

# 博士學位論文

(論文内容の要旨及び論文審査の要旨)

第11号

平成28年4月

八戸工業大学

は し が き

博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）  
第8条の規程に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の  
要旨をここに公表する。

# 目 次

## 課程博士

学位記番号	博士の 専攻分野の 名称	氏 名	論 文 題 名	頁
博 第 5 2 号	博士（工学）	畑野 智信	柿渋ゲルおよび微生物による水溶液からのクロムの除去と回収システムに関する研究 (A study on the removal and recovery system of chromium from the aqueous solution using persimmon gel and microorganism)	1
博 第 5 3 号	博士（工学）	虻川 高宏	橋梁の津波対策に関する研究 (A Study on Anti-Tsunami Measures for Bridges)	7

氏名	畑野 智信
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記番号	博 第52号
学位授与年月日	平成28年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	柿渋ゲルおよび微生物による水溶液からのクロムの除去と回収システムに関する研究 (A study on the removal and recovery system of chromium from the aqueous solution using persimmon gel and microorganism)
論文審査委員	(主査) 八戸工業大学教授 鶴田 猛彦 (副査) 八戸工業大学教授 野田 英彦 (副査) 八戸工業大学教授 若生 豊

## 論文の内容の要旨

クロム (Cr) はレアメタルの一つであり、Cr(VI)は酸化剤として有用な資源であるとともに、自然界に放出されると有害な物質である。本論文では、(1)柿渋ゲルを用いて水溶液中のCr(VI)を除去し、この過程で副製する、および、柿渋ゲルから脱着された時に溶出するCr(III)を微生物で除去するとともにCr(III)としてリサイクルするシステム、(2)鉄含有クロム(VI)廃液からの微生物による鉄除去-柿渋によるCr(VI)除去-微生物によるCr(III)除去の各除去および各段階での脱着による鉄とCr(III)の回収システムについて記述した。以下、各章の概略を示す。

「第1章は緒論であり、本研究を行う背景、既存のCr(VI)除去技術、筆者の研究室での本論文以前での研究について論じた。

「第2章 吸着材の作成、金属の定量分析と除去率・脱着率の計算」では、柿渋ゲルや微生物などの吸着剤の調整方法、金属溶液の分析方法およびデータの解析法について記述した。

「第3章 柿渋ゲルによる水溶液からのCr(VI)の吸脱着」では、柿渋ゲルに吸着されたクロムの柿渋ゲルからの沸騰脱着におよぼす塩酸濃度の影響について記述した。Crの脱着率は塩酸濃度が高いほど高い結果となった。このことから、実験を行った範囲では沸騰脱着に適しているのは1mol/Lの塩酸であった。柿渋に吸着された後のCr(VI)がどのような価数で存在しているかについて検討した。その結果、柿渋に吸着されたCr(VI)は、10分以内に全てCr(III)に還元されていた。Cr(III)はこのpH2で吸着されないことから6価で柿渋に吸着した後、急速に還元され、最終的にはCr(III)の形態として柿渋に吸着されていることがわかった。柿渋ゲルによるCr(VI)除去におよぼすCr(VI)濃度の影響を調べるとともに柿渋に吸着されたCrの化学状態について調べた。柿渋によるCr(VI)の除去率はCr(VI)濃度の上昇とともに低下したが、乾燥柿渋ゲル1g当たりの除去量は増加した。低濃度領域では、吸着されたCr(VI)は全てCr(III)に還元されていたが、高濃度になるほどCr(VI)のまま吸着されている量が増加した。しかしながら、吸着したCrを加熱脱着したところ脱着されたCrは全てCr(III)に還元されていたことから、加熱脱着の過程で、さらに還元が進んで全てがCr(III)に還元されることがわかった。

