

論文

[1150] 北海道におけるコンクリート構造物の凍害劣化に関する研究

山下英俊*1・堺 孝司*2・熊谷政行*3・喜多達夫*4

1. まえがき

北海道は、寒冷な気象環境にあり、コンクリート構造物は種々の有害な作用を受けている。それらの中でも、コンクリート中に含まれる水の凍結によって起こる凍害は最も重要な問題の1つである。凍害は、コンクリートの品質、構造物が置かれる環境、水の供給程度など、多くの要因に支配され、それらの複雑な組み合わせによって発生する。また、その劣化形態はさまざまであり、各要因の影響度合いによって異なっている。さらに、塩化物の浸透や中性化といった他の劣化要因との複合作用も考えられる。既往の研究をみると、各要因別に劣化形態を調べたものが多く、総合的に検討されたものは少ない。また、ほとんどが室内レベルのものであり、実構造物との対応をはかったものは僅かである。それらの中で、実構造物の凍害調査をもとに、劣化外力 [1] や構造細目 [2] について書かれた藤原らの論文が注目される。しかしながら、凍害発生要因の体系化や凍害による劣化の定量的な評価などについては十分とは言えない。このように、凍害の発生形態は非常に複雑で、まだ解明されていないことが多く残されている。

以上のことを背景に、本研究では凍害発生要因の体系化を試みると共に、北海道のコンクリート構造物について、その立地場所、構造物の種類、部位別の凍害劣化状況を調査し、凍害の現状を整理した。また、表面強度、超音波速度、細孔径分布、ひびわれなどにより凍害劣化によるコンクリートの物理的変化を定量的に評価した。

2. 凍害発生要因の体系化

凍害は、多くの要因の複雑な複合効果によってその程度、範囲および形態が決まる。そこで、それらの発生要因を体系化し、図-1に示した。図に示すように、凍害は環境要因、水の供給要因、コンクリートの品質要因の3つの要因に支配され、これらの複雑な組み合わせにより発生する。また、塩害や中性化などの他の劣化との複合効果によって加速すると考えられる。

環境要因とは、コンクリート構造物が置かれる場所の気象などの環境条件を示し、例えば最低温度、凍結融解回数、日射などがある。水の供給要因とは、コンクリートが受ける水

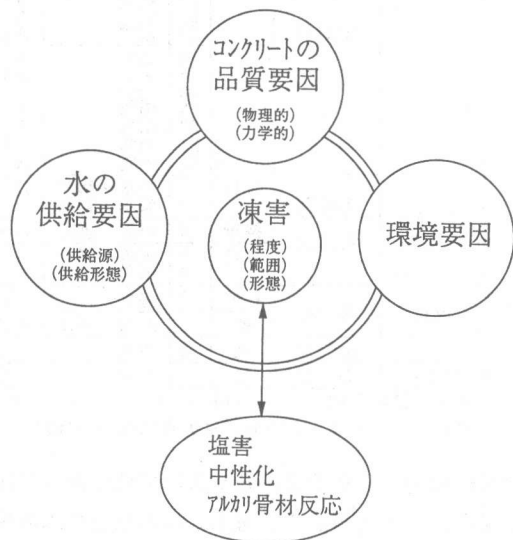


図-1 凍害発生要因

- * 1 (株) 間組技術研究所第2部第2研究室、(正会員)
- * 2 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室室長、工博(正会員)
- * 3 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室
- * 4 (株) 間組技術研究所第2部第2研究室室長、工修(正会員)

を考えると、コンクリートの品質が十分なものであれば、過酷な環境下で水の供給があっても、凍害は発生することはないであろうし、また、コンクリートの品質が悪くても、環境が穏やかか水の供給がなければ凍害は発生しないといえる。反対に、厳しい環境で十分な水の供給がある場合は、コンクリートの品質が悪いと著しい凍害を起こすことになる。

凍害の程度は、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などの複合効果によっても変わってくる。たとえば、塩害との複合効果の例を示すと、凍害が先に発生した場合、凍害によるコンクリート表面のスケーリングや微細なひびわれにより、塩分浸透速度が速くなり早期の塩害が予想されるし、また塩害が先に起こった場合を考えると、鉄筋腐食によるひびわれを透して水が供給され易くなり凍害が促進することが予想される。同じように、中性化との複合効果は、凍害により中性化速度は速くなるだろうし、中性化によるコンクリート表面の緻密化が、凍結時に生じる水圧の逃げ道を塞ぐことになり凍害が促進されると思われる。また、アルカリ骨材反応との複合効果について言えば、凍害により緩んだ部分の水持ちがよくなり、アルカリ骨材反応は促進されるし、反対に、アルカリ骨材反応により発生したひびわれが水の供給を助ける、といったように実際は互いの劣化現象は同時に進行し、それぞれの劣化が互いに劣化を促進し合うことは明らかである。

