

社会基盤施設の耐災設計思想に見る 『技術基準の進化論』

佐々木 大也¹・家田 仁²

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail:sasaki@trip.t.u-tokyo.ac.jp

²フェロー会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail:ieda@civil.t.u-tokyo.ac.jp

東日本大震災では津波により甚大な被害が出た一方で、地震動による被害は比較的軽微であった。このような差異は技術基準の差に起因すると考えられる。そこで本研究は、自然災害に対して社会基盤施設の技術基準はどのような想定の下で設計を行っているのか、そしてその技術基準はいつに進化してきたのかを調査した。種々の社会基盤施設の間で比較を行うことで技術基準の現状および進化の時期に違いがあること、そして技術基準の進化に違いをもたらす原因としては、災害の性質、被害経験、他の基準との整合性、被害の影響、復旧の容易さ、防災可能性、対策の普及度があることを明らかにし、人々の災害に対する考え方の本質を探った。原子炉建屋の耐震基準など、より進んだ技術基準を参考にしてさまざまな分野で技術基準が進化することが今後望まれる。

Key Words : disaster protection and mitigation, technical standards, evolutionary theory, infrastructure

1. はじめに

2011年3月11日、東日本大震災が発生し1万9千人以上の死者・行方不明者を出す惨事となった。

この地震による被害の大部分は津波によるものであり、震度7を記録した宮城県栗原市で死者・行方不明者が0名であったことから分かるように、マグニチュード9.0という地震の規模にもかかわらず地震動そのものによる被害は軽微であったといえる。このような違いが生まれた理由として、今回の地震動は技術基準の中で想定されていたものであったのに対して津波は想定されていなかったことが挙げられる。

このように、対象とする災害によって備え方、すなわち技術基準は異なっている。

そこで本研究は、地震や津波などの自然災害に対する技術基準がどのように災害による外力を想定しているか調査し、さらにその変遷をたどることで、技術基準がいつに進化してきたかその進化の差異の原因は何かを明らかにし、人々の災害に対する考え方の本質を探る。

個々の自然災害に対して個々の社会基盤施設でどのように技術基準が進化してきたかを研究したものは、藤原¹⁾や西村²⁾などが存在するものの、それらを網羅的

に比較・分析した研究は存在しない。

本研究で対象とした自然災害は、日本で代表的と考えられる地震、津波、洪水、土砂災害、風、高潮・高波である。各々の災害に対してそれらの災害と関わりの強い社会基盤施設における技術基準を調査した。(表-1)

表-1 対象とした自然災害と社会基盤施設

地震	建築物、道路橋、鉄道橋、港湾構造物、上水道、下水道、ダム、原子炉建屋、建築地盤基礎、道路土工、鉄道土構造物、河川堤防、宅地造成地
津波	防潮堤、原子炉建屋
洪水	河川堤防
土砂災害	砂防工
風	建築物、道路橋、風車
高潮・高波	防潮堤

2. 外力想定による技術基準の分類

本研究では、社会基盤施設が耐えうる外力（災害規模）を超えるような外力に対してどのように技術基準が備えられているかに着目し、技術基準を図-1のようにStage 0, 1, 2, 3, 4の5段階に分類した。

図-1でLevel 1, Level 2設計外力という表現を行っているが、土木学会³⁾によると、例えば地震動についてLevel 1, Level 2は以下のように定義される。

