

February 2015

「津波の影響を受ける橋の挙動評価に関するワークショップ」報告

2011年東北地方太平洋沖地震では、地震後に発生した津波により橋が流出する被害が生じましたが、このような被害を受け、日本では国総研、土木研究所を始めとして、津波により橋が受ける影響の評価とその対策等に関する研究が進められています。一方、米国でも、太平洋岸北西部沿いにおいて Cascadia 地震の発生が逼迫していることが懸念されており、この地震により米国西海岸域には津波が襲来することが予測されています。このため、同沿岸部に立地する橋への影響やその評価についての検討が急がれています。

このような橋に関する日米共通の技術的な課題に合同で効率的に取り組んでいくため、UJNR 耐風・耐震構造専門部会の作業部会 G（交通システム）においては、津波の影響を受ける橋の評価に関する研究を日米が共同で取り組むべき重要研究課題の一つとして位置づけています。作業部会 G が毎年開催している日米橋梁ワークショップにおいても、東北地方太平洋沖地震以降は、毎回1つのセッションを設けて日米における最新の研究情報の交換等を行ってきています。

このような中、2014年12月10～12日に、米国のオレゴン州立大学（OSU）において津波の影響を受ける橋の挙動評価に関するワークショップが開催されました。このワークショップは、津波の影響を受ける橋を対象として、既存の数値流体解析技術の適用性について検証するとともに、今後の橋の設計や評価への適用に向けた課題等について議論を行うことを目的とするもので、作業部会 G における日米共同研究活動と連携して、米国の太平洋地震工学研究センター（PEER）の主催により行われました。本ワークショップには、米側から連邦道路庁、州交通局、PEER、大学の学識経験者26名、日本側から土木研究所、港湾空港技術研究所、大学の学識経験者7名、合計で33名が参加し、討議中心によりワークショップが運営されました。

本ワークショップにおける既存の数値流体解析技術の橋への適用性の検証に関しては、土木研究所が実施した大型水路実験の結果がベンチマークとして活用されました。土木研究所が実施した実験は、橋の模型規模が大きく、津波が上部構造に作用する時に各支承部に生じる反力を適確に計測した実験結果を得ていることから、解析技術の検証のための比較データとして選定されました。一方、本ワークショップでは5種類の数値流体解析手法（CADMAS-SURF/3D, OpenFoam, Particle Method, SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法, LS-DYNA)が提案され、それらの解析モデルの概要と水路実験の再現解析結果について発表が行われました。議論の中心は、津波が橋の機能に及ぼす影響を検討する上で重要な支承部に作用する水平力及び鉛直力の推定結果です。各解析



写真-1 開会の挨拶をする PEER 所長の Mahin 教授(左)、作業部会 G 米側部会長 Yen 博士(中央)、土木研究所星隈上席研究員(右)



写真-2 ワークショップ参加者の集合写真

手法とも津波が上部構造を通過する時の作用力特性については概ね実験結果と近似した傾向が算出されましたが、津波作用直後の作用力については一部のケースで再現性が得られていないものもあり、その原因についても活発な議論がなされました。

今回のワークショップでは、津波の影響を受ける橋の挙動評価に対する既存の数値流体解析手法の適用性の検証が議論の中心ではありましたが、斜橋や曲線橋に津波が作用した時の挙動、地震動と津波の影響のハザードの組合せ方等、実橋への適用にあたってさらに検討が必要な項目に関する意見交換を行うとともに、日米で実施している橋梁模型に対する水路実験等に関する重要なデータについては、今後お互いに共有しあい、有効に活用していくこととなりました。

また、本ワークショップの一環として、オレゴン州立大学の Wave Research Laboratory を視察しました。この実験棟には、長さ 48.8m、幅 26.5m、深さ 2.1m の Tsunami Wave Basin があり、孤立波を複数造波することができます。また、長さ 104m、幅 3.7m、深さ 4.6m の Large Wave Flume もあり、アクチュエータによるピストン運動により様々な波高と周期の波を作るこ