3. 凍害調査の概要

3.1 実構造物の凍害調査

今回の凍害調査は、北海道の札幌、小樽、室蘭地区のあらかじめ設定した路線のコンクリート橋を中心に行い、その中で調査することができた橋梁（23カ所）と、その他にトンネル（4カ所）、覆道（3カ所）、防波堤（1カ所）についても調査した。ただし、新設（竣工5年未満）は対象外とした。また、地覆、消波ブロック等については、特に劣化の激しい部分のみとした。

調査は、その立地場所、構造物の種類および桁、橋台、坑口などの部位別に行い、凍害の現状と凍害発生要因を整理した。

3.2 凍害劣化の評価

1次調査の結果より、凍害劣化として特徴的な箇所について、健全なものと凍害劣化したものとの定量的な比較及び表面から深さ方向の劣化の程度の違いについて、詳細に調査した。調査箇所の概要を表-1に示す。調査内容は、非破壊試験としてシュミットハンマーによる表面強度、超音波法による音速、透気試験による透気時間、また採取したコアコンクリートを用いて、表面から深さ方向の細孔径分布の調査及びひびわれを観察した。

4. 結果及び考察

4.1 凍害調査の結果

表-2に構造物別の環境要因、水の供給要因、コンクリートの品質および劣化状況を示す。海岸部は海水が水の供給源である場合が多く、ひびわれ、スケーリング、鉄筋の腐食による劣化が多い。それに対し、平野、山間部は雨雪を供給源とする場合が大部分で、スケーリング劣化が多くなっている。凍害による代表的な劣化状況を写真1~3に示す。写真1は海岸部の桁の劣化を示すもので、桁下に劣化があり、最大深さ2cm程度のスケーリングがみられた。この劣化を与えた水の供給は、主に海水が飛来によって桁下に付着したものと雨雪が桁間の欠陥部を浸透したものが考えられ、この傾向は海岸部のほとんどの桁下部に見られた。写真2は山間部の橋台の劣化状況を示すものであり、コンクリートの打ち継ぎ下部の劣化が著しく、ブリージングによる品

表-1 詳細調査箇所の概要

調査構造物	部位・環境要因	水の供給要因	コンクリートの品質	劣化状況
A橋	海岸部の桁下部	海水の飛来 雨雪の欠陥部経由	現場打ちPC橋 外見上は普通の品質	一部にスケーリング
B橋	山間部の橋台	シュー座からの廻り水 (表面経由)	打ち継ぎ部は不良 ブリージング大(下部)	打ち継ぎ下部にスケーリング
C橋	山間部の橋台	桁端部からの垂れ水 (表面経由)	健全部と劣化部に品質の差 はなし(品質普通)	垂れ落ち部にスケーリング

写真1 桁下部(海岸部)

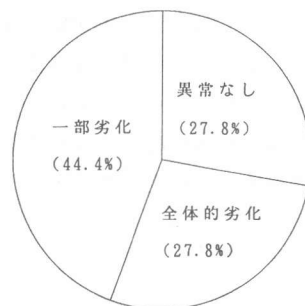
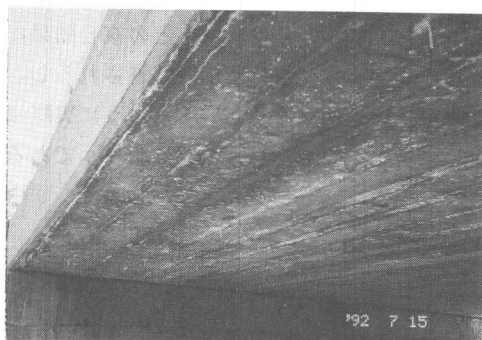
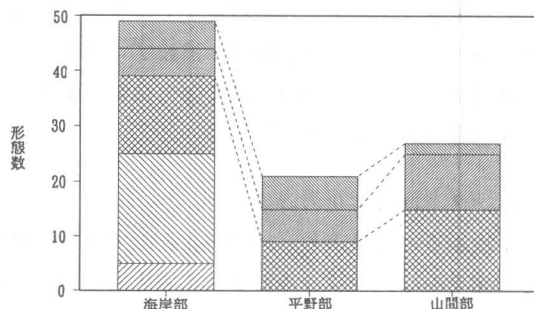