「第4章 微生物による水溶液中のCr(III)の吸脱着」では、柿渋ゲルによる除去能が低かった

Cr(III)の微生物 *Arthrobacter nicotianae* による除去におよぼす pH の影響を調べた。A. *nicotianae* による Cr(III)除去は pH に依存していた。Cr(III)水溶液の pH の上昇とともに Cr(III)除去量は増加し、pH5 で最大を示した。また、微生物による Cr(III)除去の濃度依存性を調べることにより、Langmuir の吸着等温式から乾燥微生物 1g 当たりの Cr(III)最大吸着量は 1 時間で 637  $\mu$  mol である事が算出された。A. *nicotianae* による Cr(III)除去は 5 分で 75%、2 時間で 90% が除去された。Cr(III)除去が短時間で行われ、Langmuir 吸着等温式に当てはまることから、A. *nicotianae* による Cr(III)除去は代謝ではなく吸着が主であると結論付けられた。Cr(III)の微生物からの Cr(III)脱着率は塩酸を溶離液として加熱した条件が最も高かった。また 0.1mol/L と 1mol/L の塩酸で加熱脱着を行った時脱着率は同じであったことから環境への負荷も考慮して、濃度の低い 0.1mol/L 塩酸での沸騰脱着が適当酸での沸騰脱着が適当であると考えられる。バッチ法での室温での Cr(III)の吸着と沸騰温度での脱着及びその繰返しについて検討した。その結果、脱着操作後の A. *nicotianae* の Cr(III)除去能力に低下が見られた。そこで吸着操作を除去効率の高いカラムに変えて微生物量、Cr(III)濃度を調節し、吸脱着を繰り返した結果、脱着操作を一度行った後の除去率低下は見られなくなった。また、脱着率に大きな変化は見られず、毎回脱着率 100%を示していた。7 種類の金属の混合水溶液からの A. *nicotianae* による金属除去について検討した。混在する銅(Cu(II))と Cr 除去には選択性が認められないが他の 5 種類の金属に比して Cr(III)と Cu(II)を選択的に除去できることがわかった。また、固定化微生物による Cr(III)の除去に及ぼす濃度の影響についても検討し、固定化していない菌体との比較も行った。その結果、Langmuir の吸着等温式から求めた乾燥微生物 1g 当たりの固定化微生物の Cr(III)最大吸着量は 1 時間で 417  $\mu$  mol である事が算出された。

「第 5 章 柿渋ゲルおよび微生物による Cr(VI)めっき廃液からの金属吸脱着」では、第 4 章までの Cr 水溶液からの Cr 除去の応用として、Cr273ppm、Fe24ppm を含む Cr(VI)めっき廃液からの Fe 除去に及ぼす微生物量、Cr(VI)除去に及ぼす柿渋ゲル量の影響、Cr(VI)を除去した排水からの Cr(III)の除去に及ぼす微生物量の影響、について検討した。その結果、柿渋ゲルと微生物の 2 種類の吸着剤を用いることでめっき廃液中の金属を取り除くことができた。固定化微生物による pH3.0 での Fe 除去、柿渋ゲルによる pH2.0 での Cr(VI)除去、固定化微生物による pH4.3 での Cr(III)除去の順番でめっき廃液を処理することにより、Cr(VI)は完全除去、Fe(total)を排水基準以下、Cr(total)はそれに近い濃度まで低下させることができた。Cr(VI)めっき廃液から金属を除去した後の微生物、柿渋ゲル吸着剤からの金属脱着について検討した結果、Cr、Fe とともに 85%以上の高い脱着率を示した。

「第 6 章 結論」は、本論文の結論であり、本研究全体の結論を記述した。

## ABSTRACT

Chromium (Cr) is a one of the rare metal and Cr(VI) is a useful resource as oxidizing agent, while it becomes toxic substance when it is released to the natural field. In this thesis, (1) the system of Cr(VI) removal using persimmon gel, removal of Cr(III) which produced during the Cr(VI) removal and desorbed from the Cr(VI) adsorbed on the persimmon gel, and recycle as Cr(III) using microorganism, (2) the system of iron (Fe) removal using microorganism-Cr(VI) removal using persimmon gel-Cr(III) removal using microorganism, and recovery of Fe and Cr(III) by desorption on each step are described. The following present the summary of each chapter of this thesis.

Chapter 1 is described the introduction and brief summary of this thesis.

