

大規模地震津波実験施設の開発

菅野 高弘

(独)港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

2004年12月26日インドネシアのスマトラ島沖で地震(Mw9.3)が発生し、津波による甚大な被害が発生した。生き残った方に聞くと、強い地震を感じて10~20分後に大津波が来襲したとのことであった。明らかに地震と津波の複合作用による被害が発生しているが、津波により地震動による被害の痕跡を見つけることが困難であった。地震と津波の複合作用による被災メカニズムを明らかにすることにより、合理的・経済的な対策を講ずることが可能となるため、被災過程を再現できるよう、遠心加速度場に造波装置・水路・水中振動台を導入することとし、世界初の大規模地震津波実験施設を約2年で設計・開発し、約3年の工期で完成したので報告する。

キーワード 大地震、津波、複合災害、被災メカニズム、災害対策

1. はじめに

政府の特別機関である地震調査研究推進研究本部 (<http://www.jishin.go.jp/>) によると、今後30年以内にマグニチュード8程度の大きな海溝型地震が発生する可能性として宮城県沖地震99%、東海地震84%、東南海地震58%、南海地震47%と発表(平成17年3月)されているように、インドネシア・スマトラ沖地震・津波と同規模の災害への備えが緊急課題となっている。

日本時間2010年2月27日15:34(現地時間では3:34)にチリ中部沿岸で発生したMw 8.8の地震で、チリ共和国沿岸域は地震動と津波による甚大な被害¹⁾が発生した。日本沿岸域から見ると、本地震は遠地地震であり、地震動は日本に伝播してくる間に減衰している。一方、津波は翌日2月28日午後日本(14時過ぎに東北沿岸、中部~四国沿岸には15時前後)に到達した。地球の周長は約40,000 km、チリが日本の反対側とすると距離20,000 kmを約24時間かけて1~2mの津波が到達したことになり、養殖施設などの水産物に甚大な被害が発生したことは記憶に新しい。この様に、津波作用による被害だけでも人命や住民の生活活動・経済活動に大きな被害をもたらすことがわかる。

一方、津波を伴わない地震、すなわち地震動のみによる被害についても1995年兵庫県南部地震による6400名以上の犠牲者数や高速道路、鉄道、港湾などの社会基盤施設に甚大な被害²⁾が発生している。

東海・東南海・南海地震の場合、我が国沿岸域に比較的近い位置に断層が存在することから、2004年インドネシアのスマトラ島沖で発生した地震・津波や、2010年チ

リのコンセプト沖合で発生した地震・津波のように、先ず地震動が施設に作用し、何らかの損傷が発生した後に、津波が来襲しその損傷が進行する地震動と津波作用による複合被害が発生するものと想定される。

地震動と津波作用による複合被害の実態については、未解明であるというのが正直なところである。すなわち、地震動が作用したことによる損傷が発生した後に、津波が作用するため、その痕跡が消失してしまうため、被災メカニズムを同定することが困難な状況にある。

このため筆者は、地震動が作用した後に津波が来襲する過程における被災メカニズムを把握するための実験的アプローチについて検討し、遠心加速度場に、造波装置・水路・水中振動台を導入した大規模地震津波実験施設を開発することとした。

2. 地震と津波

地震・津波の発生メカニズムは、ストレスがたまった断層が動くことによって地震動や津波が発生する。地震動の場合、伝わる岩盤の硬さによる $3\text{ km/s} \sim 7\text{ km/s}$ (硬いほど速い)という速度で伝播する。一方、津波の速度は重力加速度と水深の積の平方根で計算できる。例えば、4000mの水深であれば、

$$C = \sqrt{g \times h} = \sqrt{9.8 \times 4000} \approx 200\text{ m/s} \quad (1)$$

となる。沿岸域では水深が浅くなるため速度が遅くなるが、遅いと言っても、水深10 mでは約10 m/sの速度で

あり、男子100 mオリンピック金メダリスト並の速さである。よって目の前に迫りつつある津波から走って逃げることが困難であると考えられる。

以上より、同じ断層運動で発生した地震動と津波の到達時刻が異なることが分かる。地震動と津波の作用は、断層直上の場合にはほぼ同時に作用するものと考えられるが、断層距離が大きくなるにつれて、先に地震動が作用し、続いて津波が作用する到達の時間差が大きくなる。

