

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 20 日現在

機関番号：10101  
 研究種目：基盤研究(A)  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22246058  
 研究課題名（和文） ライフサイクルを考慮した体系的な補強設計法の確立  
 研究課題名（英文） Development of General Method for Strengthening Design with Consideration of Life Cycle  
 研究代表者  
 上田 多門 (UEDA Tamon)  
 北海道大学・大学院工学研究院・教授  
 研究者番号：00151796

研究成果の概要（和文）：構造物の補強工法である接着・増厚補強の統一的な設計法確立のために、既設部と補強部との付着界面の剥離耐力推定モデルを提示するとともに、付着界面強度に与える疲労、湿潤環境、凍結融解作用、界面粗度の影響、最適な補強材料特性と補強法（寸法、箇所）を明らかにした。さらに、交通荷重を模した移動輪荷重下の耐荷力が増厚補強により向上すること、3次元数値解析により補強後の耐荷力のシミュレーションが可能なることを示し、最新の補強設計指針と補強後の耐荷性状推定モデルを提示した。

研究成果の概要（英文）：In order to develop the unified design method for strengthening by external bonding and overlaying, the followings are presented: (1) Prediction models for various debonding types at interface between substrate concrete and reinforcing materials, (2) Influences of fatigue, moisture, freeze thaw cycles and interface roughness on interface bond strengths, (3) Optimum reinforcing material properties and reinforcing methods (dimension and location), (4) Experimental evidence of enhancement of ultimate member strength by overlaying under traffic loads, and (5) Applicability of 3D numerical analysis to simulate member strength after strengthening. After compiling all the results, latest guidelines for strengthening of concrete structures as well as strength prediction models after strengthening are presented.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	12,100,000	3,630,000	15,730,000
2011年度	13,600,000	4,080,000	17,680,000
2012年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
年度			
年度			
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料，施工，建設マネジメント

キーワード：コンクリート，補強工法

## 1. 研究開始当初の背景

先進国を中心に、大量に蓄積されてきた社会基盤施設の老朽化が進み、その維持補修が社会的関心事となっている。寒冷地である北海道においても、凍害による劣化事例が多く

見られ、交通荷重がさほど厳しくない橋梁において、凍害と疲労の複合劣化によるコンクリート床版の押抜きせん断破壊の事例が報告されている<sup>1)</sup>。損傷が大きな場合で構造物の延命化が選択された場合には、力学的な特

性を回復、もしくは、アップグレードする対策が必要となる。本研究では、この対策を「補強」と定義する。

このような社会的背景があるにもかかわらず、国内外で補強設計法の体系的な整備はなされていない。典型的な補強工法である、既設部コンクリートの表面に補強材（補強材の層）を接着する接着工法と増厚工法とはその力学的な機構が類似しているが、全く別個の研究グループが研究をしている。2つの工法の共通の特徴である**既設部と補強材接着部の界面はく離**に関しては、接着工法において精力的に研究がなされているが、増厚工法においては少ない。接着工法に関しては、連続繊維補強材（FRP 補強材）の接着工法に関して、土木学会の指針<sup>2)</sup>、fibのレポート<sup>3)</sup>、ACIの指針<sup>4)</sup>などが国内外にある。しかし、界面はく離に対し**共通の設計法が確立しているわけではない上に、既設部の損傷の影響、界面処理などの施工品質の影響、橋梁床版等では不可避の疲労の影響、**といった重要な点が未解明で、合理的な補強設計法が確立されているとは言えない。増厚工法に関しては、土木学会の指針<sup>5)</sup>があるだけで、国外では広く認知された指針類は見当たらない。増厚工法は、補修工法としては適用が進んでいるが、補強効果を定量的に考慮した設計法は、接着工法のはるか後方の水準にあるというのが現状である。

#### 【参考文献】

- 1) “積雪寒冷地における既設 RC 床版の延命手法について”，三田村浩，佐藤京，西弘明，寒地土木研究所 月報，No. 676，10-18，2009年11月2日。
- 2) “連続繊維補強材によるコンクリート構造物の補修補強指針”，コンクリートライブラリー，土木学会，No. 101，2000年7月。
- 3) “Externally bonded FRP reinforcement for RC structures” (Technical Report)，fib，fib Bulletin，No. 15，138 pages，2001。
- 4) “ACI440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”，ACI440，76 pages，2008。
- 5) “コンクリート構造物の補強指針(案)”，コンクリートライブラリー，土木学会，No. 95，1999年9月。