Chapter 2 is described the adsorbent production, quantitative analysis of metal and the calculation of metal removed and desorbed. Production method of adsorbents, such as persimmon gel and microorganism, analysis methods of metal solutions and interpretation of data were described.

Chapter 3 is described the adsorption of Cr(VI) from the aqueous solution using persimmon gel and desorption as Cr(III) using diluted hydrochloric acid. The effect of the concentration of hydrochloric acid on the Cr desorption adsorbed on persimmon gel at reflux temperature is described. Cr desorbed (%) was increased with increasing the temperature and the most suitable desorbent was 1M hydrochloric acid. Chemical state of chromium after adsorption was determined. All Cr(VI) adsorbed on the persimmon gel was reduced to Cr(III) within 10 min. Because of the Cr(III) wasn't adsorbed at pH 2 on persimmon gel, Cr was adsorbed as the hexavalent and it was rapidly reduced to Cr(III) on the persimmon gel. Effect of Cr(VI) concentration on the Cr(VI) removal using persimmon tannin and that of chemical state of adsorbed Cr were examined. Cr(VI) removed ( $\mu\text{mol/g}$  dry wt. of persimmon gel) was increased with increasing the concentration of Cr(VI), whereas Cr(VI) removed (%) was decreased. All of Cr(VI) was reduced to Cr(III) using low concentration of Cr (IV), however, the amount of adsorbed as Cr(VI) was increased with increasing the concentration of Cr(VI). As all of the adsorbed Cr(VI) was desorbed to Cr(III) after desorption at reflux temperature, reduction was proceeded at desorption, and all of Cr(VI) adsorbed was reduced to Cr(III).

Chapter 4 is described the adsorption and desorption of Cr(III) from the aqueous solution using microorganism. At first, effect of pH on the removal of Cr(III), which could not be removed effectively by persimmon gel, using *Arthrobacter nicotianae*. Cr(III) removal was strongly depended on the pH of the solution. The amount of removed Cr(III) was increased with increasing the pH of the solution and that was maximal at pH 5. As a result of effect of Cr(III) concentration on Cr(III) removal, the amount of removed Cr(III) was calculated  $637\mu\text{mol/g}$  dry wt. cells at 1h by Langmuir's adsorption isotherm. *A. nicotianae* can be removed Cr(III) 75 and 90 % within 5min and 2h, respectively. As Cr(III) removal was very rapidly and that was fitted with Langmuir's adsorption isotherm, that was proceeded mainly by adsorption, not by metabolism. The amount of desorbed Cr(III) from that adsorbed microorganism was the highest by hydrochloric acid as a desorbent at reflux temperature. As

desorbed Cr(III) using 0.1M and 1M hydrochloric acid at reflux temperature were almost same, 0.1M hydrochloric acid is seemed that the best desorbent because of the environmental reason. The recycling of chromium adsorption at room temperature and desorption at reflux temperature using batch system was examined. The amount of Cr(III) adsorbed was decreased after desorption. Therefore, adsorption was changed by column system which can be effective adsorption. Recycling of Cr(III) adsorption and desorption was proceeded effectively and amount of removed Cr (III) was not decreased by controlling the amount of microorganism and Cr(III). The amount of desorbed Cr(III) was also quantitatively. Selective metal ion removal was also examined from the solution containing 7 kinds of metal ions using *A. nictianae*. Removal selectivity between Cr(III) and Cu(II) was not observed, but these two metal ions can be removed selectively from the solution containing 7 kinds of metal ions. Removal of Cr(III) using immobilized cells are compared with that using resting cells. As a result, the amount of Cr(III) removed was calculated 417 $\mu$ mol/g dry wt. cells in 1h by Langumuir' adsorption isotherm.

