

津波波圧の評価 －非先端部荷重－

清水建設 長谷部 雅伸
構造計画研究所 奥野 峻也



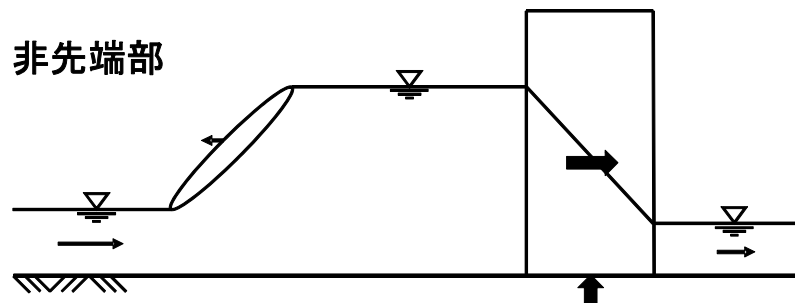
本報告における津波非先端部の扱い

非先端部

- 流れ場中の構造物に作用する波力に着目
- 水平荷重は多くの指針で抗力係数を用いて算定
- 鉛直荷重は揚圧力・浮力の適切な考慮が必要

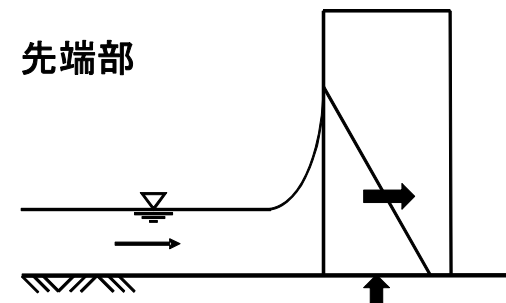
先端部

- 構造物前面（片側）に作用する波力に着目
- 水平荷重は多くの指針で水深係数を用いて算定



津波非先端部

(流れ場中の波力を評価)



津波先端部

(片側のみに作用する波力を評価)

津波非先端部で対象とする荷重

水平荷重

- 持続波力：持続波力による波圧分布を陽に仮定する算定式を対象
⇒波圧分布を積分することで荷重に換算算定可
- 抗力：抗力の考え方をを用いる算定式を対象
⇒等価な圧力分布の仮定により波圧に換算できる場合も

鉛直荷重

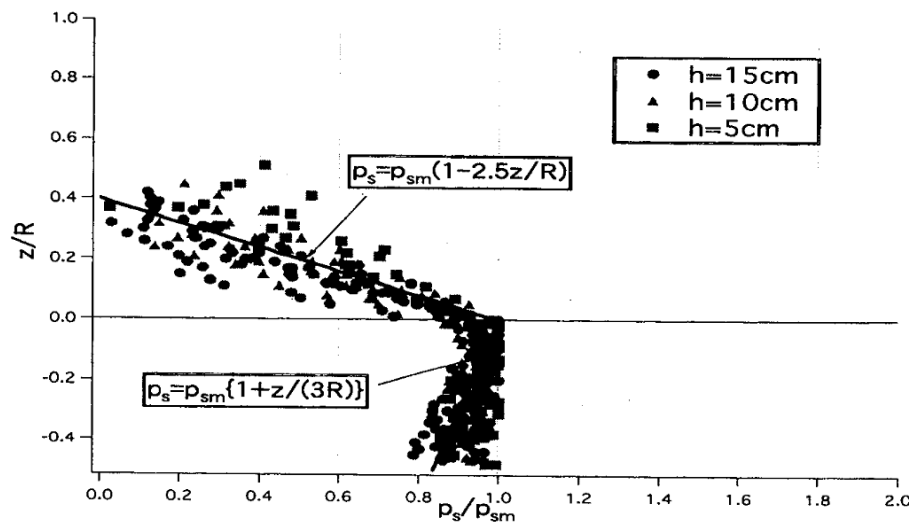
- 浮力：没入体積重心に作用する静水圧を評価
 - 全揚圧力：動水圧相当の力、構造物の特性により適切に考慮
- その他、海水重量による上載荷重を適切に考慮する必要がある

