

津波に対する自己浮上 PC シェルターと自己起立 PC 防波堤の提案

(株)複合研究機構	名誉会員	工博	○池田尚治
首都大学東京	正会員	博(工)	宇治公隆
横浜国立大学	正会員	博(工)	細田 暁
香川高等専門学校	正会員	博(工)	林 和彦

1. はじめに

大津波の襲来に対し、プレストレストコンクリート（張筋）技術を積極的に適用して合理的な防災社会基盤を建設する性能創造型設計法を基本とした提案をするものであって、ここでは津波シェルターとして PC 柱に拘束された PC 函体が津波の襲来時に自身で浮上する方式と、浮力と津波の流体力とによって自動的に起立する PC 防波堤の実行可能な画期的設計方法について述べる。突然の大津波の襲来に対し、まずは空の PET ボトルなどで各人が浮力の確保による即座の自己防衛を行うことと、自己浮上シェルターおよび自己起立防波堤を開発して具現化することを、大津波防災対策の確固とした 3 点セットと位置付けて鋭意探究した。前回のシンポジウムでの PET ボトル活用提案に続き喫緊に必要とされる大津波対策を提案する。

2. 浮力の効果

空の PET ボトルの水中での機能の認識と同様に自己浮上 PC シェルターや自己起立 PC 防波堤の浮力の効果を定量的に把握することが肝要である。浮力の効果を認識できる簡単な実験として、水面上のある高さ h から物体を水中に落下させた時の潜水深さ s および潜水時間 t と h との関係を求める方法が考えられる。比重 1.0 の物体が別途に体積 A の空気を伴って水面に自由落下するとき、水中における初速度が水面上と同じとし、水中では浮力による上向きの加速度が生じるので水中での摩擦抵抗を無視すれば水中での物体の運動方程式は次式で表わされる。

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + Ag = 0 \quad (1)$$

ここで、 M : 比重 1.0 の物体の質量, A : 比重ゼロの浮力体の体積で同体積の水の負の質量に相当。

これを解いて次式の解が得られる。

$$\frac{s}{h} = \frac{1}{A/M} \quad (2)$$

これは無次元の式であり、沈む深さは浮力比に反比例するのである。比重が 1.0 で浮力を持たなければ無限の深さに沈むのであり、浮力を 10% 持てば落下高さの 10 倍だけ沈んで浮上するのである。実験の結果では着水時のエネルギー損失などの影響で沈む深さは理論式の 40% 程度であることが示されたが、傾向は良く一致した。

また、潜水時間 t は同様にして次式で表わされる。

$$t = 2 \sqrt{\frac{2h}{g} \frac{1}{A/M}} \quad (3)$$

実験の結果、実験値はよくこの式に適合した。比重が 1.0 で別途に浮力を持たなければ、物体は潜水したままであるが 10% の浮力を持てば高さ 5 cm の場合、着水後に 2 秒で浮上し、高さ 50 cm から落下させた場合、約 6.4 秒後に水面に浮上することになる。浮力比は大きい程良いことが分かるが 5% 程度の別途の浮力でも浮力がない場合と比べれば圧倒的な効果のあることが示されたのである。

体重 60 kg の人間が 2 リットルの空の PET ボトルを 2 本持てば浮力比は約 7% であり, 水中に潜水した状態でも浮上の能力は極めて大きい筈である¹⁾。

第一著者は, 以上の検討結果から津波対策用として先ず 2 リットルの空の PET ボトル 2 本を常に携帯するようリーフレットを印刷して津波襲来地帯に配付中である。

自己浮上シェルターの浮体は静水時には浮力の大きさによって水面から空中に露出する部分の量が決まる。比重が 0.5 の場合には約半分の体積が水上に露出する。しかしこの場合でも津波襲来時には波浪の影響で浮体表面が時々水没することも十分にあり得る。したがってシェルターは浮体表面から 3 m 程度の高さのデッキを有することが必要であり、浮体の比重も 0.5 以下にする必要がある。

自己起立防波堤の場合には起立する壁体の比重の影響を十分に把握しなければならない。水平な壁体が水中で起立を始動するには壁体の比重が 1.0 以下でなければならない。その後には水圧の力で起立を継続するには壁体の重量が大きく影響する。

今、壁体の長さ(高さ)を L 、壁体の単位長さ当たりの重量を w 、液体の比重を ρ 、壁体の傾斜を θ とすれば壁体が水圧と角度 θ で釣り合う場合は (4) 式で表わされる。

$$w/L = (\rho/3) \tan \theta \quad (4)$$

θ がゼロの場合には壁体の重量がゼロであって比重が 1.0 以上の場合であり、 θ が 90 度の場合には荷重は無限大となる。即ち、 θ がある程度大きくなると水圧の影響が支配的となるのである。従って、起立を開始するには壁体の比重が 1.0 より小さいことが必要であり、早期に起立するためには比重が少なくとも 0.8 以下であることが必要である。