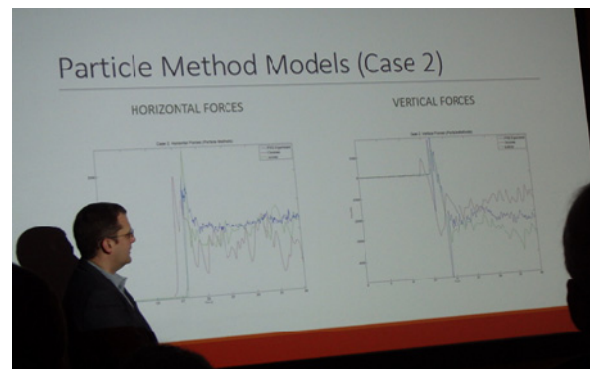


写真-3 テクニカルセッションの様子



写真-4 水路実験施設見学の様子

とができます。いずれも大規模なスケールの実験施設であり、橋梁関係では、今後、1/5 縮尺の模型に対する水路実験が実施される予定とのことです。

今回のワークショップでは、会議の企画運営並びに現地視察において、OSU の Harry Yeh 教授、Michael Scott 准教授、他関係各位にお世話になりました。ここに、厚くお礼を申し上げます。なお、本ワークショップの関連資料は下記ウェブページで公開されています。

<https://secure.engr.oregonstate.edu/wiki/tsunamiworkshop/index.php?n=Main.HomePage>

(土木研究所橋梁構造 G 星隈順一、中尾尚史)

港湾空港技術研究所「大規模津波水路」

大規模波動地盤総合水路は、長さ 184m、幅 3.5m、深さ 12m の水路で、2000 年(平成 12 年)3 月に完成しました。完成当初は造波版を±4m 動かすことにより、高波として 3.5m の波高を造波することが可能でしたが、2004 年のスマトラ沖地震津波による被害状況をうけ、2005 年 5 月に、造波版が最大 14m (正確には安全性の問題から 13.8m) まで動くことができるようにシステムを改良し、最大高さ約 2.5m の津波を人工的に造波できるようにしました。2011 年の東日本大震災による地震・津波の被害において、複合災害の課題が取り上げられ、2013 年 3 月に、最大搭載荷重 170 トン、最大加速度 1.5G の中振動台を設置し、地震・津波の複合災害の解明を行うための研究の基礎的データの取得を目標とした研究を行うこととなりました。



図-1 現在の大規模波動地盤総合水路の外観と各種装置

造波機は、ラック・ピニオン式のピストン型で、駆動部は全長 28m です。220kW の AC サーボモーター4 台を用いて、高さおよそ 11m の造波版を動かします。造波能力は、風波時(連続稼働)においては、最大ストロークが±4m で、そのときに生じる波浪諸元は、最大波高 3.5m (水深 5m)、周期 6~8 秒、となります。また 2005 年に、津波(単発稼働)を造波できるように改良し、最大ストロークが押し波時には+14m、引き波時には-10m まで作用させることができます。そのときの最大津波高は、2.5m (水深 3m)、片周期 10 秒となります。

沿岸の構造物は、水、地盤、構造物の相互作用で成り立っているため、支配する相似則は複雑であり、大規模実験は、その問題を解決するひとつの手段になりえると考えられます。一方で、安全面への配慮は大切であり、実験水槽の断面作成工程や模型の選定などの工夫を行うことが重要です。写真-5 は遡上した津波に対する人体流下試験の様子です。人と流れの強さの関係について、その特性を明らかにしています。大規模試験ならではの試験と言えます。



写真-5 津波による人体流下試験

しかし、この実験は、「津波高 50cm で人は流される」という拡大解釈をして伝えられることが多く、一方で、津波高 50cm 程度では内陸への被害は考えられないため、本試験は津波力の過大評価であると捉えられ、結果避難促進につながらないとも考えられました。このように、実験のわかりやすさとは裏腹に現象を単純化され、誤解を招く恐れがあることを念頭においておく必要があるところです。



写真-6 防潮壁に対して地震動のみ作用させたあとの様子

最後に地震と津波の重畳に関する研究に関する最新の研究を紹介します。模型縮尺は 1/10 を想定した高さ 1.2m の防潮壁の模型を振動台の上に乗せ、地震動のみ(3Hz, 400gal の規則波)、津波の(50cm の孤立波)、地震動と津波の同時作用という 3 つのパターンで実験を行った結果をここでは紹介しません。地震動のみ(図-6)では動かず、津波のみ(図-7)では下部が洗掘される程度で、防潮壁自体は動きませんでした。両方同時に作用することで、大きく変形している様子がわかります(図-8)。今後さらに、様々なパターンで検討を行うことで、定量的な影響を明らかにしていきたいと考えています。

