解説

見えてきた土木技術の役割

東日本大震災合同調査報告土木編 5

「原子力施設の被害とその影響」を踏まえて

電力中央研究所 大友 敬三

東日本大震災合同調査報告土木編 5「原子力施設の被害とその影響」が2014年8月に土木学会から刊行された。本解説では、まず、同調査報告内容を概説し、これらに分析・考察を加えた。次に、これを踏まえて原子力発電所の地震・津波リスクを低減するための原子力、機械、電気、建築、土木などの技術分野間連携における土木技術の役割、位置づけなどを論じた。

KEYWORDS: *Great East Japan Earthquake Disaster, reconnaissance report, civil engineering, nuclear power civil engineering, earthquake, tsunami*

I. はじめに

東日本大震災合同調査報告土木編 5「原子力施設の被害とその影響¹⁾」(以下では、特に断らない限りは土木編と記載)は2014年8月に土木学会から刊行された。なお、土木学会は合同調査報告のうち、土木編を含む8編の調査報告を幹事学会として担当している。筆者は2012年1月に組織された土木学会東日本大震災報告書編纂委員会委員兼幹事として土木編の編集主査を任じられ、土木編編纂作業に携わってきた。このような立場から筆者は、2015年2月13日開催の東日本大震災合同調査報告「原子力編」刊行記念合同報告会において、日本原子力学会、日本機械学会ならびに日本都市計画学会から刊行された原子力関連編と並んで土木編を報告する機会を得た。

東日本大震災報告書編纂委員会活動と並行して、土木学会では、原子力安全土木技術特定テーマ委員会活動が東日本大震災特別委員会(2011年4月～2012年3月)ならびに東日本大震災フォローアップ委員会(2012年6月～2013年6月)の傘下で進められた。同委員会では、原子力発電所被害の分析、原子力発電所の地震・津波に対

する安全確保のための提言策定、などについて調査研究が行われた。

同特定テーマ委員会の調査研究成果のうち、原子力発電所被害分析が土木編に反映されており、被災原子力発電所の事業者の方々に執筆いただいた。一方、原子力発電所の地震・津波に対する安全確保のための提言は、従来考慮されていた、基準地震動・津波に対する性能である「安全性」に加え、基準地震動・津波を超えるなどにより「安全性」が損なわれた場合の「危機耐性」を新たに性能として考慮することを提案するものであり、2013年7月に同特定テーマ委員会活動報告として公開²⁾している。また、本誌³⁾でもその内容を紹介している。

原子力発電所の地震・津波リスクを低減するには、原子力、機械、電気、建築、土木などの技術分野間連携が不可欠なことは言うまでもない。本解説では、土木編で報告された内容を概説するとともに、これらに分析・考察を加えた上で、これら分野間連携における土木技術の役割、位置づけなどを論じている。ここで論じる内容は、先に提言した原子力発電所の危機耐性を確保するためのいわば土木技術の具備条件として位置づけられる。

II. 土木編の構成

土木編は、東日本大震災における原子力発電所の土木施設(原子力土木施設)への地震や津波の影響ならびに放射性汚染廃棄物について、2013年3月時点で把握されている事実に基づき取りまとめられている。第1表に示すように土木編は、第1章 震災前の耐震設計、耐津波設計

Evolution of role of civil engineering in nuclear power plant safety learned from the Report on the Great East Japan Earthquake Disaster Civil Engineering Part 5: Damage to Nuclear Power Plants and its Radioactive Effects on Neighboring Area: Keizo OHTOMO.

(2015年4月30日 受理)

第1表 土木編の構成

<p>第1章 震災前の耐震設計，耐津波設計のレビュー（土木関連）</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 耐震設計審査指針の概要 2 断層活動性評価技術 3 津波評価技術 4 基礎地盤および周辺斜面の地盤安定性評価技術 5 屋外重要土木構造物の耐震性能評価技術 <p>第2章 震災の事例と教訓</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 女川原子力発電所 2 福島第一原子力発電所 3 福島第二原子力発電所 4 東海第二発電所 <p>第3章 放射性汚染廃棄物</p> <ol style="list-style-type: none"> 1 事故による環境汚染への取り組み 2 国内外の関連する法律・基準・指針などの整理 3 中間貯蔵の基本的考え方と状況

