

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (A)	
研究期間：2007～2009	
課題番号：19206048	
研究課題名 (和文)	寒冷地のコンクリート構造物の複合劣化に対する耐久設計と維持管理システム
研究課題名 (英文)	Durability Design and Conservation for Concrete Structures in Cold Region Subjected to Combined Deterioration Effects
研究代表者	
上田 多門 (UEDA TAMON)	
北海道大学・大学院工学研究科・教授	
研究者番号： 00151796	

研究成果の概要 (和文)：寒冷地のコンクリート構造物は、コンクリート内部の水分が凍結融解を繰り返すことにより、凍害といわれる劣化が生じる。超音波を用いた実構造物における凍害の程度を測定する方法を提示し、凍害の程度と材料特性の劣化程度との関係を示した。乾湿繰返しや塩害と凍害との複合劣化のメカニズムを明らかにし、劣化をシミュレーションするための数値モデルを提示した。凍害を受けた構造物を増厚工法で補修補強した後の、構造物の挙動を数値解析するためのモデルを提示した。

研究成果の概要 (英文)：In concrete structures in cold regions frost damage is occurred by freeze-thaw cycles of water in the concrete. This study presents the method to measure the degree of frost damage in actual structures using ultrasonic wave. The relationship between the frost damage degree and degraded material properties is observed. The deterioration mechanism under the combined effects of frost damage and wet-dry cycles/salt attack is clarified, and then the models to simulate the deterioration is proposed. The model for numerical analysis of structures with frost damage after being repaired by overlaying is also proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	14,100,000	4,230,000	18,330,000
2008年度	14,800,000	4,440,000	19,240,000
2009年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
年度			
年度			
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

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，耐久設計，維持管理システム

1. 研究開始当初の背景

寒冷地のコンクリート構造物の凍害は、従来から構造物の劣化問題として、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などと並んで、長く認

識されてきた。最近になって、国内においては土木学会（コンクリート標準示方書 [施工編]，2002年），日本建築学会（鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解

説, 2004年)における耐久性に関する設計法において, 国外では, 例えば, *fib* の耐久設計法 (Model Code for Service Life Design, Bulletin 34, 2006) において, 塩害と中性化に関しては, 塩化物イオン濃度と中性化深さを指標とした限界値と時間の関数である応答値が示され, 構造物の要求性能との関係も明確で, 耐久設計が一応確立されているといえる。しかし, 凍害に関しては, 指標として, 相対弾性係数 (日本国内), 吸水量や構造物の温度 (*fib*) などが取り上げられ, 限界値や応答値の算定法もある程度示されているが, 実際の構造物の性能との関係, 特に要求性能との関係が明確でなく, 状況は遅れているのが明白である。

上記の議論は主として新設の構造物を念頭においたものであるが, 既設の構造物の場合, 実際のどの程度凍害によって劣化が生じているのかを測る指標が確立されていない。この点も, 凍害による劣化と構造物の性能との関係が明確になっていないことに起因している。したがって, 合理的な維持管理手法 (点検, 診断, 補修補強) の確立が待たれている。

凍害は, それだけで単独で生じるというよりは, 他の劣化要因である, ①塩害, ②環境作用でもある乾湿繰り返し, ③荷重作用 (疲労を含む) などとの複合劣化が大変重要な問題となっている。したがって, 凍害に対する耐久設計および維持管理の合理化のためには, 複合劣化の解明が避けて通れない。

2. 研究の目的

本研究の目標は以下のようなものである。

- (1) 凍害によるコンクリートの劣化を表現できる合理的な**統一的劣化度評価指標** (以降, 指標) を特定し, 指標を直接あるいは間接的に**現場で測定できる手法を提示する**。
- (2) 指標が構造物の環境によって, どのように時間的に変化するかを明らかにし, 新設

および既設構造物の**凍害による劣化予測手法を確立する**。

(3) 指標が, 塩害, 乾湿繰り返し, 荷重作用 (静的・疲労荷重) との**複合劣化の影響**下で, どのように時間的に変化するかを**予測する手法を提示する**。

