

論文

低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に関わる応力解析

袴田 豊^{※)} 藤原 忠 司^{※※)} 小山田 哲 也^{※※※)}
 小田島 悠 弥^{※※※※)} 越 谷 信^{※※※※※)}

1. はじめに

低品質骨材を有効に活用するためには、これを用いたコンクリートの性能を確保する方策の確立が前提となる。その性能のひとつとして、耐凍害性に着目し、はじめに凍結融解繰返し作用に対する低品質骨材自体の抵抗性を調べてみた(袴田ら¹⁾)。対象としたのは広範囲の品質の碎石であり、得られた結果によれば、基本的物性のひとつである吸水率が大きいほど、凍結融解抵抗性は劣るとの傾向が見られた。ただし、吸水率がJISを外れる骨材であっても、規格内骨材に匹敵する抵抗性を有するものもあり、少なくともコンクリートの耐凍害性の観点からは、これらを規格内骨材と同等とみなして使用できる可能性があると思われた。また、抵抗性に多少劣っても、コンクリートの配合等を工夫すれば、有効活用の可能性もあり、これら2つの可能性を検討するのが、今後の課題であると結んでいる。

この結果を踏まえ、広範囲の品質の碎石を用いたコンクリートの耐凍害性を調べた(袴田ら²⁾)。この際、水セメント比および空気量を幾段階かに設定し、これらの調節によって、低品質骨材使用の弱点を補完できるかの検討を実験の主眼とした。その結果、骨材の吸水率が規格を外れても、4.5%程度までであれば、配合上の格別な配慮をしなくても規格内骨材を用いたコンクリートと同等の耐凍害性を示したことから、骨材自体の凍結融解抵抗性の実験で得られた予見のひとつが裏付けられたといえる。

一方、5%程度以上の吸水率を有する低品質骨材を用いた場合には、おしなべて低い耐凍害性を示し、配合を

いかに調節しても、耐凍害性の確保は難しいと判断された。ただし、中には一般的常識とは逆に、水セメント比を大きくすることで、耐凍害性が得られるとの事例もあり、骨材の品質に見合った配合条件を設定すれば、耐凍害性を確保できる可能性を示唆していると受け止められた。

低品質骨材によっては、水セメント比が大きいほど、耐久性指数が大きいとの研究例(阿波ら³⁾)が既にあり、主として骨材の細孔構造の観点から原因を考察している。ここでは、この特異とも言える現象を、力学的な観点から解釈しようとした。

2. 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性

先に行ったコンクリートの凍結融解試験の結果は、既に報告済み(袴田ら²⁾)であるが、本文の目的を明確にするため、概略を再掲する。この試験では、吸水率が0.7~8.6%の広範囲にわたる17種類の碎石を用い、配合を種々に設定して、コンクリートの耐凍害性を調べた。その結果、2種類の碎石を用いたコンクリートが、水セメント比と耐凍害性との関係において、特異な傾向を示した。そのうち、本文で着目するのは秋田県鹿角市産のデイサイト(石英安山岩)質凝灰岩の碎石であり、絶対密度 2.33g/cm^3 および吸水率5.9%と極めて低品質であるといえる。図1に、この碎石および比較用として良質碎石の細孔径分布を示す。例示した良質碎石には、細孔がほとんど存在しないのに対し、ここで着目する碎石には、広範囲の寸法の空隙が多量に含まれる。これら碎石自体に凍結融解の繰返し作用を150サイクル与えた後の細孔

