

津波に対する PC 防波堤の設計計画

(株) 複合研究機構	名誉会員 工博	○池田尚治
香川高等専門学校	正会員 博(工)	林 和彦
首都高技術(株)		松本修一
(株) ピーエス三菱	正会員	河村直彦

1. はじめに

津波対策用の防波堤の多くは盛土構造であり、鉄筋コンクリートも一部で用いられているが PC 構造物は皆無である。ただし、一般の防潮堤には一部ではあるが PC 構造が我が国で適用され FIP 作品賞を受賞したこともある。第一著者は PC 構造で自己起立式津波防波堤を提案したが固定式の津波防波堤の設置との組み合わせが必要な場合が多いと思われる。そこで、ここでは固定式の PC 津波防波堤の設計計画を提案することとした。壁の高さは 5 m, 10 m および 15 m の 3 種類を基本とし壁部はプレキャストコンクリートも対象とする。壁の前面には漂流物体の衝撃力の影響を回避するために無筋コンクリートなどでバリヤを配置し、壁の背面側には海浜道路などの社会基盤施設との複合も考えられる。高耐久な構造が求められるため緊張材や補強材には炭素繊維や全素線エポキシ樹脂塗装 PC 鋼より線を採用することが考えられる。

大津波の襲来に対する設計計画として、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 防波堤との組み合わせが特に重要である。防災社会基盤としては固定式や自己浮上津波シェルターによる防災対策を含めた総合的な防災計画が求められる。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は住民の倫理的な義務であって社会基盤の整備のみによって完璧な大津波防災を実現することは極めて困難であることが認識されなければならない^{1), 2), 3), 4), 5)}。

2. 大津波の特性

大津波は大地震のほかには海底火山の噴火、沿岸地域の山体崩壊、海底の大規模地滑り、隕石の海上落下衝突等によって発生する。また、高潮や台風時の高波との組み合わせがあればその影響は倍増される。広大な海域は通常平穏であるが海域の水量は膨大であるから海域の大異変発生時には波打ち際が相当に陸上の奥深くにまで達すると考えれば大津波による海水の侵入も容易に理解できる。津波危険区域は言わば波打ち際の地域なのであるが再現期間を大きくすれば波打ち際は一層奥地に達する。500年や1000年に1度だけ波打ち際となる地域は人間の営みにとって十分に利用可能であるので人間がそこに定住すれば何世代かに一度は海水の侵入に遭遇することになる。河川の氾濫による洪水に関しても同様なリスクが存在するが河川の氾濫に比べて大津波時の水量は圧倒的に大きく、かつ、海岸線の延長は長いのでその制御は一般に極めて困難である。また、避難時間も短い。大津波は外敵の侵入と類似であると考えれば万里の長城のような海岸堤防の建設も決して実行不可能ではないが経済性や環境破壊などを考えると現時点では社会的な合意は得られないと思われる。しかし一部の重要地域に絞ってこのような防浪構造を構築することは検討の価値がある。

大津波の伝播速度は重力の加速度と水深の積の平方根であるので太平洋では秒速 200 m 程度であり、時速にすれば 700 km 程度で航空機の速度に匹敵する。ただし、これは波動の伝播速度であって水流の速度でないことに注意しなければならない。津波の波長は極めて長いのでその周期は数分から

1時間程度と言われている。このことは一旦津波が侵入するとその水位が時間とともに増加し大量の海水が陸地に滞水することとなる。この後に水位が低下に向かうとこれが引き波となり、その流速は極めて大きいのでその威力は著しいものとなる。また、津波の流水は海岸部で極めて高速の流れでその内部には多量の土砂や砂利、岩石などを巻き込んでいるので単なる海水ではないことに注意しなければならない。過去の大津波の痕跡として相当の厚さの堆積物が陸上に残されていることは近年注目されている事実であり、過去の大津波の記録の情報となっている。どのような大津波を想定して津波防災施設を建設するかについては対象地域における有史以前も含めた津波の歴史を参考にすることになる。過去最大の津波高さとしては1958年のアラスカのリツヤ湾（Lituya Bay）で発生した520mの津波であることも記憶しておかなければならない。我が国で大災害を発生させた津波として1498年の明応地震津波、1771年の八重山地震津波、1792年の雲仙岳地震津波（島原大変肥後迷惑）などがある。最近では2011年の東日本大震災があるがこの地震津波に関しては869年の貞観地震津波、1896年の三陸地震津波、1933年の三陸沖地震津波などの大被害の歴史が存在する。外国の津波被害としては1755年のポルトガルのリスボン地震津波、1908年のイタリアのメッシナ地震津波、2004年のインドネシアのスマトラ地震津波などがあり、オランダのような低地の国では大津波のリスクが深刻に認識されている。