Chapter 5 is described adsorption and desorption of metal ions from the Cr plating wastewater containing Cr and Fe using persimmon gel and microorganism. It was examined as the application of Cr removal from the solution containing Cr only. Effect of microorganism amount on Fe removal and that of Persimmon gel amount on Cr(VI) removal from the plating wastewater containing 273ppm of Cr and 24ppm of Fe, and that of microorgasim amount on Cr (III) removal from the solution after Fe and Cr(VI) removed were examined. As a result, almost of Fe and Cr can be removed using two desorbents, such as microorganism and persimmon gel. Fe was removed under effluent standard at pH 3.0 using microorganism, Cr(VI) was removed perfectly at pH 2.0 using persimmon gel, and Cr(III) was removed near effluent standard at pH 4.3 using microorganism in this removal order. Both Cr and Fe can be desorbed over 85 % of adsorbed amount from the microorganisms removed Fe and Cr(III) and persimmon gel removed Cr(VI) from the Cr plating wastewater containing Cr and Fe.

The chapter 6 is the conclusion of this thesis. The conclusion of the whole of this thesis is described.

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、まず、柿渋ゲルを用いてクロム(VI)水溶液を pH2 において処理すると大部分のクロム(VI)が柿渋ゲルに吸着されるが、その一部がクロム(III)として溶液中に残留すること、残留したクロム(III)は微生物の一菌株である *Arthrobacter nicotianae* IAM12342 を用いて pH5 において吸着除去できることを示している。次に、柿渋ゲルに吸着したクロム(VI)は 10 分以内の短時間に急速に柿渋ゲル上でクロム(III)に還元されることを X 線吸収端近傍構造スペクトル(XANES)の測定、解析結果から確認している。柿渋ゲルに吸着後還元された、あるいは溶液中で還元後、*A. nicotianae* 菌体に吸着されたクロム(III)は、0.1M あるいは 1M の塩酸と沸騰させることにより、100%塩酸中に溶出でき、これらの操作は繰り返し可能であることを示している。

クロム(VI)水溶液からの本法によるクロム除去の応用として、企業から提供を受けた鉄含有クロム廃液からの鉄及びクロム除去について検討している。まず、pH3.0 において、固定化 *A. nicotianae* 菌体を用いて鉄を吸着除去し、次に pH 2.0 において、柿渋ゲルを用いることにより、クロム(VI)の除去を行っている。さらに、固定化 *A. nicotianae* 菌体を用いて pH4.3 において吸着されたクロム(III)を除去し、クロム(VI)および鉄を環境基準以下、全クロムを環境基準近くまで除去することができることを示している。固定化 *A. nicotianae* 菌体に pH3.0 で吸着させた鉄や柿渋ゲルに吸着後還元された、あるいは固定化 *A. nicotianae* 菌体を用いて pH4.3 において吸着されたクロム(III)は 0.1M あるいは 1M の塩酸と沸騰させることにより、85%以上塩酸中に溶出でき、環境保全及び資源のリサイクルの観点からも効率よくクロムの除去、回収ができるシステムを開発している。

以上、本論文は、環境中に放出されると有害なクロム(VI)を水溶液から柿渋ゲルを用いて 100%除去し、還元されたクロム(III)を微生物を用いて 100%除去、さらにこれらの吸着材から希塩酸を用いて 100%脱着回収できる方法を提案し、実際の廃液からも鉄およびクロム(III) を分離、回収できる方法を見出したもので、環境改善および資源リサイクルの面から工学的に寄与する所が少なくないと認められる。



## 最終試験の結果の要旨

平成 28 年 2 月 2 日実施の審査会において所定の時間で本論文の内容をよく説明し、また、この除去開発システムにおける各ステップでの除去・回収に関する質問に対しても的確な回答を行った。Journal of Environmental Science and Engineering A(2015)に論文掲載されたのを始め、2011、2014 と 2015 年度の国際会議において Proceedings of the International Symposium on Earth Science and Technology に論文発表している。特に 2014 年度の同国際会議においては MITSUI MATSUSHIMA AWARD for BEST PAPER を受賞している。この他、The 9th Asia Pacific Conference on Sustainable Energy & Environmental Technologies(2013), 11th International Phytotechnologies Conference(2014), XXVIIth International Conference on Polyphenols & 8th Tannin Conference, 13th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Element(2015)などの国際会議、資源・素材学会、化学系学協会東北大会、日本 MRS 学会などの国内学会において発表している。