Level 1 地震動：構造物の供用期間中に1~2回発生すると考えられる地震動。

Level 2 地震動：現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動。

本研究では、地震動以外の災害に対しても同様の規模のものをLevel 1, Level 2と定義する。

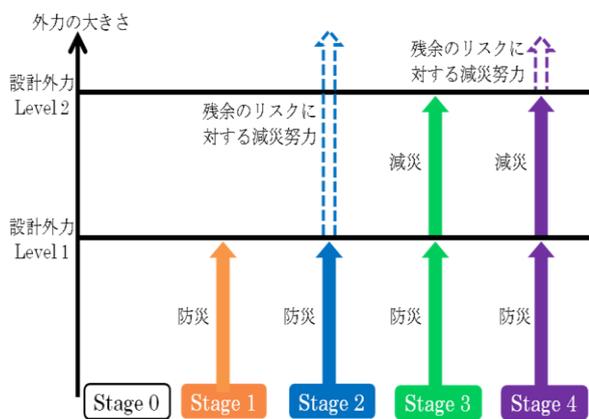


図-2 技術基準の分類

これを踏まえて、それぞれのStageを下のように定義する。

Stage 0：明確な設計外力が無い。

Stage 1：Level 1以下の外力に対して被害が発生しないようにする「防災」を行う。

Stage 2：Level 1以下の外力に対しては「防災」、Level 1以上の外力に対しては明確な設計外力は無いものの、Level 1を超える災害が発生しうることを想定して実行可能な最大限の努力をして被害を最小化する「減災努力」を行う。

Stage 3：Level 1以下の外力に対しては「防災」、Level 1以上の外力に対してはLevel 2の外力を想定し「減災」を行う。Level 2以上の外力に対しては設計外力が無い。