※) 岩手県生コンクリート工業組合中央技術センター指導開発課長 工博

※※) 岩手大学工学部 社会環境工学科 教授 工博

※※※) 岩手大学工学部 社会環境工学科 助教授 工博

※※※※) 岩手大学大学院工学研究科 社会環境工学専攻

※※※※※) 正会員 岩手大学工学部 社会環境工学科 准教授 理博

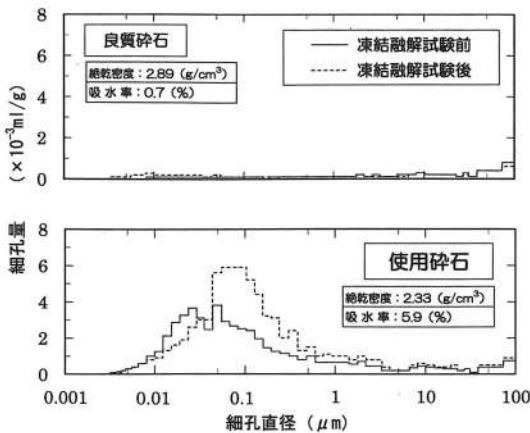


図1 細孔径分布

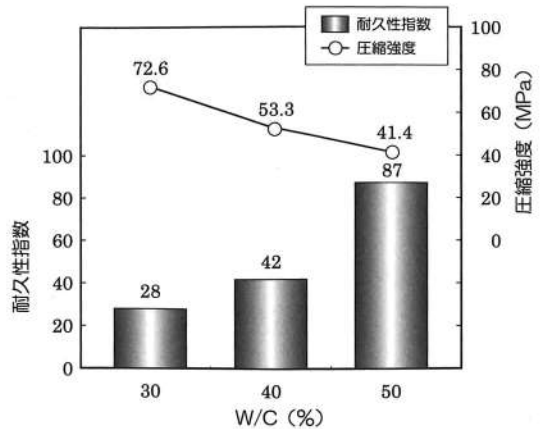


図2 耐久性指数および圧縮強度

表1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)					単位量(ml/m³)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水 剤	AE 剤
30	5.5~6.0	39	170	567	660	892	4.5	1.6
40		41	170	425	749	926	4.2	1.2
50		43	170	340	818	931	0.9	1.7

径分布も、図に示している（袴田ら¹⁾）。ここで着目する碎石の場合、凍結融解作用によって、細孔径分布は粗大側にシフトしており、凍結融解作用の影響を受けやすい碎石であるといえる。

コンクリートの凍結融解試験では、細骨材に絶乾密度 2.81g/cm³、吸水率1.8%の砕砂を、セメントには、普通ポルトランドセメント、混和剤にはAE減水剤（AEWR）およびAE剤（AE）を使用した。

これらの材料を用いたコンクリートの凍結融解試験で設定した配合を表1に示す。粗骨材の品質が劣るため、水セメント比は小さめに、空気量は大きめに設定している。コンクリートの凍結融解試験は、JIS A 1148の気中凍結・水中融解試験方法（B法）で行った。試験開始材齢は、14日である。

図2は、凍結融解試験で得られた耐久性指数とともに、材齢28日での圧縮強度も示している。

水セメント比が大きいほど、圧縮強度は小さくなっており、いわば常識的な結果となっているのに対して、耐久性指数に関しては、まったく逆の傾向を示し、水セメ

ント比が大きいほど耐久性指数が大きく、しかも水セメント比50%では、90に近い耐久性指数となって、耐凍害性を確保できている。この結果は、骨材が低品質であるための弱点を補おうとして水セメント比を小さくしても、逆効果になりかねず、耐凍害性確保の点からは、適切な水セメント比が存在することを示している。この現象を力学的観点から合理的に解釈できれば、他の低品質骨材にも敷衍でき、有効利用のひとつの方法になり得ると期待される。ここでは、当該骨材について得られた結果の力学的解釈を試みる。

3. 実験概要

3.1 解析モデル

対象とする碎石は紛れもなく低品質であり、コンクリート中において凍結融解作用により、それ自体が劣化したり、周囲のモルタルを損傷させたりする可能性がある。この碎石の挙動や作用をコンクリート中で直接的に抽出するのは難しく、ここではコンクリートを粗骨材とモルタルとからなる複合材料と考え、これをモデル化した供

試体を解析の対象とした。モデル化にあたっては、コンクリートの状況をできるだけ忠実に再現するよう配慮する必要がある。たとえば、粗骨材とモルタルとの容積割合や粗骨材の最大寸法などであり、これらに供試体作製および力学的解析の容易さなどを加味して、実験的な解析モデルを設定した。