以上のことから工学の基礎的素養、(語学力を含む)およびその応用展開力を身に付けていると認められる。よって、博士(工学)の学力を認め、合格とする。

氏名	虻川 高宏
博士の専攻分野の 名称	博士（工学）
学位記番号	博 第 5 3 号
学位授与年月日	平成 2 8 年 3 月 1 8 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	橋梁の津波対策に関する研究 (A Study on Anti-Tsunami Measures for Bridges)
論文審査委員	(主査) 八戸工業大学教授 長谷川 明 (副査) 八戸工業大学教授 佐々木 幹夫 (副査) 八戸工業大学教授 竹内 貴弘

## 論文の内容の要旨

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の巨大津波により東北地方太平洋沿岸部を中心に、甚大な津波被害をもたらした。津波は沿岸部の建物や構造物を流失させ、橋梁も同様に上部構造や橋脚、橋台背面盛土の流失被害が発生した。道路網の重要なポイントに橋梁は架橋されているため、流失による道路網の遮断は人命救助、緊急輸送、復旧および復興の遅れに直接つながるため、防災の観点から橋梁の津波に対する安全性確保が求められている。現在、橋梁に作用する津波の力やその力に対する具体的な設計方法や対策方法は確立されていない。近い将来、東海地震や東南海・南海地震、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震が発生するであろうと予測されており、橋梁における津波に対する設計方法や対策方法について、早急に確立することが望まれている。

本研究では、橋梁における津波に対する設計や対策を検討するうえで必要となる、橋梁の流失メカニズムの解明および橋梁に作用する津波力軽減のための基礎資料を得ることを目的とし、実験により検証を行った。実験は、東北地方太平洋沖地震の津波により流失した気仙大橋および歌津大橋を対象とし、実橋の形状を忠実に再現した詳細な橋梁模型（縮尺 1/50）を用いた水路実験を行い、橋梁流失メカニズムの解明を行った。また、津波による水平力軽減を図るためのフェアリングの実験を行い、その効果を検証した。

第2章では地震および津波について整理し、橋梁点検結果より被害状況を分析した。東北地方整備局管内（岩手、宮城、福島）の橋梁緊急点検結果から、点検した 1572 橋の内、津波の影響を受けた橋梁は 151 橋（10%）であった。津波の影響を受けていない橋梁において損傷がある割合は 58%（819 橋/1421 橋）、津波の影響を受けた橋梁における損傷がある割合は 93%（141 橋/151 橋）であり、津波が影響したほとんどの橋梁に損傷被害が発生している。また、津波の影響を受けていない橋梁では耐荷力に影響する損傷は 3%（36 橋/1421 橋）であるが、津波の影響を受けた橋梁では耐荷力に影響する損傷は 14%（21 橋/151 橋）であり、津波の影響を受けると重大な被害を生じやすいことがわかる。

第3章では、流失した気仙大橋および歌津大橋を対象橋梁として、橋梁の細部形状を詳細に復元

した 1/50 の縮尺模型を作成し、水路実験により模型に作用する力を把握し、支承部の耐力に着目して流失メカニズムの解明を行った。

気仙大橋は耐震補強によりゴム支承に交換がなされており、ゴム支承の本体および取付けボルト、アンカーボルトに着目し流失メカニズムの把握を行った。その結果、2 径間連続鈹桁の中間支点上である P4 橋脚の支承取付けボルトが水平破断、3 径間連続鈹桁の中間支点上である P1 橋脚、P2 橋脚の支承取付けボルトが水平破断することにより、流失が始まり連鎖的に各支承が破壊され、最後に端支点上のゴム支承が水平破断することにより完全に流失したものと推測される。気仙大橋においては、水平力による取付けボルトのせん断破壊を起因として流失したものと推測される。被災時の連続写真から定常流に近い津波により流失したものと考えられ、定常流により破壊される流速を逆算すると、P4 橋脚の支承取付けボルトで 7.2m/s、P2 橋脚の支承取付けボルトで 8.5m/s となることから、実際に気仙大橋には、流速 8.5m/s 以上の定常的な津波が作用し流失したものと推測される。