(1) 地震による被害要因

ここで、地震による被害について思いつくままに列挙してみる。地震の揺れによる建物被害・斜面崩壊・液状化現象による地下構造物の浮上や地上構造物の沈下、護岸の水平変位、石垣や塀の損壊などが挙げられる。都市部の場合には、電気・ガス・水道などのライフラインにも大きな被害が発生することが知られている。

地震動により施設に被害が発生する原因として、

- (a) 加速度：慣性力により損傷が発生、一般的に加速度が大きい程損傷の程度が大きくなる。
- (b) 周期：地震動の卓越周期と施設の固有周期が近い場合、共振現象が発生し、施設の応答加速度が大きくなり損傷が発生する。
- (c) 部材・材料等の劣化：地震動の繰返し载荷によって部材や地盤材料が劣化していくことにより損傷が発生。砂地盤の場合、常時は硬い地盤が地震時に過剰間隙水圧の上昇により液体状に変化し損傷が発生する「液状化現象」が知られている。
- (d) 人為的要因：設計ミス、施工不良、維持管理不良などにより損傷が発生あるいは損傷程度が大きくなる。などが挙げられる。地震時に、ある特定の要因のみによる損傷の発生は少なく、複数の要因が重なり合って損傷するものと考えられる。

沿岸部の施設の事例として写真-1に示すような岸壁の被害（1995年兵庫県南部地震）を見てみる。岸壁は、陸と海の境界として地盤が崩れないように支え（抗土圧構造物）ながら、船舶の接岸・係留・荷役の機能を有する構造物であり、船舶の接岸のため直立の壁である必要があることから、この写真の岸壁は約16 m（水深は12 m）程度の鉄筋コンクリート製の箱（ケーソン）で形成されている。規模としては5階～6階建のアパートと同等の寸法を有するものである。ケーソン式岸壁の設計時には船舶の接岸力・牽引力・潮位変動・陸側からの土圧（常時・地震時）などを考慮している。1995年兵庫県南部地震の被災調査から、地震時にケーソンが2～5 m程度海側へ移動し、4度程度海側に傾斜したことが確認³⁾されている。この変位の原因として、ケーソン本体に作用する慣性力および背後地盤が液状化しケーソンを海側へ押し出す泥水圧が作用すると同時に、基礎部の地盤の過剰間隙水圧が上昇したことによるせん断破壊が発生したため、大きな変位が発生したものと考えられている⁴⁾。

(2) 津波による被害要因

海底の断層運動により発生した津波は、その隆起した部分が波の山、あるいは沈降した部分が波の谷となって津波が発生する。施設の津波による被災要因として、以下のようなものが考えられる。

- (e) 波圧による被害：施設に作用する波圧（波力）には、施設周辺の地形等により衝撃波圧・重複波圧・遡上波圧・越流波圧などがあり、これらの波圧と施設の抵抗力の関係で被害が生じる
- (f) 流水力による被害：津波による流れの中の施設は、摩擦力・抗力・揚力・慣性力・造波抵抗力などの力を受ける。副次的に、船舶、流木、瓦礫などの漂流物による被害も顕著である。
- (g) 浮力による被害：津波による水位上昇に伴い施設に浮力が作用する。

地震動と同様に、

- (h) 人為的要因：設計ミス、施工不良、維持管理不良などにより損傷が発生あるいは損傷程度が大きくなる。当然、個別的要因のみで被害が発生することは極めて少なく、浮力により浮遊した木材が漂流し施設に衝突するなど、これらの要因が複雑に絡み合い被害が生じているものと考えられる。