Stage 4：Level 2以下の外力に対してはStage 3と同様であるが、Level 2以上の外力に対してもStage 2と同様の「減災努力」を行う。

本研究では、このStageが上がることを「技術基準の進化」と呼ぶ。

3. 技術基準の進化の時期に関する考察

以下では技術基準の変遷をまとめ、具体的な差異を抽出するとともに、その差異の原因について考察する。

ここでは、進化の時期に着目して進化の理由の考察を行う。（図-2）

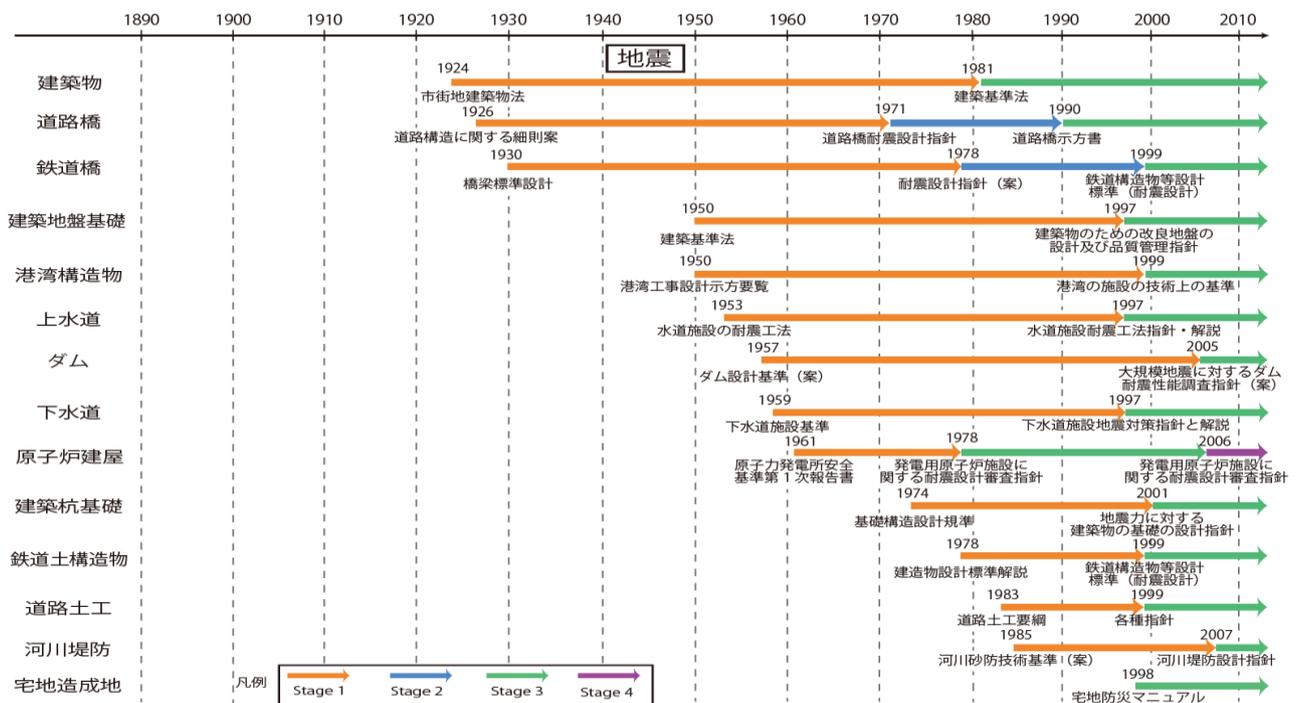


図-1 耐震基準の年表 1),2),4)-15)

図-2 は種々の社会基盤施設ごとに地震に対する技術基準（以下、耐震基準と呼ぶ）がいつ進化してきたかを示した年表である。

建築物においては、1923年に発生した関東大震災を契機として1924年に制定された「市街地建築物法」において建築物を設計する際に地震動を考慮して設計することが義務となった。また、1978年の宮城県沖地震による被害を受けて、1981年に改正された「建築基準法」では、二段階の地震動が設定され、減災の概念が導入された⁴⁾。

一方河川堤防の場合では、最初に地震動の設計外力が明確化されたのが1985年の「河川砂防技術基準(案)」においてであった。また、多くの社会基盤施設において1995年に発生した阪神淡路大震災を契機として1990年代後半にStage 3へと進化したが、河川堤防はそれから少し遅れて2007年の「河川堤防設計指針」において減災の概念が導入された⁵⁾。

また、図-3 は地震以外の災害に対する技術基準の進化の時期を示した年表である。

土砂災害に対する技術基準（以下、耐土砂災害基準と呼ぶ）は1897年に制定された「砂防法」においてStage 1へと進化し、1958年に制定された「地すべり等防止法」においてStage 2へと進化したといえる¹⁶⁾。

一方で防潮堤の津波に対する技術基準（以下、耐津波基準と呼ぶ）は1958年に制定された「海岸保全施設築造基準」においてStage 1へと進化し、1983年に制定された「津波常襲地域総合防災対策指針(案)」においてStage 2へと進化したといえる¹⁷⁾。

