0.360	1.050	30	0.857
A-3	0.414	1.207	45	1.286
A-4	0.693	2.020	60	1.714
A-5	1.929	5.624	75	2.143
B-1	0.087	0.254	15	0.429
B-2	0.221	0.644	30	0.857
B-3	0.406	1.184	45	1.286
B-4	0.911	2.656	60	1.714
B-5	1.593	4.644	75	2.143
C-1	0.155	0.452	15	0.429
C-2	0.283	0.825	30	0.857
C-3	0.485	1.414	45	1.286
C-4	1.101	3.210	60	1.714
C-5	1.629	4.749	75	2.143
D-1	0.187	0.545	15	0.429
D-2	0.297	0.866	30	0.857
D-3	0.385	1.122	45	1.286
D-4	0.987	2.878	60	1.714
D-5	1.705	4.971	75	2.143
E-1	0.153	0.446	15	0.429
E-2	0.294	0.857	30	0.857
E-3	0.440	1.283	45	1.286
E-4	0.672	1.959	60	1.714
E-5	1.474	4.297	75	2.143

表 B-1-3 解析結果（模型(c)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.025	0.073	15	0.429
A-2	0.062	0.181	30	0.857
A-3	0.174	0.507	45	1.286
A-4	0.151	0.440	60	1.714
A-5	0.434	1.265	75	2.143
B-1	0.017	0.050	15	0.429
B-2	0.059	0.172	30	0.857
B-3	0.143	0.417	45	1.286
B-4	0.288	0.840	60	1.714
B-5	0.560	1.633	75	2.143
C-1	0.116	0.338	15	0.429
C-2	0.249	0.726	30	0.857
C-3	0.358	1.044	45	1.286
C-4	0.778	2.268	60	1.714
C-5	1.465	4.271	75	2.143
D-1	0.072	0.210	15	0.429
D-2	0.209	0.609	30	0.857
D-3	0.385	1.122	45	1.286
D-4	0.394	1.149	60	1.714
D-5	0.544	1.586	75	2.143
E-1	0.084	0.245	15	0.429
E-2	0.193	0.563	30	0.857
E-3	0.261	0.761	45	1.286
E-4	0.372	1.085	60	1.714
E-5	0.906	2.641	75	2.143

表 B-1-4 解析結果（模型(d)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.174	0.507	15	0.429
A-2	0.411	1.198	30	0.857
A-3	0.593	1.729	45	1.286
A-4	0.775	2.259	60	1.714
A-5	1.308	3.813	75	2.143
B-1	0.541	1.577	15	0.429
B-2	1.135	3.309	30	0.857
B-3	1.643	4.790	45	1.286
B-4	2.302	6.711	60	1.714
B-5	3.128	9.120	75	2.143
C-1	0.802	2.338	15	0.429
C-2	1.444	4.210	30	0.857
C-3	2.037	5.939	45	1.286
C-4	2.968	8.653	60	1.714
C-5	4.235	12.347	75	2.143
D-1	0.643	1.875	15	0.429
D-2	1.105	3.222	30	0.857
D-3	1.607	4.685	45	1.286
D-4	2.430	7.085	60	1.714
D-5	3.064	8.933	75	2.143
E-1	0.355	1.035	15	0.429
E-2	0.684	1.994	30	0.857
E-3	0.947	2.761	45	1.286
E-4	1.390	4.052	60	1.714
E-5	2.530	7.376	75	2.143

表 B-1-5 解析結果（模型(e)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.410	1.195	15	0.429
A-2	0.539	1.571	30	0.857
A-3	0.513	1.496	45	1.286
A-4	0.551	1.606	60	1.714
A-5	1.227	3.577	75	2.143
B-1	0.348	1.015	15	0.429
B-2	0.462	1.347	30	0.857
B-3	0.468	1.364	45	1.286
B-4	0.438	1.277	60	1.714
B-5	1.099	3.204	75	2.143
C-1	0.112	0.327	15	0.429
C-2	0.286	0.834	30	0.857
C-3	0.510	1.487	45	1.286
C-4	1.155	3.367	60	1.714
C-5	1.653	4.819	75	2.143
D-1	0.221	0.644	15	0.429
D-2	0.917	2.673	30	0.857
D-3	1.409	4.108	45	1.286
D-4	1.576	4.595	60	1.714
D-5	2.689	7.840	75	2.143
E-1	0.355	1.035	15	0.429
E-2	1.086	3.166	30	0.857
E-3	1.502	4.379	45	1.286
E-4	2.445	7.128	60	1.714
E-5	2.821	8.224	75	2.143

表 B-1-6 解析結果（模型(f)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.157	0.458	15	0.429
A-2	0.428	1.248	30	0.857
A-3	0.971	2.831	45	1.286
A-4	1.986	5.790	60	1.714
A-5	3.730	10.875	75	2.143
C-1	0.996	2.904	15	0.429
C-2	1.332	3.883	30	0.857
C-3	1.403	4.090	45	1.286
C-4	1.681	4.901	60	1.714
C-5	2.265	6.603	75	2.143
E-1	0.607	1.770	15	0.429
E-2	0.866	2.525	30	0.857
E-3	1.064	3.102	45	1.286
E-4	1.087	3.169	60	1.714
E-5	2.312	6.741	75	2.143

表 B-1-7 解析結果（模型(g)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.522	1.522	15	0.429
A-2	1.130	3.294	30	0.857
A-3	1.352	3.942	45	1.286
A-4	2.551	7.437	60	1.714
A-5	3.687	10.749	75	2.143
B-1	0.343	1.000	15	0.429
B-2	1.074	3.131	30	0.857
B-3	1.441	4.201	45	1.286
B-4	1.699	4.953	60	1.714
B-5	3.476	10.134	75	2.143
C-1	0.390	1.137	15	0.429
C-2	0.899	2.621	30	0.857
C-3	1.424	4.152	45	1.286
C-4	1.645	4.796	60	1.714
C-5	4.082	11.901	75	2.143
D-1	0.385	1.122	15	0.429
D-2	0.904	2.636	30	0.857
D-3	1.203	3.507	45	1.286
D-4	1.330	3.878	60	1.714
D-5	5.250	15.306	75	2.143
E-1	0.437	1.274	15	0.429
E-2	0.936	2.729	30	0.857
E-3	1.215	3.542	45	1.286
E-4	2.430	7.085	60	1.714
E-5	4.028	11.743	75	2.143

表 B-1-8 解析結果（模型(h)）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.382	1.114	15	0.429
A-2	0.920	2.682	30	0.857
A-3	1.262	3.679	45	1.286
A-4	1.498	4.367	60	1.714
A-5	1.925	5.612	75	2.143
C-1	0.666	1.942	15	0.429
C-2	1.275	3.717	30	0.857
C-3	1.886	5.499	45	1.286
C-4	2.891	8.429	60	1.714
C-5	3.363	9.805	75	2.143
E-1	0.233	0.679	15	0.429
E-2	0.720	2.099	30	0.857
E-3	1.206	3.516	45	1.286
E-4	1.842	5.370	60	1.714
E-5	3.111	9.070	75	2.143

解析モデル②について、図 B-2 に時刻歴波圧を示す。表 B-2 に衝撃ケース、表 B-3 に定常ケースの解析結果を示す。表には、最大波圧、無次元化波圧、計測高さ、無次元化浸水深を示す。