(3) 地震と津波の複合被害

前節までに述べたように、地震動と津波の伝播速度の違いから、先に地震動が作用し、続いて津波が作用する。地震動のみであっても(a)～(c)の要因が複雑に絡み合い被害が発生し、ある程度の時間が経過した後に津波の(e)～(g)に起因する被害が発生することになる。また、これらの作用は、地震動の場合「余震」による繰返し作用の影響が有り、津波の場合にも第二波、第三波と複数回作用する。(d)および(h)の人為的要因については、有ってはならない事案であり、本報告の範囲外と考える。

(4) 地震と津波による被害調査の限界

大規模な地震・津波が発生した際に研究者や技術者が現場にいて、被災メカニズムを詳細に観測出来る可能性は極めて低いと考えられる。強震計の設置による地震波形記録の取得や、監視カメラによる津波の映像などが被災メカニズム究明に大きく貢献していることは明らかである。

被害調査は、一般的に大規模な地震・津波が発生した後、数日～数週間～数ヶ月後に、現場に入り被災調査をすることになる。

ここで仮に、写真-1に示した施設が地震と津波の作用を受けたと仮定してみる。当該施設が完成して供用されている期間中に、地盤の圧密などによる変化や過酷な海域環境下での劣化等が進行しつつあるところに、地震動



写真-1 ケーソン式岸壁の地震被害例

が作用する。岸壁や護岸は、液状化現象が発生すると大きな変状が生じることが知られており、地中の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下によって、さらに変化が進行する。被害調査を液状化現象が発生している間に実施することは困難であり、調査に赴いた時点では写真-2のような噴砂痕を調べて液状化が発生したことが確認されることになる。但し、この写真を見て分かる様に、降雨や、津波の来襲によって、容易に痕跡が消えることが想定される。



写真-2 液状化による噴砂痕

すなわち、竣工直後から長期的な施設の経時変化が生じている施設が、地震動の作用によってその変状が拡大して、津波で被害がさらに拡大し、津波の第二波、第三波、第N波、同時期に余震が作用した結果として、調査の際にはこれらの残留状態を計測することになる。例えば、1995年兵庫県南部地震においては、ケーソン式岸壁が数メートル（2 m～5 m程度）海側へ移動している。ここで、3 m移動したものとすると、

- 1) 主要動の加速度がピーク時点で、一瞬にして3 m移動したのか？
- 2) 地震動が作用している間に10秒から15秒程度の時間で移動したのか？
- 3) 液状化が発生したことが確認されていることから、過

剰間隙水圧が最大になった時点で一瞬にして移動したのか？

- 4) 主要動の部分で1.5 m程度移動し、過剰間隙水圧の消散に伴ってさらに1.5 m移動したのか？
- 5) 主要動部分で2.5 m移動し、過剰間隙水圧の消散過程で0.5 m移動したのか？

このように、残留変位3 mに対して、複数の被災シナリオが考えられる。

地震動の作用によって極めて不安定な状態に置かれた岸壁背後には複数の亀裂、ケーソン目地開きなどが発生しており、これに津波の作用を考えなければならぬとすると、実際の被災シナリオやメカニズムを明らかにするのは非常に困難であると考えられる。また、耐震の観点からは軽微な被害と判断される微小な亀裂や目地開きが、津波による被害の観点からは甚大な被害を誘因する可能性も否定できない。

3. 大規模地震津波実験施設の開発

(1) 模型実験による被災メカニズム解明

前節で述べたように、実際の被災シナリオやメカニズムを把握するためには、現地調査だけでは不十分である。このため、模型実験や数値解析による検討が必要となる。

模型実験の場合、実物の大きさの施設に地震動や津波を作用させるのが困難なため、縮尺模型を作成する必要がある。例えば、実物が10 mとして模型を1 mで作成すれば1/10縮尺模型となる。この模型に、多数のセンサーを設置して地震や津波を作用させ、その挙動を把握すれば、地震動の作用で損傷が生じ、過剰間隙水圧の上昇に伴い変状が拡大し、消散過程で不同沈下が発生しつつある時点で、津波の第一波が作用、その後、余震や津波の第二波が作用していく過程で、どの様にして変化していくか把握することが可能になる。模型実験の精度については実際の被災形態と同様であるかによって評価することになる。