(4) 指標と構造物の**各種の性能 (安全性, たわみ・美観などの使用性) との関係**を明確にし, それらの限界値を提示した上で, **凍害に対する耐久設計法を確立する**。

(5) 以上の成果に基づき, **凍害に対する補修・補強法を提示する**。

3. 研究の方法

本研究では, 凍害および凍害を含む複合劣化に対する合理的な耐久設計法を提示することを目指して, 図1に示すようなフローで研究を実施した。併せて, それに必要な凍害劣化シミュレーションのためのモデルの構築, 凍害劣化構造物への維持管理対策である補修補強工法の提示を目指した。以下に研究方法の概要を示す。

(1) 凍害劣化シミュレーションのモデル構築のために, 準微視的供試体による実験法を提示し, 温湿度履歴下の変形測定を行った。また, 準微視的モデルの妥当性確認のために, 劣化コンクリートの物質透過性を数値シミュレーションを実施した。

(2) 現場測定可能な劣化指標構築のために, 超音波を用いた凍害劣化深さの非破壊測定法を新たに提示し, 現場で実際に測定した。また, 小径コアを用いた超音波測定法の信頼性の検討も行った。

(3) 上記の超音波を用いた指標と, 構造物の特性である種々の指標とを結びつけるための指標であるひび割れ密度に関して, その測定法の精度を向上させる方法の検討, および, ひび割れ密度と種々の構造物特性との関係を実験室と現場構造物で調査した。

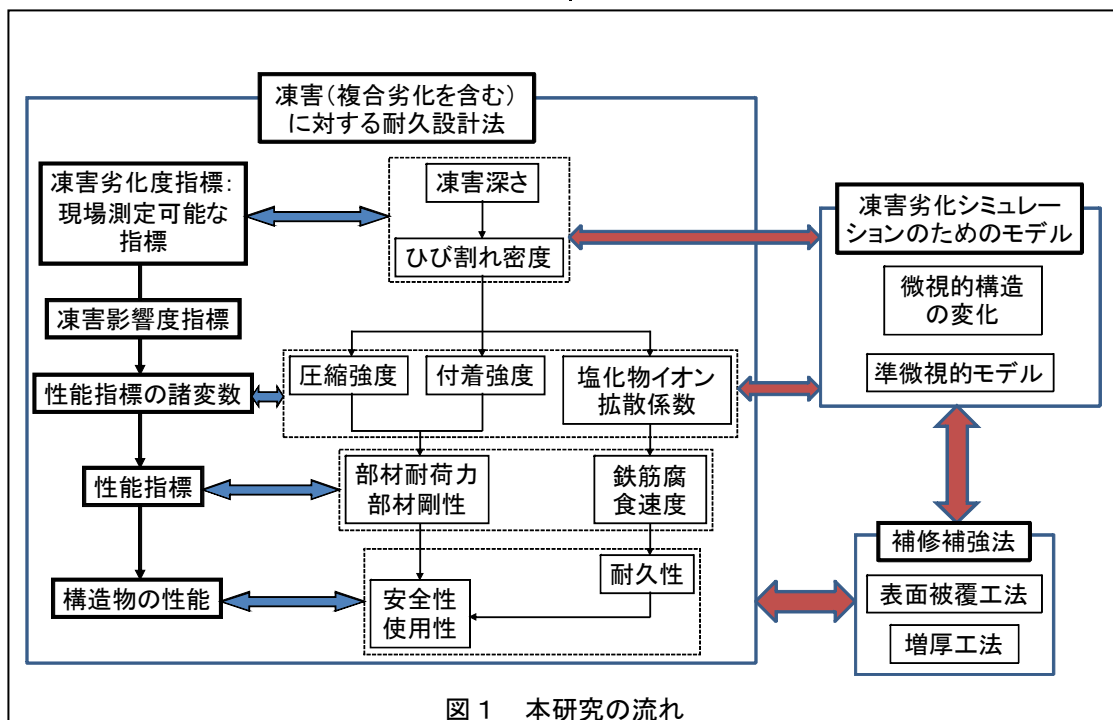


図1 本研究の流れ

(4) 指標の経時変化に関しては、現場構造物での超音波測定、ひび割れ密度測定、圧縮強度測定、塩化物イオン濃度測定を行い、必要なデータを収集した。

(5) 複合劣化作用下の指標に関しては、冬季以外の高温及び乾湿繰返しの影響に関して、コンクリート内部の水分量、微細な気泡構造の変化を測定した。また、現場構造物での凍害による剥離と塩化物イオン浸透の度合いとの関係を調査した。