3. 自己浮上津波シェルター

プレストレストコンクリート製の浮上式津波シェルターを考える²⁾。米国のシアトルにおける浮き橋、港湾の浮き栈橋、ポンツーンなどの既存の構造を参照し、設置は海岸近傍の陸上とする。設計外力は、津波高さの水圧を基本とし、これが片側から作用するとしてよい。

浮体の比重は浮力の効果を発揮できるよう 0.5 以下とする。浮体は、PC 鉛直柱をガイドとして上下に移動可能とする。船舶等の浮遊物の衝突を避けるために周囲に防衝柱を配置する。津波の流速が早いのは津波の侵入時と引き波の終わりの頃と思われるので防衝工の高さは設計津波高さの 1/3 程度でよい。鉛直ガイド柱は中実断面を基本とする。浮体上面には避難用の軽量デッキを構築する。その高さは 3m 程度としデッキ上には救命ボート、救命胴衣などを配備する。

標準的な設計例として避難者 100 名程度を対象とすればコンクリート製浮体の寸法は幅、長さ、高さのそれぞれが 20m, 20m, 3m である平面形状が正方形の箱形構造が考えられる。外壁、上下床版、隔壁の厚さをそれぞれ 15cm, 12cm, 5cm とすれば浮体の比重は 0.35 以下にすることができるので浮体上に避難デッキを設置できる。浮上ガイド用および浮遊防止用の鉛直 PC 柱は、浮体の四隅に配置する。その直径は剛性と安全性から 1.5m とし、高さは 12m を上限とする。鉛直 PC 柱には軸方向に 19S15.2B ケーブルを 6 本配置して流水圧、波圧、および浮体の衝撃力に対処する。浮体の質量は 400Mg 程度であるから 100 人が載ってもその質量は 7Mg 程度であり浮力に影響を与えることはない。ただし、種々の積載物を載せるので浮力の検討は常に必要である。

一方、津波の予想高さが 40m にも達する場合には中空のガイド柱を中央に 1 本配し、柱を伸縮可能な構造とすることも可能である。折りたたみ式の傘のシャフトのように 2 段式に伸縮すれば高さ 40m 以上の浮上式津波シェルターの設計も可能である。

以上のような構造は、平常時は地上に設置された状態であるので浮体上面は店舗として活用できる。海浜

沿いの「道の駅」や高速道路のサービスエリアに店舗兼用で設置すれば平常時と津波襲来時の複合的な利用が可能であり、平常時と災害時の調和のとれた経済的合理性が得られるのである。

4. 自己起立式津波防波堤

自己起立式津波防波堤は、津波襲来時に浮力と津波の流体力と水圧とによって自動的に起立して防波堤となる構造である³⁾。海岸部や河口部に設置すると有効である。TP プラス 5 m 程度の築堤を造りその上にこの構造を設置すると壁体の高さが 10m の構造でも高さ 15m の防波堤になり平常時の景観を阻害しない。また、平常時には防波堤の下部工部分は、道路として活用できる。200 m 間隔で固定部を造りこれを利用して堤内と堤外部の連絡路を造るのが良い。また、海岸の常時水中となる位置に設置すれば津波による水位の上昇と津波の流体力とによって自己起立の始動が可能であるので津波堤防として機能することが可能である。

起立式の可動部分は、PC 構造とし、外ケーブルを適用する。構造は厚さ 1.5m、幅 3m、長さ(高さ) 10m のプレキャスト中空函体の壁体を標準とする。壁体の比重は 0.8 以下とする。津波の 1 波の滞留時間は 1 時間程度以内であるので完璧な止水は考えなくて良い。引き波によって水位がさがるときに起立した壁体は元の位置に着底することができる。必要に応じて起立の開始点である先端部に非構造材として浮力体を取り付けることが考えられる。

この構造の最大の特徴は、水平の常時の状態から起立時の鉛直の状態に移行する時に外ケーブルの配置長さを一定に保つことができることである。また、起立の過程および起立後に作用する水圧はこの外ケーブルによるプレストレス力によって抵抗される。引き波時にはこのプレストレス力および壁体自重によって水平状態に復元することができる。したがって現在工事中のヴェニス可動防潮堤とは機構が全く異なるものである。