但し、模型実験を実施すれば全てが解決するという単純なものでは無く、長さに関しては1/10の縮尺とすると体積は長さの3乗で縮尺を考える必要がある。模型実験を実施する場所が、実物と同じ地球上、すなわち同じ重力加速度場の場合、実物と模型で加速度は1:1の関係になる。加速度の単位が m/s^2 で与えられることから、分子は長さの縮尺となるため10:1、分母の「時間」をうまく調整しないと模型と実物間の重力加速度1:1の関係が成立しないことになる。よってこの場合、模型の時間が $s = \sqrt{1/10}$ に縮む必要がある。この様に模型実験を計画実施するには、実物と模型との間の縮尺をうまく決める必要があり、種々の物理量（長さ、面積、体積、速度、

加速度，時間，粘度など）の縮尺関係を総称した「相似則」を構築することが鍵となる。

ここで、「土」の性質を復習してみる。幼稚園の砂場を想像してみると、乾燥した砂は細かい粒子の集合体で、さらさらと崩れる。少し水気があると砂の団子を作ることが可能であるが、これも簡単に指で崩すことができる。この団子を手で包みおにぎりを握るように力を加えると、かなり硬くなる。この様に、砂のような粒状体は、周りからの圧力で硬さが変わる、すなわち拘束圧依存性を持つことが知られている。同様の事が、実際の「おにぎり」でも成立し、強く握ったおにぎりは硬く、軽く握ったおにぎりは柔らかく崩れ易いことから実感できる。

例えば、幼稚園の砂場が地中深く50 mまで同じ砂であったとして、鉄の棒を差し込んで動かそうとすると、地表から数十センチ差し込んだ範囲では容易に動かすことが可能であるが、さらに深く差し込もうとすると、人間の手では深く差し込む事さえ困難となる。地下50 mの部分の砂要素の拘束圧は大きく、強く握ったおにぎり状態であることは明らかである。ここで、1/50縮尺の模型について考えてみる。実物で50 mの杭の地震時挙動が問題で、1/50の模型を作成して実験しようとする、杭は1/50の大きさで作成すれば簡単であるが、砂地盤をどうするのか？ 長さの縮尺から1 mの砂層を作成することになるが、拘束圧が小さいことは明らかである。このため、相似則を巧みに構築して何とか実現象を再現できるようにする工夫が必要である。同じ地球上に模型と実物があるため加速度が1:1という制約条件が課せられるためであり、もし、模型の重力加速度場を50倍にできれば、1 mの砂層の土要素に作用する拘束圧は実物と同様の拘束圧にすることが可能となる、すなわち1/50模型でも、きつく握ったおにぎり状態を再現出来ることになる。

ここで、重力加速度を50倍にするための装置を考えてみると、全自動洗濯機が脱水モードになった状態が思い浮かぶ、すなわち洗濯物の代わりに模型に遠心加速度を作用させるものである。地盤材料に関しては、古くから遠心載荷装置⁵⁾による研究が実施されてきているが、流体力学分野での適用事例⁶⁾は少ない。ここで、波について遠心加速度場での模型実験が成立するのか、考えてみる。砂場と同様に、水深50 mの海底での水圧を考えてみると大きな作用することが簡単に想像できる。これを1 mの模型の水深で再現しようとする、長さの縮尺は1/50縮尺の模型となる。流体分野の模型実験も古くから実施されていて、当然「相似則」も確立され、現象把握に用いられている。実物と模型が同じ地球上の場合の相似則としてフルード則が良く用いられる。フルード数は、

$$Fr^2 = \text{慣性力} / \text{重力} = U^2 / (g \times L) \quad (2)$$

ここに、 U :速度、 g :重力加速度、 L :長さ

で表され、実物と模型でフルード数が同じになるように

すると実現象を模型で再現出来るものである。遠心加速度場では重力加速度の縮尺比が1:50となることから、1G場における模型実験の相似則とは異なった相似則を構築する必要があり、かつ、地盤系の相似則と調和的な相似則とすることにより地震動と津波の複合被害に関する遠心加速度場での模型実験が成立することになる。ただし、実物と模型間の全ての物理量に対して完全な相似関係を構築することは不可能であり、実験対象で見た現象に対して支配的な物理量の相似関係を優先させた「相似則の緩和」が必要不可欠であると考えている。