歌津大橋はプレテンション PC 単純 T 桁 (Span6) とポストテンション PC 単純 T 桁 (Span9) で構成されている。

Span6 における実験の結果より、桁高は低く津波による水平作用力は小さいが、支承はパット型ゴム支承で水平力に対して抵抗しないこと、設置されていた直角方向変位制限装置 (RC 突起) の耐荷力が小さかったことから、水平的な津波の作用力により RC 突起が破壊されることにより流失したと考えられる。気仙大橋と同様に、歌津大橋においても被災時の動画記録から定常流に近い津波により流失したものと考えられ、定常流により破壊される流速を逆算すると、流速 6.7m/s 以上の定常的な津波が作用し、RC 突起が破壊され流失したものと推測される。

Span9 については Span6 と同様に水平的な津波の作用力により、支承サイドブロックが破壊され流失が始まったと推測される。ただし、Span9 の RC 突起は強度が高く、山側の支承サイドブロックが破壊されても水平的な作用力では流失しなく、支承サイドブロックが水平力により破壊されると同時に、そのサイドブロックに取り付けられていた浮き上がり防止装置が外れることにより、回転しながら流失したものと推定される。これは、Span9 の桁高が高く、桁間隔が小さいため、津波により作用する水平力により大きな回転力が発生したためである。Span6 と同様に定常流により破壊される流速を逆算すると、流速 6.9m/s 以上の定常的な津波が作用し、サイドブロックが破壊され流失したものと推測される。

気仙大橋および歌津大橋で、流失の原因や形態に違いは見られるものの、主要因は津波による水平力であることが確認された。従って、橋梁における津波対策を行う上で水平力の低減が重要であることが分かった。

第 4 章では、流失の主要因である水平力の低減を図るため、耐風安定性で効果のあるフェアリングを設置した実験を実施した。また、フェアリングにより鉛直上向き力の増加が確認されたことから、鉛直上向き力の抑制を図るためフェアリングにスリットを設けた場合の実験を実施した。

実験結果より、フェアリングを設置することにより、津波による水平力を低減できることが確認され、橋梁の水平力低減対策としてフェアリングが有効であることが確認できた。L 形フェアリングよりも箱形フェアリングにおいて水平力を低減できたが、箱形フェアリングはフェアリングにより密閉された空間内に空気が残存するため浮力が作用し、鉛直上向き力を増大させる結果となった。鉛直上

向き力は橋梁の安定性を低下させることから、浮力低減対策も同時に必要であると考えた。

フェアリングにスリットを設けると、箱形フェアリングにおいて鉛直上向き力は低減できることが確認された。しかしながら、箱形フェアリングにスリットを設けると、水平力の低減効果が低下し、L形フェアリングにスリットを設けた場合と同程度となった。従って、対象橋梁に応じて水平力と鉛直上向き力のバランスを考慮して、水平力を大幅に低減させたい場合には箱形フェアリングを採用し、水平力および鉛直力の両方をバランスよく低減したい場合には、L形フェアリングまたはL形スリットフェアリングを採用するのが適切であると考えられる。

本研究において、ゲート式造波装置による段波状の波を用いて実験を行っているが、実際には実験と異なる様々な性状の津波が考えられる。また、橋梁の津波対策としてフェアリング以外にも桁高の低減や床版張出長の短縮等による対策も考えられる。橋梁の上部構造における耐津波研究は未だ発展途上であり、具体的な橋梁へ作用する力や橋梁形状の違いが及ぼす影響等、今後さらなる実験や解析等の研究が必要と思われる。

## ABSTRACT

The giant tsunami caused by the Great East Japan Earthquake in 2011 inflicted extensive damage in the Pacific coastal area around the Tohoku region. The tsunami washed away buildings and constructions in the coastal area. Bridge superstructures were also washed away. Since bridges are constructed at important points of road networks, traffic blocks due to washouts directly led to delays in lifesaving measures, emergency transportation, restoration, and recovery efforts. Accordingly, it is necessary to ensure the safety of bridges against tsunamis from the perspective of disaster prevention. Until now, no specific design methods or measures to counter the force of tsunamis have been established for bridges. Since the occurrence of major earthquakes is being predicted, it is desirable that bridge design methods and anti-tsunami measures be established immediately.