#### 2. 研究の目的

国内外を問わずコンクリート系構造物の補強設計法が体系的には整備されていない。本研究では、典型的な補強工法であり力学的に類似している増厚工法と接着工法を取り上げ、既設部の損傷の影響、施工品質の影響といった補修補強工法が避けて通れない問題を明らかにした上で、補強直後のみではなく、**ライフサイクルを通しての補強構造物**

の**性能予測手法を提示**する。これらの成果に基づき、体系的な合理的補強設計法の確立を図り、**国内外の指針のモデル**とする。副次的な成果として、**補強材料として優れた特性の提示**も行う。

現実的には、界面はく離を完全に避けることは不可能であり、界面はく離がいつ生じ始め、不安定なはく離進展はいつ生じるのか、界面の一部にはく離がある状態での補強部材の耐力といった情報が、補強構造物の性能照査には必要である。FRP 補強材や鋼板による接着工法で界面はく離の発生・進展に対してある程度明らかにされているが、全てのはく離の場合が網羅されているわけではない。

本研究では、補強設計の根幹である補強構造物の性能照査を行うために必要な以下の点を、**実験的及び数値解析の方法を併用**することにより明らかにすることを目的とする。なお、本研究で対象とする補強材料は、現時点で国内で適用されている一般的な材料とする。

- (1) **棒部材**に対する接着工法・増厚工法における3タイプの**界面はく離**(曲げひび割れに起因するもの、せん断ひび割れに起因するもの、補強材層端部に起因するもの)の**発生および不安定進展の限界状態**
- (2) **面部材**に対する界面はく離の限界状態
- (3) **疲労荷重**が界面はく離の限界状態に与える影響
- (4) **環境の影響(湿度、温度)**が界面はく離の限界状態に与える影響
- (5) **既設部材の界面損傷等**が界面はく離の限界状態に与える影響
- (6) 接着工法における**接着樹脂層の力学特性**が界面はく離に与える影響
- (7) 増厚工法における**既設部材の表面粗度**が界面はく離に与える影響
- (8) 接着工法・増厚工法における**界面はく離に対する最適の補強材料の特性**

#### 3. 研究の方法

研究代表者と、研究分担者の佐藤、古内、それに、本研究で雇う博士研究員 Zhang (張) の4名で分担して実施する(図1参照)。これまで、接着工法を中心に研究してきた**佐藤が接着工法**を、増厚工法を中心に研究してきた**古内が増厚工法**を主として担当する。また、Zhang はより多くの研究が必要な増厚工法を担当する。研究手法としては、北海道大学での**環境条件制御機能付き載荷試験装置**、外部(IHI 技術研究所を予定)での**移動輪荷重疲労試験装置**、などを駆使した実験的解析と、研究代表者らが開発した**3次元非線形有限要素解析プログラム(CAMUI)**、**準微視的RBSM**などによる数値解析を適用した数値解析とを併用する。