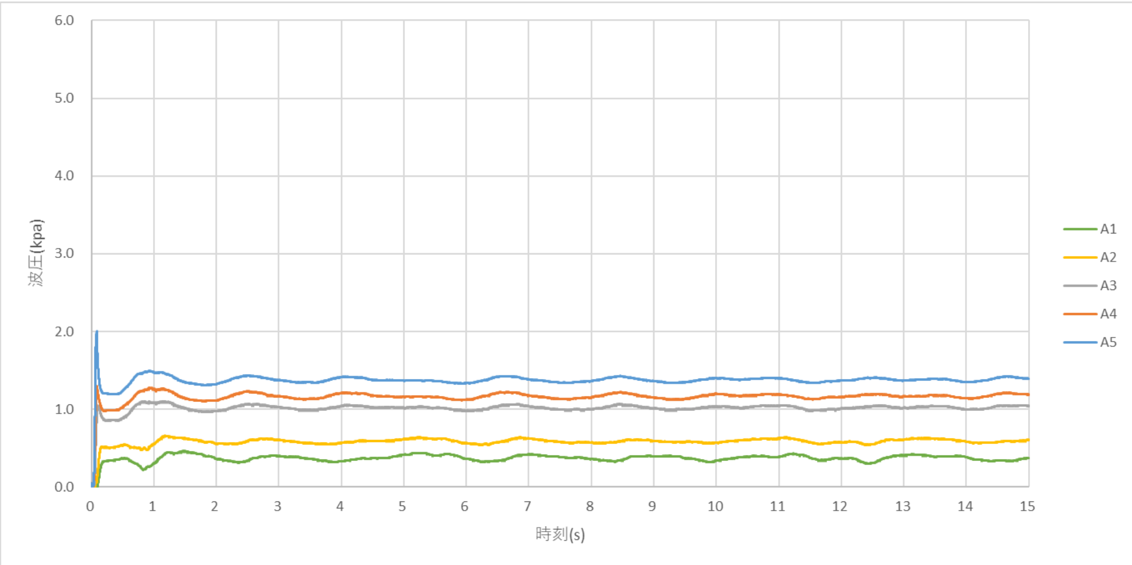


図 B-2-1 時刻歴波圧（模型(a)、A 列）

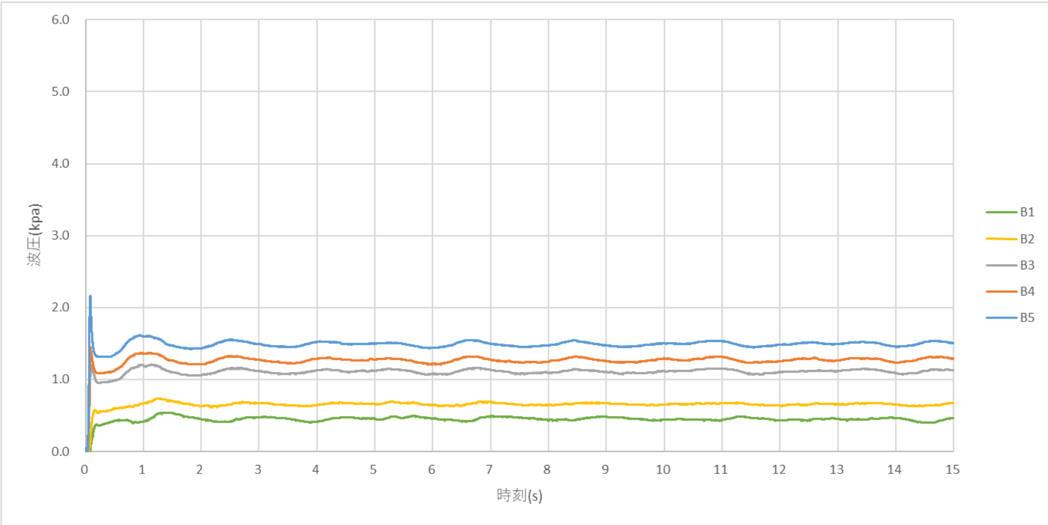


図 B-2-2 時刻歴波圧（模型(a)、B 列）

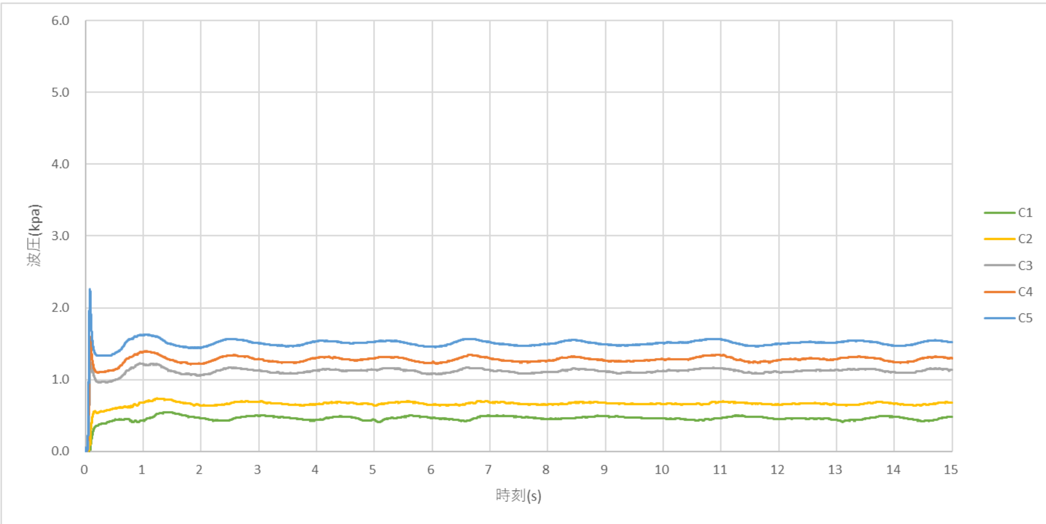


図 B-2-3 時刻歴波圧（模型(a)、C 列）

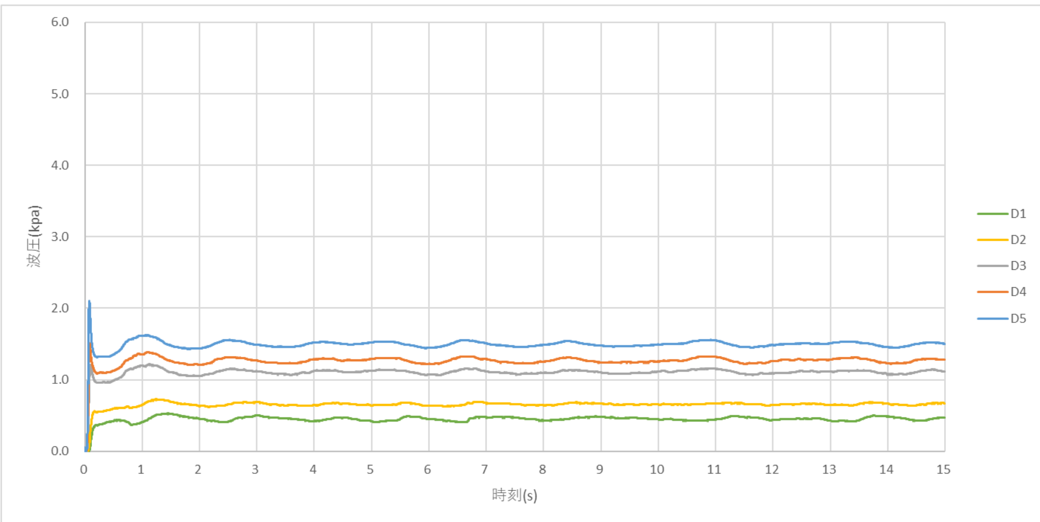


図 B-2-4 時刻歴波圧（模型(a)、D 列）

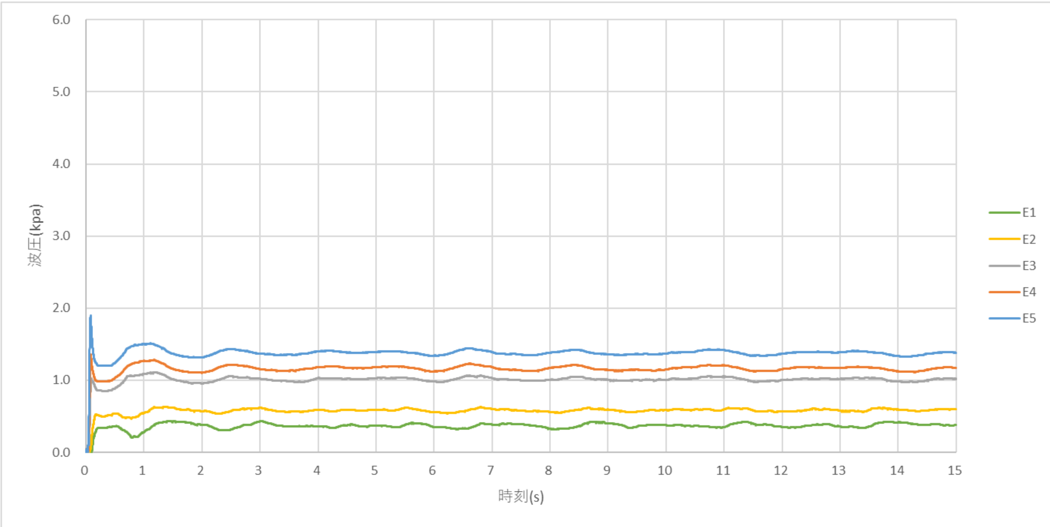


図 B-2-5 時刻歴波圧（模型(a)、E 列）

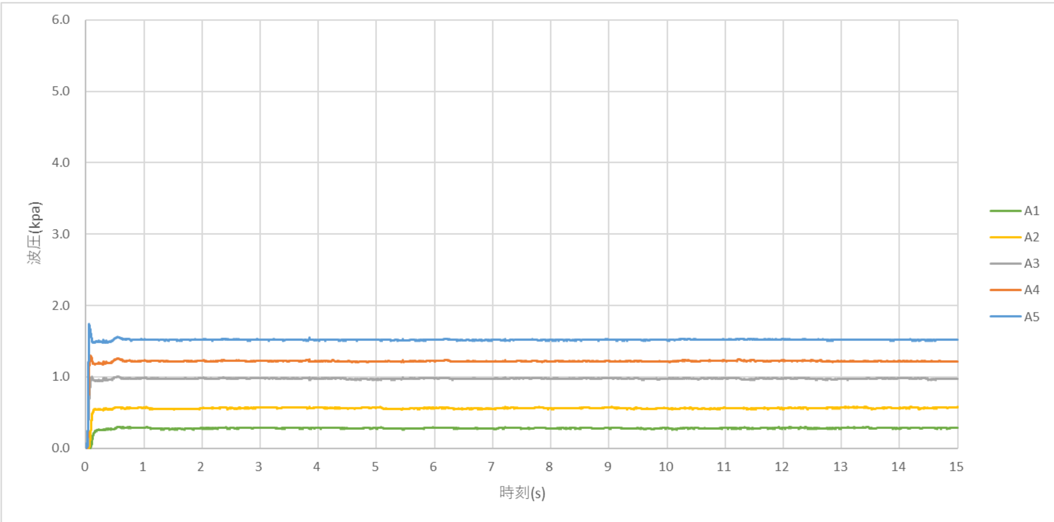


図 B-2-6 時刻歴波圧（模型(b)、A 列）

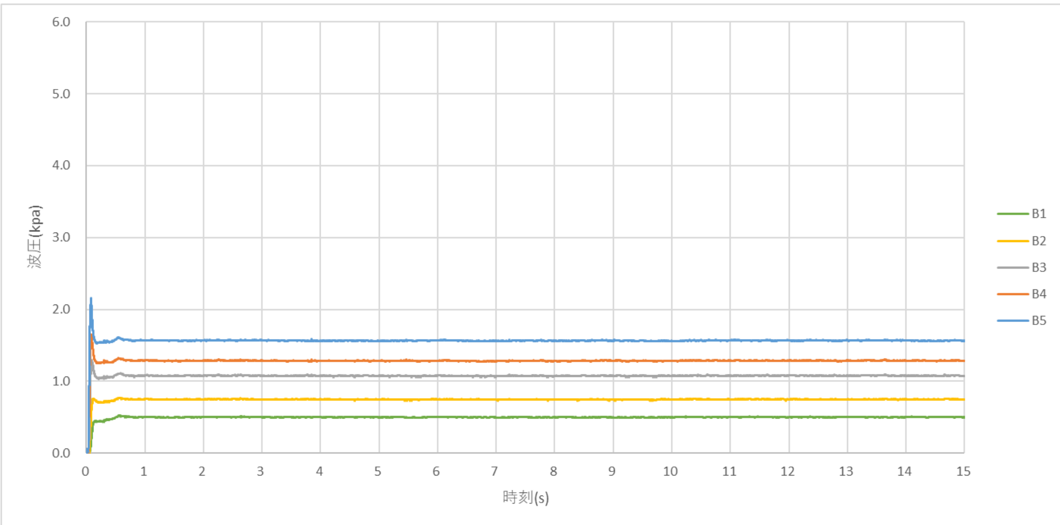


図 B-2-7 時刻歴波圧（模型(b)、B 列）

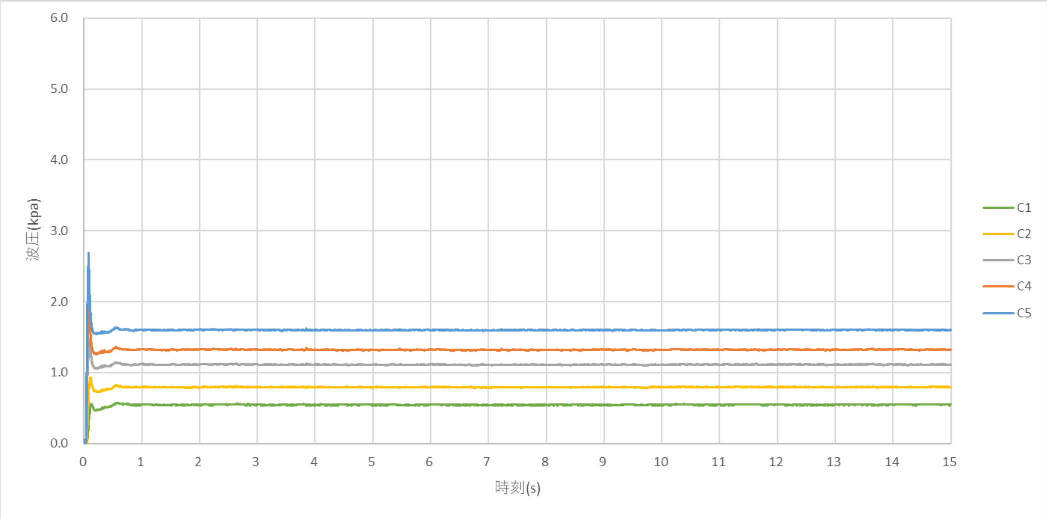


図 B-2-8 時刻歴波圧（模型(b)、C 列）

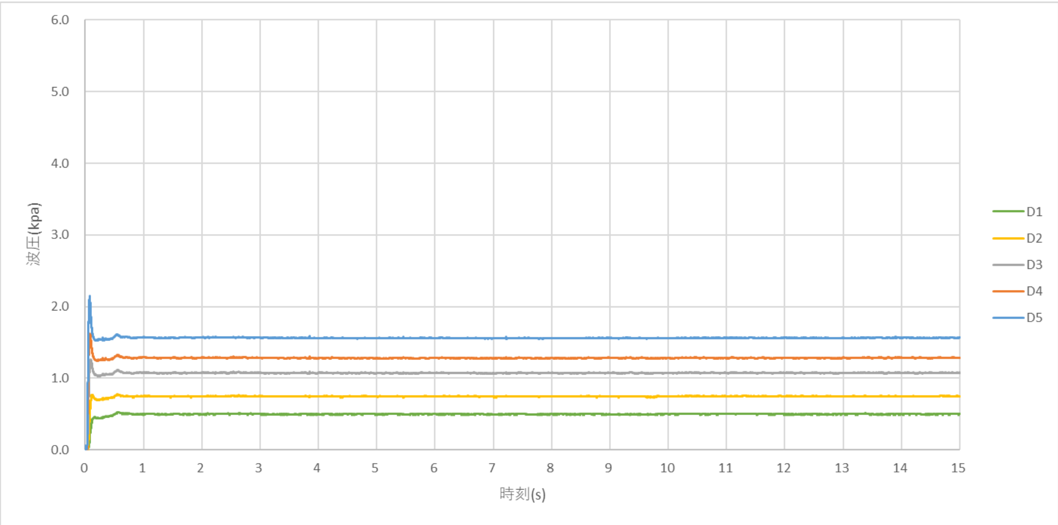


図 B-2-9 時刻歴波圧（模型(b)、D 列）

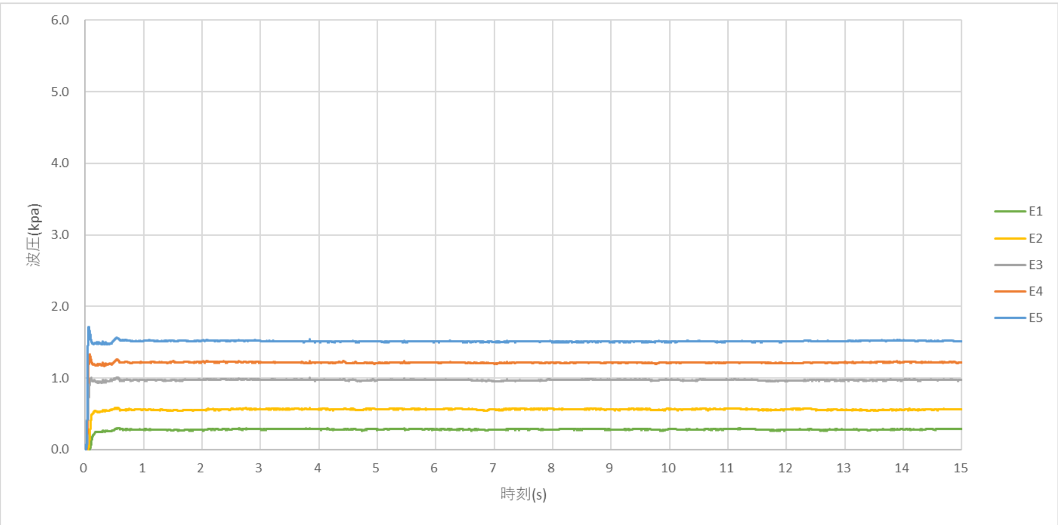


図 B-2-10 時刻歴波圧（模型(b)、E 列）

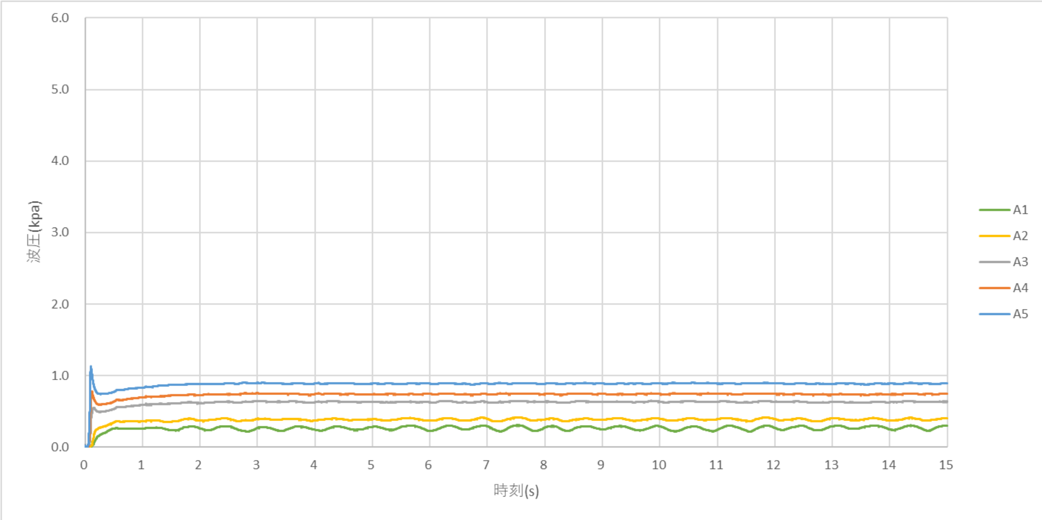


図 B-2-11 時刻歴波圧（模型(c)、A 列）

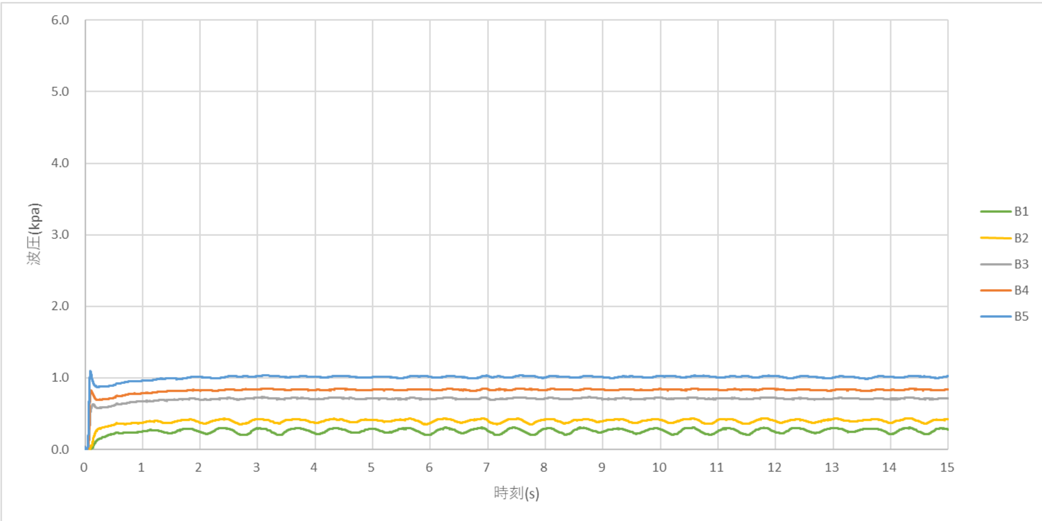


