HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---|---|
| Title | コンクリートの凍害とひびわれの役割に関する研究 |
| Author(s) | 鎌田, 英治; 洪, 悦郎; 田畑, 雅幸 |
| Citation | 北海道大學工學部研究報告, 92, 51-58 |
| Issue Date | 1979-01-31 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/41549 |
| Type | departmental bulletin paper |
| File Information | 92_51-58.pdf |

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第92号（昭和54年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 92 (1979)

# コンクリートの凍害とひびわれの役割に関する研究

鎌田英治　洪　悦郎　田畑雅幸

（昭和53年7月10日受理）

# A Study on Frost Damage of Concrete, Especially on the Role of Cracks

Eiji Kamada, Yoshiro Koh　Masayuki Tabata

(Received July 10, 1978)

**Abstract**

The Amount and extent of the cracks observed on the surface of concrete were measured by using test specimens exposed to the outdoors in Sapporo, and the process of the crack formation caused by frost action was discussed based on the measurements.

Two series of freezing-and-thawing test were carried out in order to confirm the results obtained in the exposure test. In the first test series, specimens reinforced by crimped wire mesh were loaded with shear load until visible hair crack was obsered. And specimens without reinforcement were exposed to several kinds of drying conditions in another test series. After these treatments, both specimens were subjected to freezing-and-thawing, and influences of cracks on the frost damage of concrete were investigated.

The following conclusions regarding the role of these cracks on frost damage of concrete seem to be reasonable.

(1)Visible cracks observed on the surface of concrete are caused by the expansion of the interior and not by the direct action of the freezing-and-thawing.

(2) The acceleration of frost damage derived from the cracks mainly arises from the penetration of water into the concrete from the surface.

(3) The action, which enlarges cracks during the freezing process, does not play a too siguificanut role in frost damage of concrete.

## 1. まえがき

実際のコンクリート構造物の凍害は，コンクリート表面のひびわれとして認められる場合が多く，コンクリートの凍害には，ひびわれが何らかの役割をはたしていることが考えられる。本研究は，凍害とひびわれの関係を，屋外暴露試験および凍結融解試験によって検討したもので，凍害を受けたコンクリートでしばしば見られるひびわれの役割を明らかにすることを目的としている。

※　建築工学科　建築材料学講座

## 2．研究の基盤と背景

建築材料学講座は，材料・施工系の講座として，全国に先がけて設立されたもので，寒冷地特有の問題であるコンクリートの凍害は，講座設立の初期から，主要なテーマの一つとして考えられていた。しかし，この当時は，凍結融解試験装置がなく，実験は，試験体を低温室に運んで凍結し，また取り出して融解するという方法であった。このため，長期間の繰り返しを要する硬化したコンクリートの凍害研究には，多大な労力と時間を要した。凍結融解試験装置は，昭和31年に設置され，ここで，硬化したコンクリートの凍害問題に対して有力な研究手段を得ることになった。この装置は，手動によって1日1回の凍結融解を行なうもので，現在の一般的な試験法と比較すると，結果を得るためには数倍の日数と毎日のバルブ操作が必要というものであったが，それまでと比較して格段の進歩が得られた。この装置を用いて，骨材の岩種や軟石がコンクリートの耐凍害性におよぼす影響，人工軽量骨材を用いたコンクリートの耐凍害性などについて研究が進められた。

その後，昭和41年に線膨張測定装置，昭和44年に全自動急速水中凍結融解装置と設備の充実が進み，昭和48年には気中凍結水中融解装置2槽と，ポロシメータの設置が行なわれ，硬化したコンクリートの凍害を多角的な視野から検討することが可能となった。凍結時の膨張挙動を水分凍結の細孔構造依存性によって説明しようとする試みはコンクリートの凍結機構に関する研究[XIV-1]として展開し，コンクリートの凍害と地域性に関する研究がとりまとめられた[XIV-2]。人工軽量骨材，各種セメントによるコンクリートの耐凍害性や，骨材種別，粒度についても検討が加えられ，凍結融解試験方法の標準化もテーマの1つになっている[I-50]。