のレビュー（土木関連），第2章 震災の事例と教訓，第3章 放射性汚染廃棄物，から構成されている。

第1章では，土木施設被災状況の理解に資するため，東日本大震災以前の原子力土木施設の耐震設計や津波影響評価の考え方が整理されている。第2章では，東北電力(株)女川原子力発電所，東京電力(株)福島第一原子力発電所ならびに第二原子力発電所，日本原子力発電(株)東海第二発電所などにおける原子力土木関連施設の被災状況が報告されている。第3章では，東京電力(株)福島第一原子力発電所事故により，環境中に放出された放射性物質がもたらした社会への影響に関して，特に放射性汚染廃棄物に対して関係諸機関がどのように対処してきているかの観点から分析した結果が記載されている。これらのうち，第3章については，本誌で既に報告⁴⁾されているので，本解説では，対象外とした。

Ⅲ. 土木編「第1章 震災前の耐震設計，耐津波設計のレビュー（土木関連）」

Ⅲ. では，まず，原子力発電所への土木技術者の関わりについて簡単に触れ，次に，土木編第1章に見られる，東日本大震災以前からの耐震設計，耐津波設計の体系を解説する。

1. 原子力発電所への土木技術者の関わり

原子力発電所の立地・調査・計画・設計・建設・運用・保守などに関して，土木技術者は第1図に示すように，指針，審査，検査，運転，研究開発，広報，自主保安活動，などの業務に関わってきている。これらのうち，他分野と協働する項目もあれば，土木技術者が主体となる項目もある。主体となる代表的事項は，指針，研究開発における次のような分野；地質調査・地震活動調査，活断層評価，津波評価，重要構造物基礎地盤安定性評価，周辺斜面安定性評価，屋外重要土木構造物，などである。

これらの調査研究対象については，土木学会原子力土

第1図 土木技術者の原子力発電所への関わり

木委員会において1980年代から継続的に調査研究活動してきており，これまでに技術分野ごとの委員会活動報告書が刊行されている。これらの報告書が参照される形で原子力発電所の耐震設計，津波評価，などに関する民間技術指針（日本電気協会「原子力発電所の耐震設計技術規格／指針」⁵⁾）に反映されており，国の審査要求に対する技術根拠として活用されている。

2. 土木技術が担う耐震設計，耐津波設計の役割

第1章では，章タイトルのごとく土木技術が主体的に関わる断層活動性評価，津波評価，基礎地盤および周辺斜面の地盤安定性評価，屋外重要土木構造物の耐震設計，などの技術分野の現状が原子力土木委員会幹事ほかの関係者によりレビューされている（第1表）。

断層活動性評価では，基準地震動策定に必要となる調査手法，活断層認定方法，などが述べられている。津波評価では，数値解析による津波高さ推計手法，津波波力評価法，海底地形変形，さらに確率論的津波ハザード評価，などが扱われている。基礎地盤および周辺斜面の地盤安定性評価では，評価に必要となる地盤調査方法，地盤特性の試験方法，耐震解析手法，などについて解説が加えられている。屋外重要土木構造物の耐震設計では，耐震設計に必要な耐震解析手法や評価基準値などが紹介されている。

「3 津波評価技術」では，原子力発電所設計における津波評価の歴史について説明が加えられている（第2図）。これによれば，1993年北海道南西沖地震津波被害を契機として，1997年に国として津波対策が強化され，2002年に土木学会より数値解析による津波高さ推計を中心とした「原子力発電所の津波評価技術」が刊行されたこと，などの経過が解説されている。同様な説明は，「5 屋外重要土木構造物の耐震設計」において，基準類の改訂が必要となる地震被害発生，コンクリート標準示方書改訂，などの動向を踏まえて屋外重要土木構造物の耐震設計技術が向上されてきたことが示されている。

以上のように，第1章により，原子力発電所における耐震設計や津波影響評価に関する土木技術の役割が明確に示されている。さらに，断層活動性評価，津波評価，

1964	1983	1993	1997	2002	2004	2006	2008	2011
新潟地震津波	日本海中部地震津波	北海道南西沖地震津波	七省庁「地域防災計画における津波対策強化の手引き」策定	土木学会・原子力土木学会 津波評価部会「原子力発電所の津波評価技術」出版	土木学会・原子力土木学会 津波評価部会「原子力発電所の津波評価技術」出版	原子力安全委員会「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」改訂	日本電気協会「原子力発電所耐震設計技術指針」JECG 4601-2008 において津波評価技術指針策定	東北地方太平洋沖地震津波

第2図 原子力発電所設計における津波評価の歴史
(土木編¹⁾より引用)