図 B-2-12 時刻歴波圧（模型(c)、B 列）

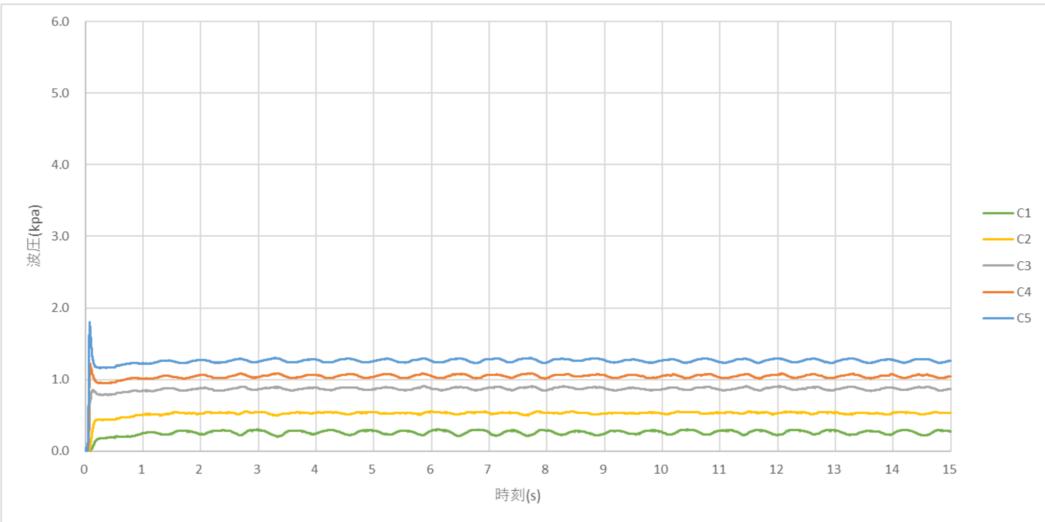


図 B-2-13 時刻歴波圧（模型(c)、C 列）

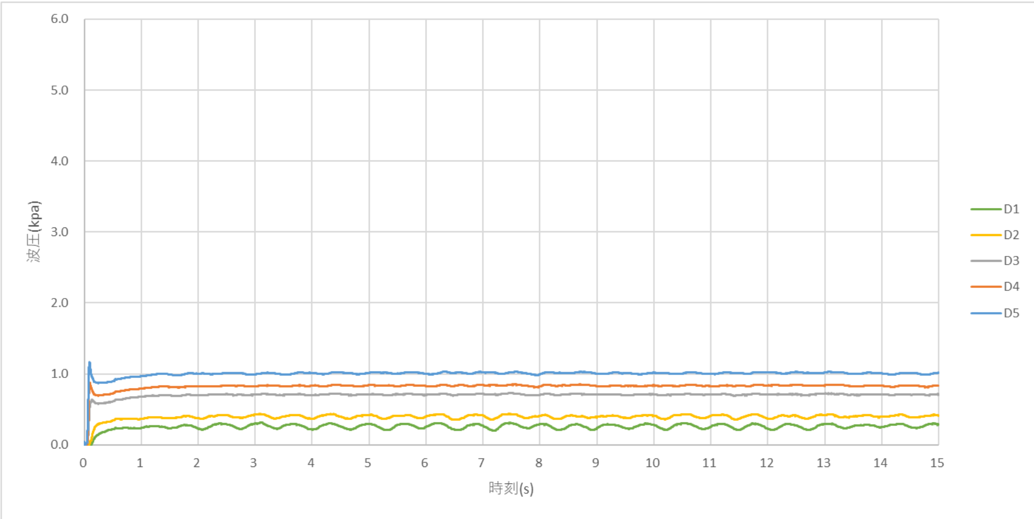


図 B-2-14 時刻歴波圧（模型(c)、D 列）

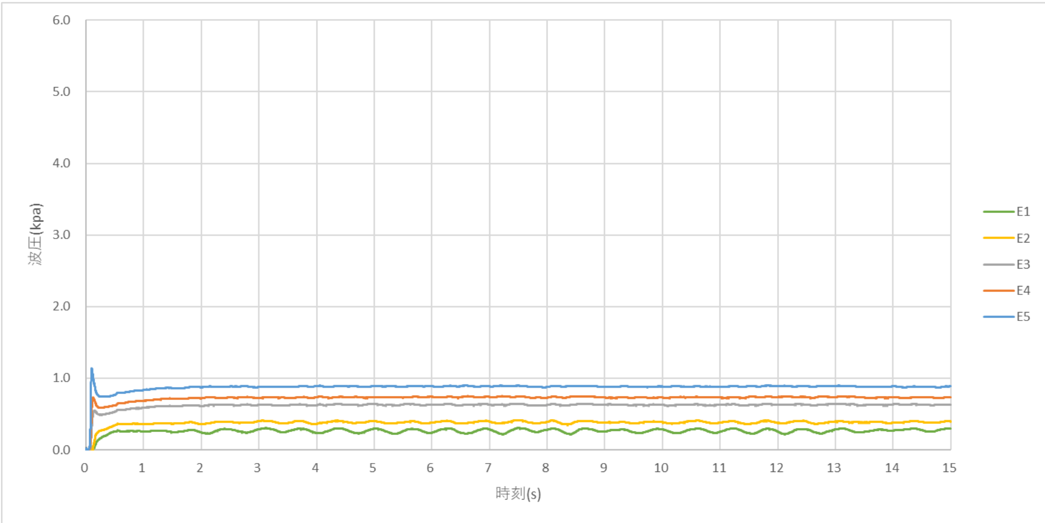


図 B-2-15 時刻歴波圧（模型(c)、E 列）

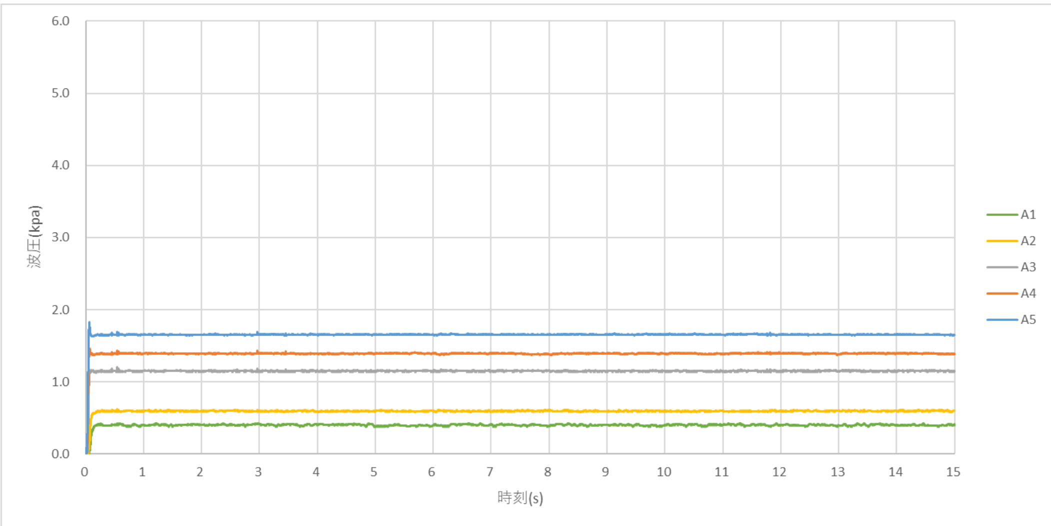


図 B-2-16 時刻歴波圧（模型(d)、A 列）

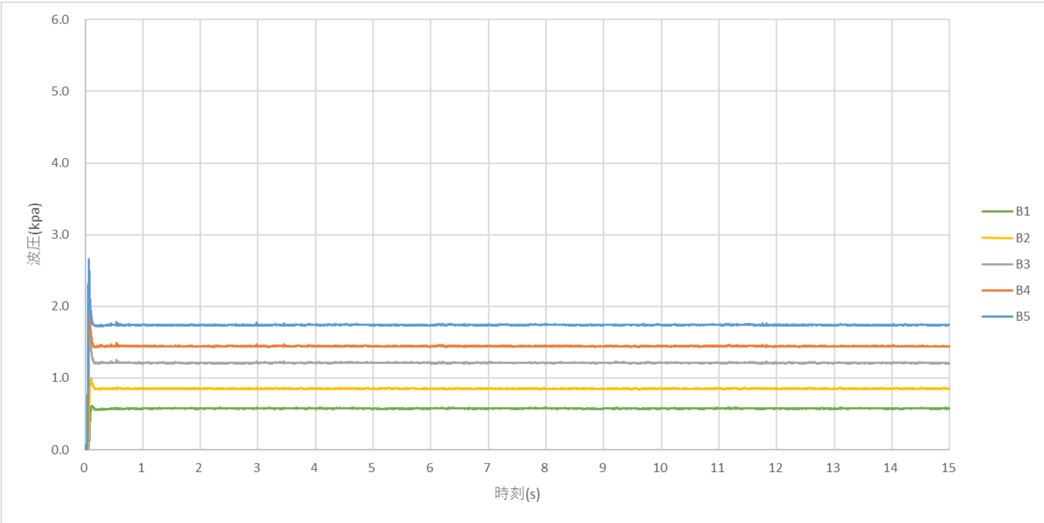


図 B-2-17 時刻歴波圧（模型(d)、B 列）

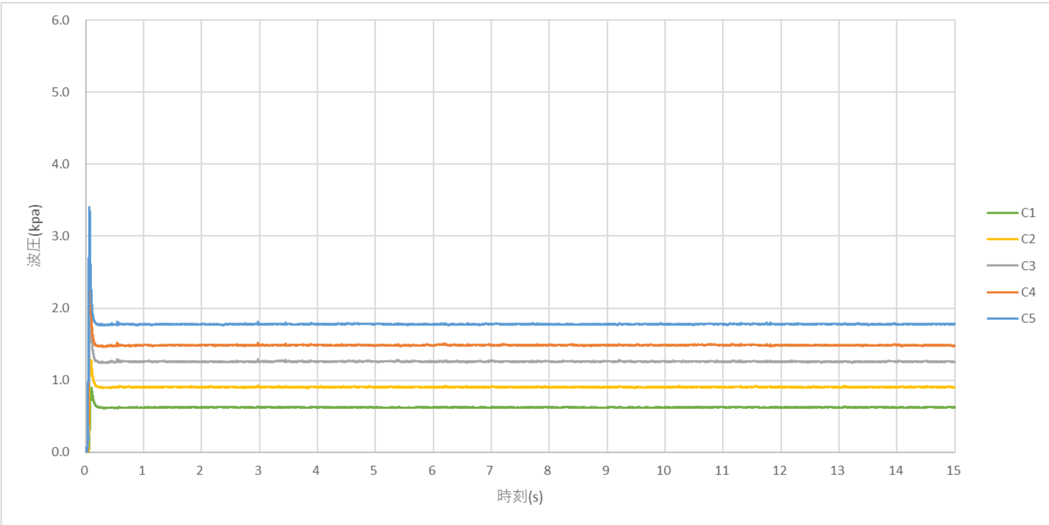


図 B-2-18 時刻歴波圧（模型(d)、C 列）

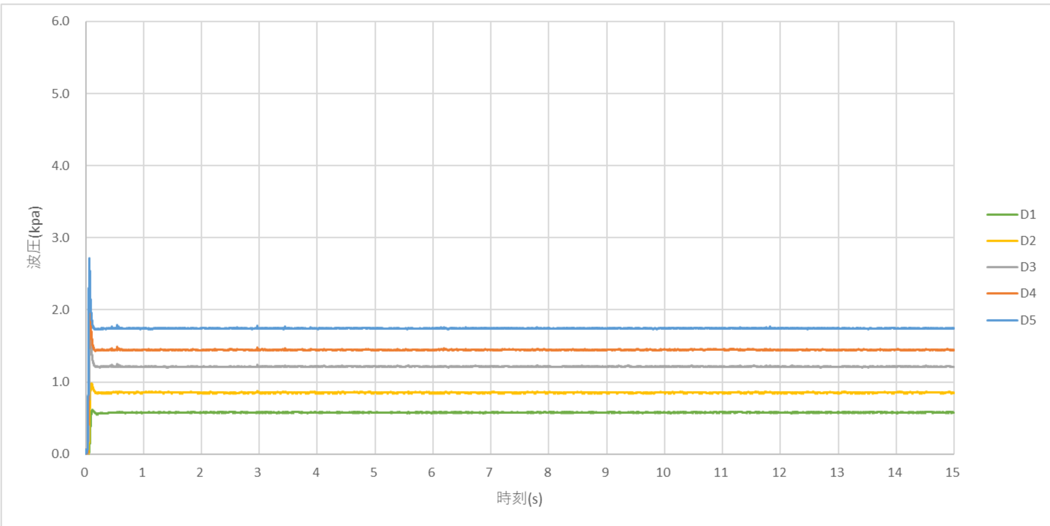


図 B-2-19 時刻歴波圧（模型(d)、D 列）

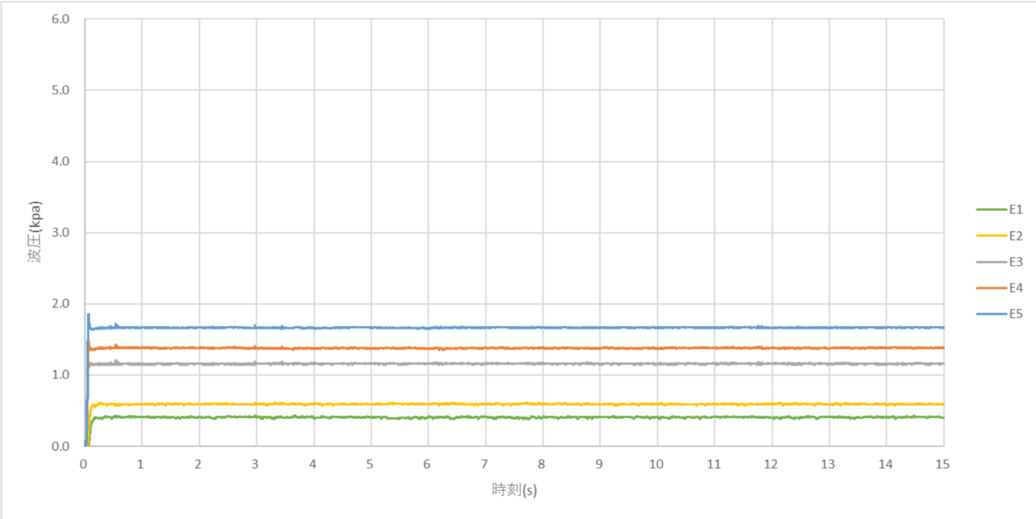


図 B-2-20 時刻歴波圧（模型(d)、E 列）

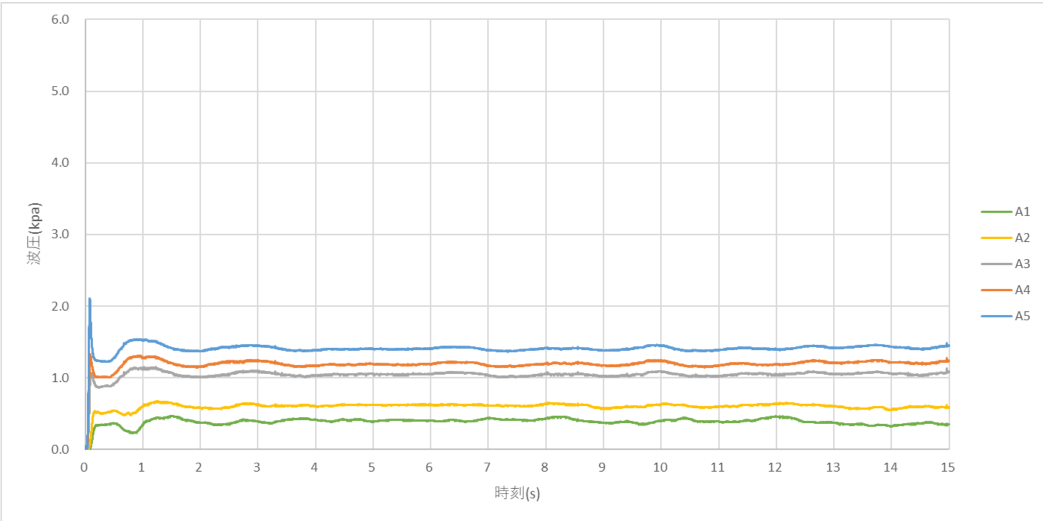


図 B-2-21 時刻歴波圧（模型(e)、A 列）

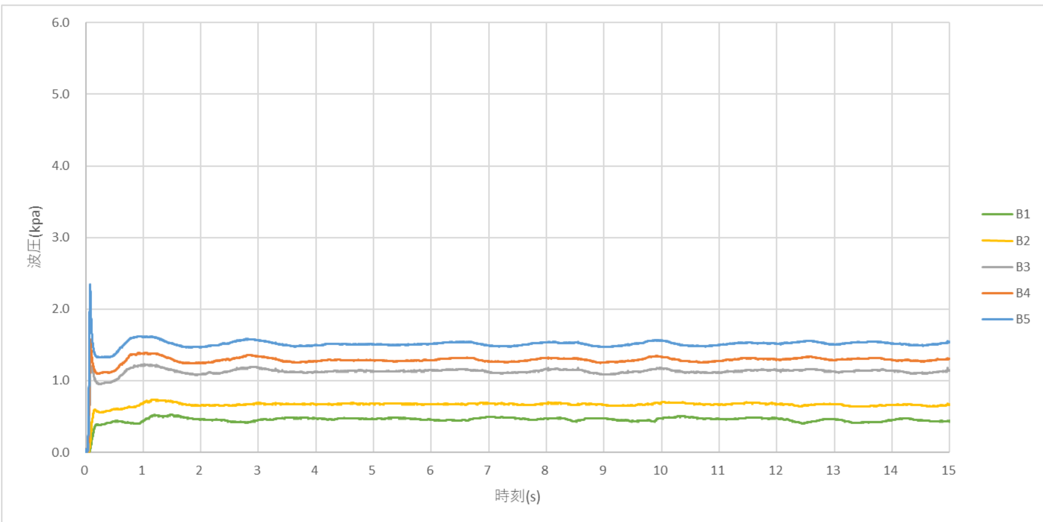


図 B-2-22 時刻歴波圧（模型(e)、B 列）

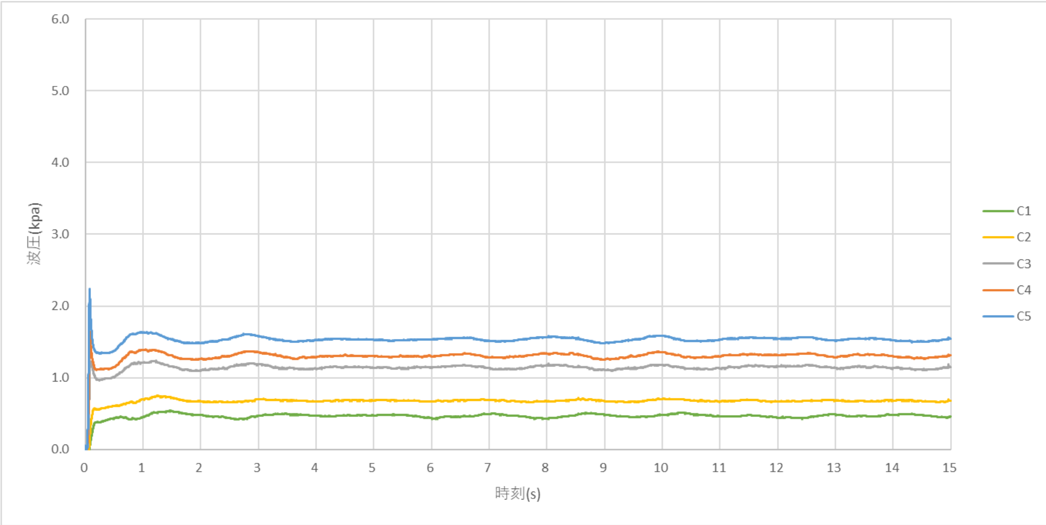


図 B-2-23 時刻歴波圧 (模型(e)、C 列)