対象構造物	出展資料（基準・ガイドライン）	発行者	発行年	抗力	揚圧力	浮力
橋梁	東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 最終報告書	土木学会地盤工学委員会東日本大震災 による橋梁等の被害分析小委員会	2015	○	○	-
原子力 (胸壁,建築物)	原子力発電所耐津波設計技術規定 JEAC4629-2021	(社)日本電気協会 / 原子力規格委員会	2021	○	-	-
下水道施設	耐津波対策を考慮した下水道施設設計の考え方※1	国土交通省下水道部 / 下水道地震・津 波対策技術検討委員会	2012	-	-	○
ガス貯蔵施設	高圧ガス取扱施設における地震・津波時の対応に 関する調査報告書	経済産業省 / 高圧ガス保安協会	2013	○	○	○
津波避難ビル	津波避難ビル等の構造上の要件の解説	国土交通省国土技術政策総合研究所・ 一般社団法人建築性能基準推進協会	2012	-	-	○
建築物一般	建築物荷重指針・同解説 (2015)	日本建築学会	2015	○	○	○
避難施設 (港湾)	港湾の津波避難施設の設計ガイドライン	国土交通省港湾局	2013	○	-	○
その他	Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis (2008)	FEMA	2008	○	○	○
その他	Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-22)	ASCE	2022	○	○	○

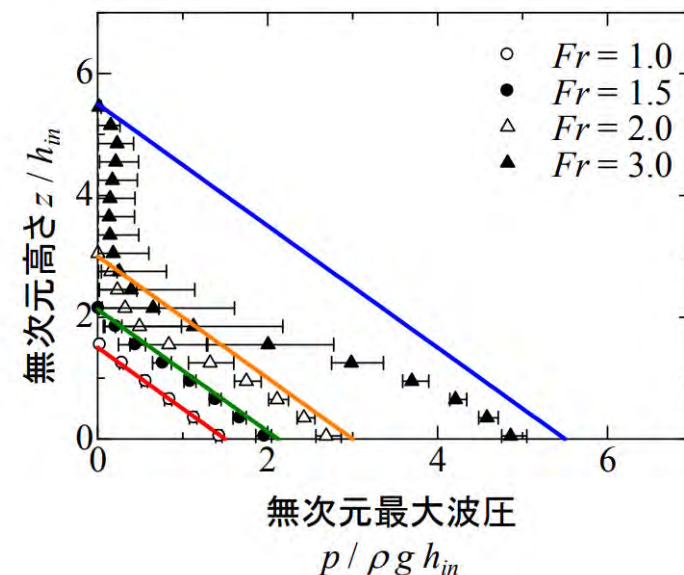
水平荷重：持続波力

津波の非先端部が構造物に作用する際の波圧分布は、海水密度・浸水深・流速を用いて鉛直方向に対して線形（または区分線形）の関数で算定する。

- 原子力（胸壁）に関しては、傾斜構造物に対する実験結果※¹を元に**静水位位置の波圧が最大となる区分線形関数**
- 建築物に関しては構造物最下端を最大とした**三角形の波圧分布**



原子力（胸壁）における波圧分布（※1）



原子力（建築物）における波圧分布（※2）

※1 水谷将・今村文彦：構造物に作用する段波波力の実験，海岸工学論文集，第47巻，pp.946-950 (2000)

※2 木原直人・高島大輔・吉井匠・池野正明・太田一行・田中伸和：陸上構造物に対する津波流体力評価（その1）—有限幅構造物に対する非越流条件での数値的検討一、電力中央研究所報告、N12010、pp.21-24 (2012)

対象構造物	算定式
原子力 (胸壁) [1]	<p>最大持続波圧</p> $p_{sm} = 0.14(2 + \cos \theta) \cdot p_{dm} c^2 / gh \quad (0 < \cos \theta < 0.71)$ $p_{sm} = 0.38 p_{dm} c^2 / gh \quad (0.71 < \cos \theta)$ <p>p_{sm} : 最大持続波圧、p_{dm} : 最大動波圧、c : 段波の波速、θ : 構造物の水平面からの傾斜勾配角度、H : 津波段波振幅</p> <p>持続波圧の鉛直分布</p> $p_s(z) = p_{sm}(1 - 2.5 z/R) \quad (z/R \geq 0)$ $p_s(z) = p_{sm}(1 + z/3R) \quad (z/R \leq 0)$ <p>R : 遡上高、z : 静水面上向き正の座標</p>
原子力 (建築物) [1]	$F = \frac{1}{2} \rho g \left(h_{in} + \frac{u_{in}^2}{2g} \right)^2 W$ $p = \rho g \left(h_{in} + \frac{u_{in}^2}{2g} - z \right)$ <p>F : 構造物に作用する流体力、p : 構造物に作用する圧力の鉛直分布、ρ : 流体密度、W : 構造物の幅、h_{in}、u_{in} : 対象とする構造物から代表的に流入津波水深の 5 倍程度上流側へ離れた地点での浸水深・流速</p>