具体的には、碎石の母岩から採取した $\phi 30 \times 60$ mmのコアを粗骨材に見立て、これをモルタルで包んだ $\phi 50 \times 100$ mmの円柱状供試体である。コアは供試体の中心に位置させる。コンクリートの試験で用いた碎石の最大寸法は25mmであり、コアの直径はこれよりやや大きい。コンクリートの場合、断面積に占める粗骨材の割合はモルタルの65%程度であるのに対し、解析モデルでは56%となっており、これよりやや小さい。このように、碎石とコアとの形状の違いも含め、解析モデルにはコンクリートの状況と異なる面があるが、厳密に再現するのは困難であり、ここでの解析モデルでも、大略的には力学的検討に耐え得ると考えることにした。

碎石の吸水率は5.9%であり、これから $\pm 1.5\%$ の吸水率を有するコアを選定して用いた。モルタル用の材料としてのセメント、細骨材および混和剤は、コンクリートの試験で用いたものと変わらない。モルタルの配合は、表1のコンクリートの配合から粗骨材を除いたものとした。コンクリートの場合、空気量は5.5～6.0%としたが、モルタルでは粗骨材を除いているため、これに該当する空気量は、8.6～9.4%となる。水セメント比は、コンクリートと同様に3水準とした。モルタルの試験開始材齢は14日であり、それまで標準養生を行った。

3.2 ひずみおよび温度の測定

解析モデルに凍結融解の作用を与え、ひずみの変化を測定する。測定には、電気抵抗線ひずみゲージを用いた。供試体は、複合体としての解析モデルのほか、コア単体およびモルタル単体（ $\phi 50 \times 100$ mm）である。図3は、コア単体および複合モデルのゲージ貼付位置を示している。モルタル単体については、コア単体と同様に、高さの中心位置に、ゲージを円周方向に貼付した。ゲージ長は、30mmである。

コンクリートの凍結融解試験では、粗骨材を表乾状態で用いており、コアもこの状態にして試験に供する。ゲージ裏面からの吸湿の影響を避けるため、ポリエステル

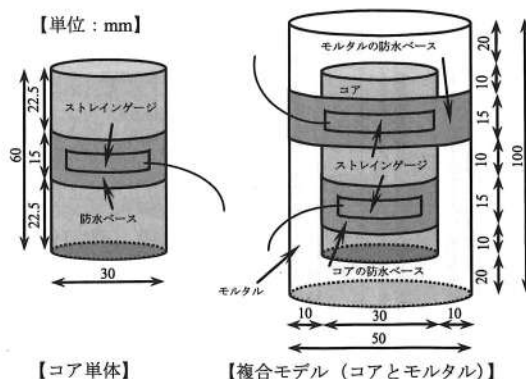


図3 コア単体および複合モデルのゲージ貼付位置

系の接着剤で防水ベースを設け、その上にゲージを貼付した。表面からの吸湿に対しては、ゴム系感圧型のコーティングテープで覆って防水処理した。この後、コアを水に浸して飽水状態とし、表面水を拭って表乾状態とした。これを、モルタル中に埋設する。コア単体の場合は、ホットメルト型のコーティング剤で全体を被覆し、さらにゴム系感圧型のコーティングテープを巻いて、封緘状態とした。

コアを埋設したモルタルおよびモルタル単体の場合、14日間の養生を終えた後、表面水を拭いて、ゲージ貼付位置を除いた部分に、コア単体と同様の被覆を施す。ゲージの貼付もコア単体と同じようにし、貼付後は、この部分も被覆して全体を封緘状態とする。コア単体およびモルタル単体のゲージ貼付位置は、高さの中央であるが、複合モデルでは、図に示すように、コアとモルタルとでゲージの位置をずらすようにした。コアのゲージのコーティングが、モルタルのひずみに影響を及ぼす恐れがあり、それを避けるための配慮である。

凍結融解に伴う温度変化は、ひずみ測定用と同一寸法で、同じように被覆した供試体を用い、熱電対によって測定した。この設置位置は、ひずみ測定用供試体と同じ温度履歴を受けるように、これに隣接した場所とした。コア単体およびモルタル単体の場合は、中心部および表面部、複合モデルでは、コアの中心部と表面部およびモルタル表面部で測定し、それぞれ平均して、供試体の温度とした。温度が変化すれば、ひずみゲージには、熱出力（温度による見かけひずみ）が発生し、ひずみの指示