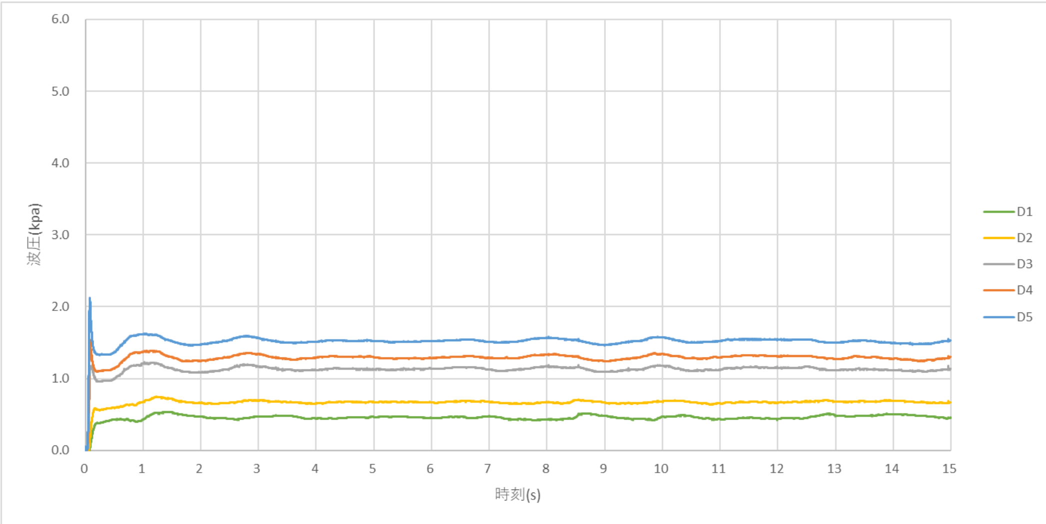


図 B-2-24 時刻歴波圧 (模型(e)、D 列)

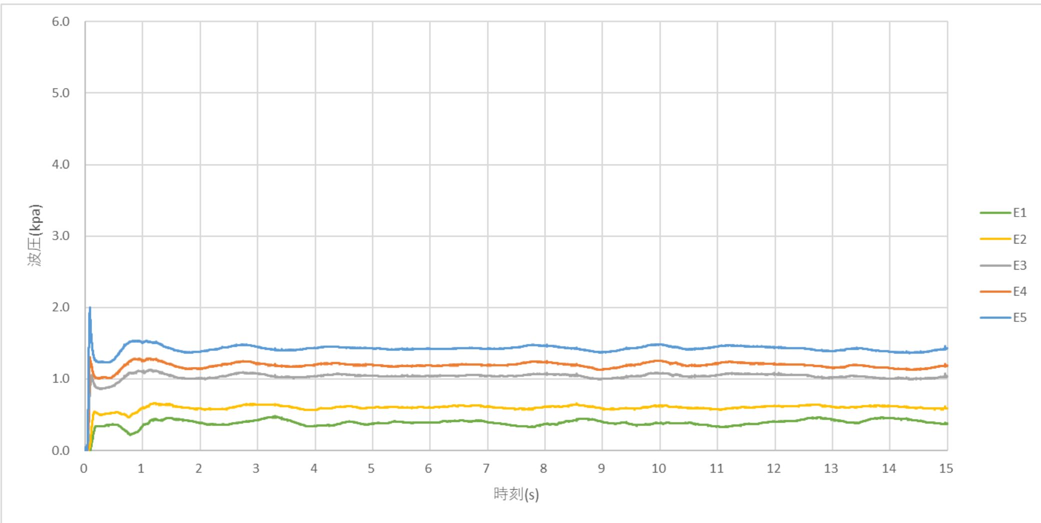


図 B-2-25 時刻歴波圧 (模型(e)、E 列)

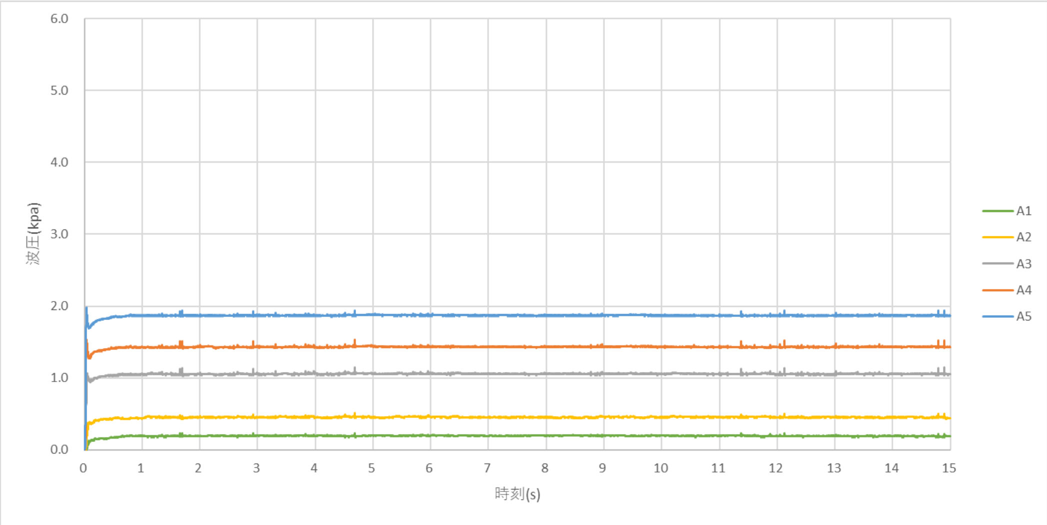


図 B-2-26 時刻歴波圧 (模型(f)、A 列)

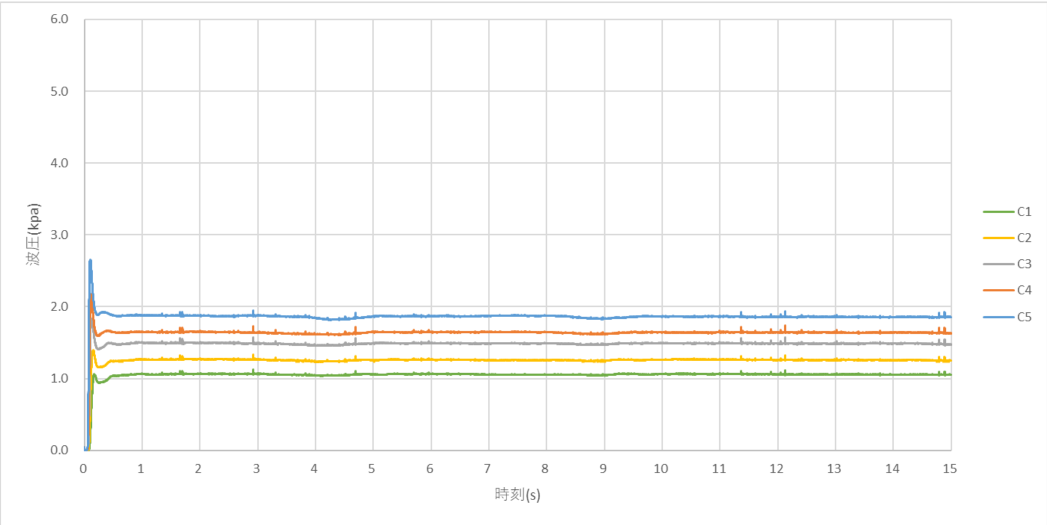


図 B-2-27 時刻歴波圧 (模型(f)、C 列)

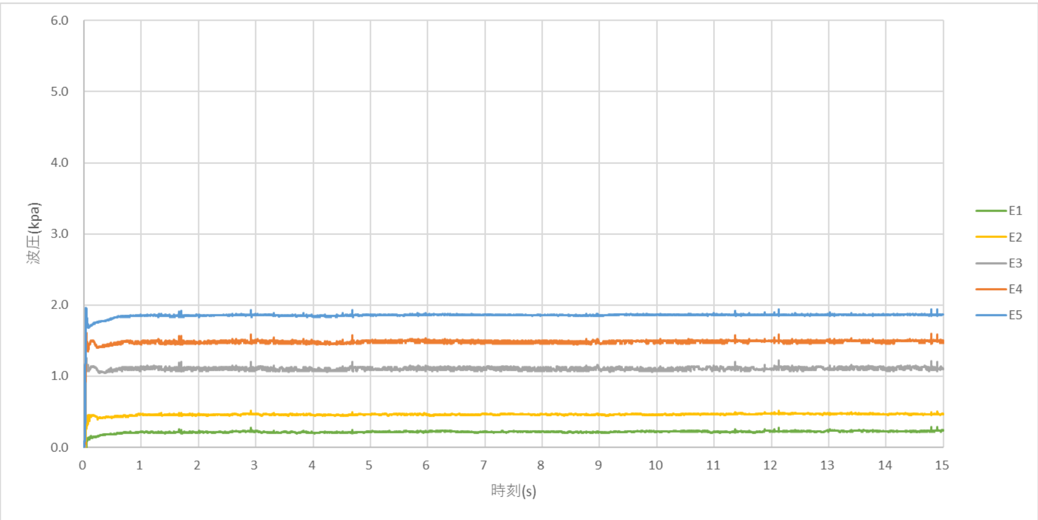


図 B-2-28 時刻歴波圧 (模型(f)、E 列)