基礎地盤および周辺斜面の地盤安定性評価、屋外重要土木構造物の耐震設計、などの分野における技術体系の変遷を把握することができる。

IV. 土木編「第2章 震災の事例と教訓」

土木編第2章では、被災原子力発電所ごとに土木関連施設の地震の影響、津波の影響、ならびに復旧状況、などが述べられている(第1表)。津波の影響に関する記述は、今後、整備される原子力発電所施設の耐津波設計、津波リスク評価に向けた基礎資料になると考えられる。IV. では、これらを俯瞰して、1)地震の影響、2)津波の影響、3)復旧状況、などの観点から震災の教訓、再確認事項、今後獲得すべき土木技術、などを提示することを試みる。

1. 地震の影響

地震の影響については、1)既往地震被害事例に見られる被害形態、2)原子力発電所として初体験の被害形態、3)耐震裕度・対策等が発揮された事例、などの視点から分析している。これらの分析では、被災原子力発電所における地震観測記録に基づき、設計用基準地震動を超過するかあるいは相当する地震動作用下での事例を対象としていることになる。

1) 既往地震被害事例に見られる被害形態は、既往の国内被害地震において見られた公共土木構造物、産業施設、港湾施設、ライフライン施設、人工地盤、自然地盤、などの被害事例・被害モードと類似している事例を示す。また、2007年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所における屋外施設と同様な被害事例も対象となる。このような被害形態としては、埋戻し土の不同沈下、構内道路の変状、一般設備基礎の沈下・傾斜、護岸のはらみ出し、などが挙げられる。このうち、埋戻し土の不同沈下は2007年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所において経験した被害である。設計用基準地震動超レベルの地震動作用下においては、地盤に関わる部分で変状が生ずることは避けられないものと言え

る。

2) 原子力発電所として初体験の被害形態については、耐震設計では考慮されていない被害モードに加え、構造的被害は軽微または中程度であるものの、事故対応・復旧にあたっての弱点となった事例、などを含む。事例としては、地殻変動に伴い沈下したカーテンウォールや防波堤からの越波、発電所構外の工業用水導水管の破断、盛土崩壊による発電所内工事用電力鉄塔の倒壊、タンク類基礎ならびに周辺地盤の不同沈下、などが代表的である。

3) 耐震裕度・対策等が発揮された事例については、設計用基準地震動に対して耐震設計されていた安全上重要な土木構造物、2006年耐震設計審査指針改訂を踏まえた耐震安全性評価結果を踏まえた耐震裕度向上対策あるいは2007年新潟県中越沖地震による被害を教訓とした対策、などが該当する。安全上重要な土木構造物については、耐震性に影響を及ぼすような変状が見られなかったこと、排気筒支持鉄塔の鋼材による補強および制振装置(弾塑性ダンパー)設置改造工事が実施中であったこと(排気筒は健全)、2007年新潟県中越沖地震被害の教訓を踏まえて免震重要棟が設置されていたこと、などが具体例である。

以上で見てきた3つの視点から土木施設への地震影響を踏まえると、今後求められる土木技術の役割は以下のようなことになろう。まず、設計用基準地震動相当の地震動作用下においては、発電所構内地盤の埋戻し部、構内道路、一般設備については、少なからずの変状や損傷を受けることは避けられない。これらについては、地震後も無損傷となるように耐震設計することは合理的ではない。むしろ、変状を許容してもアクシデントマネジメント時に施設や地盤の変状が復旧活動を阻害することがないように構造計画上で配慮することが求められる。

次に、構造的被害が軽微であっても安全系統上の上位設備に波及的影響を及ぼすような事象、復旧活動の障害となるような事象などに注意を払うべきであろう。このため、他分野と連携しながら、地震影響に対する原子力発電所内の潜在的弱点箇所を特定するとともに敷地内のみならず敷地外の周辺地域を見渡して発電所事故発生時対応の要所となる箇所(アクセスルート、復旧資材供給拠点など)の耐震性を高めることなどが必要である。

さらに、設計用基準地震動に匹敵する強地震動作用においても安全上重要な土木施設の耐震裕度が認められたことから、東日本大震災以前の耐震設計技術の妥当性が確認された。今後も耐震安全性向上のためのハード面での対策や原子力発電所リスク評価の観点から耐震裕度の定量化、などが求められる。

2. 津波の影響

津波の影響については、1)津波の水理(外力作用)、2)