遠心載荷装置で、津波と地盤材料の両方を取り扱える装置としては、東洋建設(株)が津波による沿岸構造物の破壊挙動に関する研究を実施するために、地盤工学用に設計されたドラム型遠心装置を改造して研究を開始したところで沢山の新たな知見⁷⁾が得られ始めている。但し、この装置では地震動を模型に直接作用させることが出来ないため、別の装置で地震動を作用させる必要があり、余震や津波の繰返し作用、津波とは異なる波浪に関する実験的検討は不可能である。

(2) 大規模地震津波実験施設

前節までに述べた現象を遠心加速度場で再現するために、図-1に示すように津波や波を再現するための水路を考える。本装置には波を発生させる造波装置が必要であり、地盤と構造物の模型に地震動を作用させるための水中振動台も設置する必要がある。これをぐるっと丸めて、回転させ遠心加速度を作用させるものである。

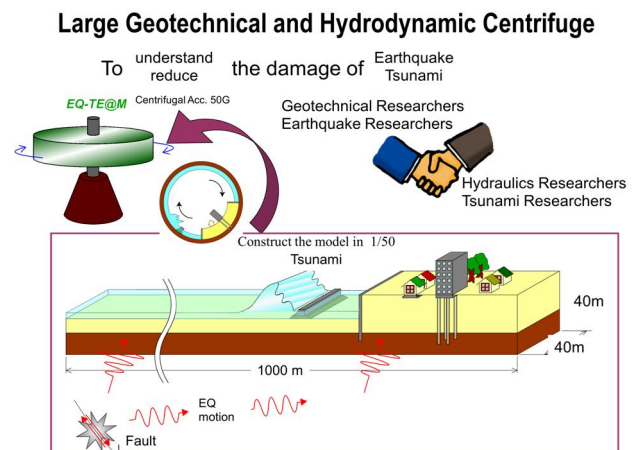


図-1 大規模地震津波実験施設機構概念図

装置が回転していない時、すなわち模型を作成するには造波装置と水中振動台が設置されたプラットフォームは、地球の重力場の状態にあるため、ブランコ(図-2ではバケットと表示している。)のようにぶら下がることになる。