プレストレス技術の優れた特性を性能創造的に開発し、このような実行可能な技術を適用することは極めて重要である。壁体の寸法を幅 w 、断面高さ h 、壁体厚さ t とすればコンクリートの比重が 2.5、壁体の比重が 0.8 の時、次式が成り立つ。

$$t=0.16wh / (w+h) \quad (5)$$

ここで、 $w=3m$ 、 $h=1.5m$ とすれば函体の厚さ t は 16cm となる。

ここでは典型的な例として起立時の高さ 10m の壁体を持つ防波堤を設計することとし、動水圧の影響を考慮し水圧の 3 倍を最大水圧として壁体の安定性を設計する。また、高さ 10m の水圧作用時にフルプレストレス状態を保持することとする。壁体の付け根部は壁厚を 50cm とし、19S15.2B を 3m 当たり 6 本配置する。高さ 10m による付け根部の作用曲げモーメントは 1m 当たり約 1600kN-m であり 3m 当たり約 5000kN-m である。設計ではこの 3 倍である 15000kN-m を考える。19S15.2B ケーブルは引張抵抗力が 4960kN であるので異常時緊張力として 4500kN を考えれば 6 本で 27000kN である。これによる抵抗曲げモーメントは約 18000kN-m であり、十分安全である。なお、10m の静水圧時には十分に余裕のあるフルプレストレスの状態である。有効緊張力は靱性確保の安全を考えて 20000kN となるようにプレストレスを導入する。壁体の起立時の自重による応力は 0.25MPa 程度であり無視してよい。

外ケーブルは壁体先端部を緊張端とし、デビエーターを介してフーティング部分の底部付近で鉛直に固定される。この場合、緊張されたケーブルはデビエーターを壁体およびフーティング内に適切に配置することにより水平設置状態と起立時とで同一長さに保つことが可能である。すなわち、外ケーブルの外縁からの距離を a とすれば幾何学的な関係から $a \cdot \cot(\pi/8)=2.414 a$ だけ端面から離れた位置でフーティングおよび壁体にデビエーターを設置することによりこのことが可能となる。回転接触部分にはヒンジ構造の設置が考え

られるが確実な回転が必要な時のみ配置することとし、一般にはフーティング部分に半円形の接触部分を形成することで対処してよい。

津波襲来時に起立が容易になるように予め函体に勾配を付けて先端部が若干上になるように配置することも考えられる。

以上に述べたようにこの構造の根幹は壁体の PC ケーブルに関し、緊張定着によるケーブルの緊張長さが平常時における壁体の水平状態の時と津波襲来による起立時とで同一であるようにケーブルを配置できることである。なお、この構造物の性能要求事項として高耐久であることが必須であるので PC ケーブルは多重被覆されたフレキシブルな性能を持つものでなければならない。

この構造は、平常時には横伏しており、津波襲来時に自動的に起立して津波防波堤として機能するのであるから平常時の景観を害することなく、かつ、稀に発生する大津波に対して地域を守るのであって、社会にとって画期的な構造であるといえる。ただし、実際に津波が襲来した時に所期の性能を確実に果たすためには

今後種々の実験や実証試験が必要である。

そこで、極めて予備的な実験として壁体の高さ 10 m の場合を想定して写真 1 に示すような 100 分の 1 の模型による実験を行った。用いた材料は木材である。PC 鋼材の代わりにはポリプロピレン繊維を用いた。実験の結果は予想通りであり、津波の高さが横伏した壁体の位置に達すると起立を開始し、その後は水位の上昇とともに鉛直になるまで起立した。次いで引き波によって水位が下がるとそれに応じて元の横伏状態に戻った。今後はコンクリートを用いて 20 分の 1 程度の模型実験をする予定である。



写真 1 自己起立防波堤の模型実験（起立前）

5. 終わりに

現在、東日本大震災の復興事業が大いに進められているが、近々発生するといわれている東海地震、東南海地震、南海地震あるいは首都直下地震などへの備えは同時に一層の喫緊の課題である。南海トラフ巨大地震の被災予測では高知県の黒潮町などに高さ 40m 以上の津波が遡上するとされる。また、1498 年の明応地震では南海トラフの地震に起因して 4 万人もの死者があったことが記録されている。従って、対象とする津波の規模や高さは、地震の規模やそれぞれの土地の特性に大きく支配されるので津波対策としては国民の生存性を必須の目標として多重的な防災計画を立案、実行することが肝要である。

ここでは、巨大津波の防災対策として PET ボトルによる即座の浮力確保、自己浮上津波シェルターの建設、および自己起立津波防波堤の建設の 3 手段を 3 点セットと位置付けて提案するものである⁴⁾。

参考文献

- 1) 池田, 平井, 細田, 林, 津波対策用救命具へのプレストレス（張筋）技術の活用, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 2013 年 10 月, PC 工学会
- 2) 池田尚治, 津波避難構造体, 特許願 K J N 26-11, 特願 2014-040176
- 3) 池田尚治, 浮上起立式津波防波堤, 特許願 K J N 26-12, 特願 2014-067973
- 4) 池田尚治, コンクリート構造および津波防災構造物における引張力の探究, 土木技術 2014 年 6 月号