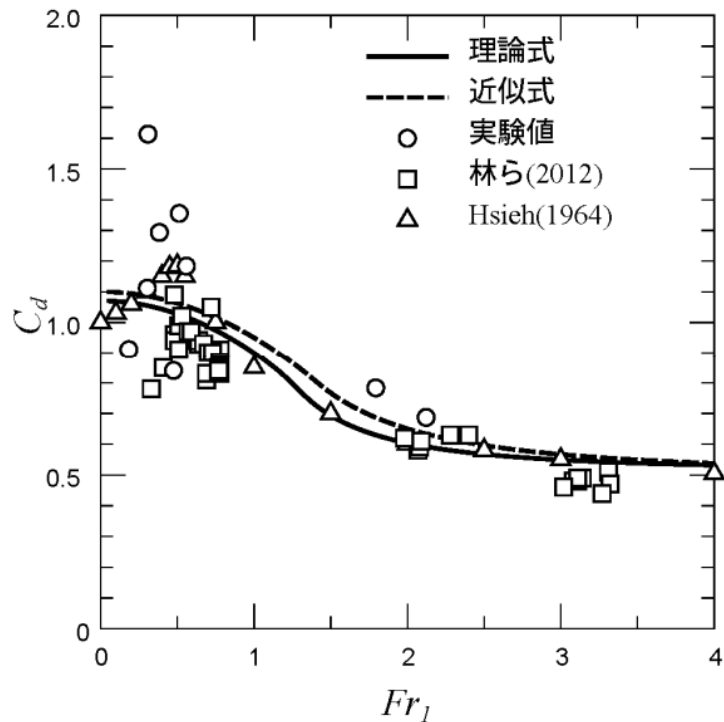
水平荷重：抗力

津波の非先端部が構造物等に作用する流れ方向の水平力は抗力が支配的であり、海水の密度、流速と構造物等の水没部の鉛直投影面積から算定可能である。

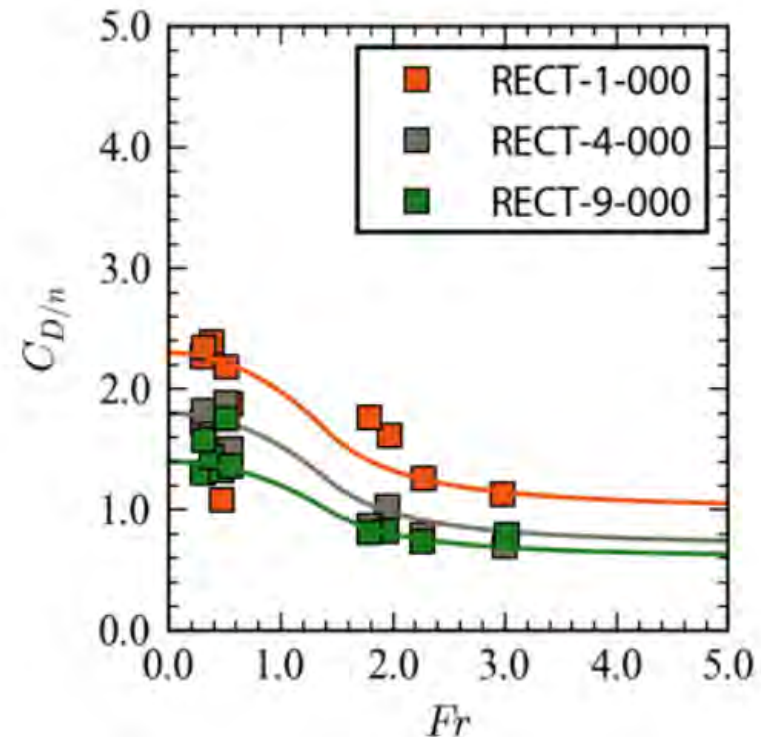
- 多くの算定式は構造物等の水没部の鉛直投影面積、海水密度、流速の二乗に構造物に応じた抗力係数を乗じた形で表現
- **流速、浸水深の定義は注意が必要**
通過波・非通過波、運動量フラックス最大時、流速最大時等の条件があり、算定式適用時には定義を要確認
- 基本的には**抗力が支配的**と考えて良いが、構造物によっては抗力の他に**波面の擾乱成分や慣性力項**を考慮する場合も
- 抗力から波圧分布への換算も可能
e.g.) 建築物荷重指針・同解説 (2015)：台形分布に換算