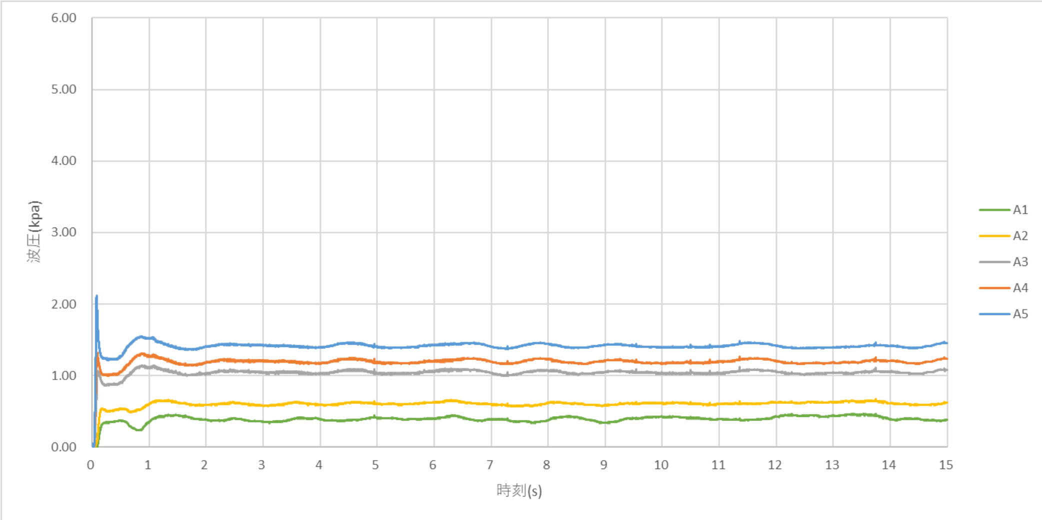


図 B-2-29 時刻歴波圧（模型(g)、A 列）

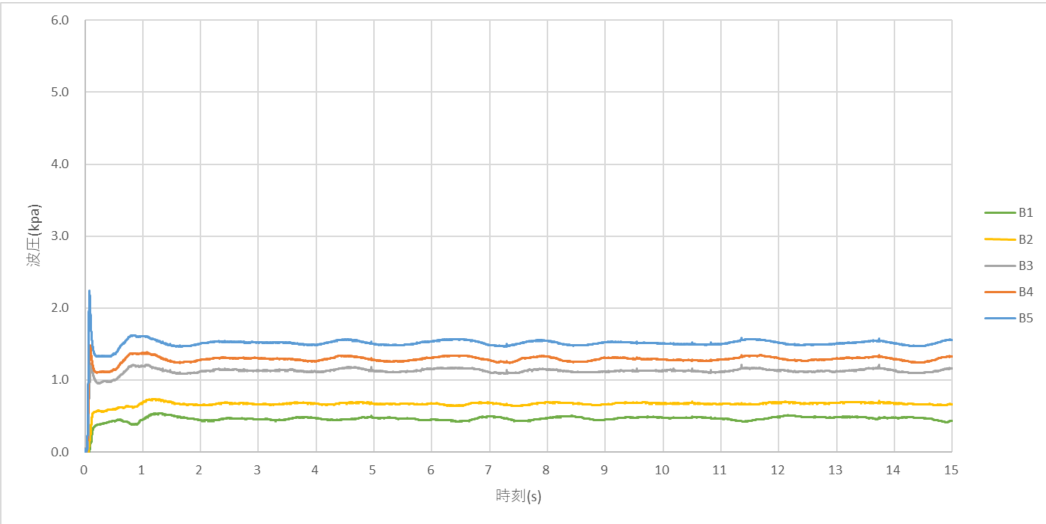


図 B-2-30 時刻歴波圧（模型(g)、B 列）

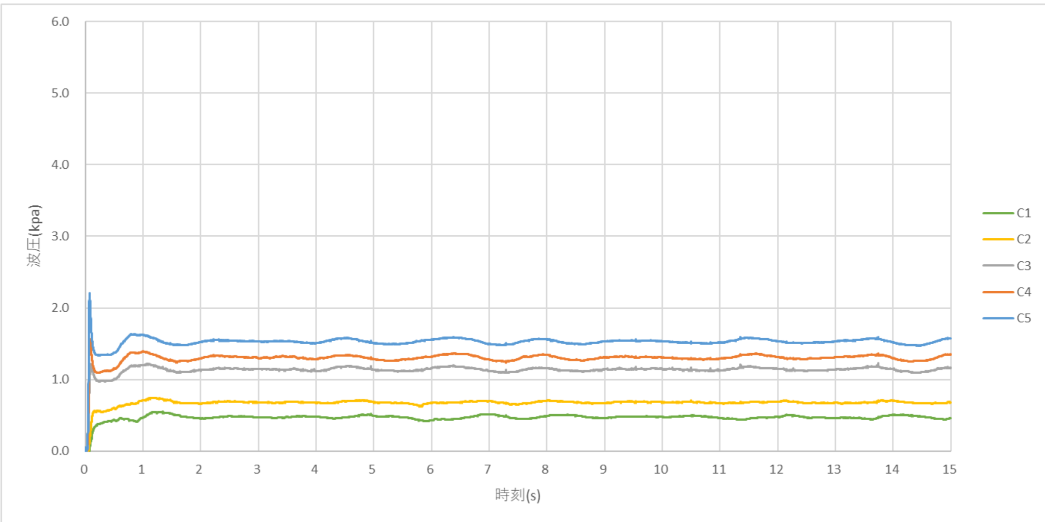


図 B-2-31 時刻歴波圧（模型(g)、C 列）

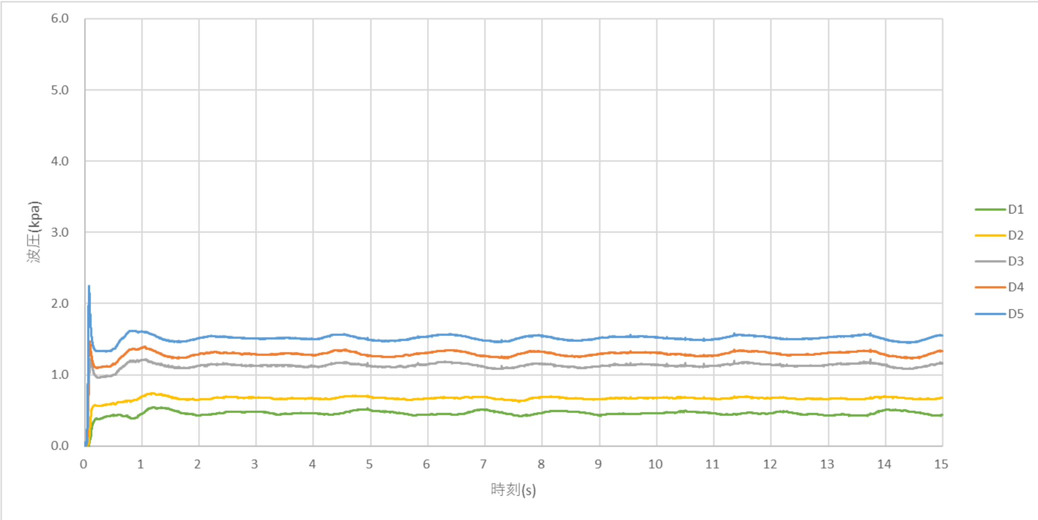


図 B-2-32 時刻歴波圧（模型(g)、D 列）

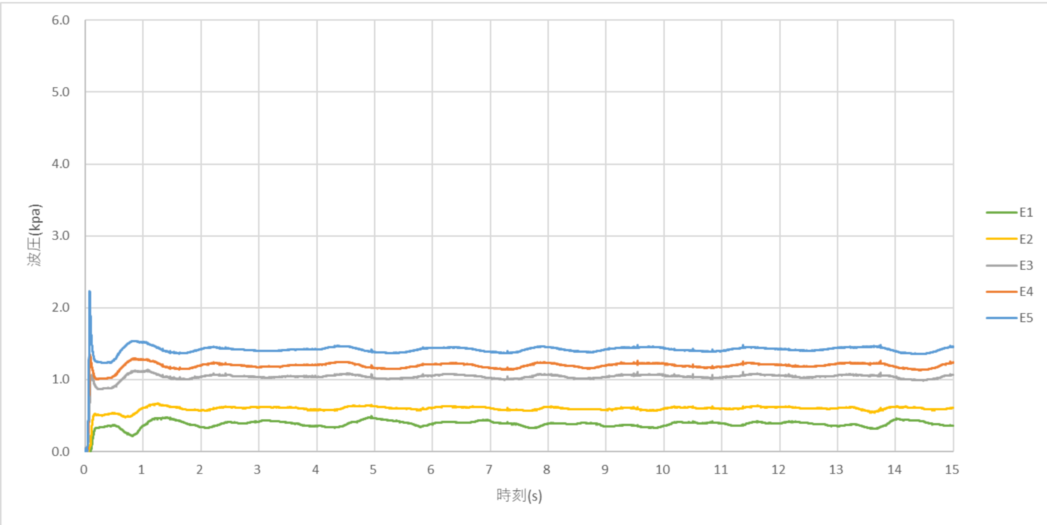


図 B-2-33 時刻歴波圧（模型(g)、E 列）

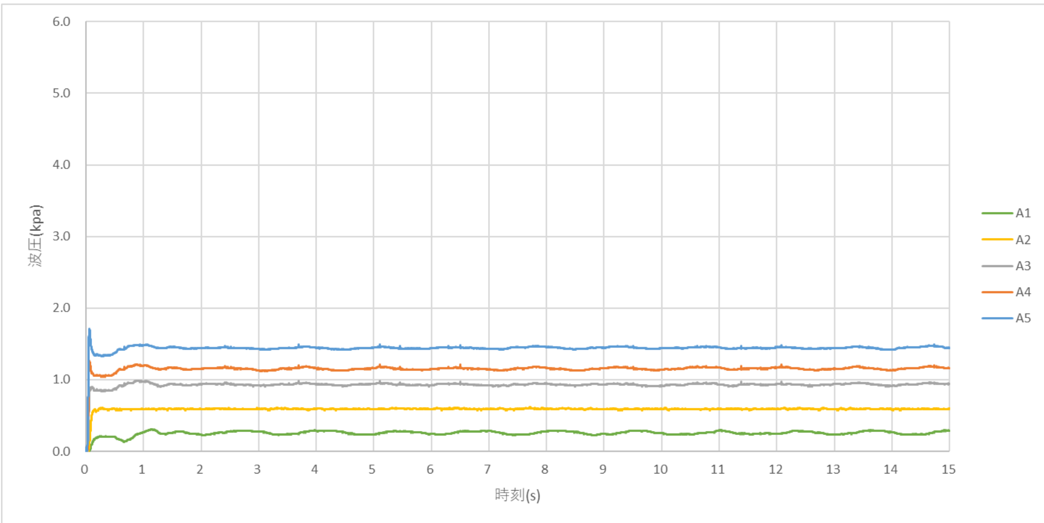


図 B-2-34 時刻歴波圧（模型(h)、A 列）

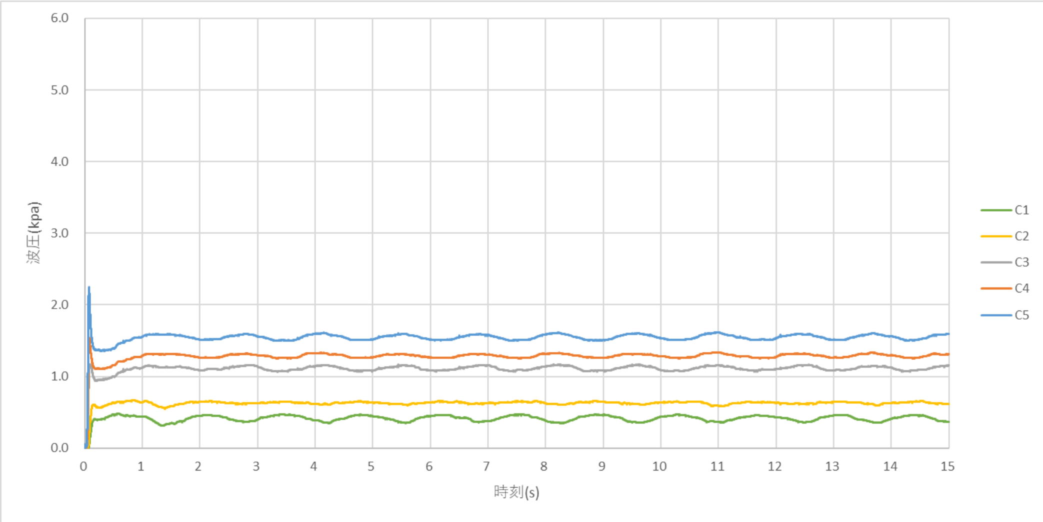


図 B-2-35 時刻歴波圧（模型(h)、C 列）

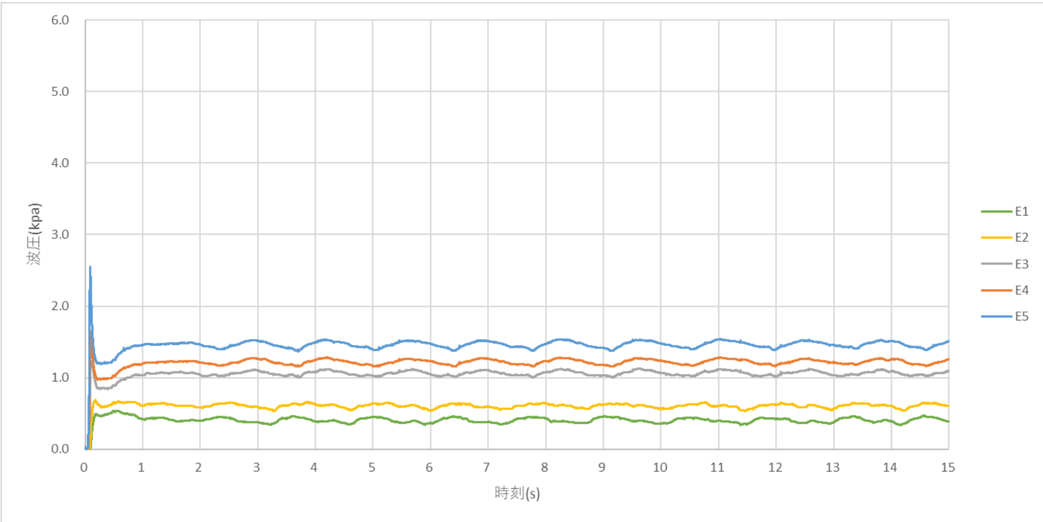


図 B-2-36 時刻歴波圧（模型(h)、E 列）

表 B-2-1 解析結果（模型(a)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.341	0.791	15	0.341
A-2	0.517	1.199	30	0.682
A-3	1.050	2.435	45	1.023
A-4	1.294	3.001	60	1.364
A-5	2.004	4.647	75	1.705
B-1	0.376	0.872	15	0.341
B-2	0.578	1.340	30	0.682
B-3	1.204	2.792	45	1.023
B-4	1.451	3.365	60	1.364
B-5	2.164	5.019	75	1.705
C-1	0.390	0.904	15	0.341
C-2	0.562	1.303	30	0.682
C-3	1.239	2.873	45	1.023
C-4	1.591	3.690	60	1.364
C-5	2.260	5.241	75	1.705
D-1	0.381	0.884	15	0.341
D-2	0.559	1.296	30	0.682
D-3	1.212	2.811	45	1.023
D-4	1.509	3.500	60	1.364
D-5	2.105	4.882	75	1.705
E-1	0.340	0.788	15	0.341
E-2	0.527	1.222	30	0.682
E-3	1.027	2.382	45	1.023
E-4	1.358	3.149	60	1.364
E-5	1.894	4.392	75	1.705

表 B-2-2 解析結果（模型(b)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.268	0.622	15	0.341
A-2	0.554	1.285	30	0.682
A-3	0.999	2.317	45	1.023
A-4	1.303	3.022	60	1.364
A-5	1.740	4.035	75	1.705
B-1	0.458	1.062	15	0.341
B-2	0.760	1.763	30	0.682
B-3	1.298	3.010	45	1.023
B-4	1.654	3.836	60	1.364
B-5	2.155	4.998	75	1.705
C-1	0.559	1.296	15	0.341
C-2	0.925	2.145	30	0.682
C-3	1.475	3.421	45	1.023
C-4	1.950	4.522	60	1.364
C-5	2.693	6.245	75	1.705
D-1	0.457	1.060	15	0.341
D-2	0.769	1.783	30	0.682
D-3	1.261	2.924	45	1.023
D-4	1.622	3.762	60	1.364
D-5	2.150	4.986	75	1.705
E-1	0.266	0.617	15	0.341
E-2	0.553	1.282	30	0.682
E-3	1.004	2.328	45	1.023
E-4	1.330	3.084	60	1.364
E-5	1.711	3.968	75	1.705

表 B-2-3 解析結果（模型(c)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.184	0.427	15	0.341
A-2	0.279	0.647	30	0.682
A-3	0.552	1.280	45	1.023
A-4	0.782	1.814	60	1.364
A-5	1.130	2.621	75	1.705
B-1	0.167	0.387	15	0.341
B-2	0.304	0.705	30	0.682
B-3	0.630	1.461	45	1.023
B-4	0.827	1.918	60	1.364
B-5	1.100	2.551	75	1.705
C-1	0.179	0.415	15	0.341
C-2	0.443	1.027	30	0.682
C-3	0.855	1.983	45	1.023
C-4	1.218	2.825	60	1.364
C-5	1.807	4.191	75	1.705
D-1	0.170	0.394	15	0.341
D-2	0.306	0.710	30	0.682
D-3	0.636	1.475	45	1.023
D-4	0.871	2.020	60	1.364
D-5	1.170	2.713	75	1.705
E-1	0.185	0.429	15	0.341
E-2	0.278	0.645	30	0.682
E-3	0.550	1.276	45	1.023
E-4	0.729	1.691	60	1.364
E-5	1.139	2.641	75	1.705

表 B-2-4 解析結果（模型(d)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.419	0.972	15	0.341
A-2	0.606	1.405	30	0.682
A-3	1.164	2.699	45	1.023
A-4	1.466	3.400	60	1.364
A-5	1.823	4.228	75	1.705
B-1	0.612	1.419	15	0.341
B-2	0.996	2.310	30	0.682
B-3	1.745	4.047	45	1.023
B-4	2.231	5.174	60	1.364
B-5	2.659	6.167	75	1.705
C-1	0.896	2.078	15	0.341
C-2	1.283	2.975	30	0.682
C-3	2.045	4.743	45	1.023
C-4	2.592	6.011	60	1.364
C-5	3.410	7.908	75	1.705
D-1	0.612	1.419	15	0.341
D-2	0.980	2.273	30	0.682
D-3	1.670	3.873	45	1.023
D-4	2.202	5.107	60	1.364
D-5	2.719	6.306	75	1.705
E-1	0.407	0.944	15	0.341
E-2	0.606	1.405	30	0.682
E-3	1.171	2.716	45	1.023
E-4	1.477	3.425	60	1.364
E-5	1.857	4.307	75	1.705

表 B-2-5 解析結果（模型(e)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.346	0.802	15	0.341
A-2	0.535	1.241	30	0.682
A-3	1.069	2.479	45	1.023
A-4	1.332	3.089	60	1.364
A-5	2.107	4.886	75	1.705
B-1	0.390	0.904	15	0.341
B-2	0.599	1.389	30	0.682
B-3	1.203	2.790	45	1.023
B-4	1.573	3.648	60	1.364
B-5	2.349	5.448	75	1.705
C-1	0.393	0.911	15	0.341
C-2	0.579	1.343	30	0.682
C-3	1.228	2.848	45	1.023
C-4	1.642	3.808	60	1.364
C-5	2.237	5.188	75	1.705
D-1	0.390	0.904	15	0.341
D-2	0.585	1.357	30	0.682
D-3	1.174	2.723	45	1.023
D-4	1.536	3.562	60	1.364
D-5	2.121	4.919	75	1.705
E-1	0.342	0.793	15	0.341
E-2	0.544	1.262	30	0.682
E-3	1.053	2.442	45	1.023
E-4	1.309	3.036	60	1.364
E-5	2.004	4.647	75	1.705

表 B-2-6 解析結果（模型(f)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.159	0.369	15	0.341
A-2	0.427	0.990	30	0.682
A-3	1.065	2.470	45	1.023
A-4	1.536	3.562	60	1.364
A-5	1.979	4.590	75	1.705
C-1	1.058	2.454	15	0.341
C-2	1.392	3.228	30	0.682
C-3	1.835	4.256	45	1.023
C-4	2.176	5.046	60	1.364
C-5	2.655	6.157	75	1.705
E-1	0.170	0.394	15	0.341
E-2	0.451	1.046	30	0.682
E-3	1.250	2.899	45	1.023
E-4	1.699	3.940	60	1.364
E-5	1.957	4.538	75	1.705