図 2 に接着工法と増厚工法と各研究項目との関係、図 3 数値解析の研究の流れを示した。

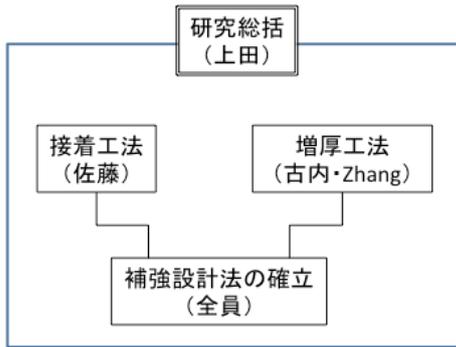


図1 研究体制

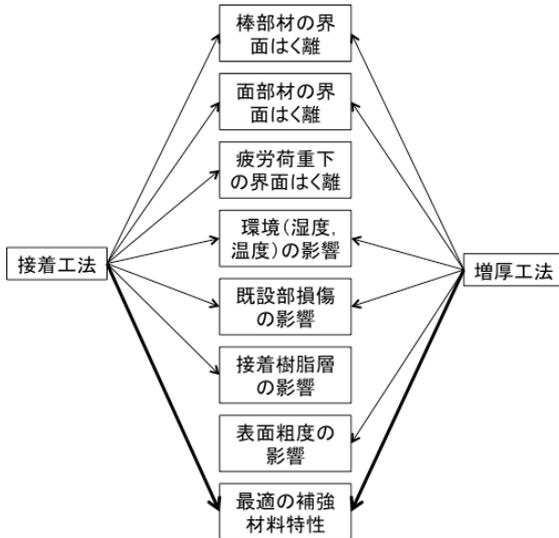


図2 接着工法と増厚工法と各研究項目との関連

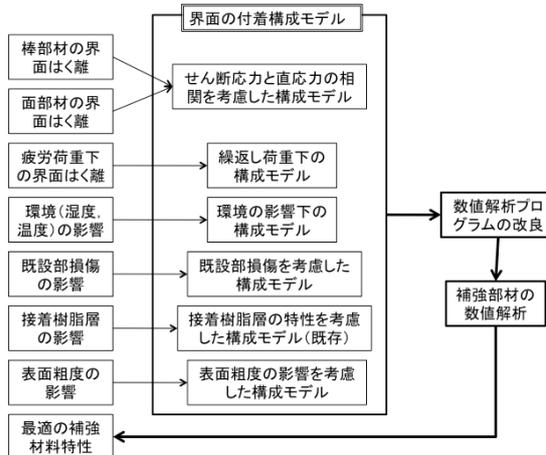


図3 数値解析の研究の流れ

#### 4. 研究成果

研究の成果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 接着及び増厚補強に対する種々の界面剥離(曲げひび割れ, 曲げせん断ひび割れ, 端部を起点とする既設部と補強部との付着界面剥離, かぶりコンクリート割裂

による付着界面剥離)発生推定モデルを提示した(図4)。

- (2) 増厚材料(HPFRCC)とコンクリートとの界面の疲労せん断付着強度を実験的に提示し, 従来のPCMの疲労強度性状と合わせ, 通常セメント系材料の疲労強度性状(S-N曲線)と大差がないことを示した。
- (3) 長期間浸水した後のFRPシートとコンクリート及び増厚材料(HPFRCC)とコンクリートとの界面のせん断付着強度は, 浸水しないものと比べ若干強度が低下する可能性がある。前者の場合, 接着樹脂やコンクリートの浸水による強度低下はないものの, 付着界面性状が劣化することが理由と推定された。後者の場合, 疲労強度には低下が見られなかった。
- (4) 凍結融解繰返しを受けた増厚材料(PCMとモルタル)とコンクリートとの界面の引張付着強度は, 増厚材料が凍害劣化を示さない場合低下はほとんど見られなかった。コンクリートが凍害劣化するとその凝集破壊となり, それ以外は付着界面破壊であった。
- (5) 既設部コンクリートの損傷の影響として, 既設部に発生しているひび割れが界面剥離耐力に影響を与えることを示した。(1)に示したモデルはこの場合にも適用できる。一方, 高伸度繊維材料(PETシート)による巻立て補強を行なった場合, 既設部の損傷レベルは補強後の耐力に大きな影響を及ぼさないことを示した。
- (6) 剛性が低い樹脂層(ポリウレタ樹脂層)を挿入した場合, 常温でも低温でもFRPシートとコンクリートとの界面のせん断付着強度が挿入しない場合の数倍となることを示し, 従来の知見と同様の結果となった。
- (7) 増厚補強(PCM)においては, 表面粗度(Ra)が大きくなるほど付着強度が大きくなり, 骨材寸法が10から25mmの場合, Raが1mm, ウォータージェット処理深さとして2mm程度が最適である。
- (8) かぶりコンクリートの割裂破壊による界面剥離の場合, 最適な補強材料(補強有効度)を, 種々の変数(補強材強度・剛性, 既設部補強筋強度・量, 接着面の幅・位置)の下で示した(図5)。
- (9) 増厚補強(HPFRCC)したコンクリートスラブの移動輪荷重下の疲労押抜きせん断破壊耐力は向上し, 付着界面での剥離が支配的でなかった。押抜きせん断耐力は, 既往のマクロモデルに増厚部を考慮した拡張モデルで推定可能である。
- (10) 付着界面の構成則を導入した3次元非線形有限要素解析により, 接着補強を施し

たコンクリートスラブの押抜きせん断破壊をシミュレーションできることを示した。

- (11) 上記の有限要素解析用の構成則構築のために、準微視的 RBSM を用いて、FRP シートで補強された部材の引張特性、時間依存荷重を受けるコンクリートの変形・破壊特性、凍結融解繰返し作用下のモルタルの変形特性を明らかにした。
- (12) 本研究の最新の成果を取り入れ、補強後の性能の経時変化に関する記述も加えた、既往のものに替わる新たな補強設計指針を提示した。また、付属資料として、曲げ補強とせん断補強に関する補強材料に依存しない最新モデルを提示した。