(6) 指標と構造物の性能に関しては、凍結融解作用が与える鉄筋とコンクリートとの付着性状への影響、および、梁の耐荷性状への影響を実験的に調査した。また、凍害による付着の劣化が梁部材の曲げ耐荷性状に与える影響を数値解析的に調査した。

(7) 補修補強工法の提示に関しては、表面被覆工法の凍害劣化抑制の効果を実験室的に調査した。また、増厚工法における接着界面での材料モデルと増厚補強後の部材の構造特性とに関し、実験的かつ数値解析的に調査した。

4. 研究成果

(1) 凍害劣化シミュレーションのモデル構築に関しては以下の成果が得られた。①本研究で開発した、凍結融解温度履歴下のモルタルの変形挙動測定システムは、他の研究でよく使用されている TMA と同様に含水状態の違いによる変形挙動の違いを測定可能である。②気中乾燥 (RH75~95%) させた供試体では膨張ひずみは生じず、凍結融解繰返し作用を受けても残留ひずみは生じなかった。③飽水状態の供試体では凍結過程で膨張ひずみを生じ、本研究の範囲では各サイクルでの最大膨張量の約 53% が残留ひずみとして残ることが示された。④水分の供給がない条件においても、凍結融解繰返し作用を与えることによって、膨張量の増加が見られ、1 回の凍結融解サイクルにおけるモルタル組織の損傷が、次のサイクルにおける凍結時膨張ひずみを生じる要因となると考えられた。⑤本研究で得られた実験結果に基づき、メソスケールのモルタルの凍結融解作用下の変形モデルを提示した。⑥今後は、本研究で明らかになった試料が小さいことによる試験誤差などの問題を解決した上で、実験データの蓄積を行い、提示したメソスケールの変形挙動モデルを確立していく。また、本システムをコンクリート供試体に適応していく。

凍害劣化シミュレーションモデルの妥当性に関しては、以下の成果が得られた。①準微視的には、骨材とモルタルとの界面でのひび割れ、および、モルタル内部の微小ひび割れによるモルタルの空隙率の増大により、凍害を表現できる。②この準微視的

凍害劣化モデルにより、塩化物イオン浸透性の増大を予測可能である。

(2) 現場で測定可能な凍害劣化指標に関して、非破壊の凍害劣化深さ測定に対しては、以下の成果が得られた。①表面走査法を用いて、図 2 に示すように、凍害劣化したコンクリート表面の数箇所の位置で、超音波の伝播速度を測定することにより、劣化を受けた場所と受けていない場所とで伝播時間が異なることから、測定距離と伝播時間の関係が折れ線となる。折れ点までの距離を使って、劣化部の深さを求めることができる。②ひび割れ密度が 0.010 本/mm 以上あるところが劣化部と考えることができた。③ひび割れ密度が大きくなると、圧縮強度や付着強度が小さくなり、塩化物イオン拡散係数が大きくなる様子が観察された。④以上より、表面走査法により求められる凍害深さに基づき、深さ方向のひび割れ密度の分布を推定する方法、さらに、ひび割れ密度から、圧縮強度、付着強度や塩化物イオン拡散係数などを推定し、構造物の諸性能の評価を可能とする手法が示された。なお、劣化表面からの距離ごとの実験データの測定法の工夫、実験データそのものの更なる蓄積、など、この手法はさらに改良が加えられる必要がある。