In this study, verification by experiments was conducted for the purpose of obtaining basic data to clarify mechanisms of bridge washouts and to reduce the force of tsunamis on bridges. Such basic data is necessary to consider bridge designs and anti-tsunami measures. The objects of the experiments were Kesen Bridge and Utatsu Bridge. Experiments were conducted using detailed bridge models, which reproduce the actual forms of the bridges, in order to clarify the washout mechanisms of bridges. Experiments were also conducted using a model with fairings—which were installed to reduce the horizontal force of tsunamis—to verify their effects.

In Chapter 2, knowledge concerning earthquakes and tsunamis was sorted out and the damage situation was analyzed using the results of bridge inspections. According to the results of the emergency inspections of the bridges within the jurisdiction of Tohoku Regional Development Bureau (Iwate Prefecture, Miyagi Prefecture and Fukushima Prefecture), 10% of the inspected bridges were affected by the tsunami and 93% of the bridges that were affected by the tsunami had damage. It means that most bridges affected by the tsunami were damaged. In addition, damage affecting load-bearing capacity was found in 3% of the bridges that had not been affected by the tsunami, whereas damage affecting load-bearing capacity was found in 14% of the bridges that had been affected by the tsunami. The results above show that serious damage tends to be inflicted if a bridge was affected by a tsunami.

In Chapter 3, detailed models were constructed reproducing the detailed configurations of Kesen Bridge and Utatsu Bridge, which were washed away. Forces acting on the models were examined through experiments and the washout mechanisms were clarified paying attention to the resilience of bearings.

Attention was paid to bearings to clarify the washout mechanism. It was suggested that a shear failure of a mounting bolt due to horizontal force triggered the Kesen Bridge to be washed away. According to a sequence of photographs taken at the time of the disaster, the bridge was washed away presumably by a tsunami similar to a steady flow. The steady flow rates that can wash away the bridge were calculated and it was presumed that a steady tsunami flow of 8.5 m/s or above swept

away Kesen Bridge.

Utatsu Bridge consists of a pre-tension PC simple T girder bridge (Span6) and a post-tension PC simple T girder bridge (Span9).

Based on the experimental results concerning Span6, the bridge was presumably washed away as the RC projection was destroyed by the tsunami's horizontal acting force. As in the case of Kesen Bridge, a video record at the time of the disaster showed that Utatsu Bridge was washed away by a tsunami closely resembling a steady flow, too. Based on calculating a steady flow that can demolish a bridge, a steady tsunami with a flow rate of 6.7 m/s or above destroyed the RC projection and washed away the bridge.

As for Span9, it was presumed that the washout started as the bearing side block was destroyed by the tsunami's horizontal acting force. At the same time as the bearing side block was destroyed by horizontal force, the lifting prevention device attached to the side block got out of place and then the bridge was washed away while rotating. As in the case of Span6, the flow rate of a steady flow that can destroy the structure was calculated and it was estimated that a steady tsunami with a flow rate of 6.9 m/s or above destroyed the side block and washed away the bridge.

It was confirmed that the main factor of the washouts was horizontal force caused by the tsunami. Therefore, it was understood that reducing the horizontal force is important when taking anti-tsunami measures for bridges.

In Chapter 4, experiments were conducted using a model with a fairing—effective for improving stability against wind—in order to reduce horizontal force, which is the main factor of washouts. Furthermore, experiments were conducted in which a slit was made in the fairing to suppress vertical upward force.

The experiment results confirmed that horizontal force by a tsunami can be reduced by installing a fairing. It was confirmed that a fairing is an effective measure to reduce horizontal force on bridges. Although a box-shaped fairing can reduce horizontal force more effectively than an L-shaped fairing, a box-shaped fairing increases vertical upward force.