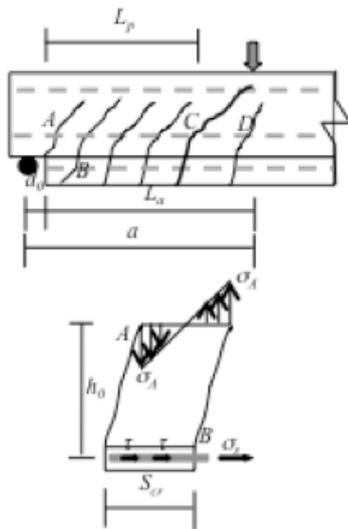


図4 界面剥離モデルの例

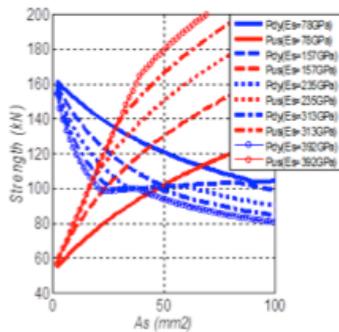


図5 最適な補強材料の例

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

- ① 島中悠企, 上田多門, 古内仁, 張大偉, 基板コンクリートと HPRCC の界島中悠企, 上田多門, 古内仁, 張大偉面におけるせん断

付着強度に水が及ぼす影響、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.12、2012、407-410

DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000175

- ② Jirawattanasomkul, T., Zhang, D. and Ueda, T., Post-peak Behavior of FRP-Jacketed Reinforced Concrete Columns, Proceedings of Japan Concrete Institute、査読有、Vol.34(2)、2012、1351-1356

- ③ Dawei Zhang, Tamon Ueda and Hitoshi Furuuchi, A General Design Proposal for Concrete Cover Separation in Beams Strengthened by Various Externally Bonded Tension Reinforcements, Journal of Advanced Concrete Technology、査読有、Vol.10、2012、285-300

DOI: 10.3151/jact.10.285

- ④ Ueda, T., Zhang, D. and Furuuchi, H., Towards Rational Design Method for Strengthening of Concrete Structures by External Bonding, Civil Engineering Dimension、査読有、Vol.14、2012、196-204  
DOI: 10.9744/CED.14.3.196-204

- ⑤ Dawei Zhang, Tamon Ueda and Hitoshi Furuuchi, Concrete cover separation failure of overlay-strengthened reinforced concrete beams, Construction and Building Materials、査読有、Vol.26、2012、735-745

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.082

- ⑥ Justin Shrestha, Tamon Ueda, Dawei Zhang, Atsushi Kitami and Atsuya Komori, Effect of primer and substrate concrete on the FRP-concrete bond properties、土木学会北海道支部論文報告集、査読無、Vol.68、2012、CD-ROM4 ページ

- ⑦ 北見 篤史, Justin Shrestha, 張 大偉, 上田 多門, 湿潤環境下における FRP シート/コンクリート界面の付着特性、土木学会北海道支部論文報告集、査読無、Vol.68、2012、CD-ROM3 ページ

- ⑧ 柏原 優澄, 島中 悠企, 張 大偉, 古内 仁, 上田多門, 田村 哲也, 森井 直治, 齊藤 恒雄, 下面増厚補強 RC 梁の付着割裂破壊荷重に対する既設部コンクリート強度の影響、土木学会北海道支部論文報告集、査読無、Vol.68、2012、CD-ROM3 ページ

- ⑨ Dawei Zhang; Tamon Ueda; and Hitoshi Furuuchi, Average Crack Spacing of Overlay-Strengthened RC Beams, Journal of Materials in Civil Engineering、査読有、Vol.23(10)、2011、1460-1472

DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000316

- ⑩ Dawei Zhang, Tamon Ueda and Hitoshi Furuuchi, Intermediate Crack Debonding of Polymer Cement Mortar Overlay-Strengthened RC Beam, Journal of

Materials in Civil Engineering、査読有、Vol.23(6)、2011、857-865

DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000240

⑪ Tidarut JIRAWATTANASOMKUL, Yoshifumi IKOMA, Dawei ZHANG and Tamon UEDA, Shear Strength of Reinforced Concrete Members Strengthened with FRP Jacketing, Proceedings of JCI、査読有、Vol.33(2)、2011、991-996