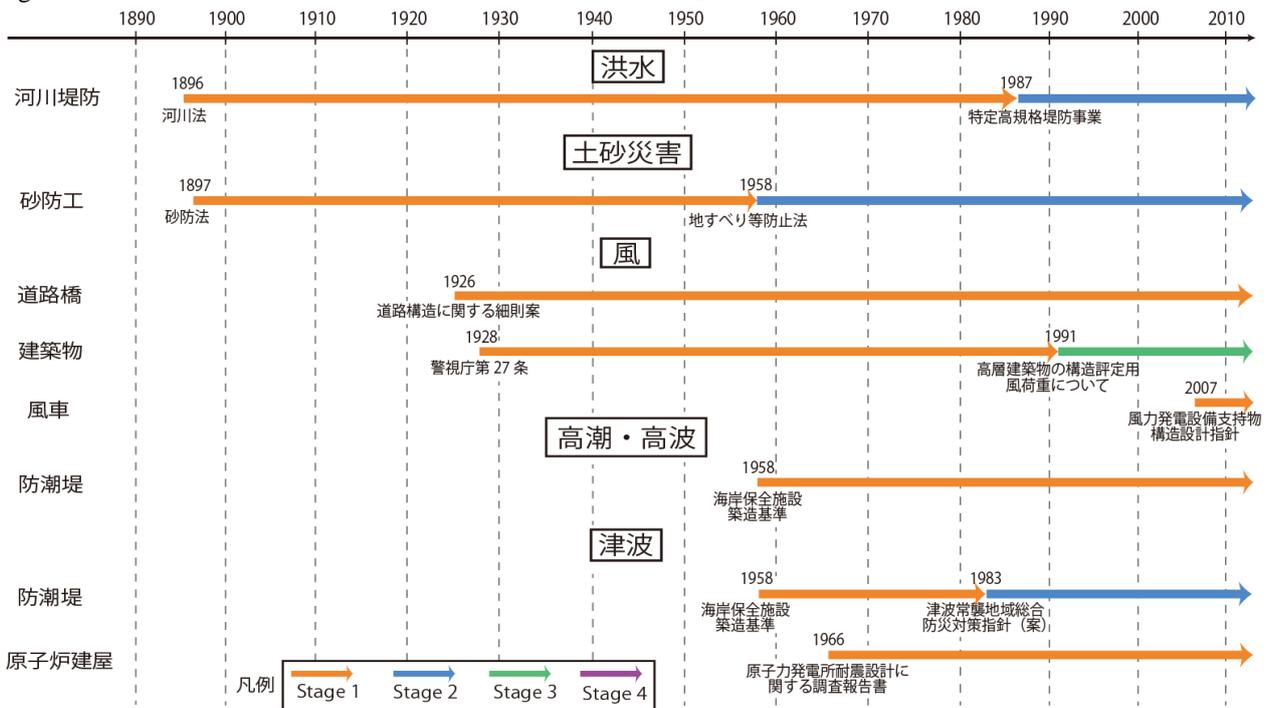


図-3 耐洪水、土砂災害、風、高潮・高波、津波基準の年表^{16)~25)}

これらの図より、進化の時期には大きな違いがあることが分かる。以下では、なぜこのような差異が生じたのかを考察する。

(1) 復旧の難しさによる進化の加速

図-2より、耐震基準がStage 1へと進化する時期には大きな差異が存在することが分かる。具体的に見ていくと、建築物や橋梁といった鉄筋コンクリート構造物では進化が相対的に早く、道路土工などといった土構造物では進化が遅いといえる。

このような差異が存在する理由としては、人工物である鉄筋コンクリート構造物は設計技術が早くから発達していたことに合わせて耐震基準も進化し、自然物である土を使った土構造物は設計が難しいため明確な耐震基準を設計することが難しく、加えて復旧は容易であるため耐震基準が進化するのが遅かったことが考えられる。

(2) 被害の及ぼす影響による進化の加速

原子炉建屋の耐震基準は最も早くStage 3へと進化しているが、これは原子炉建屋では被害が出た際に影響が大きいためであると考えられる。同様に、建築物や道路橋、鉄道橋の耐震基準も他の基準と比べて早く進化している。

また、洪水に対する技術基準（以下、耐洪水基準と呼ぶ）と耐土砂災害基準がStage 1へと進化したのはそれぞれ1896年、1897年であり、今回の対象としたなかで最も早い。これは、農業労働力比率が66%（1895年当

時)にも達していた²⁶⁾日本社会において、水害とそれに伴う土砂災害への対応が最も重要であったためと考えられる。

耐洪水基準、耐津波基準はそれぞれ1987年、1983年にStage 2へと進化しているが^{15),17)}、この時期には多くの分野で耐震基準はStage 1に留まっていた。

耐洪水基準がこのように進化したのは、都市化が進んで河川のそばにまで住宅が立地するようになり洪水が起こった場合に大きな経済被害が発生すると予想されるようになったためであると考えられる。

また、耐津波基準の場合は、1976年に東海地震の危険性が認知されるようになり、想定される津波が大きくなったことで計画対象津波は防潮堤を超える可能性があることが認められ、ソフト対策と組み合わせる必要があると考えられるようになったためと考えられる¹⁷⁾。