It was confirmed that vertical upward force can be reduced if a slit is made in a box-shaped fairing. However, if a slit was made in a box-shaped fairing, its effect of reducing horizontal force was reduced to be around the same level as an L-shaped fairing with a slit. Therefore, it is reasonable to consider the balance between horizontal force and vertical upward force to select the type of fairings.

In this study, waves like hydraulic bores were produced by a gate-type wave generating device. However, actual tsunamis consist of various kinds of waves that differ from the experiments. On the other hand, there are anti-tsunami measures other than introducing fairings, such as reducing the girders' height or the overhang length of the floor slabs. The study on anti-tsunami measures for bridge superstructures is still in the developmental stage and further research is necessary.

## 論文の審査結果の要旨

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による巨大津波により、東北地方太平洋沿岸部を中心に甚大な津波被害をもたらした。巨大津波は沿岸部の建物や構造物を流失させ、橋梁も同様に上部構造や橋脚、橋台背面盛土の流失被害が発生した。橋梁は道路網の重要なポイントに架橋されており、落橋や大被害により道路網が寸断されることは、緊急輸送路としての機能を逸することとなりため、橋梁の耐津波対策が求められている。

今回の地震では地震動による橋梁の落橋は無く大被害もわずかであり、耐震設計は高度なレベルに達していると考えられるものの、橋梁上部構造に作用する津波による力や津波に対する橋梁の設計方法についての研究はあまり進められておらず、設計手法や基準も確立されていない。東北地方太平洋沖地震の翌年の平成 24 年 3 月に改訂された道路橋示方書・同解説において、津波に対する配慮の必要性が記述されたものの、具体的な設計法や対策方法については未だ確立されていない。近い将来、東海地震や東南海・南海地震、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震が発生するであろうと予測されており、既設橋梁や新設橋梁への対津波対策に関する設計法および対策方法の早期の確立が望まれている。

本研究の目的は、橋梁の津波に対する設計方法を確立するために必要な、橋梁の流失メカニズムの解明およびその対策方法の基礎資料を得ることである。そこで、実際に津波により流失した気仙大橋および歌津大橋を対象として、橋梁の細部形状を詳細に再現した橋梁模型を作成し、水路実験を行いそれぞれの流失メカニズムを把握している。また、津波により橋梁に作用する力の軽減を図るためフェアリングを取り付けた実験を行い、その効果を確認している。本研究によって得られた主な知見は次の通りである。

- (1) 被災直後の橋梁被害調査（対象：1572 橋）によれば、耐荷力に関する被災度区分において、津波の影響がない場合、損傷は比較的軽微であるが、津波の影響を受けると被害率が高く、しかも重大な被害が発生し、対津波対策が重要であることが示された。
- (2) 気仙大橋および歌津大橋の模型実験から、津波力と支承部の耐力を比較分析するとともに、現地での橋台橋脚の支承被災状況と比較検証し、被災メカニズムを解明した。
- (3) 側面フェアリング、箱形フェアリング、およびスリット付きフェアリングの津波力低減効果について実験を行い、それらの対津波対策としての効果および課題を明確にした。

これらの成果は、今後の橋梁の対津波対策に有効な基礎資料となると評価される。

審査の結果、本研究は八戸工業大学博士学位論文として十分な成果をあげていると判断され、合格とした。

## 最終試験の結果の要旨

平成 28 年 2 月 2 日、社会基盤工学専攻学位論文審査および最終試験が、口頭試問によって実施された。学位論文の目的、手法、結果および結論等を的確に説明し、またその後の質疑に対しても適切に対応し、八戸工業大学大学院博士後期課程を修了するために必要な学力を有すると評価され、最終試験に合格した。

なお、査読論文 8 編（うち英文 6 編）、国際会議発表 5 件（全て英文）、および国内会議発表 8 件（和文のみ）の成果を上げている。また、本研究成果の一部は、平成 27 年 5 月 29 日に土木学会東北支部から技術開発賞を受賞している。