抗力係数のフルード数/設置条件への依存性

- 多くの指針では抗力係数を定数として取り扱うが、実際には
抗力係数はフルード数、柱の設置条件等に依存しうる
- e.g.) フルード数の増大に伴い抗力係数は低減する



円柱の抗力係数とフルード数
池谷ら (2014)



角柱の設置数と抗力係数
末長ら (2014)

対象構造物	算定式
橋梁（上部構造） [6]	$F_x = F_{xf} + F_{xw}$ $F_{xf} = \frac{1}{2} \rho C_d v^2 A_h \quad (\text{抗力})$ $F_{xw} = \alpha \rho g \eta'_H A_h \quad (\text{擾乱による作用力})$ $C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1(B/D) & 1 \leq B/D < 8 \\ 1.3 & 8 \leq B/D \end{cases}$ <p> F_x : 水平作用力(N)、F_{xf} : 流れによる水平作用力(N)、F_{xw} : 擾乱による水平作用力(N)、 ρ : 海水の密度(=1030kg/m³)、g : 重力加速度(=9.8m/s²)、C_d : 抗力係数、B : 橋の総幅(m)、D : 橋の総高(m)、v : シミュレーションで得た桁位置における桁が無い場合の最大水平方向流速(m/s)、α : 擾乱高さに乗じる係数(=1.9)、A_h : 有効鉛直投影面積(m²) </p>
原子力（建築物） [1]	<p>・ 構造物前面の浸水深を用いる評価式</p> $F_D = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 A = \frac{1}{2} \rho C_D u^2 h_f B / g$ $= 0.61 \gamma_w C_D h_f^2 B$ <p> F_D : 抗力、ρ : 流体の密度、C_D : 抵抗係数、u : 陸上での流速、A : 構造物浸水面積、 h_f : 前面浸水深、B : 構造物の幅、γ_w : 流体の単位体積重量 </p>

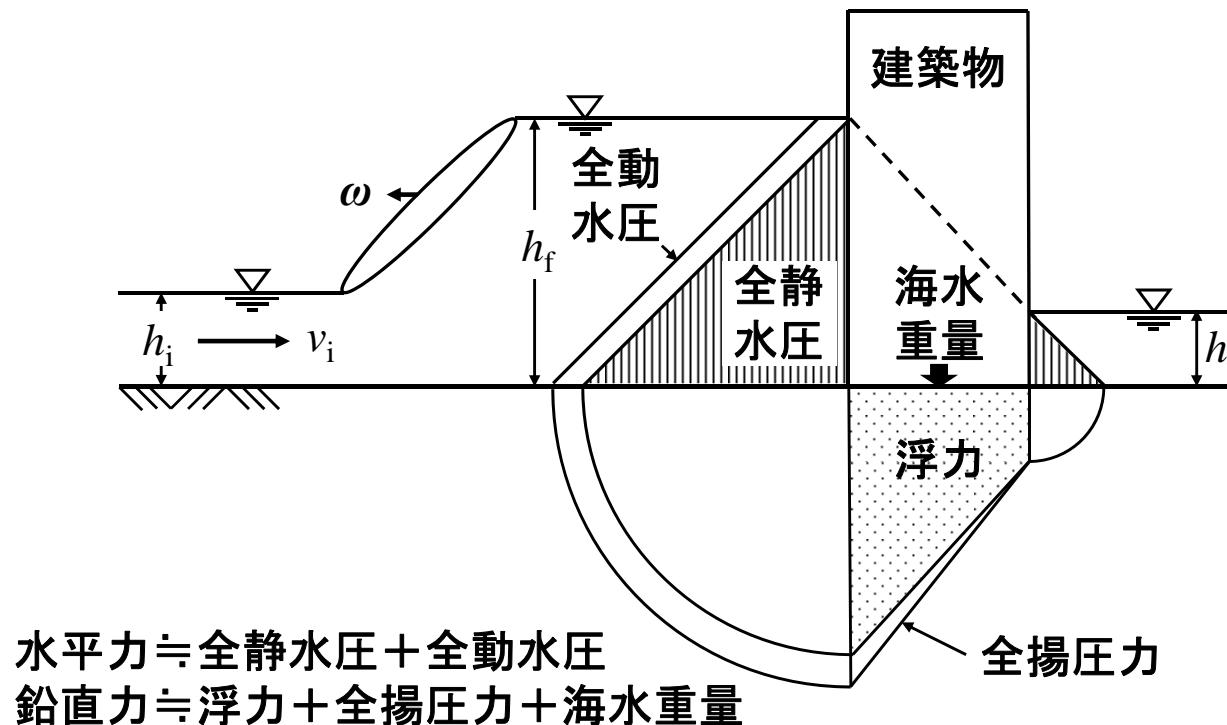
<p>港湾施設（港湾） 柱状骨組構造物 [18]</p>	$\vec{f}_n = \frac{1}{2} C_D \rho_0 \vec{u}_n \vec{u}_n D \Delta S + C_M \rho_0 \vec{a}_n A \Delta S$ <p>f_n : 部材軸方向に微小長さ ΔS(m) に作用する、部材軸と水粒子運動方向の共通面における部材軸に直角な方向の力(kN)、u_n、a_n : 部材と水粒子運動方向の共通面における部材軸直角方向の水粒子速度成分(m/s)及び加速度成分(m/s²)、u_n : u_n の絶対値、C_D : 抗力係数、C_M : 慣性力係数、D : f_n の方向から見た部材軸直角方向の部材幅(m)、A : 部材実に垂直な面で切った部材断面積(m²)、ρ_0 : 海水の密度(=1.03t/m³)</p>
--------------------------------------	---