【単位: mm】

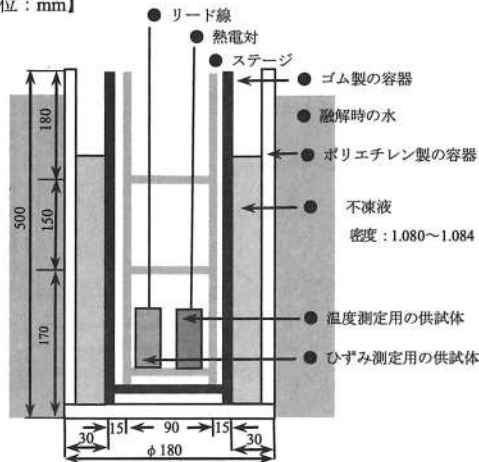


図4 凍結融解試験で供試体を設置した容器

値に加わる。熱出力は用いるゲージに固有であり、メーカーによる補正の式に従って熱出力を求め、指示値からこれを差し引いて、供試体のひずみとした。

3.3 凍結融解作用

凍結融解の繰返し作用は、気中で与えた。装置は、JIS A 1148（コンクリートの凍結融解試験方法）の気中凍結・水中融解方法（B法）で用いられるものである。図4に示すように、不凍液を充填したポリエチレン製の容器の中にA法で用いる120×120×500mmのゴム製容器を設置し、この中のステージに供試体を置いた。ゴム製容器は常に空であり、供試体は気中で凍結融解の繰返し作用を受けることになる。両容器の間に不凍液を介在させたのは、熱を供試体に伝わりにくくし、温度の変化に対して、ひずみを追従させやすくしようとの意図による。

図5は、温度変化の一例であり、+12℃～-23℃程度の範囲で凍結融解を繰返し、1サイクルに要する時間は9時間程度となっている。槽内の温度変化がきわめて急激であるのに対し、供試体の温度変化は緩慢であり、意図したとおりの雰囲気となっている。

4. 実験結果

実験に供した供試体の数は、コア単体で9、モルタル単体では各水セメント比で3、複合モデルでは各水セメント比で4である。前述のように、コアとしては、 $5.9 \pm$

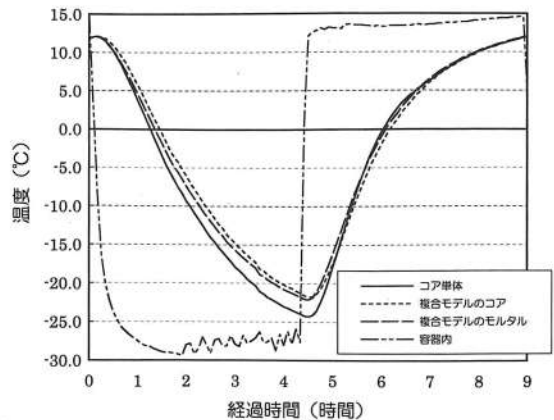


図5 温度変化の一例

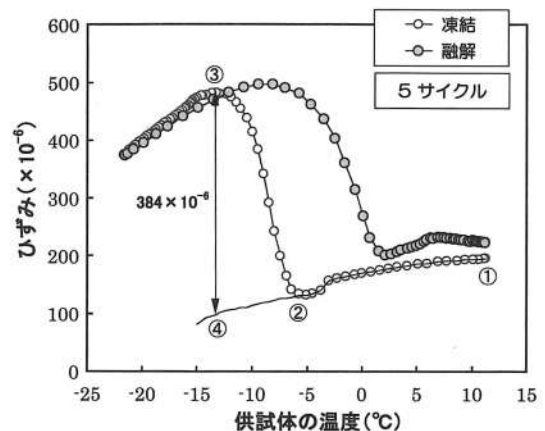


図6 コア単体のひずみの変化

1.5%の吸水率を有するものに限定した。このコア単体としての凍結融解に伴うひずみの変化は、ほぼ同様の傾向を示したが、ひずみの絶対値に関しては、個体間に幾分の違いが見られた。後述のように、本解析では、凍結時の最大の膨張ひずみに着目する。コア単体のその最大ひずみは、 $303 \sim 514 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、平均値は 387×10^{-6} であった。ここでは、この平均値に最も近い膨張ひずみを示したコアに着目して、コア単体の解析を行う。モルタル単体および複合モデルについても、同様の考えで代表となる供試体を選定した。