3. 防浪施設の位置づけとPC構造

発生頻度の極めて低い大津波に関しては、設計で想定する津波の規模を超える大津波が襲来した場合の人命の安全性を高めることを考えなければならない。このことは防浪施設の設計にとって第一に重要なことである。津波防波堤の内部にいる人々も、その堤域内で高所のより安全な場所を求めて緊急に避難することを基本とすることである。しかし繰り返し発生する津波の襲来に対して津波堤防によって安全に堤防内を保持できるならば人命のみならず家屋や社会基盤などを津波から守ることができる。また、堤防を津波が越流する場合でも堤防の存在によって避難時間に若干でも余裕できる。このような防災思想に立つならば設計想定津波の規模と津波高さを定めることが容易となる筈である。例えば再現期間が50年の津波の規模を設定する場合には50年に1度は家屋や社会基盤などは津波の被害を受けるが人命に対しては高所への避難が前提なので社会的な安全が確保できるのである。このように人命の安全と家屋や社会基盤などの財産の保全とを分離することにより、計り知れない未知の大津波を考慮に入れた防浪対策が合理的に立案できると思われる。社会の持続発展性を考えるのならば、少なくとも100年に1度の大津波を設計で想定し、大津波に対する防波堤を建設するのが良いと思われる。

津波防波堤の設置を考えると、海岸線にある河川や運河の存在を無視することはできない。大河川であれば河川堤防と一体になった津波防災を考えなければならない。河川を遡上する大津波の侵入を阻止するには水門の建設や自己起立津波防波堤の設置が必要となる。このような考えを進めていくと、津波堤防としては住宅や社会基盤の密集している地域のみを輪中堤のように周囲を堤防で閉合することを考えることが得策と思われる。この場合、固定式堤防の設置場所は海拔が多少高い地区にすることも多いと思われる。ある程度内陸部に堤防を設置するのであれば津波侵入時の流速による破壊力も低減されると思われること、船舶などの漂流物の衝突の可能性が小さくなって堤防の安全性が向上することも考えられる。したがって、このような場合にはプレキャストコンクリート構造の薄肉の壁構造の採用も可能となるとと思われる。

固定式堤防の内部と外部との連絡は壁部の天端を横断する高架構造とすればよいのである。平常時の開放的な景観を必要とするならば部分的に自己起立式の防波堤を設置すればよい。

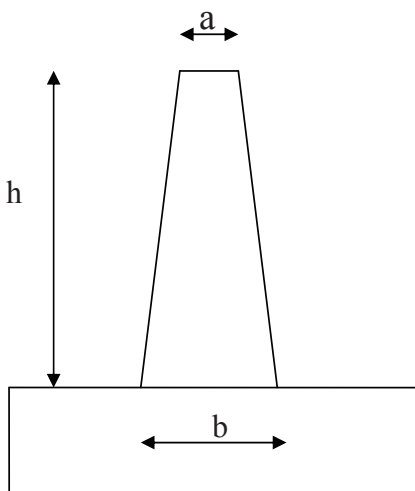
津波が堤防を越流して陸側の水位が上昇すると堤防にはそれまで作用していなかった浮力が発生する。ひとたび浮力が堤防に作用すると堤防の安定性が大きく損なわれ堤防が倒壊する恐れも生じてくる。たとえ堤防を大きく越流する津波が襲来したとしても堤防が健全に存在していれば侵入水の底部付近に巻き込まれた

土石などの物体は堤防によって侵入を阻止されるので津波の被害は大幅に低減される。したがって襲来する津波の高さに比べて相当に低い堤防でも津波時に倒壊しなければ防災構造として大きな役割を果たすので、津波堤防の設計にあたっては浮力の作用した状態での安定計算が重要である。津波堤防の究極限界状態としてこのような水没時の性能を照査することが重要である。