東日本大震災において多くの防波堤や防潮堤が倒壊したことを受け、設計波力に対して安全かどうかということから一歩踏み込み、設計を超えた外力を受けた場合における構造物の変形度合まで考える必要があると考えられます。そのような構造物の変形まで考慮したような設計を行うため、大規模試験を活用しながら今後も研究を進めていく予定です。



写真-7 防潮壁に対して津波のみ作用させたあとの様子



写真-8 地震動と津波を同時に作用させたあとの様子

(港湾空港技術研究所 海洋情報・津波研究領域 有川太郎)

「車両と橋の地震時相互作用に関する大規模振動台実験」

米国で実施された最近の大規模実験研究の中から事例を1つ紹介します。

写真-9は、米国ネバダ大学リノ校で実施された橋と車両の地震時相互作用に関する振動台実験を示したものです。橋面上の渋滞車両による活荷重が橋の地震時挙動にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目的としたもので、カリフォルニア州交通局（Caltrans）や連邦道路庁（FHWA）から委託された研究となっています。米国では、現在の橋の設計において、渋滞による交通荷重と大規模地震の同時発生を考慮していませんが、渋滞が頻発する都市部においてはこの同時発生の確率が高まることとなります。しかしながら、こうした渋滞車両が地震時の橋の挙動に対して、良い影響を及ぼすのか、悪影響を及ぼすのかについては、十分明らかにされておらず、今回の大型実験がその解答を得ることをねらったものでした。我が国の設計基準でも同様に、この同時発生を考慮することとはされていませんが、これまで車両モデルを積載した橋梁モデルの各種の解析検討が実施され、その影響の程度が大きい結果が得られています。

ネバダ大学では、地震工学研究実験施設に装備された4台の振動台上に約2/5程度の縮尺を有する3径間の曲線橋模型を構築しています。さらに、その橋桁上に、6台の実物のピックアップトラックを積載し、地震動によって加振し、橋全体の振動性状や橋桁を支持する鉄筋コンクリート橋脚の破壊特性を調査しています。ピックアップトラックの積載の有無など、合計6ケースの実験が実施されました。

振動台実験結果とその結果を再現可能な数学モデルを用いたパラメトリックな解析検討からは、各種の車両条件、地震動条件に対して、車両の積載によって橋の地震応答が一般に低下、あるいは影響が小さいことが明らかにされ、今後さらに十分な議論、吟味が必要とはされていますが、活荷重は一般に地震時慣性力に考慮しなくてよいという1つの重要なデータが得られた実験例となっています。詳細は、下記ウェブページや報告書等をご参照ください¹⁾⁻²⁾。

本実験や解析検討に際しては、我が国で実施された実験研究や解析研究のデータも情報共有されています³⁾。



写真-9 ネバダ大学による載荷車両が橋の地震応答に及ぼす影響に検証振動台実験
(写真：実験代表者であるネバダ大学 Ian Buckle 教授提供（作業部会 G メンバー）)

- 1)<http://newsroom.unr.edu/2011/09/22/university-of-nevada-reno-engineers-simulate-large-quake-on-curved-bridge-university-of-nevada-reno-engineers-simulate-large-quake-on-curved-bridge-full-size-pickup-trucks-on-bridge-deck-to-add-im/>
- 2)http://www.dot.ca.gov/hq/esc/earthquake_engineering/Research_Reports/vendor/un_reno/59A0695/59A695_Final%20Report.pdf
- 3)土木研究所：橋梁の地震応答に及ぼす活荷重の影響に関する研究（その1，その2），土木研究所資 3316号（1994年）及び第3355号（1999年）

（事務局より）

平成27年度UJNR活動予定カレンダー

平成27年度の合同部会（幹事会会議）、作業部会ワークショップの開催については、計画調整議論が予定されています。次号以降で報告いたします。



UJNR Panel Update 「UJNR 便り」 発行

UJNR 事務局：(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター

連絡先：〒305-8516 つくば市南原1-6 TEL:029-879-6773

運上茂樹(ウヅヨウ)、土生都素子(ハブツ)、柳田佐知枝(ヤギダ)

*) 関連するワークショップ等の開催予定・開催報告など、UJNR 耐風耐震構造専門部会内で共有したい有用情報がありましたら事務局までご連絡ください。