津波の二次的影響(土砂移動・堆積、漂流物)、3)建屋等開口部からの海水浸入、4)耐津波裕度・対策が発揮された事例、などの事項に沿って分析している。

1) 津波の水理(外力作用)は、津波の浸水(高さ・深さ、時間、速度、圧力など)に伴う外力であり、波圧(静水圧、動水圧)、浮力などが含まれる。事例としては、防波堤(パラペット、透過防止工、消波ブロック、捨石など)の傾斜・損傷、重油タンクの移動・倒壊による重油流出、防波堤のパラペットや透過防止工の一部倒壊、取水路角落し口の蓋流出、などが挙げられる。

2) 津波の二次的影響(土砂移動・堆積、漂流物)は、津波に伴う諸現象であり、敷地内への津波漂流物集積による事故対応の支障、構内道路の洗掘、屋外トレンチ内への土砂流入・堆積、などが具体例である。

3) 建屋等開口部からの海水浸入は、津波水理によって構造的被害は伴わないものの流体挙動の結果、原子力発電所機器の機能に影響を与えたものであり、冠水による非常用海水系ポンプ設備ならびに非常用ディーゼル発電機などの機能喪失が代表的被災事例である。海水浸入要因や経路としては、海水系ポンプや非常用ディーゼル発電機が設置されている建屋周辺全域の浸水、海水ポンプ室貫通部から建屋への浸入、などが認められている。

4) 耐津波裕度・対策が発揮された事例については、サイトの津波評価等に基づいて実施されていた対応策、などの事例を含む。事例としては、津波想定の見直しを踏まえた海水ポンプ室津波対策工事実施(側壁嵩上げ、貫通部封止)、想定津波高さに対し余裕を見込んだ敷地への主要建屋・設備設置、引き波継続時でも必要冷却水取水が可能な取水設備構造、などが挙げられる。

津波影響に関する4つの視点に共通して求められる土木技術の役割は以下のようなことになろう。まず、震災前からの津波評価技術を背景として、津波影響評価の基本となる津波高さ推計については、土木技術が主体となることは言うまでもない。

次に、津波の二次的影響や海水浸入については、防波施設は土木主体としても、建屋開口部等、電源盤等の電気設備、ポンプ類等の機械設備、などが対象となることから、建築、機械、電気などの分野と連携してそれぞれの設備の機能に応じた耐津波設計技術を確立することが求められている。現在でも、日本電気協会「原子力発電所耐津波設計技術規程」⁶⁾策定、日本地震工学会「原子力安全のための耐津波工学の体系化に関する調査委員会」などの活動が進められている。この中で土木技術は、被災原子力発電所において耐津波裕度確保や津波対策の実施経験を基本として、津波波源評価、津波伝播・遡上解析、津波波力・漂流物評価、などについて主導的役割を果たす必要がある。

3. 復旧

復旧については、応急復旧、安定化対策に大別できる。このうち、安定化対策については、福島第一原子力発電所のように大量の放射性物質が環境中に放出されたことに伴う対応である。ここでは、むしろアクシデントマネジメントに関係が深い応急復旧面での復旧技術に焦点をあててみたい。

応急復旧には、以下の①～⑧のような土木復旧技術が駆使された：①発電所構外の工業用水導水管破断に対応した所内用水確保のための仮設ポンプ設置とコンテナ車20台による計7,700m³の水運搬、②発電所復旧作業のため、段差・不陸が生じた構内道路のアスファルトの剥ぎ取り、整形などによる通行機能維持、③地震・津波直後の土木設備被害状況把握の対応、④人・モノが絶対的に不足しかつ放射線による過酷な環境下での瓦礫撤去、⑤重機オペレーターの確保(協力会社・下請会社職員の方々の自主的な参画)、⑥事故対応メンバーの安否確認、⑧ケーブル類の道路下埋設(ケーブル・ホース布設と構内道路車両通行の輻輳回避)。

地震、津波に限らず、土砂災害、洪水災害が発生した場合には土木特有の施工技術を利用した土砂や瓦礫撤去等による原状復帰、施設の機能回復、物資輸送、ルート確保などの復旧が実施される。被災原子力発電所においては、構内道路が変状し、津波二次的影響による土砂や瓦礫が発電所構内に散在していたわけである。このように平常時と異なる様相の中で原子炉の冷温停止に向けた復旧が行われた。この結果を踏まえ、敷地内復旧に関する土木技術の重要性は再認識されるべきである。