準破壊的測定法である小径コアによる超音波測定に関しては、以下の成果が得られ

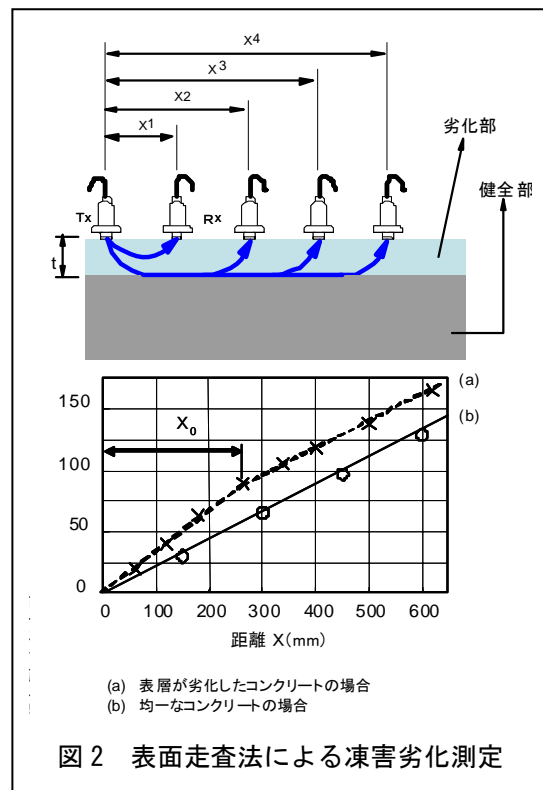


図 2 表面走査法による凍害劣化測定

た。①室内試験における超音波伝播速度とひび割れ密度の関係から、28 サイクルまでは、超音波伝播速度の低下に従ってひび割

れ密度は大きくなる良好な相関を示し、超音波伝播速度は凍害による損傷状態を良く評価していることが確認された。しかし、全てのサイクルのデータを総合すると、相関係数は低下する結果となった。ひび割れの本数が同じでも発生形態も一様とは限らず、その形態が複雑であるほど迂回距離も長くなることから、サイクルの増加に伴うひび割れの発生形態の違いが相関係数の低下に影響していることが考えられる。このことは、超音波伝播速度によって凍害による損傷の度合を評価する場合、劣化の程度により精度が異なる可能性があることを示している。②実構造物における超音波伝播速度とひび割れ密度の関係は、ばらつきはあるものの、ある程度の相関が認められた。しかし、40～49年経過の構造物に関しては、相関が認められない分布を呈していた。材齢の進行やジャンカなどが超音波伝播速度に影響を及ぼしたと考えられる。③超音波伝播速度と小径コアの圧縮強度との関係は、室内促進試験、実構造物ともに、相関が認められた。超音波伝播速度が同じ場合、強度は室内促進試験の方が実構造物に比べて約20MPa高い傾向にあった。粗骨材の最大径は室内が25mmに対し、実構造物は40mmと大きく、骨材径の差異が強度に影響したことが理由の一つに考えられる。

(3)凍害劣化指標と構造物特性指標との中間指標であるひび割れ密度の測定法に関しては、以下の成果が得られた。①凍害の進行を予測あるいは評価、診断し補修範囲を決定する際に必要となる凍害劣化深さを実際のコンクリート断面に発生した微細ひび割れの量で評価する方法を再構築した。具体的には、不要な蛍光塗料を容易に研磨可能とするアクリルエマルジョン系蛍光塗料と界面活性剤入り研磨剤の採用により、所要の深さで切断、研磨したコンクリート断面に存在する微細ひび割れを顕在化する方法に改良を加えた。その結果、安定した観察面を用意することが可能な試料調整方法を得ることができた。②さらに、本手法を旭川に暴露した耐凍害性が著しく低いコンクリートに適用して、暴露後5年の劣化深さを測定した。促進劣化試験の結果では耐久性指数で6.3%であり、温度条件からは2年程度で大きく劣化することが予測されるものでも実際の環境下では表面から5mm程度に劣化の進行がとどまることを示した。これは、寒冷地のコンクリートでしばしば観察される結果と定性的に一致し、凍害深さの進行には、温度以外にコンクリート内部の含水状態が大きく影響することを示唆する結果となった。

(4)指標の経時変化予測に関しては、以下の

成果が得られた。①凍害を受けている実構造物の超音波伝播速度とひび割れ密度、剥離度、各種構造特性(圧縮強度、塩化物イオン濃度)は、構造物の竣工後経過年数と関係がある。②非破壊の超音波測定による凍害深さと外観上の凍害劣化には相関がある。