⑫ Shohei MAEDA, Tamon UEDA, Dillon S Lunn and Sami H Rizkalla, FRP Anchorage Systems for the Strengthening of Infill Masonry Structures, Proceedings of JCI、査読有、Vol.33(2)、2011、1315-1320

⑬ Ahmed Sabry Farghaly and Tamon Ueda, Prediction of Punching Shear Strength of Two-Way Slabs Strengthened Externally with FRP Sheets, ASCE Journal of Composites for Construction、査読有、Vol.15(2)、2011、181-193

DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000177

⑭ Khalid Farah, Yasuhiko Sato, Uni-Axial Tension Behavior of Reinforced Concrete Members Strengthened with Carbon Fiber Sheet, ASCE Journal of Composites for Construction、査読有、Vol.15(2)、2011、215-228

⑮ 佐藤靖彦, Farah Khalid, 橋田直樹、FRPシート補強 RC 部材のはく離破壊の解析的評価、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、査読有、Vol.10、2010、379-386

⑯ 松本浩嗣, 佐藤靖彦, 上田多門、メソスケール解析による時間依存荷重を受けるモルタルの損傷・破壊メカニズムと変形予測、土木学会論文集 E、査読有、Vol.66(4)、2010、380-398

〔学会発表〕(計 20 件)

① 天羽 健・佐藤靖彦・荒添 正棋・小林 朗、炭素繊維ストランドシートとコンクリート間の付着強度に関する検討、平成 24 年度 年次技術研究発表会、2013 年 02 月 02 日～2013 年 02 月 03 日、函館工業高等専門学校(函館市)

② Ye Qian, Dawei Zhang and Tamon Ueda, Mode I fracture of concrete-mortar repair systems under freeze-thaw cycles、平成 24 年度 年次技術研究発表会、2013 年 02 月 02 日～2013 年 02 月 03 日、函館工業高等専門学校(函館市)

③ J. Shrestha, T. Ueda, D. Zhang, A. Kitami and A. Komori, Durability of the FRP-Concrete Bond under the Influence of Moisture, The First International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE

2012)、2012 年 12 月 05 日～2012 年 12 月 07 日、Regal Kowloon Hotel, Hong Kong (China)

④ Ye Qian, Dawei Zhang and Tamon Ueda, Interfacial Bonding of Concrete-Ordinary Portland Cement Mortar under Freezing Thawing Cycles, The Fourth Asia-Pacific Young Researchers & Graduates Symposium, 2012 年 12 月 04 日～2012 年 12 月 05 日、Hong Kong Polytechnic University (China)

⑤ 島中悠企, 上田多門, 古内仁, 張大偉、基板コンクリートと HPRCC の界面におけるせん断付着強度に水が及ぼす影響、第 12 コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム、2012 年 11 月 02 日～2012 年 11 月 02 日、京都テルサ(京都市)

⑥ T. Jirawattanasomkul, D. Zhang and T. Ueda, Behavior of Reinforced Concrete Columns with Seismic Retrofitting, The 5th International Conference of Asian Concrete Federation, 2012 年 10 月 24 日～2012 年 10 月 26 日、Amari Orchid Hotel, Pattaya (Thailand)

⑦ T. Ueda, D. Zhang and H. Furuuchi, Towards Rational Design Method for Strengthening of Concrete Structures by External Bonding, The Benjamin Lumantara Symposium on Structural Engineering and Construction Technology (招待講演)、2012 年 09 月 15 日～2012 年 09 月 15 日、Petra Christian University (Indonesia)

⑧ Y. Shimanaka, T. Ueda, H. Furuuchi, D. Zhang, T. Tamura and S-C. Lim, Punching Shear Behavior of Overlay Strengthened RC Slab Under Traveling Wheel-Type Fatigue Loading, The 1st International Conference on Sustainable Civil Engineering Structures and Construction, 2012 年 09 月 11 日～2012 年 09 月 13 日、Universitas Gadjah Mada (Indonesia)

⑨ Atsushi Kitami, Tamon Ueda, Dawei Zhang, Justin Shrestha and Atsuya Komori, Influence of Moisture on the Mode I Bond Properties of FRP-Concrete Interface, JSCE International Summer Symposium, 2012 年 09 月 05 日～2012 年 09 月 06 日、名古屋大学(名古屋市)

⑩ Justin Shrestha, Tamon Ueda, Dawei Zhang, Atsushi Kitami and Atsuya Komori, Experimental Study on Influence of Moisture on Shear Bond Properties at FRP/Concrete Interface, JSCE International Summer Symposium, 2012 年 09 月 05 日～2012 年 09 月 06 日、名古屋大学(名古屋市)