コンクリートの凍害をひびわれの観点からとらえようとする試みも，これら広範な凍害研究の一環で，建築構造物の凍害調査，暴露試験体の観察から動機を得ている。建築構造物の凍害調査は，昭和31，40，41，47年（札幌），49年（旭川）と実施したが，凍害による劣化がひびわれとして生じている例が数多く観察された。また，昭和38年から開始したコンクリート試験体の屋外暴露試験では，暴露開始後2度目の冬を越した段階で，試験体表面のひびわれが目立ち始め，凍害とひびわれについての実例を提供した[VI-3]。昭和47年より実施している膨張セメントコンクリートに関する田畑の研究[I-30]は，凍結融解試験に先だって乾燥を受けたコンクリートの耐凍害性が著しく劣る傾向を示し，乾燥によってもたらされるひびわれが凍害を促進させるのではないかとの示唆を与えた。

## 3．屋外暴露試験体のひびわれの観察

### 3．1 暴露試験の概要

屋外暴露試験は，養生条件の圧縮強度増進におよぼす影響に関する研究[VI-3]において，3種の条件（水中，屋内，屋外）のうちの1条件として実施したもので，長期的には凍害による劣化を観察することも目的としている。試験体は15φ×30cmで，セメントの種別を普通ポルトランドセメント，B種高炉セメント，B種フライアッシュセメントとし，それぞれのセメントについてAE剤（ヴインソル）・AE減水剤（ポゾリス）を使用したもの，無使用のものの

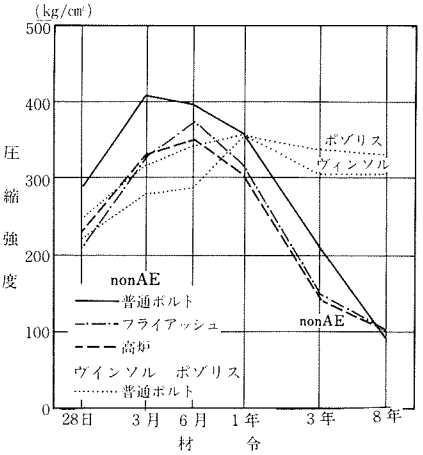



図1 屋外暴露試験体の圧縮強度

3種のコンクリートを作製した。実験は冬期と夏期に実施したが，ひびわれは冬期打設のコンクリートで観察した。この場合，強度上の水セメント比を普通ポルトランドセメントで55%とし，混合セメントの場合は，普通ポルトランドセメントと同じ圧縮強度が得られるように定めた。スランプは19 cmを目標とし，骨材には北海道広島産の山砂，山砂利を用いた。

コンクリートは脱型後を20℃水中養生とし，材令7日より暴露を開始した。冬期打設のコンクリートの暴露の開始は，3月初旬から中旬で，日射による融解の可能性も高く，凍結融解作用が比較的厳しい時期に該当する。耐凍害性の劣る骨材を使用したなどの理由があるものと思われるが，AE剤，AE減水剤を用いていないコンクリートは材令1年（2冬経過後）には劣化の徴候を示し，材令3年，8年では，non AEコンクリートのすべてが，凍害による著しい強度低下を示した。（図1）

### 3．2　ひびわれ観察の方法

全般的な観察の結果，試験体の部位によってひびわれの程度に差が認められ，ひびわれの観察は試験体の部位を考慮して行なうこととした。図2に示すごとく，試験体を上，中，下の3部位に分割して，それぞれの中央に境界に平行な測線を描き，この水平方向の測線とほぼ同じ長さとなるように垂直方向の測線を定めた。ひびわれ量の定量化のため，ひびわれがこの測線を横断する場合に，その巾を最小目盛0.04 mmのクラックスケールと対比した目測で測定し，測線を横断しないひびわれは無視した。なお，ひびわれが測線を斜めに横断する場合には，その巾はひびわれの方向と直角に求め，ひびわれ量の数値化にあたって，次のような指数を仮に定めた。