表 B-2-7 解析結果（模型(g)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.348	0.807	15	0.341
A-2	0.541	1.255	30	0.682
A-3	1.065	2.470	45	1.023
A-4	1.323	3.068	60	1.364
A-5	2.118	4.912	75	1.705
B-1	0.393	0.911	15	0.341
B-2	0.574	1.331	30	0.682
B-3	1.229	2.850	45	1.023
B-4	1.487	3.449	60	1.364
B-5	2.242	5.199	75	1.705
C-1	0.395	0.916	15	0.341
C-2	0.566	1.313	30	0.682
C-3	1.216	2.820	45	1.023
C-4	1.559	3.615	60	1.364
C-5	2.208	5.121	75	1.705
D-1	0.389	0.902	15	0.341
D-2	0.575	1.333	30	0.682
D-3	1.225	2.841	45	1.023
D-4	1.465	3.397	60	1.364
D-5	2.245	5.206	75	1.705
E-1	0.338	0.784	15	0.341
E-2	0.522	1.211	30	0.682
E-3	1.065	2.470	45	1.023
E-4	1.351	3.133	60	1.364
E-5	2.231	5.174	75	1.705

表 B-2-8 解析結果（模型(h)、衝撃ケース）

	最大波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.210	0.487	15	0.341
A-2	0.468	1.085	30	0.682
A-3	0.903	2.094	45	1.023
A-4	1.265	2.934	60	1.364
A-5	1.715	3.977	75	1.705
C-1	0.406	0.942	15	0.341
C-2	0.609	1.412	30	0.682
C-3	1.170	2.713	45	1.023
C-4	1.540	3.571	60	1.364
C-5	2.249	5.216	75	1.705
E-1	0.492	1.141	15	0.341
E-2	0.686	1.591	30	0.682
E-3	1.229	2.850	45	1.023
E-4	1.645	3.815	60	1.364
E-5	2.552	5.918	75	1.705

表 B-3-1 解析結果（模型(a)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.376	0.872	15	0.341
A-2	0.591	1.371	30	0.682
A-3	1.021	2.368	45	1.023
A-4	1.167	2.706	60	1.364
A-5	1.376	3.191	75	1.705
B-1	0.451	1.046	15	0.341
B-2	0.658	1.526	30	0.682
B-3	1.113	2.581	45	1.023
B-4	1.270	2.945	60	1.364
B-5	1.492	3.460	75	1.705
C-1	0.464	1.076	15	0.341
C-2	0.667	1.547	30	0.682
C-3	1.122	2.602	45	1.023
C-4	1.283	2.975	60	1.364
C-5	1.510	3.502	75	1.705
D-1	0.453	1.051	15	0.341
D-2	0.657	1.524	30	0.682
D-3	1.109	2.572	45	1.023
D-4	1.269	2.943	60	1.364
D-5	1.496	3.469	75	1.705
E-1	0.373	0.865	15	0.341
E-2	0.584	1.354	30	0.682
E-3	1.014	2.352	45	1.023
E-4	1.163	2.697	60	1.364
E-5	1.378	3.196	75	1.705

表 B-3-2 解析結果（模型(b)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.281	0.652	15	0.341
A-2	0.561	1.301	30	0.682
A-3	0.974	2.259	45	1.023
A-4	1.219	2.827	60	1.364
A-5	1.519	3.523	75	1.705
B-1	0.499	1.157	15	0.341
B-2	0.747	1.732	30	0.682
B-3	1.076	2.495	45	1.023
B-4	1.285	2.980	60	1.364
B-5	1.565	3.629	75	1.705
C-1	0.547	1.269	15	0.341
C-2	0.795	1.844	30	0.682
C-3	1.112	2.579	45	1.023
C-4	1.323	3.068	60	1.364
C-5	1.600	3.711	75	1.705
D-1	0.500	1.160	15	0.341
D-2	0.747	1.732	30	0.682
D-3	1.073	2.488	45	1.023
D-4	1.282	2.973	60	1.364
D-5	1.561	3.620	75	1.705
E-1	0.283	0.656	15	0.341
E-2	0.563	1.306	30	0.682
E-3	0.973	2.256	45	1.023
E-4	1.216	2.820	60	1.364
E-5	1.513	3.509	75	1.705

表 B-3-3 解析結果（模型(c)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.267	0.619	15	0.341
A-2	0.386	0.895	30	0.682
A-3	0.631	1.463	45	1.023
A-4	0.741	1.718	60	1.364
A-5	0.888	2.059	75	1.705
B-1	0.261	0.605	15	0.341
B-2	0.400	0.928	30	0.682
B-3	0.711	1.649	45	1.023
B-4	0.834	1.934	60	1.364
B-5	1.013	2.349	75	1.705
C-1	0.264	0.612	15	0.341
C-2	0.533	1.236	30	0.682
C-3	0.875	2.029	45	1.023
C-4	1.049	2.433	60	1.364
C-5	1.266	2.936	75	1.705
D-1	0.261	0.605	15	0.341
D-2	0.400	0.928	30	0.682
D-3	0.710	1.647	45	1.023
D-4	0.834	1.934	60	1.364
D-5	1.011	2.345	75	1.705
E-1	0.266	0.617	15	0.341
E-2	0.385	0.893	30	0.682
E-3	0.629	1.459	45	1.023
E-4	0.734	1.702	60	1.364
E-5	0.885	2.052	75	1.705

表 B-3-4 解析結果（模型(d)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.400	0.928	15	0.341
A-2	0.596	1.382	30	0.682
A-3	1.151	2.669	45	1.023
A-4	1.392	3.228	60	1.364
A-5	1.655	3.838	75	1.705
B-1	0.576	1.336	15	0.341
B-2	0.853	1.978	30	0.682
B-3	1.212	2.811	45	1.023
B-4	1.445	3.351	60	1.364
B-5	1.741	4.038	75	1.705
C-1	0.622	1.442	15	0.341
C-2	0.905	2.099	30	0.682
C-3	1.259	2.920	45	1.023
C-4	1.486	3.446	60	1.364
C-5	1.778	4.123	75	1.705
D-1	0.577	1.338	15	0.341
D-2	0.853	1.978	30	0.682
D-3	1.213	2.813	45	1.023
D-4	1.445	3.351	60	1.364
D-5	1.743	4.042	75	1.705
E-1	0.406	0.942	15	0.341
E-2	0.592	1.373	30	0.682
E-3	1.160	2.690	45	1.023
E-4	1.378	3.196	60	1.364
E-5	1.666	3.864	75	1.705

表 B-3-5 解析結果（模型(e)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.393	0.911	15	0.341
A-2	0.608	1.410	30	0.682
A-3	1.050	2.435	45	1.023
A-4	1.198	2.778	60	1.364
A-5	1.411	3.272	75	1.705
B-1	0.459	1.064	15	0.341
B-2	0.670	1.554	30	0.682
B-3	1.133	2.628	45	1.023
B-4	1.293	2.999	60	1.364
B-5	1.515	3.513	75	1.705
C-1	0.469	1.088	15	0.341
C-2	0.680	1.577	30	0.682
C-3	1.145	2.655	45	1.023
C-4	1.307	3.031	60	1.364
C-5	1.535	3.560	75	1.705
D-1	0.460	1.067	15	0.341
D-2	0.671	1.556	30	0.682
D-3	1.132	2.625	45	1.023
D-4	1.293	2.999	60	1.364
D-5	1.521	3.527	75	1.705
E-1	0.393	0.911	15	0.341
E-2	0.606	1.405	30	0.682
E-3	1.041	2.414	45	1.023
E-4	1.192	2.764	60	1.364
E-5	1.424	3.302	75	1.705

表 B-3-6 解析結果（模型(f)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.195	0.452	15	0.341
A-2	0.455	1.055	30	0.682
A-3	1.058	2.454	45	1.023
A-4	1.433	3.323	60	1.364
A-5	1.872	4.341	75	1.705
C-1	1.057	2.451	15	0.341
C-2	1.257	2.915	30	0.682
C-3	1.487	3.449	45	1.023
C-4	1.641	3.806	60	1.364
C-5	1.861	4.316	75	1.705
E-1	0.222	0.515	15	0.341
E-2	0.465	1.078	30	0.682
E-3	1.107	2.567	45	1.023
E-4	1.492	3.460	60	1.364
E-5	1.862	4.318	75	1.705

表 B-3-7 解析結果（模型(g)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.401	0.930	15	0.341
A-2	0.611	1.417	30	0.682
A-3	1.046	2.426	45	1.023
A-4	1.196	2.774	60	1.364
A-5	1.412	3.275	75	1.705
B-1	0.467	1.083	15	0.341
B-2	0.672	1.558	30	0.682
B-3	1.129	2.618	45	1.023
B-4	1.291	2.994	60	1.364
B-5	1.513	3.509	75	1.705
C-1	0.474	1.099	15	0.341
C-2	0.680	1.577	30	0.682
C-3	1.141	2.646	45	1.023
C-4	1.305	3.026	60	1.364
C-5	1.530	3.548	75	1.705
D-1	0.460	1.067	15	0.341
D-2	0.670	1.554	30	0.682
D-3	1.132	2.625	45	1.023
D-4	1.292	2.996	60	1.364
D-5	1.514	3.511	75	1.705
E-1	0.387	0.897	15	0.341
E-2	0.601	1.394	30	0.682
E-3	1.042	2.417	45	1.023
E-4	1.195	2.771	60	1.364
E-5	1.417	3.286	75	1.705

表 B-3-8 解析結果（模型(h)、定常ケース）

	平均波圧(kPa)	無次元化波圧	計測高さ(mm)	無次元化浸水深
A-1	0.262	0.608	15	0.341
A-2	0.532	1.234	30	0.682
A-3	0.932	2.161	45	1.023
A-4	1.155	2.679	60	1.364
A-5	1.445	3.351	75	1.705
C-1	0.409	0.949	15	0.341
C-2	0.628	1.456	30	0.682
C-3	1.119	2.595	45	1.023
C-4	1.293	2.999	60	1.364
C-5	1.555	3.606	75	1.705
E-1	0.402	0.932	15	0.341
E-2	0.607	1.408	30	0.682
E-3	1.067	2.474	45	1.023
E-4	1.225	2.841	60	1.364
E-5	1.470	3.409	75	1.705

付録 C 数値計算手法

連続の式

連続の式は質量保存の法則によって、導出される。ここで、図 C-1 に示すような、密度 ρ、各辺の長さ(dx,dy,dz)の微小直方体の流量について考える。

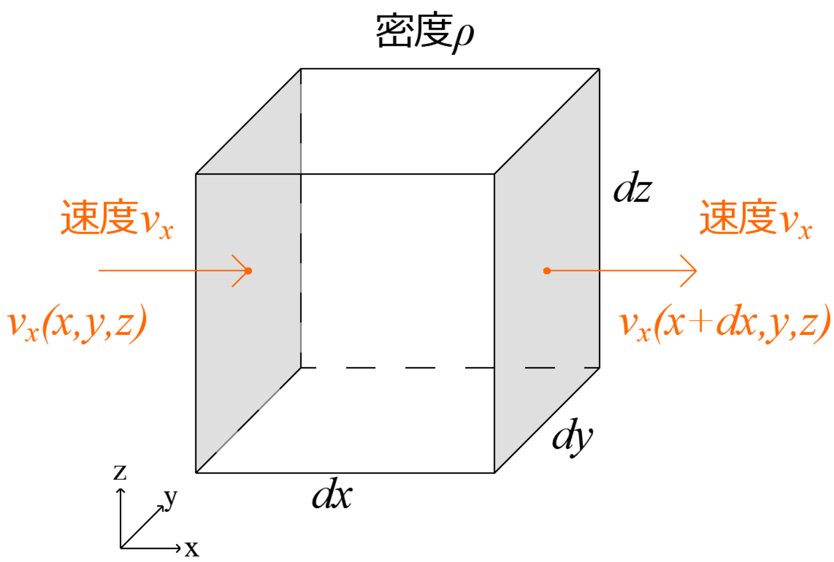


図 C-1 連続の式における微小直方体

図のように x 方向のみを考えると、流入する質量流量 $M_{x\,in}$ は座標(x,y,z)における x 方向の速度 $v_x(x,y,z)$を用いて、下式で表される。

$$M_{x\,in} = \rho v_x(x,y,z)dydz$$

一方で、流出する質量流量 $M_{x\,out}$ は座標$(x+dx,y,z)$における x 方向の速度 $v_x(x+dx,y,z)$を用いて、下式で表される。

$$\begin{aligned} M_{x\,out} &= \rho v_x(x+dx,y,z)dydz \\ &\approx \rho\left\{v_x(x,y,z) + \frac{\partial v_x(x,y,z)}{\partial x}dxdydz\right\} \end{aligned}$$

従って、x 方向における質量流量の変化量 ΔM_x は下式で表される。

$$\Delta M_x = M_{x\,in} - M_{x\,out} = -\rho dxdydz\frac{\partial v_x}{\partial x}$$

y 方向、z 方向も同様にして、

$$\Delta M_y = -\rho dxdydz\frac{\partial v_y}{\partial y} \quad , \quad \Delta M_z = -\rho dxdydz\frac{\partial v_z}{\partial z}$$

で示される。

従って、微小直方体の質量流量の変化量 ΔM は下式で表される。

$$\Delta M = \Delta M_x + \Delta M_y + \Delta M_z = -\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right)dxdydz$$

ここで、ΔM は単位時間での微小直方体の質量の変化量を表しているので、

$$\Delta M = \frac{\partial \rho}{\partial t} dxdydz$$

で示される。
以上より、連続の式は下式のように表される。

$$-\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) dxdydz = \frac{\partial \rho}{\partial t} dxdydz$$

$$\therefore \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = 0$$

この式は、速度ベクトル $\boldsymbol{v}(v_x\ v_y\ v_z)$とベクトル演算子 $\nabla\left(\frac{\partial}{\partial x}\ \frac{\partial}{\partial y}\ \frac{\partial}{\partial z}\right)$を用いると、下式のように変形できる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0$$

非圧縮性流体を考えると、密度は一定なので、$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ となる。

従って、非圧縮性流体における連続の式は(C.1)式となる。

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 \qquad \text{(C.1)}$$

Navier-Stokes 方程式

Navier-Stokes 方程式（以下、NS 方程式という）は質量 m、加速度 a、外力 F についての運動方程式 $ma=F$ より導出される。左辺について、図 C-2 に示すように密度 ρ、体積 V の微小直方体が、微小時間 dt で微小距離 $d\boldsymbol{r}$ だけ移動したときを考える。

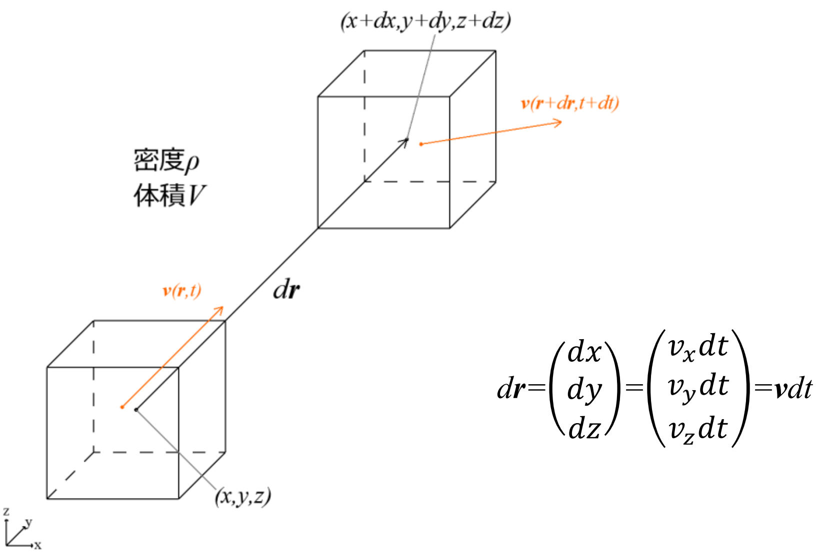


図 C-2 微小直方体の移動

図のように微小直方体が移動したとき、加速度 a は下式より求まる。

$$a=\frac{d\boldsymbol{v}}{dt}=\frac{\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r}+d\boldsymbol{r},t+dt)-\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r},t)}{dt}$$

$$\approx\frac{1}{dt}\left\{\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r},t)+\frac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial t}dt+\frac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial\boldsymbol{r}}d\boldsymbol{r}-\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r},t)\right\}$$

$$=\frac{1}{dt}\left\{\frac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial t}dt+\frac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial\boldsymbol{r}}d\,\boldsymbol{v}dt\right\}$$

$$=\frac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial t}+(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}$$