以上より、原子炉建屋など被害が出た場合に大きな影響を及ぼすと考えられるものに対しては早く技術基準が進化すること、また経済発展などで被害想定が変化すると技術基準が進化することから、被害の及ぼす影響が大きいほど進化が早くなるといえる。

(3) 防災の困難さによる進化の加速

耐土砂災害基準は、1958年と最も早い時期にStage 2へと進化しているが¹⁶⁾、これは土砂災害が発生する可能性がある場所が日本中にあり、その他の自然災害と違って被害を無くすことが極めて難しいと考えられ、被害の発生を前提とした技術基準へと進化したと考えられる。

このように、完璧に防災を行うことが困難な場合には技術基準は早く進化する。

(4) 被害経験による進化の加速

ダムの耐震基準がStage 3へと進化したのは2005年であり、他の耐震基準が1995年の兵庫県南部地震を受けて1990年代後半に揃ってStage 3へと進化したとことと比較すると少し遅れての進化であったといえる。これは、ダムが兵庫県南部地震であまり被害を受けなかったために技術基準の進化につながらなかったものと考えられる。

また、高潮・高波に対する技術基準(以下、耐高潮・高波基準と呼ぶ)と耐津波基準がStage 1へ進化するのは1958年であり、他の自然災害に対する技術基準と比べて遅いことが分かる。これは、戦後になって海岸に人が多く住み始めた頃に台風による高潮で大きな被害が出たこと、また津波を理解するための理論展開が始まったのが1933年昭和三陸地震津波以降であった¹⁷⁾

ことによると考えられ、津波による被害が稀にしか発生しないことが進化を遅れさせたと考えられる。

このように、被害の経験が無い、もしくは少ない分野では技術基準の進化が遅いといえる。逆に、被害が技術基準の進化する契機になることが多いともいえる。

例えば、道路橋は1971年にStage 2へと進化しているが、これは1964年新潟地震で昭和大橋が落橋したことによるものである²⁷⁾。また、1978年宮城県沖地震による被害を受けて鉄道橋はStage 2へ、建築物はStage 3へそれぞれ進化している²⁴⁾。

以上のことから、技術基準の進化には被害の経験が大きく影響していると考えられる。

(5) 対策の普及による進化の加速

図-2より、河川堤防の耐震基準は2007年にStage 3へ進化しているが、これは上述したダムと同様に少し遅れての進化であるといえる。この理由としては、河川堤防は1990年代後半には耐震化そのものが全国的になされておらず、1997年に改訂された基準ではLevel 2地震動よりもLevel 1地震動への対応が優先されたためであると考えられる⁵⁾。

このように、大きな災害への対策を行うためにはそれよりも小規模な災害に対して既に対応されていることが必要であり、そのような対策が進んでいるほど進化が早いと考えられる。

4. 技術基準の進化の過程

前章でまとめた技術基準の変遷をもとに、それぞれの技術基準が現在どのStageにあるか、そこに至るまでにどのようなStageを経てきたのかを図-4に示す。これにより、技術基準の進化の過程と現状にはそれぞれの構造物や対象とする災害ごとに違いがあることが分かる。以下では、その原因について考察を行う。

(1) 災害の性質による進化の早さの違い

図-4より、耐震基準はStage 3もしくはStage 4に進化しているのに対して、耐洪水基準、耐土砂災害基準、耐津波基準はStage 2となっている。

地震に対しては、耐震基準においては、Level 1以下の地震動については弾性変形の範囲内になるように設計し、Level 1以上の地震動については塑性変形を許容しながらも終局的な破壊には至らないように設計する二段階設計の概念が適用されている。一方で、洪水と土砂災害、津波に対しては防災施設で被害を完全に防ぐことはできないと言及しているが、Level 2すなわち