<p>Buildings and Other Structures [22]</p>	<p><u>Overall Drag Force on Buildings and Other Structures</u></p> $F_{dx} = \frac{1}{2} \rho_s I_{tsu} C_d C_{cx} B (h_{sx} u^2)$ $C_{cx} = \frac{\Sigma(A_{col} + A_{wall}) + 1.5 A_{beam}}{B h_{sx}}$ <p>I_{tsu}: Importance Factor for tsunami forces to account for additional uncertainty in estimated parameters (1.0, 1.25, 1.5), B: width of overall building wall area, C_d: drag coefficient for the building (Table 6.10-1), $\rho_s (= k_s \rho_{sw})$: minimum fluid mass density, k_s: the fluid density factor 1.1, ρ_{sw}: seawater mass density (1025kg/m³), A_{col}, A_{wall}: vertical projected areas of all individual column and wall elements, A_{beam}: combined vertical projected area of the slab edge facing the flow and the deepest beam laterally exposed to the flow, h_{sx}: average of the story heights.</p>
--	---

鉛直荷重

鉛直荷重 F_A は、浮力 F_B 、全揚圧力 F_{UL} 、（構造物内部へ流入した）海水荷重 F_W の合力で表現される： $F_A = F_B + F_{UL} - F_W$

- 実際には津波や構造物、地盤などの実況次第で構成が変わりうるほか、各成分は必ずしも独立に算定されない



※建築物荷重指針・同解説(2015)より

鉛直荷重：浮力

浮力は没水した構造物の体積に作用する静水圧相当の力として算定する

- 橋梁（上部構造）、下水道施設、港湾施設（港湾）、津波避難ビル、高圧ガス、FEMA、ASCEいずれも**没水した構造物体積に作用する浮力**を計算
 - 建築物に関しては、津波作用構面と反対側構面の水位差を陽に考慮し全揚圧力を含む算定式
- 開口部がある場合、**没水体積を適切に考慮することで過剰設計を避ける余地**がある

津波避難ビル[14]	$Q_z = \rho g V$ <p>Q_z : 浮力(kN)、V : 津波に浸かった建築物の体積(m³)</p>
建築構造物[15]	$F_B = \frac{1}{2} \rho g (h_f + h_r) A$ <p>h_f : 津波作用構面における浸水深(m)、h_r : 反対側構面における浸水深(m)</p> <p>h_fは同指針の段波波力および非先端部の波力算定式に、反対側構面に働く全静水圧を加えた波力を全静水圧としたときの水深のうち、最大のものを採用する。h_rは、浸水深・流速の時系列が利用できる場合は h_f発生時の入射津波の浸水深を、それ以外の場合は入射津波の最大浸水深を採用する。ただし、反対側構面のすぐ背後が崖などの場合は $h_f = h_r$ とする。</p>