また、質量 m は次のようになる。

$$m=\rho V$$

以上より、運動方程式の左辺は(C.2)式で表される。

$$ma=\rho V\left\{\frac{\partial\boldsymbol{v}}{\partial t}+(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}\right\} \tag{C.2}$$

右辺の外力 F について、圧力項、粘性項、外力項に分けて考える。
圧力項について、図 C-3 に示すような座標(x,y,z)を中心に持つ、各辺の長さ(dx,dy,dz)、体積 V の微小直方体を考える。

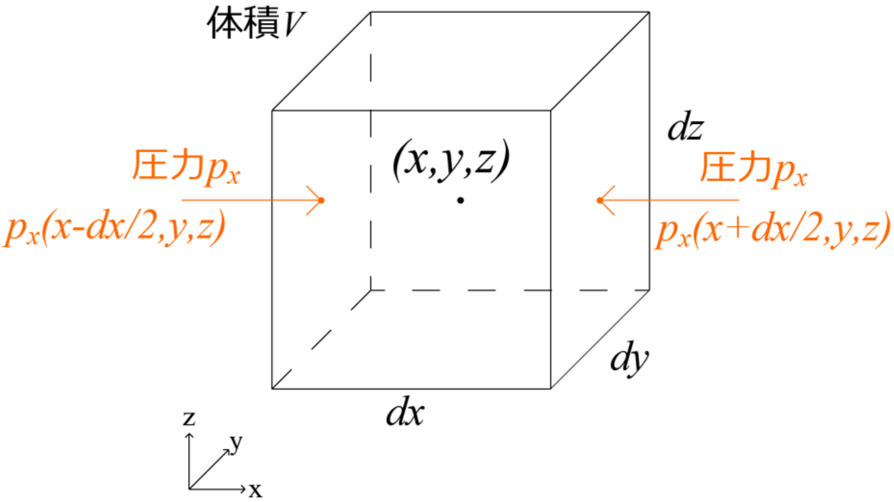


図 C-3 圧縮力を受ける微小直方体

図より、x 方向に働く圧縮合力 P_x は以下のようになる。

$$P_x=\left\{p_x(x-\frac{dx}{2},y,z)-p_x(x+\frac{dx}{2},y,z)\right\}dydz$$

$$\approx\left[p_x(x,y,z)-\frac{dx}{2}\frac{\partial p_x(x,y,z)}{\partial x}-\left\{p_x(x,y,z)+\frac{dx}{2}\frac{\partial p_x(x,y,z)}{\partial x}\right\}\right]dydz$$

$$=-\frac{\partial p_x(x,y,z)}{\partial x}V$$

y 方向、z 方向も同様にして、

$$P_y = -\frac{\partial p_{\mathrm{y}}(x,y,z)}{\partial y}V \quad , \quad P_z = -\frac{\partial p_{\mathrm{z}}(x,y,z)}{\partial z}V$$

となる。従って、圧縮合力 P は(C.3)式で表される。

$$P = -V\left(\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\right)p$$

$$= -V\nabla p \tag{C.3}$$

粘性項を導出する。i 面で j 方向にかかる粘性応力 τ_{ij} は流体速度 v と粘性係数 μ を使い、(C.4)式で表される。

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial v_{\mathrm{i}}}{\partial x_j}+\frac{\partial v_{\mathrm{j}}}{\partial x_i}\right) \tag{C.4}$$

ここで i,j は 1,2,3 をとる変数であって、1,2,3 はそれぞれ x,y,z に対応している。
図 C-4 に示す体積 V、各辺の長さが(dx,dy,dz)の微小直方体を考える。

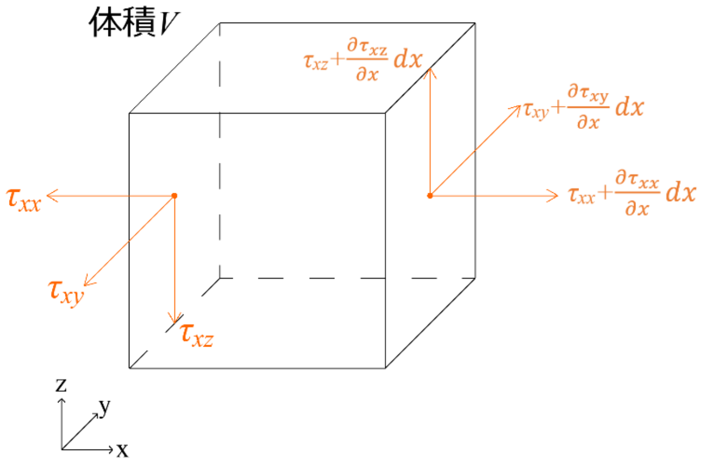


図 C-4 粘性応力（x 面のみ記載）を受ける微小直方体

図より、他の面でも同様に粘性応力を受けると考えると、x 方向に働く粘性合力 T_{x} は次のようになる。

$$T_x = \frac{\partial\tau_{\mathrm{xx}}}{\partial x}dxdydz + \frac{\partial\tau_{\mathrm{yx}}}{\partial y}dydxdz + \frac{\partial\tau_{\mathrm{zx}}}{\partial z}dzdxdy$$

$$= \left(\frac{\partial\tau_{\mathrm{xx}}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{\mathrm{yx}}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{\mathrm{zx}}}{\partial z}\right)V$$

x 方向に働く粘性合力 T_{x} は、(付 3.4)式を用いると、以下のように変形できる。

$$T_x = V\mu\left\{\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial x}+\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial x}+\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial v_{\mathrm{z}}}{\partial x}+\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial z}\right)\right\}$$

$$= V\mu\left\{\frac{\partial^2 v_{\mathrm{x}}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v_{\mathrm{x}}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v_{\mathrm{x}}}{\partial z^2}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial x}+\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial y}+\frac{\partial v_{\mathrm{z}}}{\partial z}\right)\right\}$$

$$= V\mu\left(\nabla^2 v_{\mathrm{x}}+\frac{\partial}{\partial x}\nabla\cdot\boldsymbol{v}\right)$$

ここで、ラプラス演算子 $\nabla^2\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}\ \frac{\partial^2}{\partial y^2}\ \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$とする。

非圧縮性流体のとき、連続の式より、$\nabla\cdot\boldsymbol{v}=0$なので、

$$T_x = V\mu\nabla^2 v_{\mathrm{x}}$$

となる。

y 方向、z 方向も同様に考えると、次のようになる。

$$T_y = V\mu\nabla^2 v_{\mathrm{y}}\ ,\quad T_z = V\mu\nabla^2 v_{\mathrm{z}}$$

従って、粘性合力 T は(C.5)式となる。

$$\begin{aligned} T &= V\mu\nabla^2 v_{\mathrm{x}} + V\mu\nabla^2 v_{\mathrm{y}} + V\mu\nabla^2 v_{\mathrm{z}} \\ &= V\mu\nabla^2\boldsymbol{v} \end{aligned} \tag{C.5}$$

外力項について、単位質量、単位体積あたりの外力を f とすると、微小直方体が受ける外力 F は(C.6)式となる。

$$F = \rho V f \tag{C.6}$$

(C.2)式、(C.3)式、(C.5)式、(C.6)式より、NS 方程式は運動方程式
$ma = F$から、動粘性係数$\nu(=\mu/\rho)$を用いて、(C.7)式で導出される。

$$\rho V\left\{\frac{\partial v}{\partial t} + (\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}\right\} = V(-\nabla p + \mu\nabla^2\boldsymbol{v} + \rho f)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial v}{\partial t} + (\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\boldsymbol{v} + f \tag{C.7}$$

LES の標準 Smagorinsky モデル

LES(Large Eddy Simulation)は、流れ場の乱れを格子スケール(Grid Scale : GS)と格子以下のスケール(Sub Grid Scale : SGS)に分解し、GS 成分を直接計算し、SGS 成分をモデル化して非定常計算を行う乱流モデルである。

エネルギーカスケードという渦の発生から散逸までの流れを図 C-5 の上部、乱流の速度から得られるエネルギースペクトル E と波数 k の関係を図 C-5 の下部に示す。図上部に示す通り、流れ場のスケール（壁面の段差など）からエネルギーが与えられて大きな渦が発生する。その後、分裂を繰り返し、最終的にこれ以上分裂できない最小スケールになった渦が粘性によって、熱となって散逸する。

ここで、乱流はエネルギー保有領域と普遍平衡領域に分けられる。エネルギー保有領域における大きな渦は、流れ場のスケールに依存した流れ場固有のものであり、乱流のエネルギーの大部分を保有している。普遍平衡領域では、流れ場の影響を受けず、どんな流れ場においても普遍的な小さな渦となる。また、普遍平衡領域は分裂だけを繰り返す慣性小領域と熱となって散逸する散逸領域に分けられる。

LES では、格子サイズを慣性小領域内に設定し、どんな流れ場においても普遍的な小さな渦となる SGS 成分についてモデル化する。

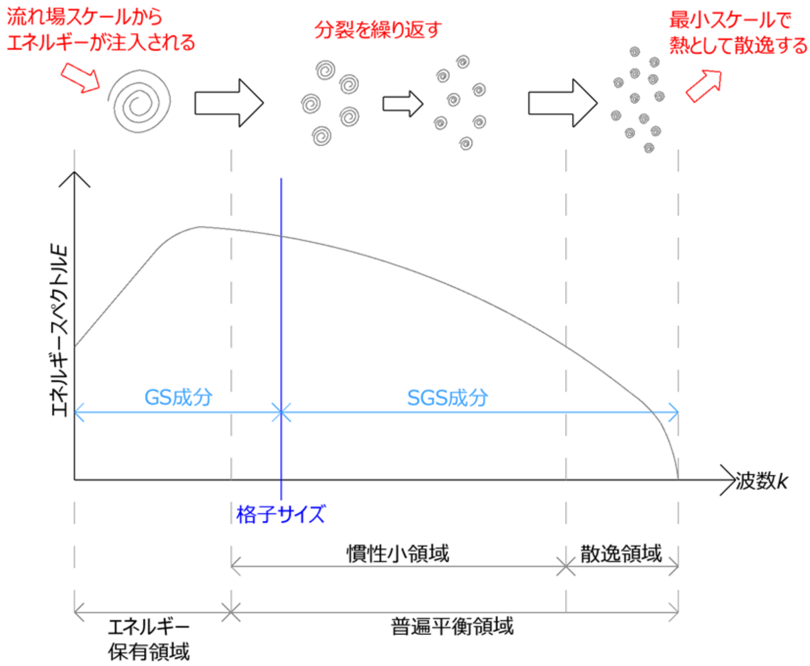


図 C-5 エネルギーカスケードと LES 概略図

LES の標準 Smagorinsky モデルによる乱流のモデル化にあたって、NS 方程式を応力テンソル $\boldsymbol{T}$ によって、書き換える。応力テンソル $\boldsymbol{T}$ は圧力による垂直応力 p、粘性応力による垂直応力 τ_{ii}、せん断応力 τ_{ij} で下式のように書くことができる。

$$\boldsymbol{T} = -p\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \tau_{yy} & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

ここで、(C.4)式用いると、以下のようになる。

$$\boldsymbol{T} = -p\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \mu\left\{\begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial y} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} & \frac{\partial v_y}{\partial z} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{pmatrix}\right\}$$

$$= -p\boldsymbol{I} + 2\mu\boldsymbol{D}$$

ここで、$\boldsymbol{I}$ を基本テンソル、$\boldsymbol{D}$ をひずみ速度テンソルとして、以下のように定義する。

$$\boldsymbol{I} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad , \quad \boldsymbol{D} = \frac{1}{2}\{\nabla\boldsymbol{v} + (\nabla\boldsymbol{v})^T\}$$

ここで、上付添え字 T は転置を表す。

応力テンソル $\boldsymbol{T}$ を使って、NS 方程式を書き換えると、以下のようになる。以下ここでは、外力項を省略する。

$$\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t}+(\boldsymbol{v}\cdot\nabla)\boldsymbol{v}=\frac{1}{\rho}\nabla\boldsymbol{T}$$

$$=-\frac{1}{\rho}\nabla p+2\nu\nabla\boldsymbol{D}$$

$$=-\frac{1}{\rho}\nabla p+\nu\nabla\{\nabla\boldsymbol{v}+(\nabla\boldsymbol{v})^T\}$$

ここで、アインシュタインの総和規則を用いると、連続の式は(C.8)式、NS 方程式は(C.9)式で表すことができる。

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i}=0 \tag{C.8}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t}+\frac{\partial(v_i v_j)}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right) \tag{C.9}$$

(C.8)式と(C.9)式で表される連続の式と NS 方程式に対して、平均操作を行う。
平均操作によって、速度 v_i と圧力 p は GS 成分である平均値$(\overline{v_i},\overline{p})$と SGS 成分である変動値$(v_i{}',p')$に分けられる。

$$v_i=\overline{v_i}+v_i{}' \quad , \quad p=\overline{p}+p'$$

ここで、

$$\overline{\frac{\partial f}{\partial t}}=\frac{\partial\overline{f}}{\partial t} \quad , \quad \overline{\frac{\partial f}{\partial x}}=\frac{\partial\overline{f}}{\partial x}$$

と仮定し、(C.8)式に平均操作を行うと、連続の式は以下のようになる。

$$\overline{\frac{\partial v_i}{\partial x_i}}=0 \Leftrightarrow \frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_i}=0 \tag{C.10}$$

また、(C.9)式に平均操作を行うと、NS 式は以下のようになる。

$$\overline{\frac{\partial v_i}{\partial t}}+\overline{\frac{\partial(v_i v_j)}{\partial x_j}}=-\frac{1}{\rho}\overline{\frac{\partial p}{\partial x_i}}+\nu\overline{\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial\overline{v_i}}{\partial t}+\frac{\partial(\overline{v_i v_j})}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i}\right)$$

両辺から$\frac{\partial(\overline{v_i v_j})}{\partial x_j}$を引き、$\frac{\partial(\overline{v_i}\,\overline{v_j})}{\partial x_j}$を加えると、

$$\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial t}+\frac{\partial(\overline{v_i}\,\overline{v_j})}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial(\overline{v_i v_j})}{\partial x_j}+\frac{\partial(\overline{v_i}\,\overline{v_j})}{\partial x_j}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial\overline{v_i}}{\partial t}+\frac{\partial(\overline{v_i}\,\overline{v_j})}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial\overline{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\nu\left(\frac{\partial\overline{v_i}}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_i}\right)-\tau_{ij}\right\} \tag{C.11}$$

ここで、$\tau_{ij}=(\overline{v_i v_j})-(\overline{v_i}\,\overline{v_j})$とする。

以上より得られた(C.10)式と(C.11)式で表される連続の式、NS 方程式を用いることで、格子スケール以下の流れ場(v_i', p')を解かないで、GS 流れ場$(\overline{v_i}, \overline{p})$のみを計算できる。しかし、(C.11)式で表される NS 方程式には、GS 成分$(\overline{v_i}, \overline{p})$では表すことのできない$\overline{v_i v_j}$を含む τ_{ij} が存在している。τ_{ij} は平均操作によって粗視化された流れにおける残余の応力であり、SGS 応力と呼ばれる。そのため、LES では τ_{ij} を求めるモデル式を導入し、計算を行う。