具体的な外力の設定および対策は行っていない。

このような差異が生まれる原因としては、日本において地震が数多くの被害をもたらしてきたことに加え、地震は振動の外力、すなわち平均荷重が0となる力が短時間にかかる災害であることから、二段階設計、すなわち減災の技術基準を他の自然災害よりも作りやすいためであると考えられる。一方、洪水や津波は一方方向に長い時間力がかかり続ける災害のため、塑性変形を一度起こしてしまうと終局的な変形に至ってしまうという特徴があるため、Stage 3へ進化できないと考えられる。

(2) 被害の及ぼす影響による進化の早さの違い

図4より、原子炉建屋の耐震基準は唯一Stage 4へと進化していることが分かる。この基準では⁹⁾、二段階の地震動を設定した上でLevel 2を超える地震動が発生する可能性があることを明確に指摘しており、合理的に実行可能な限り被害を小さくするための努力を払う必要があるとしている。

このように原子炉建屋の耐震基準が他の基準と比べて最も進化している理由としては、福島第一原子力発電所の事故からも分かるように原子力発電所で事故が起こった際には社会的に非常に大きな影響があるためと考えられる。

また、図4の進化の過程に着目すると、Stage 3以上に進化している基準のほとんどがStage 2を経ずに進化しているが道路橋と鉄道橋の耐震基準だけはStage 2を経てStage 3へと進化している¹²⁾。これは、橋脚が被害を受けても落橋は避けることを目的として落橋防止装置が耐震基準に取り入れられていることを反映して

いる。橋梁は、被害を受けると修復に時間がかかり交通網に大きな影響を及ぼすためこのような進化をしたと考えられる。

以上から、被害が出ることで社会的に大きな影響を及ぼすと考えられる社会基盤施設の技術基準は独自の進化をしているといえる。

(3) 被害経験による進化の早さの違い

図4より、風と高潮・高波に対する技術基準（以下、それぞれ耐風基準、耐高潮・高波基準と呼ぶ）は建築物の耐風基準を除いてStage 1に留まっている。これらの災害は過去に設計外力を超えるような災害があまり発生していないために技術基準が進化していないと考えられる。

このように、過去の被害経験が技術基準の進化に大きく影響すると考えられる。

(4) 他の基準との整合性による進化の早さの違い

図4より、耐風基準の中で建築物だけがStage 3となっていることが分かる。従来、建築物の設計の際には地震荷重が重視されていたが、高層建築物では地震荷重よりも風荷重が支配的となる。そこで、地震荷重と同じような計算手法を用いる必要が生じたためにStage 3へと進化した¹⁸⁾。