図6は、凍結融解5サイクル目における代表的なコア

単体の温度変化に伴うひずみの変化を示している。すでに4サイクルの凍結融解作用を受けており、凍結行程に入る前のひずみには、残留膨張がみられる。このサイクルでの凍結開始点①から、コアは温度の低下によって収縮する。-3℃付近を過ぎたあたりで収縮がやや著しくなっているのは、内部で氷が形成され、未凍結水がそれに引き寄せられる浸透圧により、部分的に乾燥状態になる空隙が生じたためと推察される。-6℃程度になった②から、供試体は収縮から膨張に転じる。その後、③の-14℃あたりまで膨張し続け、ここを過ぎると、再び収縮する。膨張をもたらすのは、コア内部の空隙に含まれる水の凍結であり、コアは低品質で空隙を多く保有するため、凍結に伴う膨張が著しく、この膨張が、コア自体を劣化させたり、複合体中では周囲のモルタルを損傷させたりする可能性がある。これを力学的に検討するためには、最大の膨張ひずみに着目する必要がある。凍結行程において、水の凍結による膨張が生じないと仮想すれば、-14℃付近でコアは④まで収縮するはずである。④と③のひずみの差を、ここでは最大の膨張ひずみとすることにした。

融解行程に移れば、コアは温度の上昇に伴って膨張し、やがて氷が解け始めると収縮に転じて、0℃近辺から、再び膨張する。凍結行程開始時の温度に戻っても、ひずみは元の値にはならず、その差が、このサイクルにおける残留膨張となる。この残留膨張や融解時のひずみの変

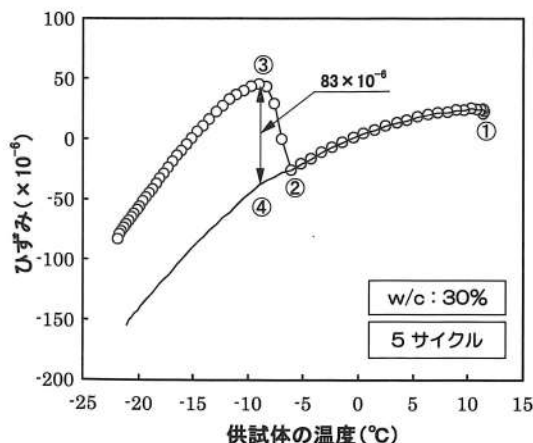


図7 複合体中のコアのひずみの変化

化も、耐凍害性に大きく関わると考えられるが、ここでは凍結時のひずみがより重要であると考え、以下では凍結時のみに着目する。

図7は、凍結融解5サイクル目の凍結時における複合体中のコアのひずみを示しており、モルタルの水セメント比が30%の場合である。モルタル中においても、コアは凍結に伴って膨張する。前図と同様の方法で求めた最大の膨張ひずみは、コア単独に比べ、きわめて小さく、その差の分だけモルタルによって拘束されたことになる。

凍結融解5サイクル目の凍結時におけるモルタル単体および複合体のモルタルのひずみを示したのが、図8であり、ここでも水セメント比30%の場合を掲げた。モルタル単体では、凍結行程で収縮するばかりであり、膨張の兆候は見当たらない。水セメント比が小さく、しかも空気量を9%程度としており、内部で水分が凍結しても、膨張を生じないようなモルタルであったといえる。凍結開始時でのひずみもほぼ0であり、先行する4サイクルの凍結融解繰り返しでも、残留膨張がほとんど生じなかったことになる。