(5)複合劣化作用下の指標に関しては、まず、冬季以外の温湿度の影響に関して、以下の成果が得られた。①高分子温湿度センサーを埋め込んだコンクリートの暴露試験結果から、冬期間の凍結融解作用時のコンクリート内部の相対湿度と凍結最低温度の関係について、コンクリート表面では比較的低い相対湿度で凍結融解作用を受けていること、また、暴露後の年数の経過によりコンクリート内部の相対湿度は低下し、RH30～60%程度で凍結融解作用を受けることが多いことが明らかとなった。また、コンクリートの凍害には温度だけでなく内部の相対湿度が大きく影響することから、水分条件を適切に評価し、予測するためのデータの蓄積の重要性が確認された。②さらに、実験室での環境変化養生および暴露試験結果から、セメント種別、試験材齢によらず高温乾燥により、細孔構造の粗大化、インクボトル細孔の増加およびインクボトル細孔の入り口径の粗大化が確認された。また、細孔構造の変化に対して乾燥時の湿度よりも温度の影響が大きく、直径40～2000nmの細孔量とインクボトル細孔が増加すると耐凍害性が低下することが明らかとなった。③しかしながら、乾湿繰返しによる耐凍害性の低下に対しても適切な量と質の空気泡を連行することで凍害劣化を抑制することは可能であり、一般的に推奨されているよりもやや大きめの気泡径、特に直径100～500 μm の区間空気量が有効であることが明らかとなった。

次に、内部水分量に注目した研究成果として、以下が得られた。①W/C25%の高強度コンクリートを対象とし、夏季を想定した乾湿繰返しを受けた後に凍結融解作用を受けた場合の含水状態を連続的に測定し、水分の状態が耐凍害性におよぼす影響について検討を行った結果、高強度コンクリートの耐凍害性は、乾湿繰返しを受けると低下することを確認するとともに、含水率分布が生じることによる水分移動が影響している可能性を示した。②実環境における乾湿繰返しの影響を明らかにするために表層から15mmの位置に温湿度センサーを設置した試験体の屋外暴露を行い、その温湿度の変化を実測した結果より、表面被覆なしの場合、夏期の乾燥の影響を大きく受けること、表面被覆を行った場合、表面被覆なしのものに比べて、年間を通して湿度の変動が小さく高い内部湿度となっていること、表面改質を行ったものを行わないものでは内部湿度は大きく変わらないこと、等

の知見を得た。

最後に、現場構造物での凍害による剥離と塩化物イオン浸透の度合いとの関係に関しては、以下の成果が得られた。①凍結融解と塩化物イオン浸透の複合作用を 10~40 年間継続的に受けている北海道内の防波堤上部天端面において、剥離が生じない場合の塩化物イオン量の計算値と、剥離面からそれぞれの深さにおける塩化物イオン量を調べた実測値との比較から、剥離面から深さ 1cm は全体の 80%、深さ 3cm は 53%、深さ 5, 7, 9cm は 33% が計算値を上回っており、凍害によるかぶりの減少は塩害の促進に大きな影響を及ぼすことが実地調査により明らかとなった。計算値に対する実測値の比率は、剥離面から深さ 1cm では最大 1.6 倍、全体では最大 2.5 倍であった。②剥離度(剥離深さ)が大きい防波堤では、全ての深さで比率が 1 以上すなわち計算値を上回っているものもあった。このことは、かぶりは塩害の促進抑制ならびにコンクリートの健全性を確保する上で重要であることを示している。③スケーリングが生じている実構造物において調べた見かけの拡散係数の実測値は、土木学会式を基に水セメント比から求めた見かけの拡散係数の計算値よりも、全体的に小さい値となっている。この事実は、塩化物イオン量は表面近傍で計算値より大きな値を示し、深いところで計算値と同程度の値を示していることによる。④つまり、コンクリートの表層に凍害劣化が生じたことで塩化物イオンが表層に多く浸透したことによる影響と推考されるが、寒冷地ではない海洋環境下で 30 年以上供用された港湾構造物(栈橋)においても、見かけの拡散係数が非常に低く表示される場合があることが既往の調査で明らかになっており、見かけの拡散係数の減少が凍害に起因するものと断定することは現時点では難しく、ばらつきの範囲と捉えられるともいえる。⑤本研究で得た成果の範囲で凍害による塩害の促進の予測法は次のようになる。(i)Fick 式により剥離が生じない場合の塩化物イオン量を計算・予測し、(ii)次に予想される剥離深さを求め、(iii)その結果をもとに、計算値に最大 1.6~2.5 倍の比率を乗ずる補正作業を剥離面からどの深さの範囲まで行うかを検討し、最終的に各位置の塩化物イオン量の予測値を決定する。