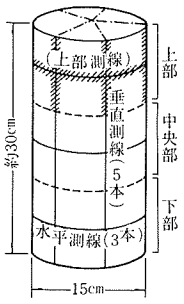


図2　測線の位置

$$\text{ひびわれ間隔}=\frac{\text{測線長}}{\text{ひびわれ個数（この場合は0.04 mm以上のひびわれ個数）}}$$

$$\text{ひびわれ横断率}=\frac{\Sigma(\text{個々のひびわれのひびわれ巾}\times\text{その個数})}{\text{測線長}}$$

ここで，ひびわれ間隔はひびわれ間の平均距離を表わすもので，ひびわれ分布の指標となり，ひびわれ横断率はひびわれによる空隙量に関係し，ひびわれ巾（個々のひびわれの程度）の指標となると考えている。

### 3．3　暴露試験体のひびわれの分布

non AEコンクリートではすべての試験体にひびわれが認められたが，このひびわれには方向性がなく，試験体内部の膨張あるいは表面の収縮を示唆するようなものであった。

測線長1 m当りのひびわれ本数をひびわれ巾ごとに示したものが図3である。図には材令2年3月（3冬経過）と8年（9冬経過）と比較して示す。この2度の測定において，ひびわれの総数にはあまり差がなく，材令が進行した場合，すなわち，凍害が進行した場合には，大きなひびわれが増加し，小さなひびわれが減少するという傾向が認められた。non AEコンクリートの場合と比較してヴィンソル，ポゾリスを用いたAEコンクリートでは目視しうるひびわれが極端に少ないが，これらのコンクリートでは図1の圧縮強度の測定においても低下が認められず，凍害による劣化が生じていないものと判断できた。

### 3．4　ひびわれとコンクリートの劣化との関係

AEコンクリートでは凍害による劣化が認められないことから，non AEコンクリートの劣化の程度をAEコンクリートとの強度比で表わし，3．2で述べた指標との関係を求めたものが図4である。ひびわれ間隔を指標とした場合，ひびわれ間隔の減少は，強度比の高い段階で強度低下とある程度の相関性を示すものの，強度比60%以下ではほぼ一定となった。一方，ひびわれ横

断率を指標とした場合，この値は強度の低下に比例して増大し，ひびわれによる空隙は劣化の過程を通して強度の低下と相関性をもつことを示した。これらの傾向は，ある段階以降の凍害劣化の進行が，新らたなひびわれの発生（ひびわれ長さの延長も含めて）をもたらすのではなく，それ以前に形成されたひびわれの巾を増加させる方向に作用することを示唆している。

### 3．5　ひびわれ形成の過程とひびわれ間隔の限界

図5は材令8年の測定で観察された試験体表面のひびわれを部位別に示したもので，厳しい気象条件にさらされる試験体上部の被害が他の部位と比較して激しく，ひびわれ横断率が最も大きな値となった。一方，ひびわれ間隔を指標とした場合には，上部のひびわれの特徴としてすべての試験体でこの値がほぼ2cmと一定の値とな