⑪ Kousuke Takasaki, Tamon Ueda, Dawei Zhang and Tidarut Jirawattanasomkul, Behavior of Members with FRP Jacketing

with Buckling of Reinforcement and Confinement Effect, JSCE International Summer Symposium, 2012年09月05日~2012年09月06日名古屋大学(名古屋市)

⑫ Tidarut Jirawattanasomkul, Dawei Zhang and Tamon Ueda, Influence of Pre-damage in RC Beams Jacketed with Large Fracture Strain Fiber, JSCE International Summer Symposium, 2012年09月05日~2012年09月06日, 名古屋大学(名古屋市)

⑬ Jirawattanasomkul, T., Zhang, D. and Ueda, T., Post-peak Behavior of FRP-Jacketed Reinforced Concrete Columns, 第31回コンクリート工学講演会、2012年07月04日~2012年07月06日、広島国際会議場(広島市)

⑭ 柏原 優澄, 島中 悠企, 張 大偉, 古内 仁, 上田 多門, 田村 哲也, 森井 直治, 齊藤 恒雄、下面増厚補強 RC 梁の付着割裂破壊荷重に対する既設部コンクリート強度の影響、平成24年度年次技術研究発表会、2012年02月02日~2012年02月03日、札幌コンベンションセンター(札幌市)

⑮ Justin Shrestha, Tamon Ueda, Dawei Zhang, Atsushi Kitami and Atsuya Komori, Effect of primer and substrate concrete on the FRP-concrete bond properties、平成24年度年次技術研究発表会、2012年02月02日~2012年02月03日、札幌コンベンションセンター(札幌市)

⑯ Tidarut JIRAWATTANASOMKUL, Yoshifumi IKOMA, Dawei ZHANG and Tamon UEDA, Shear Strength of Reinforced Concrete Members Strengthened with FRP Jacketing、第33回コンクリート工学講演会、2011年07月12日~2012年07月14日、大阪国際会議場(大阪市)

⑰ Shohei MAEDA, Tamon UEDA, Dillon S Lunn and Sami H Rizkalla, FRP Anchorage Systems for the Strengthening of Infill Masonry Structures、第33回コンクリート工学講演会、2011年07月12日~2011年07月14日、大阪国際会議場(大阪市)

⑱ K. Yamamoto, Y. Kikuchi, D. Zhang, H. Furuuchi and T. Ueda, Behavior of Beams Strengthened with HPRCC and FRP Grids under Static Loading, Proceedings of the 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures (ICDCS2010), 26 November 2010, 北海道大学(札幌市)

⑲ Zhang D. W., Furuuchi H., Fujima S. and Ueda T., Optimum treatment of PCM-concrete interfaces, The 7th International Conference on Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures (Framcos7), 26 May 2010,

Seogwipo KAL Hotel (Korea)

⑳ 島中 悠企, 菊地 裕介, 張 大偉, 古内 仁, 上田 多門, 田村 哲也, 森井 直治, 齊藤 恒雄、下面増厚工法において梁部材に発生したひび割れの影響、土木学会北海道支部平成22年度技術研究発表会、2010年2月5日、苫小牧高等工業専門学校(苫小牧市)

[図書] (計3件)

① Dawei Zhang and Tamon Ueda, Lambert Academic Publishing, Interface and Beam Behavior of PCM-Strengthened Concrete, 2012, 70

② Tidarut Jirawattanasomkul, Tamon Ueda and Dawei Zhang, Lambert Academic Publishing, Reinforced Concrete Members with and without Seismic Retrofitting, 2012. 44

③ Jian-Guo Dai and Tamon Ueda, Springer, Chapter 14 Strength and Deformability of Concrete Members Wrapped with Fiber-Reinforced Polymer Composites with a Large Rupture Strain", Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction, 2011, 379

[その他]

ホームページ等

URL:

<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/maintenance/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

上田 多門 (UEDA TAMON)

北海道大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号: 00151796

### (2) 研究分担者

古内 仁 (FURUUCHI HITOSHI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 60165462

佐藤 靖彦 (SATO YASUHIKO)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 60261327

### (3) 研究協力者

張 大偉 (ZHANG DAWEI)

浙江大学(中国)・工学部・准教授

研究者番号:

(H24年8月まで北海道大学博士研究員)