図-2 凍害劣化の割合

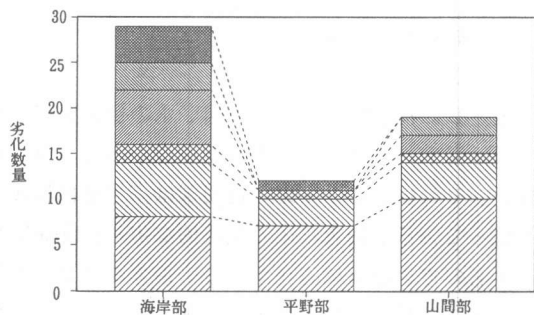
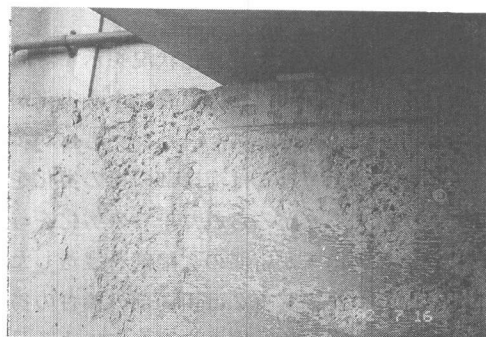
写真2 橋台(山間部)



☐ 海水を直接 □ 海水を飛来 ▨ 雨雪を直接 ▩ 雨雪を表面経由 ■ その他

図-3 水の供給要因

写真3 橋台(山間部)



☐ スケーリング □ ひびわれ ▨ 遊離石灰 ▩ 鉄筋腐食 ■ ポツポツ ■ その他

図-4 凍害劣化状況

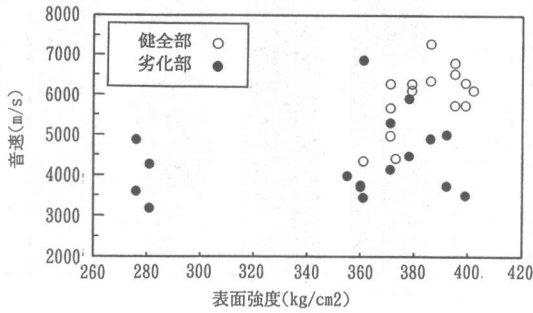


図-5 表面強度と音速の関係

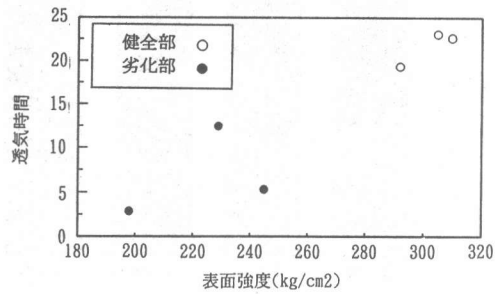


図-6 表面強度と透気時間の関係

質不良が明瞭である。また、写真3は同じく山間部の橋台のスケーリングの状況であり、桁端部からの水の垂れ落ち部分のスケーリングが大きく、最大深さ3 cm程度となっている。このように、山間部における橋梁の凍害は、雨や雪の解け水が桁端部に廻りシュース座を通過して橋台に流れ落ちて発生するケースが多く、写真2のような品質不良がある箇所か、写真3のように水の供給が多い箇所に凍害が発生している。

次に、調査構造物の内、コンクリート橋についてまとめた結果を示す。図-2に示すように、凍害の発生状況は調査したコンクリート橋23ヶ所に対して18ヶ所に何らかの凍害による劣化が見られ、異常がなかったのは5ヶ所であった。また、図-3に示すように、水の供給は、海岸部は、海水を飛来で受ける場合が最も多く、平野、山間部では雨、雪を直接受ける場合とコンクリート表面を伝わって受ける場合が多くなっている。また、図-4に示すように劣化状況を見ると、海岸部は鉄筋腐食とスケーリングが、平野、山間部はスケーリングが多くなっている。このように、構造物の立地場所によって水の供給源や供給形態が違い、それによる劣化の違いが明確に表れている。

4.2 凍害劣化の評価

図-5にA橋(写真1)でのシュミットハンマーによる表面強度と音速の関係を示す。健全なものはほぼ比例関係にあり、強度の増加に伴い音速も速くなっている。しかし、劣化部は値にばらつきがあり、全体的に音速が遅くなっている。これは、表面強度だけでは健全部と劣化部の違いを表すことは困難だが、超音波法による音速を併用するとその違いを表すことが出来ることを示している。また、B橋(写真2)の圧縮強度と透気時間の関係を図-6に示す。図からわかるように、健全部は圧縮強度が高くなるにつれ透気時間も長くなっている。それに対して劣化部は、圧縮強度が低い分、透気時間も短くなっており、その関係はほぼ比例関係にあり、透気時間が劣化の程度を表していることが分かる。これらの結果は、他の橋梁の試験結果でも同じような傾向が表れており、室内レベルでの基礎的評価による裏付けが必要と思われるが、健全部と劣化部の物理的特性の違いを定量的に評価することは可能と思われる。