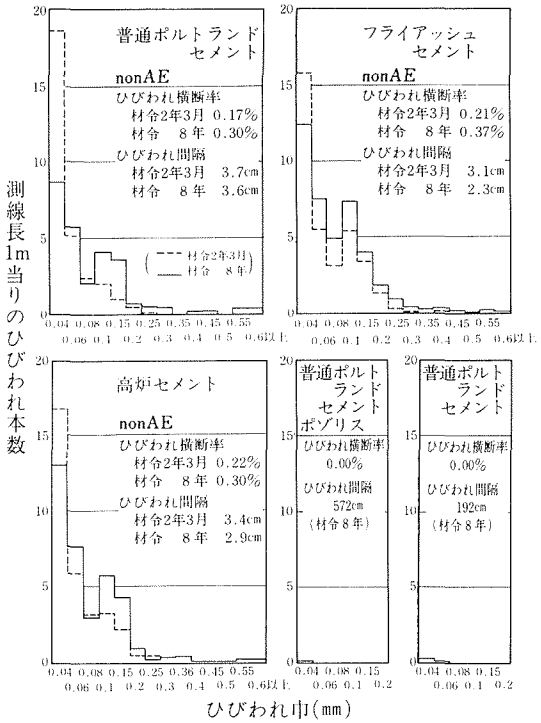



図3　測線長1m当りのひびわれ数とひびわれ巾の分布

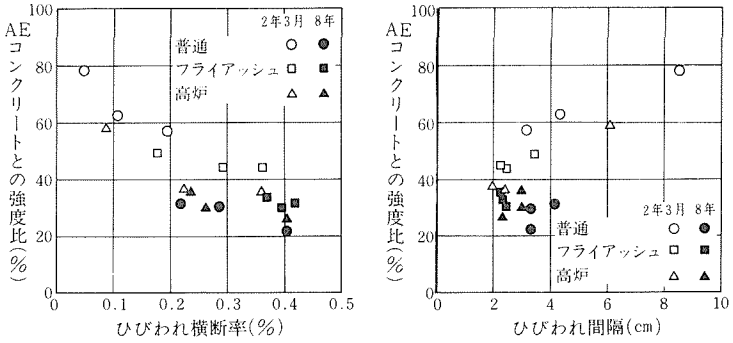



図4　凍害による劣化とひびわれ横断率，ひびわれ間隔との関係

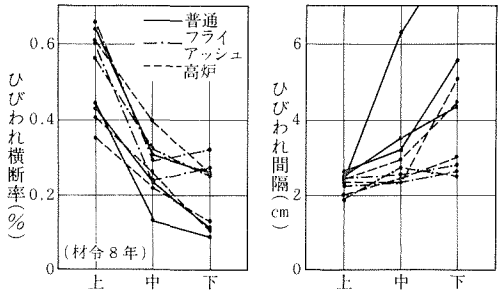



図5　試験体部位によるひびわれの差

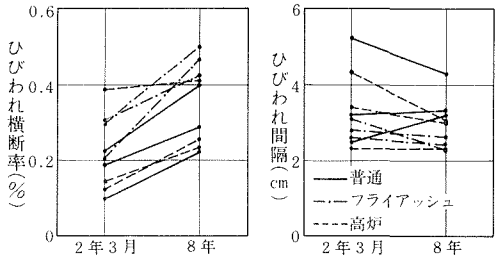



図6　材令の進行にともなうひびわれの変化

り，上部はすでにひびわれ間隔の限界に達していると考えることができる。試験体上部のひびわれ間隔が限界値に達しているにもかかわらず，ひびわれ横断率に差のある結果は，新らたなひびわれの形成がなされない段階においても個々のひびわれの巾は増加していることを示すものと考えられる。

材令2年3月における測定値を8年における値と比較した結果が図6であるが，材令2年3月の段階でひびわれ間隔がほぼ2 cmとなった試験体では材令8年においても同じ値を保ち，図5の場合と同様，ひびわれ間隔に限界値のあることを示した。一方，ひびわれ横断率は，材令の進行，すなわち劣化の進行とともに増加する傾向となり，ひびわれ間隔が一定となった後にも，個々のひびわれ巾が増加することを示した。

図5および図6の結果は**3．4**での考察をうらずけるもので，凍害によるコンクリート表面のひびわれ形成過程を次のように考えることができる。

(1)　凍害による劣化が目視しうるひびわれとして表われる場合，劣化の初期には微細なひびわれが比較的大きな間隔で入るが，劣化の進行とともに新らたなひびわれが形成されてひびわれ間隔はせばまっていく。

(2)　劣化がある程度進行した段階において，新らたなひびわれの形成はなくなり，以後はそれまでに形成されたひびわれの巾が増大する過程をたどる。

凍害による劣化の過程において，ある間隔でひびわれが生じると，その後は個々のひびわれの巾が拡大するという結果は，凍害によるコンクリートのひびわれが凍害の原因となる応力に直接的に起因するというよりは，むしろ，凍害によるコンクリート内部の膨張に対して表面が追随できずに生じることを示すものと考えることができる。