このように、他の基準との整合性を図るために進化した基準も存在する。

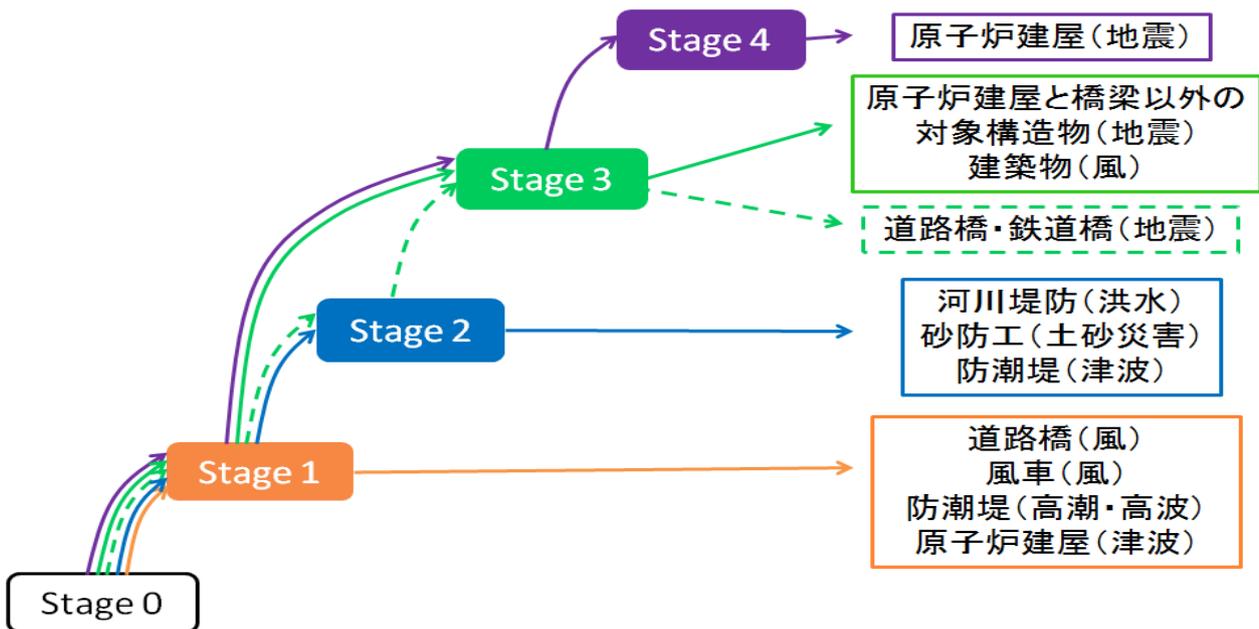


図4 技術基準の現状と進化の過程

5. おわりに

本研究では、技術基準において被害の発生を防ぐことができないような自然災害についてどのように考えられているかを様々な自然災害、社会基盤施設について比較し、耐災思想や進化の時期に違いがあることを明らかにした。それらの違いをもたらす要因をまとめると以下の7点になる。

- 1) 災害の性質
- 2) 被害の及ぼす影響
- 3) 被害経験
- 4) 他の基準との整合性
- 5) 復旧の容易さ
- 6) 防災可能性
- 7) 対策の普及度

以上のような要因から耐災思想や進化の時期に違いがあるものの、進化の方向性として Stage 0 から上の段階へ徐々に進化していくということは一致している。一方、災害に対する備え方の根本的な姿勢に災害によって大きな違いがあるべきではないと考えられる。したがって、原子炉建屋における耐震基準のように、進化の進んだ技術基準を参考とし他の技術基準が進化していくことが望まれる。

今後の課題としては、対象とする社会基盤施設を拡大し、より一層の知見を広げるとともに進化の進んでいる分野や遅れている分野が無いかな調査することが挙げられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、対象とした災害および社会基盤施設に関する知識を教授してもらうためにさまざまな方にヒアリングを行った。貴重な時間を割いてお話をしてくださった JR 東日本・島村誠様、電力中央研究所・当麻純一様、関東学院大学・宮村忠名誉教授、東京大学・大和裕幸教授、鈴木真二教授、高田毅士教授、須田義大教授、山田常圭教授、鎌田実教授、藤野陽三教授、佐藤慎司教授、前川宏一教授、古関潤一教授、東畑郁生教授、石原孟教授、小池俊雄教授、藤田香織准教授、知花武佳准教授、内村太郎准教授、大原美保准教授に改めてお礼を申し上げたい。

参考文献

- 1) 藤原稔：道路橋技術基準の変遷, pp.8-20, 技報堂, 2009.