一方、複合体のモルタルの場合、モルタル単独に比べて、温度低下に伴う収縮ひずみが小さく、しかも-7℃あたりからは、僅かながら膨張している。温度低下に伴う収縮が小さいのは、より線膨張係数の小さなコアが埋設されているためであると考えられ、また膨張は、明らかに埋設されているコアの膨張による。複合体のモルタ

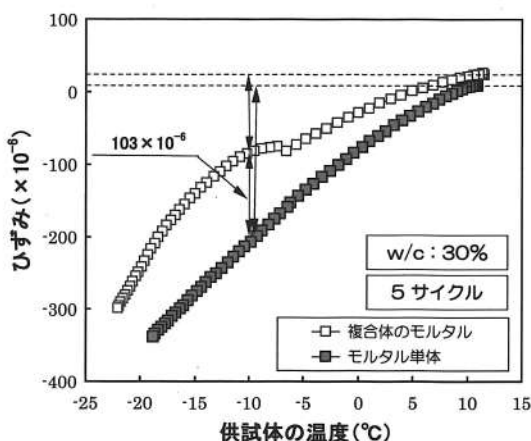


図8 モルタル単体および複合体のモルタルのひずみの変化

ルは、モルタル単独のように収縮しようとするが、内部にコアが存在するため、その収縮すべてを実現できない。その差の分だけ、モルタルはコアによって収縮を拘束される。拘束される最大のひずみを、図中に示しておいた。

5. 応力解析

5.1 圧力の算出

複合体を構成するコアおよびモルタルとも、両者の凍結に伴う体積変化の違いにより、圧力を受けている状態にある。前掲した水セメント比30%で、凍結融解5サイクルにおける凍結時を例として、発生する最大の圧力を求める。圧力の導出には、図9に示すような内外圧を受ける厚肉円筒モデルを用いる（邊ら⁴⁾）。前述のように、設定した実験モデルには、実際のコンクリートの状況と異なる面があるが、実験モデルそのものは、厚肉の円筒モルタルにコアが包まれており、厚肉円筒モデルを援用して、力学的解析を行なえると考えた。

内圧 p_1 (N/mm²) と外圧 p_2 (N/mm²) によって、次に示すような半径方向の応力 σ_r (N/mm²) および接線方向の応力 σ_t (N/mm²) が発生する。

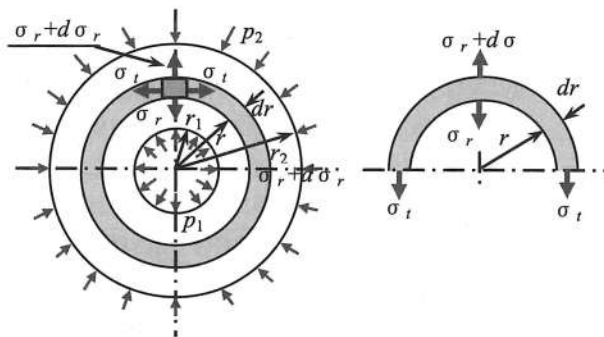


図9 厚肉円筒モデル

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} \quad (2)$$

ここに、 r_1 ：円筒の内半径 (mm)、 r_2 ：円筒の外半径 (mm)。

実験で測定したのは、円周方向のひずみ ε_t ($\times 10^{-6}$) である。このひずみは、応力と次のような関係にある。

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r) \quad (3)$$

ここに、 E ：ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm²)、 ν ：ポアソン比。

圧力が作用して、ひずみは生じる。測定したひずみから、以上の式を用いて、圧力を逆算する。計算に必要なのは、ひずみの測定値のほかに、ヤング係数およびポアソン比であり、コア単体とモルタル単体について、これらの実験値を表2に示す。表には、圧縮強度および割裂引張強度も掲げている。モルタルについては、材齢14日の値であり、凍結融解の開始材齢に相当する。これらの値は、凍結融解の過程で変化すると思われるが、ここではこの変化を考慮しない。