## 4．ひびわれを導入したコンクリートの凍結融解試験

### 4．1　ひびわれの導入と凍結融解試験

暴露試験体の観察は，凍害によるひびわれの形成過程および原因をほぼ明らかにしたが，ひびわれが凍害を促進させたかどうかについては何ら情報を与えていない。ここでは，意図的にひびわれを導入した試験体の耐凍害性を検討し，ひびわれが凍害を促進する要因として作用するかどうかを検討する。コンクリートは水セメント比60%，スランプ21 cmのnon AEコンクリートで，セメントは普通ポルトランドセメント，骨材には錦岡産海砂，当別産川砂利(最大寸法10 mm)を使用した。試験体は7.5×7.5×40 cmで，ひびわれ導入の際に破断するのを防ぐため，内部に2枚のクリンプ金網を埋め込んだ。20℃，4週の水中養生後，試験体の長手方向に直角に割裂荷重をかけ，ひびわれを認めた瞬間に除圧するという方法を繰り返して試験体に5本または10本のひびわれを導入した。ひびわれ導入後は，ASTM C 666にもとづく急速水中凍結水中融解試験を行なった。載荷後のひびわれは，金網がなければ試験体の破断にむすびつくほど深いものであるが，除圧後はきわめて微細となり，すべてのひびわれを肉眼でとらえることは困難である。

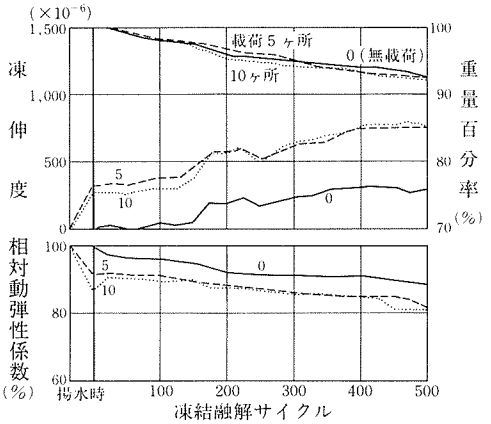



図7　載荷後の試験体の耐凍害性

### 4．2　ひびわれをもつコンクリートの耐凍害性とひびわれの凍害促進効果

ひびわれを導入したコンクリートの耐凍害性をひびわれのない試験体と比較して図7に示す。ひびわれが導入された場合，凍伸度は見掛上増大するものの，凍結融解の繰り返しにともなう増加はひびわれのないコンクリートと同様であった。一方，動弾性係数は，凍結融解により低下せず，むしろ，凍結融解の初期に，ひびわれの導入により低下した値が回復する傾向を示した。これは，一部のひびわれが凍結融解の過程でゆ着したことを示すものと考えられ，ひびわれにより試験体の耐凍害性が低下するとの結果は得られていない。このような傾向は金網の種別を異ならせても同様で，たとえ内部に達するようなひびわれであっても，この程度のひびわれには健全なコンクリートに凍害をもたらすほどの悪影響はなく，凍害促進の役割はきわめてすくないことが明らかとなった。

## 5．乾燥を受けたコンクリートの耐凍害性と透水性

### 5．1　実験の概要

乾燥を受けることによって，コンクリートにはきわめて微細なひびわれが入る。このひびわれは一般に目視することは困難であるが，コンクリートを短時間水に浸すと水の浸透した跡として見ることができる。ここでは，このような微細であるが，非常に多数のひびわれがコンクリートの耐凍害性にどのような影響を与えるかを検討する。試験体は7.5×7.5×40 cm で，2週間の水中養生の後，20℃，35℃，50℃，65℃，105℃の温度で2週間の乾燥を行なった。乾燥後は2日間水に浸し ASTM　C 666 にもとづく凍結融解試験を行なった。また，凍結融解試験用の試験体と同時に試験体中央に電極を埋め込んだ試験体も作製し，吸水の過程で，中心部分に水が到達する速度を電極間の電気抵抗の変化としてとらえた。コンクリートはスランプ18 cm で，骨材には錦岡海砂と当別川砂利（最大寸法20 mm）を用いた。なお，4の実験シリーズにおいても，乾燥と耐凍害性の関係を検討したが，この場合には骨材の最大寸法が10 mm で，金網を埋め込んだ試験体を用いて材令4週の水中養生後乾燥を行なっている。