- 2) 西村昭彦：鉄道橋梁の耐震設計法の変遷および今後の展望, 基礎工, Vol.35, No.3, pp.19-24, 2007.
- 3) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」, 2000
- 4) 田浜基嗣：鉄骨造建物の耐震設計に関する諸問題（I）, 溶接学会誌, Vol.64, No.7, pp.482-487, 1995.
- 5) 杉田秀樹：河川構造物の耐震設計の歴史・現状・展望, 基礎工, Vol.35, No.2, pp.36-41, 2007.
- 6) 勝村庸介：改めて原子力学び大きな財産に, エネルギーレビュー, Vol.311, No.12, pp.5-6, 2006.
- 7) 田村昌仁：建築基礎の耐震設計（建築基準法、学会基礎指針等）の歴史、現状および展望, 基礎工, Vol.35, No.2, pp.6-15.
- 8) 菅野高弘：港湾構造物の耐震設計法（港湾基準）の歴史・現状および展望, 基礎工, Vol.35, No.3, pp.15-18.
- 9) 日本水道協会：水道のあらまし 2008, p.206, 日本水道協会, 2008.
- 10) 松本徳久：ダム耐震設計・補強の歴史および展望, 基礎工, Vol.35, No.3, pp.56-60, 2007.
- 11) 楠田哲也：下水道施設の耐震設計・補強の歴史、現状と展望, 基礎工, Vol.35, No.3, pp.36-40, 2007.
- 12) 大崎順彦, 渡部丹：原子炉施設の耐震設計, pp.5-13, 産業技術出版, 1987.
- 13) 松尾雅夫：建築杭基礎の耐震設計法の変遷と最新の動向, 基礎工, Vol.35, No.2, pp.16-20, 2007.
- 14) 館山勝：鉄道土構造物の耐震設計法の歴史・現状および展望, 基礎工, Vol.35, No.3, pp.25-30, 2007.
- 15) 杉田秀樹：道路土工の耐震設計の歴史・現状・展望, 基礎工, Vol.35, No.2, pp.30-35, 2007.
- 16) 竹内篤雄：地すべり災害・防止工法の変遷について, 地すべり, Vol.16, No.3, pp.21-31, 1980.
- 17) 首藤伸夫, 越村俊一, 佐竹健治, 今村文彦, 松富英夫：津波の事典, pp.288-290, 朝倉書店, 2007.
- 18) 日本建築防災協会：20 世紀の災害と建築防災の技術, pp.312-318, 技報堂, 2002.
- 19) 三輪賢志：大規模盛土造成地の耐震基準等（宅地造成等規制法・宅地防災マニュアル）の歴史・現状および展望, 基礎工, Vol.35, No.2, pp.21-24, 2007.
- 20) 吉川勝秀, 白井勝二, 瀬川明久, 福成孝三, 長瀬迪夫：河川堤防学 - 新しい河川工学, pp.37-81, 技報堂, 2008.
- 21) 富田和久：高規格（スーパー）堤防, 土と基礎, Vol.40, No.3, pp.149-150, 1992.
- 22) 国土交通省河川局砂防計画課：土砂災害防止法の現状と今後の取り組み, 河川, Vol.62, No.5, pp.8-12, 2006.
- 23) 長崎敏音：道路構造に関する細則, p.205, 大倉書店, 1931.
- 24) 土谷学, 石原孟, 勝地弘, 嶋田健司：風力発電設備支持物構造設計指針策定に向けて, <http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/TCWRDWT/WindEnergySymposium.pdf>.
- 25) 藤間功司：中央防災会議・災害教訓の継承に関する専門調査会 1960 チリ地震津波報告書 第8章 構造物主体の津波対策の確立とその後, pp.154-165, 2006, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/kyoukun/rep/1960-chile%20JISHINTSUNAMI/11_chap8.pdf.
- 26) 山口三十四：産業構造の変化と農業 - 人口と農業と経済発展, p. 12, 有斐閣, 1994.
- 27) 宇津徳治, 嶋悦三, 吉井敏冠, 山科健一郎：地震の事典, p.377, 朝倉書店, 2001.

?

“EVOLUTIONARY THEORY OF TECHNICAL STANDARDS” IN
SAFETY DESIGN CONCEPT OF INFRASTRUCTURE SYSTEMS
AGAINST DISASTERS

Hiroya SASAKI and Hitoshi IEDA

In this paper, we researched how technical standards of various infrastructure systems assume scale of natural disaster and how they have been evolved. By comparison among various infrastructure systems, it became clear that present state and transition of technical standards are different from one another. In concrete terms, causes of this difference are properties of structures and natural disasters, experiences and influence of damage, integrity with other technical standards, the degree of difficulty of protection, difficulty in restoring and prevalence of measures.