粘性応力は(C.4)式で表されるように、粘性係数と速度勾配の積で与えられる。これより、乱流応力も渦による拡散を表す係数と平均速度勾配の積で与えられるとすると、

$$\tau_{ij} = -\nu_e\left(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{3}\tau_{ii}\delta_{ij} = -2\nu_e\overline{\boldsymbol{D}_{ij}} + \frac{1}{3}\tau_{ii}\delta_{ij} \tag{C.12}$$

と表される。ここで、ν_e は渦動粘性係数、$\overline{\boldsymbol{D}_{ij}}$はひずみ速度テンソルを表し、

$$\overline{\boldsymbol{D}_{ij}} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial x_i}\right)$$

である。また、δ_{ij} はクロネッカーのデルタと呼ばれ、

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 \ (i = j) \\ 0 \ (i \neq j) \end{cases}$$

である。

(C.12)式の右辺第 1 項は先述した通り、(C.4)式で表される粘性応力の式と似ている。

また、(C.12)式には、右辺第 2 項が追加されている。追加項の必要性について説明するため、右辺第 2 項を除いた式の挙動を見る。

ここで、すべての垂直応力の和をとる（すなわち、$i = j$で$i = 1,2,3$）と、

$$\tau_{ii} = -\nu_e\left(\frac{\partial \overline{v_x}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v_y}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v_z}}{\partial z}\right) = -\nu_e\nabla\cdot\overline{\boldsymbol{v}}$$

となる。非圧縮性流体の場合、(C.1)式で表される連続の式より、

$$\tau_{ii} = -\nu_e\nabla\cdot\overline{\boldsymbol{v}} = 0$$

となり、SGS 応力 τ_{ij} の垂直応力成分が存在しないこととなる。そのため、垂直応力をそれぞれ 1/3 ずつ割り当てるような項を追加することで整合性をとっている。

(C.12)式で表される SGS 応力 τ_{ij} を(C.11)式で表される NS 方程式に用いると、

$$\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{v_i}\,\overline{v_j})}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{2(\nu + \nu_e)\overline{\boldsymbol{D}_{ij}}\right\}$$

となる。ここで、$\overline{P} = \overline{p} + \frac{1}{3}\rho\tau_{ii}$である。

このとき、渦動粘性係数 ν_e を与え、(C.10)式で表される連続の式と連立させれば、GS 流れ場$(\overline{v_i}, \overline{p})$について解くことができる。

Smagorinsky モデルでは、動粘性係数 ν が次元 m^2/s で表されることから、渦動粘性係数 ν_e も同様にして、次元 m^2/s で表すことができるとしてモデル化を行う。ここで、渦動粘性係数 ν_e は長さスケールと速度スケールの積で表されるとする。長さスケールには、フィルター幅 Δ をとる。ここで、フィルター幅 Δ は x,y,z 方向のフィルター幅 $\Delta_x,\Delta_y,\Delta_z$ を使い、

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta_x \Delta_y \Delta_z}$$

と表される。
速度スケールには、長さスケール Δ と解像した流れの平均ひずみ速度$\left|\overline{D_{ij}}\right|$の積$\Delta \times \left|\overline{D_{ij}}\right|$をとる。ここで、

$$\left|\overline{D_{ij}}\right| = \sqrt{2\overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}}}$$

である。よって、渦動粘性係数 ν_e は(C.13)式で評価できる。

$$\nu_e = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\overline{D_{ij}}\,\overline{D_{ij}}} \qquad \text{(C.13)}$$

ここで、C_s は Smagorinsky 定数とよばれ、Smagorinsky モデルにおいて与えるべき唯一の無次元定数である。Smagorinsky 定数は$C_s = 0.10 \sim 0.20$程度をとることが分かっており、流れ場に応じて適切に設定する必要があることが知られている。

クーラン数

クーラン数 C は流体の速度を v、1 ステップでの時間間隔を Δt、要素間の距離を Δx とすると、(C.14)式で表される。クーラン数は実現象の物理的な伝達速度 v と情報の数値的な伝達速度($\Delta x/\Delta t$)の比を表す無次元量である。クーラン数 C が 1 以上、即ち、物理的な伝達速度 v が数値的な伝達速度($\Delta x/\Delta t$)より大きい場合、情報の伝達速度が実現象の伝達速度に追従できず、計算が不安定になってしまう。よって、計算を安定させるには$C \leq 1.0$を満たす必要があり、このことは CFL 条件と呼ばれている。

$$C = \frac{v\Delta t}{\Delta x} \qquad \text{(C.14)}$$

有限体積法

有限体積法の説明にあたって、輸送方程式とガウスの発散定理について説明する。
NS 方程式や連続の式などの流体の基礎方程式は、一般的な変数 Φ を導入し、共通して次の形で書くことができる。

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\phi\boldsymbol{u}) = \nabla\cdot(k\nabla\phi) + S_\phi \tag{C.15}$$

ここで、k を拡散係数、S_Φ をソース項とする。
(C.15)式は変数 Φ に対する輸送方程式として、知られている。
例えば、(C.15)式で$\phi = \boldsymbol{u}$、$k = \mu$とし、S_Φ で圧力項、外力項を表すと、NS 方程式となり、$\phi = 1$、$k = S_\phi = 0$とすれば、連続の式となる。

あるベクトル **a** に対して、ガウスの発散定理を用いると、下式が成り立つ。

$$\int_V \nabla\cdot\boldsymbol{a}dV = \int_S \boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{a}dS$$

ここで、**n** は領域表面の法線ベクトルを表す。
左辺は、ある立体におけるベクトル **a** の発散の体積積分を表す。これは、連続の式の導出でも述べたように、ベクトル **a** が立体内部から湧き出る量を表す。右辺について、$\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{a}$は表面要素 dS に対して、垂直なベクトル $\boldsymbol{n}$ 方向のベクトル $\boldsymbol{a}$ の成分を表す。よって、右辺は$\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{a}$の面積分、即ち、立体表面を通ってベクトル **a** が流出する量を表す。
従って、ガウスの発散定理は、ある立体において、ベクトル **a** が立体内部から湧き出る量は、立体表面を通って流出する量と等しいことを示している。

有限体積法では、図 C-6 のように連続体をセルとよばれる多面体で分割する。図に示す通り、注目セル P の代表値を Φ_P、隣接セル N の代表値を Φ_N、境界面 f の代表値 Φ_f と表す。
有限体積法では、(C.15)式で表される輸送方程式をセルの体積積分の形で次のように表す。

$$\int\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}dV + \int\nabla\cdot(\rho\phi\boldsymbol{u})dV = \int\nabla\cdot(k\nabla\phi)dV + \int S_\phi dV$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial(\rho\phi_P)}{\partial t}V_p + \int\nabla\cdot(\rho\phi\boldsymbol{u})dV = \int\nabla\cdot(k\nabla\phi)dV + S_P V_P \tag{C.16}$$

ここで、ガウスの発散定理より、

$$\int\nabla\cdot(\rho\phi\boldsymbol{u})dV = \rho\int(\phi\boldsymbol{u})\cdot\boldsymbol{n}dS = \rho\sum\phi_f\boldsymbol{u}_f\cdot\boldsymbol{S}_f$$

となる。$\boldsymbol{n}$ は領域表面の法線ベクトル、$\boldsymbol{S}_f$ はセルを構成するそれぞれの面に垂直でそれぞれの面積を大きさとしてもつベクトル（面積ベクトル）とする。
また、同様にして、

$$\int\nabla\cdot(k\nabla\phi)dV = \int(k\nabla\phi)\cdot\boldsymbol{n}dS = \sum k_f(\nabla\phi)_f\cdot\boldsymbol{S}_f$$

となる。

従って、(C.16)式は下式のようになる。

$$\frac{\partial(\rho\phi_P)}{\partial t}V_p+\rho\sum\phi_f\boldsymbol{u}_f\cdot\boldsymbol{S}_f=\sum k_f(\nabla\phi)_f\cdot\boldsymbol{S}_f+S_PV_P$$

ここで、離散化に使える値は注目セル P の代表値 Φ_P と隣接セル N の代表値 Φ_N の 2 つのみである。そのため、Φ_f や $(\nabla\Phi)_f$ といった境界面 f の代表値が未知数となる。有限体積法では、2 つのセルの間にある境界面 f の代表値 Φ_f は Φ_P と Φ_N を用いて、補完される。この補完や離散化の方法のことを、離散化スキームという。

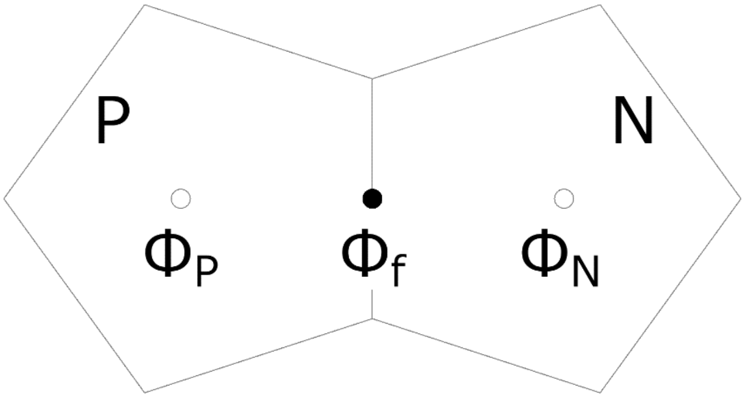


図 C-6 有限体積法のセル

離散化スキーム

本研究で用いた 1 次精度陰解法と 2 次精度中心差分について、解説する。
ある関数 Φ(x)を考える。$x+\Delta x$でテイラー展開すると、以下のようになる。

$$\phi_{(x+\Delta x)}=\phi_{(x)}+\frac{d\phi_{(x)}}{dx}\Delta x+\cdots$$

展開を第 2 項で打ち切り、変形すると、

$$\frac{d\phi_{(x)}}{dx}\approx\frac{\phi_{(x+\Delta x)}-\phi_{(x)}}{\Delta x}$$

となる。これを関数 Φ(x)の微分の差分近似という。

ここで、図 C-7 のように点の座標を $x_1,x_2,\cdots x_n$ と表す。このとき、格子点間の距離は Δx とする。また以降、$\phi_{(x_i)}=\phi_i$と表す。

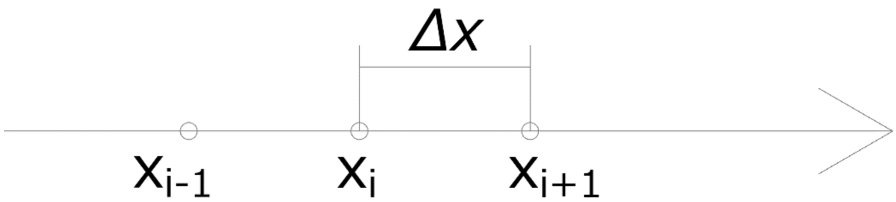


図 C-7 格子点

$\Phi_{\text{i-1}}$でテイラー展開すると、

$$\phi_{i-1} = \phi_i - \frac{d\phi_i}{dx}\Delta x + O(\Delta x^2)$$

となる。ここで、$O(\Delta x^2)$をオーダーという。展開を打ち切る際、このオーダーが打ち切り誤差となる。上式を変形する。

$$\frac{d\phi_i}{dx} = \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x)$$

右辺第 2 項を無視すると、

$$\frac{d\phi_i}{dx} \approx \frac{\phi_i - \phi_{i-1}}{\Delta x}$$

となる。

ここで、無視した $O(\Delta x)$は Δx の 1 乗のオーダーであり、$x_{\text{i-1}}$ を使ったものなので、この一階微分の差分近似は、1 次精度陰解法という。

　また、関数 $\Phi(x)$について、$\Phi_{\text{i-1}}$ と $\Phi_{\text{i+1}}$ でテイラー展開すると、

$$\phi_{i-1} = \phi_i - \frac{d\phi_i}{dx}\Delta x + \frac{d^2\phi_i}{2dx^2}\Delta x^2 + O(\Delta x^3)$$

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \frac{d\phi_i}{dx}\Delta x + \frac{d^2\phi_i}{2dx^2}\Delta x^2 + O(\Delta x^3)$$

となる。ここで、$\phi_{i+1} - \phi_{i-1}$をとると、

$$\frac{d\phi_i}{dx} = \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2\Delta x} + O(\Delta x^2)$$

となり、右辺第 2 項を無視すると、

$$\frac{d\phi_i}{dx} \approx \frac{\phi_{i+1} - \phi_{i-1}}{2\Delta x}$$

となる。これを一階微分の 2 次精度中心差分という。

　同様にして、関数 $\Phi(x)$について、$\Phi_{\text{i-1}}$ と $\Phi_{\text{i+1}}$ でテイラー展開すると、

$$\phi_{i-1} = \phi_i - \frac{d\phi_i}{dx}\Delta x + \frac{d^2\phi_i}{2dx^2}\Delta x^2 - \frac{d^3\phi_i}{6dx^3}\Delta x^3 + O(\Delta x^4)$$

$$\phi_{i+1} = \phi_i + \frac{d\phi_i}{dx}\Delta x + \frac{d^2\phi_i}{2dx^2}\Delta x^2 + \frac{d^3\phi_i}{6dx^3}\Delta x^3 + O(\Delta x^4)$$

となる。ここで、$\phi_{i+1} + \phi_{i-1}$をとると、

$$\phi_{i+1} + \phi_{i-1} = 2\phi_i + \frac{d^2\phi_i}{dx^2}\Delta x^2 + O(\Delta x^4)$$

となる。

これを変形して、

$$\frac{d^2\phi_i}{dx^2} = \frac{\phi_{i+1} - 2\phi + \phi_{i-1}}{\Delta x^2} + O(\Delta x^2)$$

となり、右辺第 2 項を無視すると、

$$\frac{d^2\phi_i}{dx^2} \approx \frac{\phi_{i+1} - 2\phi + \phi_{i-1}}{\Delta x^2}$$

となる。これを二階微分の 2 次精度中心差分という。

PIMPLE 法

図 C-8 に PIMPLE 法の計算手順を示す。図に示すように、PIMPLE 法では、圧力の計算と速度の補正をイテレーションループで指定した回数繰り返し、圧力と速度の連成を行う。本研究では、イテレーションループの回数を 2 とした。

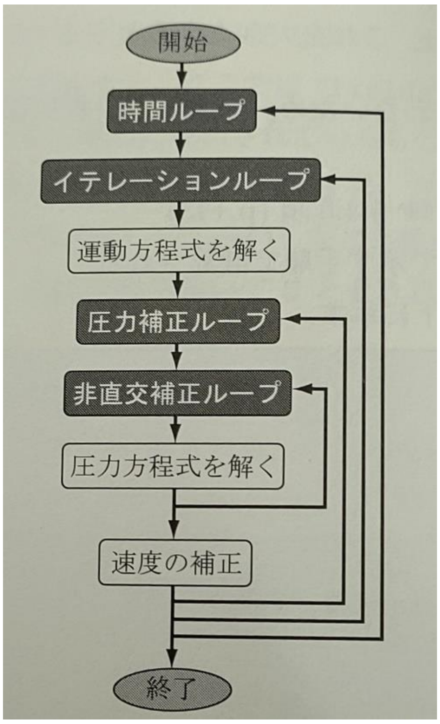


図 C-8 PIMPLE 法の手順

出典・文献 22),一般社団法人オープン CAE 学会 (2021)p.100

付録 参考文献

21) 石綿良三:流体力学入門,森北出版株式会社,2000.4

22) 一般社団法人オープン CAE 学会,OpenFOAM による熱移動と流れの数値解析第 2 版,森北出版株式会社,2021.3

23) H.K.Versteeg＆W.Malalasekera 原著,松下洋介・斎藤泰洋・青木秀之・三浦隆利共訳,数値流体力学第 2 版,森北出版株式会社,2011.5

24) 梶島岳夫,乱数の数値シミュレーション改訂版,養賢堂,2014.7