回転数を上げていくとプラットフォームが持ち上がり水路と一体化、ここに水を注入し、地震動を作用させ、津波を作用させることを可能としている。

プラットホームと水路部の境界部は沈埋トンネルにお

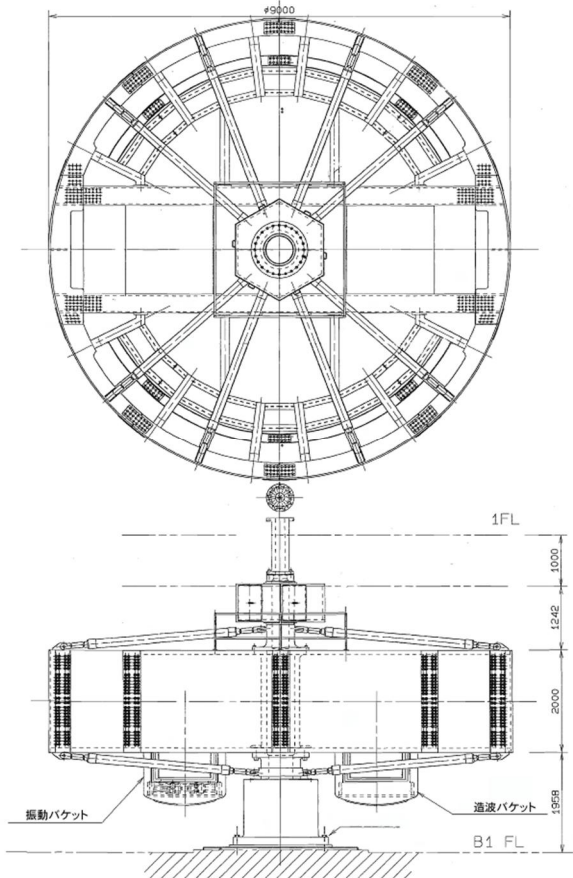


図-2 大規模地震津波実験施設回転部

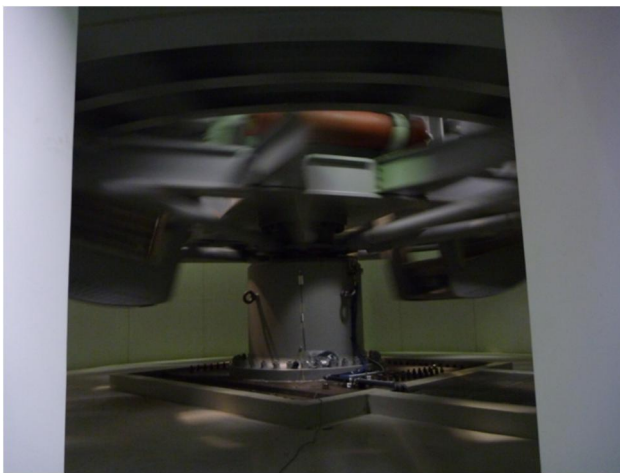


写真-3 回転開始直後の様子

ける最終継手部の止水と同様の機構⁸⁾ (Vブロック工法)としており、プラットホームがV型の形状をしており、中心軸方向にオフセットした状態で振り上がり、油圧ジャッキにより水路部と一体化するものである。

加速度計、変位計や水圧計などの計測センサーを最大128チャンネル設置できるようにしており、回転場においてデジタル変換し、無線通信によりパソコンにデータが集積される。また、動的現象に加えて圧密や過剰間

隙化水圧をの消散過程などの長時間を要する現象を計測するため「静・動切換装置」を介して静ひずみアンプ・動ひずみアンプへの入力を切換できる機構を有している。

この様な機構を有していることから、複数回の地震動を模型に作用(余震の再現)させることが可能であり、かつ、津波の第二波、第三波などの繰返し作用も再現できる。造波装置を制御することにより、津波より波長の短い波を作用させることも可能である。写真-3は、直径7mの造波装置・水路・水中振動台を有する巨大な回転体を実験を実施する50Gまで回転数を上げていく途中であり、回転によりプラットホームが振り上がりつつあることが分かる。

4. おわりに

大規模地震津波実験施設の開発には構想から5年の期間を要し、3月に完成したところである。発生確率が高まりつつある巨大地震の発生前に研究成果を出し、安心・安全に資するため、地震と津波の専門家が協力しながら、この装置を使った研究に着手したところである。地震と津波の複合作用による施設の被災挙動を正確に把握し、被災メカニズムを明らかにできれば、合理的・経済的な対策工法の開発が可能になるものと考えている。

参考文献

- 1) 今村ら：2010年チリ地震津波のチリ沿岸での現地調査，津波工学研究報告第27号，pp. 83-99，2010.
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会編：阪神・淡路大震災調査報告 共通編-1 総集編，日本建築学会・土木学会・地盤工学会・日本地震学会・日本機械学会，2000.
- 3) Inagaki, H., et. al. : Performance of caisson type quay walls at Kobe, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspekts of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp. 119-136. 1996.
- 4) 菅野ら：兵庫県南部地震による港湾施設被害考察(その6) ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験，港湾技研資料，No. 813，pp. 207-252，1995.
- 5) 土質工学会：「講座」遠心模型実験、土と基礎，1987年11月号～1988年9月号
- 6) Sekiguchi et. al. : Response of poro-elastoplastic beds to standing waves, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 3, pp. 257-261, 1984.
- 7) 三宅ら：津波の遠心力場における実験手法の開発とケーソン式防波堤への適用，海洋開発論文集，Vol. 25, pp. 87-92, 2009.
- 8) 沿岸技術研究センター編：沿岸技術ライブラリーNo. 10, 沈埋トンネル技術マニュアル(改訂版)，2002.