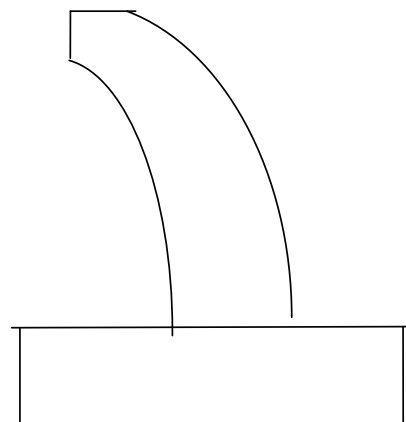
4. PC津波防波堤の基本

PC構造物で固定式の津波防波堤を設計する場合、津波の前の地震に対して安全でなければならない。また、再現期間の長い外乱を想定するので構造物は高耐久的でなければならない。地震時の安全性の観点と究極時として水没後の引き波の影響を考慮するとPC津波防波堤の形状は図—1に示すような対称構造としプレストレス力は断面の中心に作用させる構造が基本タイプとして考えられる。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 180cm とし、19S15.2B を 1m 当たり 2.5 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 であり津波時に3倍すれば約 5000kN-m である。19S15.2B ケーブルは引張抵抗力が 4960kN であるので異常時のPC鋼材引張力を $0.9P_u$ とすれば 3470 kN となり 1m 当たり 2.5 本の場合 86700 kN となる。これによる抵抗曲げモーメントとしては断面の腕長を $b/3$ とすれば 0.6 m となり抵抗曲げモーメントは約 5200kN-m であり津波時の水圧に十分抵抗できる。なお、静水圧時には余裕のあるフルプレストレスの状態である。壁体の自重による応力は 0.25MPa 程度であり無視してよい。堤防高さ 5m および 1.5m の場合についても同様な計算を行い、その結果を表—1に示した。耐荷力はPC鋼材のみで十分であるが詳細設計時には鉄筋の配置を検討するのがよい。津波襲来時に津波の勢いを減少させるため図—2に示すような曲面構造のPC津波防波堤が考えられる。構造全体の安定計算を行う場合には安全のために水没状態での浮力の影響を考慮することとする。



図—1 直立式防波堤



図—2 曲面式防波堤

表—1 直立式PC津波防波堤の諸元

h (m)	a (m)	b (m)	PC鋼材 (堤防延長1m当り)
5	0.8	1.0	12S 15.2B, 1本
10	1.0	1.8	19S 15.2B, 2.5本
15	1.0	2.5	19S 15.2B, 6本

5. 自己起立式津波防波堤

起立式の可動部分は、PC構造とし、外ケーブルを適用する。ここで、厚さ 1.5m、幅 3m、起立時高さ 10m のプレキャスト中空函体の壁体を考える。壁体の比重は 0.8 以下とする。引き波によって水位が下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。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。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。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、 $w=3m$ 、 $h=1.5m$ の場合、函体の版の厚さ t は 16cm となる。外ケーブルは壁体先端部を緊張端とし、ディビュ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。必要な PC 鋼材としては固定式に比べて腕長を大きくとれるので 19S15.2B を 1m 当たり 2 本配置すればよい⁵⁾。

6. 終わりに

設計で想定する大津波の頻度、規模や高さは、対象とする地域の特性に大きく支配されることを認識し、津波対策としては国民の生存性、社会の持続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⁶⁾。この観点から津波堤防の設計計画の基本コンセプトに関して熟慮した結果、次のような明快な方針が得られた。すなわち、津波堤防は津波襲来地域の生活環境を保全することを第一義として、対応した発生頻度と規模、高さの設計津波を設定することとし、人命に関しては高所避難および住民各自の浮力の確保を前提として津波堤防の設置と分離するのである。この考えにより、津波堤防の建設費と維持管理費は保全すべき社会の財産と直結した形で決定が可能となる。したがって、住民の避難施設の建設が堤防の建設と独立して計画されなければならない。また、津波が堤防を越流しても住民の避難行動には堤防の存在が大きく貢献できるとともに土砂などの侵入を相当に阻止することができるので堤防は越流時に決壊しないことが必須である。現在の PC 技術を性能創造的に適用すれば合理的な津波堤防の建設が可能である。

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
- 5) 池田, 宇治, 細田, 林, 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, 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, 2014年10月, PC工学会
- 6) 池田尚治, 町田篤彦, 大災害に備えての平成防災17条憲章の策定に関する提案, プレストレストコンクリート, Vol.55, No.1, Jan. 2013, プレストレストコンクリート工学会