### 5．2　乾燥の凍害促進効果と水セメント比・AE 剤の影響

凍結融解試験の結果，non AE コンクリートでは乾燥による耐凍害性の低下が明瞭な傾向と

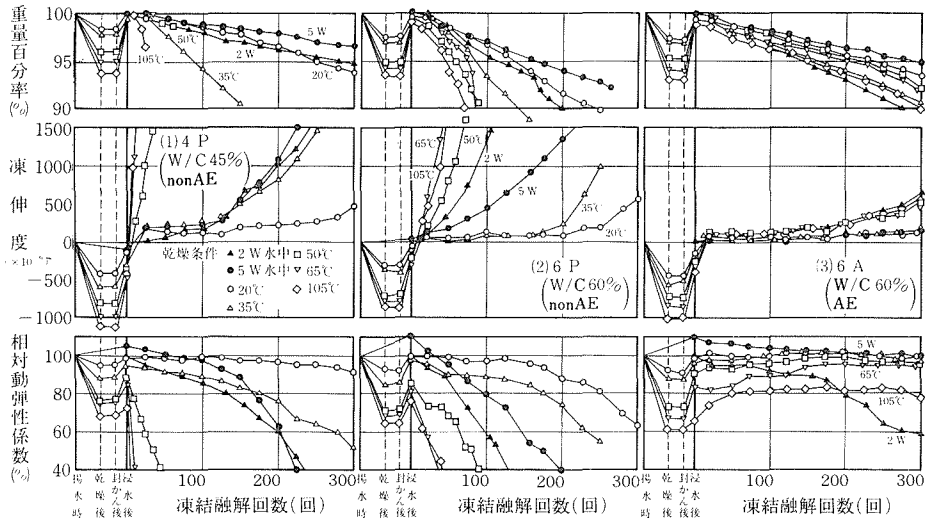



図8　加温乾燥を受けたコンクリートの凍結融解試験結果

して認められ，50℃，65℃，105℃乾燥など，充分に乾燥したコンクリートほど低下が著しい傾向となった。一方，AE コンクリートでは乾燥による耐凍害性の低下は認められず，105℃乾燥を受けたコンクリートでも，300 サイクルの繰り返しに対して健全であった。（図 8）

図 8 の実験は，4 の場合と異なり，乾燥が凍害に悪影響をおよぼすことを示した。しかし，この場合には加温乾燥という手段が用いられているため，温度の影響が含まれ，また，試験体にはひびわれを拘束する金網が埋め込まれていない。図 9 は金網を埋め込んだ試験体を 35℃で乾燥した結果であるが，図 8 と同様な結果となり，凍害促進の効果は乾燥によってもたらされることが明らかとなった。水セメント比を低下させることは乾燥による凍害促進効果を減ずるには効果がないばかりか，むしろ，より悪影響を受けやすく，AE 剤の使用は非常に有効であることが判明した。