(5) 指標と構造物の性能に関しては、凍結融解作用が与える鉄筋とコンクリートとの付着性状への影響という点で、以下の成果が得られた。①今回の実験では、凍結融解作用により鉄筋の付着劣化が起こると言う事実を、付着応力-すべり関係、破壊形式、破壊耐力と言う指標を用いて確認することができた。②具体的には、水の供給の有無に関わらず、

付着劣化が起こる可能性があること、付着劣化機構は、付着力が伝達される鉄筋周囲のコンクリート断面の大きさにより異なる可能性があることを新たに見出した。③すなわち、かぶり厚が大きい場合、コンクリート内部に温度差が生じ、鉄筋とコンクリート界面にずれ(ひずみ差)が生じることで付着剛性が低下する可能性があり、一方、かぶり厚が小さい場合、内部の温度差は生じず、それゆえ付着剛性の低下は生じないが、コンクリート内部の最低温度がより低下し、かつ水分の影響が相対的に高まり、その結果、いわゆる凍害によるコンクリート強度の低下に起因する付着破壊が起こる可能性がある。

凍結融解作用が与える梁の耐荷性状に関しては、以下の成果が得られた。①凍害劣化程度が比較的小さい場合には、最大荷重に大きな変化は生じない。②水分供給条件がおよぼす凍害劣化状態や範囲の違いが、梁の変形挙動および破壊形式に影響を及ぼす。③凍結融解回数が増加に伴い、変形挙動や破壊形式が異なる結果となった理由として、凍結融解回数とともに、鉄筋とコンクリートの付着力が低下したことが一因として考えられる。

凍害による付着の劣化が梁部材の曲げ耐荷性状に与える影響に関しては、数値解析により以下の成果が得られた。①梁の曲げ圧縮側もしくは曲げ引張側が凍害を受け、コンクリートの圧縮強度、弾性係数、付着特性が低下したとして数値解析を行い、健全な場合と比較した。②全てのモデルは曲げ破壊したが、曲げひび割れが発生した後の勾配が引張側コンクリート劣化の方が圧縮側よりも小さくなり、降伏直前に引張側コンクリート劣化モデルが付着特性低下の影響により荷重の上昇が緩慢になる現象が現れた。③本数値解析モデルは十分な量のせん断補強筋を有していたため曲げ破壊先行の挙動をどのケースも示したが、せん断破壊に対する余裕度によっては破壊現象が変化する可能性があると考えられる。

(7) 補修補強工法の提示に関しては、表面被覆工法の凍害劣化抑制の効果について、実験室的に以下の成果が得られた。①各種表面被覆材を施工したコンクリートを対象に促進凍結融解試験より、一般に表面被覆材を施工したものは、表面被覆材なしのものよりも質量減少に転ずる凍結融解サイクルが遅くなっていることが示され、表面被覆材を施工することによって、凍害劣化を遅くできると考えられる。②物質透過性の指標と考えられる透湿量と、表面被覆材なしと表面被覆材ありのそれぞれの質量が減少に転じた凍結融解サイクルの差の関係から、表面被覆材の透湿量が小さいものほど、凍結融解サイクルの差が大きくなり、劣化を遅らせることができると考えられ、物質透過性によって耐凍害性の