V. 土木技術の役割の可視化

地震の影響、津波の影響、復旧、などの側面から、東日本大震災後の教訓としての土木技術の役割については、以下が主要な事項となろう：①一般設備の耐震計画上の配慮、②安全上重要な土木構造物の耐震裕度の定量化、③関連分野と連携した耐津波設計技術の確立における土木技術の主導、④アクシデントマネジメントにおける土木復旧技術の重要性の再確認。これらの事項を土木施設の耐震設計・耐津波設計技術体系に積み上げることにより原子力発電所の地震・津波リスクを低減するための土木技術の役割の全体像が浮き彫りされよう。

原子力安全以外の分野では、土木技術の位置づけはどのように見られているであろうか。土木学会エネルギー委員会エネルギーインフラ輸出小委員会活動報告(2014年4月)⁷⁾によれば、米国における原子力発電所建設プロジェクトでは、大手建設企業がリーダーとなって事業を遂行する形態が特徴であることが指摘されている。これは、プロジェクトに関するリスクについては、機電部門で扱うリスクよりも地質、地形、地下条件、自然条件関連などのリスクがプロジェクトに与えるインパクトが大きく、インパクトが大きいリスクに対処できる部門；す

第3図 土木技術の役割・位置づけの概念

なわち土木技術部門が中心となったプロジェクト遂行形態をとることが自然の流れであることによる。海外の原子力発電所プロジェクトのこのような論理に基づけば、地震・津波などの自然外部事象に対する原子力発電所リスク低減に土木技術が主体となる必然性が感じられる。

2014年5月22日に開催された土木学会エネルギー委員会エネルギーインフラ輸出小委員会活動報告会における基調講演「パッケージ型インフラ輸出への取り組みとその課題」(草柳俊二(高知工科大学))で紹介された図を参考にして、第3図のように土木技術の役割・位置づけを概念的に可視化することを試みた。第3図は、いわゆる原子力発電所の多重障壁の考え方を、原子力発電所を構成する主要な設備群を対象として拡張したものと考えてもよい。ここで、各分野の楕円面積の大きさは、発電所構内に占める物理的スペース、自然事象を扱う範囲の広さ、底面から楕円の重なり順序については、自然外部事象の発生、到達、影響の進展の順序、などを見てよい。また、地盤・土木構造物は自然外部事象へのフロントラインとなることを示す。

原子力発電所に影響を及ぼす規模の大きい地震・津波が発生した場合には、原子力発電所構内はプラント本体と敷地地盤を含めて全体が同時に影響を受ける。また、周辺地域も相当程度の被害を受けることも充分想定される。第3図の底面部分に地盤・土木構造物を位置づけたのは、原子力発電所の自然外部事象リスクの低減ならびに事故発生時のアクシデントマネジメントにおいて原子

力発電所の主要設備に関わる技術分野間連携を下支えしていくことが土木技術の使命であることを示している。

VI. おわりに

東日本大震災合同調査報告土木編5「原子力施設の被害とその影響」を踏まえ、原子力発電所の地震・津波リスク低減における土木技術の役割について考察した。自然条件が厳しいわが国において、原子力発電所の安定運転に貢献できる土木技術の役割あるいは他分野からの期待は、決して小さくはないはずである。

－ 参考資料 －

- 1) 土木学会：東日本大震災合同調査報告土木編5 原子力施設の被害とその影響，2014.8.
- 2) 土木学会東日本大震災フォローアップ委員会・原子力安全土木技術特定テーマ委員会：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言(土木工学からの視点)
<http://committees.jsce.or.jp/2011quake/node/158>.
- 3) 当麻純一：原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿－土木工学からの視点－，日本原子力学会誌，Vol.55，No.8，pp.23-27，2013.8.
- 4) 河西基，藤塚哲朗，吉原恒一，勝見武，枋山修：福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染と放射性廃棄物処理・処分への取り組み，日本原子力学会誌，Vol.55，No.8，pp.10-22，2013.8.
- 5) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2015/指針 JEAG4601-2015(発刊準備中)。
- 6) 日本電気協会：原子力発電所耐津波設計技術規程 JEAC4629-2014.
- 7) 土木学会エネルギー委員会エネルギーインフラ輸出小委員会：パッケージ型インフラ輸出の促進に向けて～建設技術者が果たすべき役割～，
<http://committees.jsce.or.jp/enedobo/>.

著者紹介

大友敬三 (おおとも・けいぞう)

電力中央研究所

(専門分野/関心分野) 土木工学，地震工学，
原子力土木