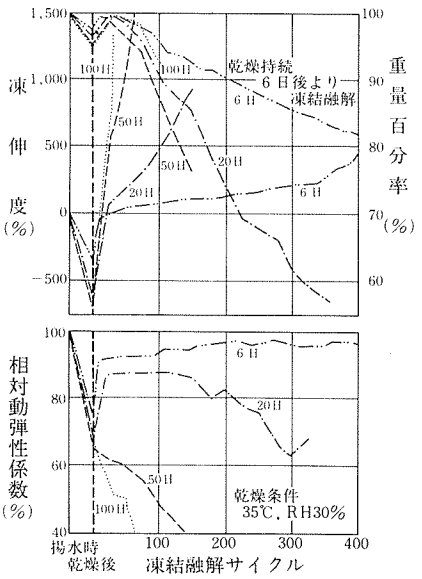



**図 9**　35℃乾燥後のコンクリートの凍結融解試験結果

### 5．3　乾燥過程を経たコンクリートの透水性

凍結融解試験の結果は乾燥が凍害に悪影響を与えることを示したが，乾燥の影響はひびわれとしての効果であるかどうかは不明である。ここで，乾燥後の試験体を水に浸し，中心部に埋め込んだ電極間の電気抵抗の変化を調べた結果が図 10 である。温度管理が不充分で，また，105℃乾燥の試験体では熱によって電線被覆材が老化したこともあり，データはいくぶんあばれているが，いずれの試験体でも，乾燥が進むほど比抵抗の上昇が速く，乾燥が水の浸透を速める作用を持つことを示している。試験体全体としての含水量の変化では乾燥が進んだ試験体ほど，同一時間における含水量が低く，また，電気抵抗は抵抗の低い部分（水の含まれた部分）の影響を受けることを考慮すると，乾燥は飽水していない部分を残しながらも，局部的に水の浸透が容易な部分を形成することになる，この水の浸透が容易な部分をひびわれと考えることは，最も妥当に思える。

## 6．コンクリートの凍害要因としてのひびわれの役割

コンクリートの凍害とひびわれの関係について，凍害の進行はひびわれを拡大し，新らたな

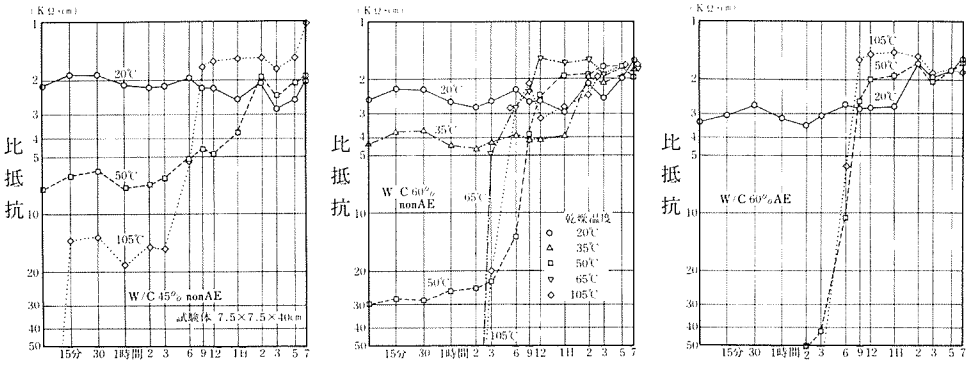



**図 10**　乾燥を受けたコンクリートの吸水過程における比抵抗の変化

ひびわれを形成する過程であると考える説明が一般的である。これは，コンクリートにひびわれが形成されると，ひき続く凍結において，ひびわれ中の水分がひびわれにクサビを打ち込むような作用をして，新らたなひびわれを形成させるというものである。しかし，屋外暴露試験体の観察の結果はひびわれがある程度分布した段階以降は新らたなひびわれの形成がないことを示し，また，凍結融解試験では金網程度の拘束でも，ひびわれは拡大しないばかりか，逆にゆ着する傾向のあることを示した。これらの結果より，コンクリートの凍害におけるひびわれの役割は，クサビのような作用でコンクリートの凍害を促進させるというものではなく，主として，内部への水の浸透を容易にするものであると判断できる。コンクリートの凍害におけるひびわれの役割をこのように想定することにより，乾燥によるきわめて微細なひびわれが凍害を促進させ，同時にAE剤が促進効果の緩和に有効である結果が説明できる。この場合，実際の構造物で認められる凍害によるひびわれは，内部の膨張に対して表面が追随した結果であると考えられ，凍害を受ける以前に微細なひびわれが存在したコンクリートでは，凍害による膨張がそのひびわれ巾を拡大する作用をもたらすことになる。この結果，凍害はそれ以前に存在した応力を強調する。実際の構造物の凍害では，温度応力，乾燥収縮などのひびわれを顕著に示す例がしばしば認められている。

## 7．おわりに

本研究は，これまで建築材料研究室で実施してきた硬化したコンクリートの凍害に関する研究をひびわれの観点からとりまとめたもので，暴露試験体の観察は，洪，後藤，旗手によって作製されたコンクリートについて実施した。ひびわれを導入したコンクリートの実験は昭和49年度丹羽範夫の修士論文[I-45]をもととし，乾燥後のコンクリートの耐凍害性は最近の田畑の研究[I-48]をもととしている。なお，文献は研究発表リスト，建築材料学講座の文献番号で示し，XIVは学位論文の項とした。