次にコンクリート表面からの深さ方向の物理的な特性の違いについて述べる。図-7にC橋(写真3)の健全部と劣化部の細孔径分布の違いを示す。両方共に表面付近の方が $10^2 \sim 10^3$ 、 $10^3 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の割合が多くなっているが、凍害を受けている方がその傾向が大きい。これは、表面に近い方が凍害による微細ひびわれが多く発生していることを示している。写真4~6にC橋の表面付近、30 mm、60 mmのひびわれ状況を示す。表面付近では、骨材回りのペースト分が

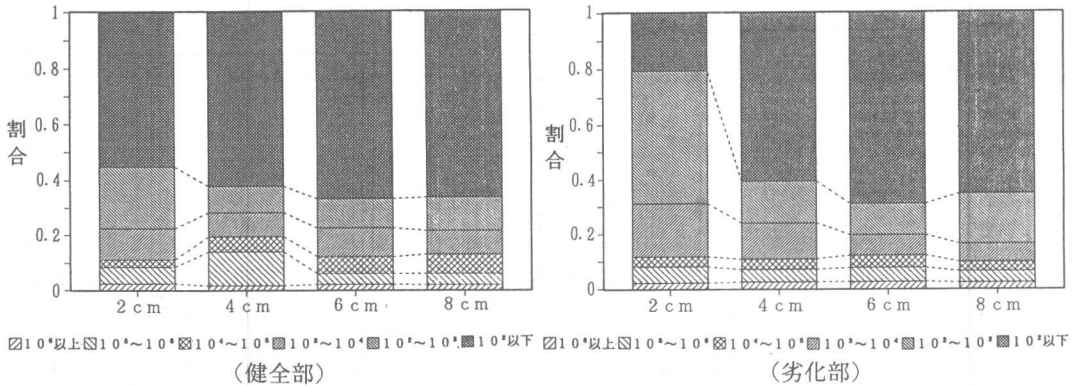


図-7 健全部と劣化部の細孔径分布の違い

写真4 表面付近

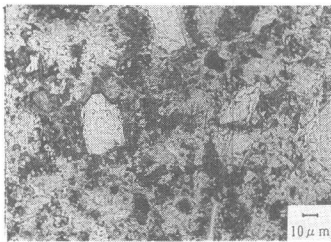


写真5 表面から30mm

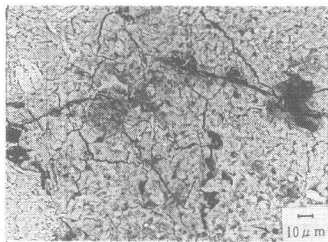
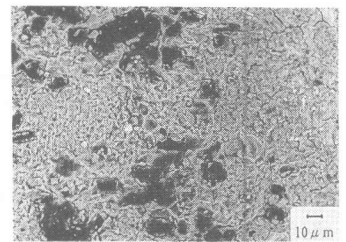


写真6 表面から60mm



なくなっており、凍害劣化が進んでいることを示している。表面から30mm付近では、微細なひびわれが多数確認され、水の凍結の際の膨張圧により発生したものと思われる。なお、この傾向は、表面から10mm付近でも得られており、同じ様な劣化形態を示している。また、表面から60mm付近では少量のひびわれは確認できるが、明らかに30mm付近より少なくまだ凍害が進行していないことを示している。この結果は、細孔径分布の $10^3 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の割合の違いに対応しており、凍害は表面から徐々に内部に進行していくことが確認された。

5. あとがき

今回の現場調査の対象となったコンクリート構造物は、現在供用されているものがほとんどであったため、調査内容、数量に制限があったが、凍害の劣化によるコンクリートの物理的特性の変化や劣化の進行過程を裏づける有力な情報が得られたと思う。また、これまで凍害による劣化は、表面から内部に徐々に劣化が進行するといわれているが、このことは本研究においても確認された。しかし、現在一般的に用いられている凍結融解試験はコンクリート供試体全体を凍結させ、その劣化過程を調べるものがほとんどであり、実構造物への適用の有効性が問題となる。今後は、実構造物の劣化形態を一層明確にし、それに対応した促進凍結融解試験方法について研究を進めていくつもりである。

[参考文献]

- 1) 藤原忠司:コンクリートの凍害に関する劣化外力の評価方法, 土木学会論文集 VI-15, pp111~120, 1991, 9
- 2) 藤原忠司ら:道路橋におけるコンクリートの凍害とその防止に関する構造細目, 土木学会論文集 VI-17, pp97~106, 1992, 9