鉛直荷重：全揚圧力

全揚圧力は動水圧に起因する鉛直上向きの力であり、構造物の形状に応じて適切に考慮する

- 橋梁（上部構造）、FEMAおよび高圧ガス、ASCEでは**水位上昇時における構造物上部への抗力**として考慮
 - 橋梁では波面の擾乱による作用力を想定し、同報告書の段波波力と同一の式に基づき算出
 - FEMAおよび同指針を採用した高圧ガスでは、流体の鉛直方向流速と構造物上部の作用面積から、抗力係数を用いて算出
 - ASCEでは部材毎に算定式、特にパイプラインでは**フルード数に依存する区分線形関数**を与える

<p>Above-Ground Horizontal Pipelines [22]</p>	<p><u>The upward vertical force per unit length</u></p> $F_{l+} = C_{cp} C_l^+ \rho_s I_{tsu} D_p u^2$ <p>C_{cp}: 1.5, C_l^+: upward lift coefficient as given in Table 6.10-4 or in Figure 6.10-2.</p> <p><u>The downward vertical force per unit length:</u></p> $F_{l-} = C_{cp} C_l^- \rho_s I_{tsu} D_p u^2$ <p>C_{cp}: 1.5, C_l^-: downward lift coefficient as given in Table 6.10-5 or in Figure 6.10-3.</p>
---	--

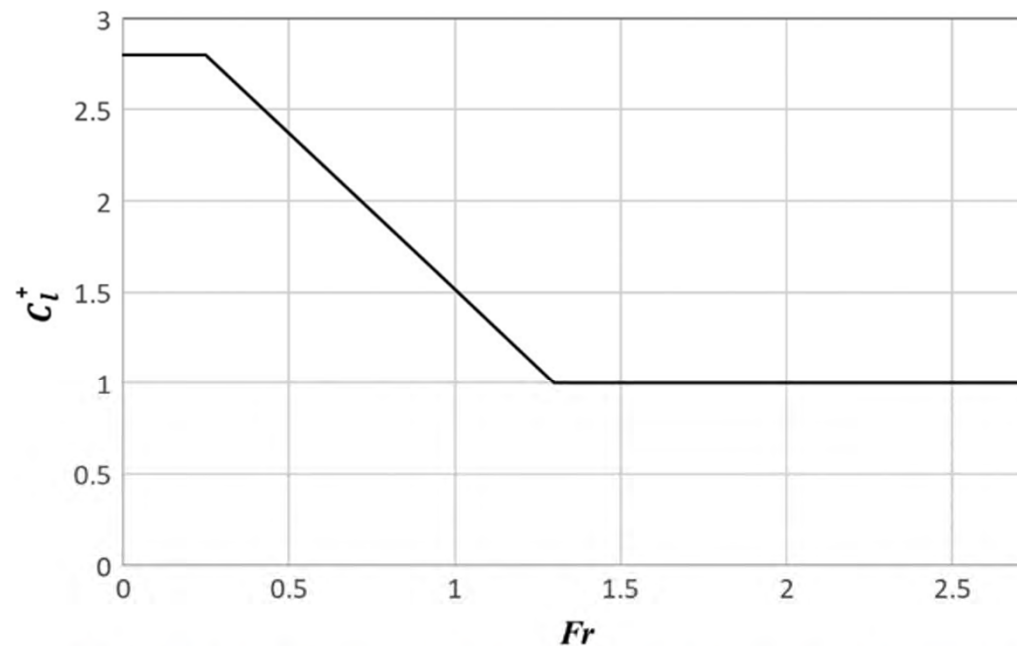


Figure 6.10-2. Upward lift coefficient, C_l^+ , as a function of the Froude number, Fr .

今後に向けて

- 抗力係数算定時の**水位・流速の条件整理**
 - 通過波・非通過波、運動量フラックス最大時、流速最大時など
 - 算定式導出時の条件と、適用する抗力係数の一貫性
- 各種構造物に応じた**抗力係数と適用範囲の整理**
 - 水深係数と同様、抗力係数はFr数に依存しうる
- 実際の津波シミュレーション結果を利用した場合の荷重の妥当性
 - **数値計算の不確実性、評価式の不確実性の関係**
 - 危険側の評価や、逆に過剰設計となる可能性も
- 水位および流速の時系列データの利用を前提とした評価式
 - 重要インフラを除き入手困難なケースも
 - 入手できる情報に応じた算定ルートが望まれる