向上効果を評価できる可能性があることを示した。

増厚工法における接着界面での材料モデルと増厚補強後の部材の構造特性とに関しては、実験的かつ数値解析的より以下の成果が得られた。①増厚材料であるPCMと既設部コンクリートとの接合界面での静的強度として、割裂引張強度とせん断強度は、表面粗度はあまり影響を与えないが、界面粗度が大きくなるにしたがい曲げ引張強度は増加し、その後一定値を示すようになる。したがって、曲げ引張強度が一定となるときの粗度が最適な値となる。界面強度（引張付着強度、曲げ強度、せん断強度）は、コンクリートあるいはPCMの小さい方の強度に支配される。②PCM-コンクリート界面のモードI破壊を支配する界面の引張付着特性として、界面粗度と既設部コンクリート強度の影響を考慮した、引張応力-ひび割れ幅の構成則を定式化した。③PCMとコンクリート界面の疲労付着特性を明らかにする目的で、引張応力-ひび割れ幅の関係を間接的に測定するための簡便な手法を新たに提示した。また、測定された関係から、疲労荷重下の引張応力-ひび割れ幅の構成則を定式化した。提示した簡便な実験手法は、界面を構成する材料に依存しないととも類似の補強工法である接着工法にも適用が可能である。さらに、要素供試体の疲労試験により、付着界面の曲げ強度とせん断強度のS-N関係（疲労強度-寿命関係）を明らかにした。④PCMにより増厚補強したはりの挙動として、界面はく離が耐荷力、破壊モード、鉄筋降伏へ与える影響について明らかにした。⑤以上の付着界面特性、および増厚補強はり供試体の挙動に基づき構築したモデルを用いて、数値解析的に増厚補強部材における界面はく離の性状とそれが部材の全体的な力学挙動に与える影響を明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計22件）

- ① Licheng Wang and Tamon Ueda, “Mesoscopic simulation of chloride ion diffusion in frost-damaged concrete”, International Journal of Modelling, Identification and Control, Inderscience Enterprises Ltd., 査読有, Vol.7, No.2, 2009, pp.148-154.
- ② Tamon Ueda, Muttaqin Hasan, Kohei Nagai, Yasuhiko Sato and Licheng Wang, “Mesoscale Simulation of Influence of Frost Damage on Mechanical Properties of Concrete”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 査読有, Vol.21, No.6, 2009, pp.244-252.
- ③ 濱幸雄, 平野彰彦, 田畑雅幸, 新大軌, コ

ンクリートの気泡組織に影響する要因と耐凍害性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読有, Vol.73, No.634, 2008, pp.2061-2067.

- ④ 遠藤裕丈, 田口史雄, 嶋田久俊, 星俊彦, 太田利隆, 佐伯昇, 名和豊春, 10 数年および約40年経過した北海道の港湾コンクリート建造物のスケーリング進行性評価, 土木学会論文集, 査読有, Vol.64, No.3, 2008, pp.484-499.

[学会発表] (計24件)

- ① Ueda Tamon, “Structural Performance and Modeling of Concrete Damaged under Combined Effects”, Proceedings of the 3rd ACF International Conference, ACF/VCA, 基調講演, 11-13th November 2008, Ho Chi Minh City, pp.33-43 (CD-ROM).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 多門 (UEDA TAMON)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 00151796

(2) 研究分担者

後藤 康明 (GOTO YASUAKI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90170472

長谷川 拓哉 (HASEGAWA TAKUYA)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30360465

濱 幸雄 (HAMA YUKIO)

室蘭工業大学・工学部・教授

研究者番号: 70238054

田口 史雄 (TAGUCHI FUMIO)

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所

所・上席研究員

研究者番号: 80414184

遠藤 裕丈 (ENDOHI HIROTAKE)

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所

所・研究員

研究者番号: 60414190

林田 宏 (HAYASHIDA HIROSHI)

独立行政法人土木研究所・寒地土木研究所

所・主任研究員

研究者番号: 20414188

(3) 連携研究者

佐藤 靖彦 (SATO YASUHIKO)

北海道大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60261327

(4) 研究協力者

王立成 (WANG LICHENG)

大連理工大学・土木水利工学部・准教授