はじめに、コア単体に作用する圧力を求める。前掲の図6のように、コア単体は、凍結時に膨張を示す。この膨張は、内部の空隙に存在する水の凍結によるものであり、コアは

表2 コア単体およびモルタル単体の物理的品質

種類	W/C (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	ポアソン比
コア単体	—	52.3	4.5	1.60	0.25
モルタル単体	30	59.7	4.7	2.64	0.25
	40	54.7	3.7	2.46	0.21
	50	33.0	3.2	2.34	0.30

この内圧を受けて膨張することになる。空隙は散在しており、圧力は内部の至るところで発生するが、解析の便宜上、図10のように、すべての空隙を中心部に集め、それを実質部分が取り囲むとするモデルを想定する。コアの吸水率をもとに、集められた空隙の寸法（半径）を算出すると、図に示すようになった。この想定により、コア単体に対し、厚肉円筒モデルを援用できる。作用する圧力は、内圧のみであり、外圧は働かない。

式（1）より、コア表面（ $r=r_2$ ）での半径方向の応力 σ_r は、 $p_2=0$ を代入して、以下のようになる。

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} = 0$$

同じくコア表面での接線方向の応力 σ_t は、

$$\sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} = \frac{2 p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

これらの応力を式（3）に代入すれば、接線すなわち円周方向のひずみ ε_t は次のようになる。

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \sigma_r) = \frac{1}{E} (\sigma_t) = \frac{1}{E} \left(\frac{2 p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

この式より、内圧 p_1 は、

$$p_1 = \frac{E \varepsilon_t (r_2^2 - r_1^2)}{2 r_1^2}$$

図6で求めた最大の膨張ひずみをこの式に代入すれば、このひずみをもたらす最大の圧力（内圧）が、次のように算出される。

$$p_1 = \frac{1.60 \times 10^4 \times 384 \times 10^{-6} \times (15^2 - 8.2^2)}{2 \times 8.2^2} \\ = 7.2 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

次に、複合体中のコアに作用する圧力を求める。コア単体であれば、図6のように膨張するが、複合体中でのコアは、図7のように、モルタルに拘束されて、その膨張のかなりの部分を実現できない。そのため、コアは外圧を受けている状態にある。この外圧 p_2 を求める。算出に用いるのは、コア単体と複合体中のコアの最大膨張ひずみであり、それぞれ発現する温度は異なるが、ここ

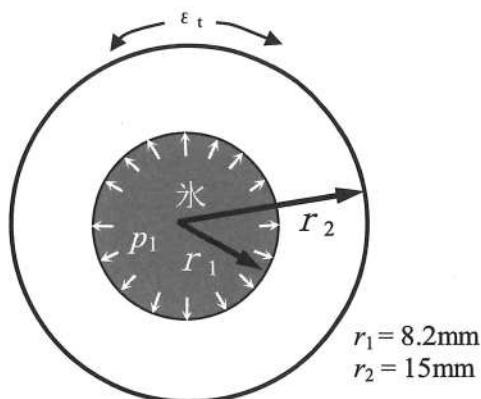


図10 コア単体のモデル

ではこれを無視する。

モルタルによる外圧のみを考慮するので、 $r_1=0$ 、 $p_1=0$ であり、これを式（1）および式（2）に代入すれば、

$$\sigma_r = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} = -p_2 \\ \sigma_t = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{r_1^2 r_2^2 (p_1 - p_2)}{(r_2^2 - r_1^2) r^2} = -p_2$$

これらの応力を、式（3）に代入する。

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [-p_2 - \nu(-p_2)] = \frac{-p_2}{E} (1 - \nu)$$

これより、 p_2 は、

$$p_2 = \frac{-\varepsilon_t E}{1 - \nu}$$

円周方向のひずみ ε_t には、複合体中のコアの最大膨張ひずみとコア単体の最大膨張ひずみの差を与える。

p_2 は、つぎのように算出される。

$$p_2 = \frac{-(-301 \times 10^{-6}) \times 1.60 \times 10^4}{(1 - 0.25)} \\ = 6.4 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

続いて、複合体のモルタルに作用する圧力を求める。前掲の図8のように、モルタル単体に比べて、複合体のモルタルの凍結に伴う収縮は小さい。内部に線膨張係数

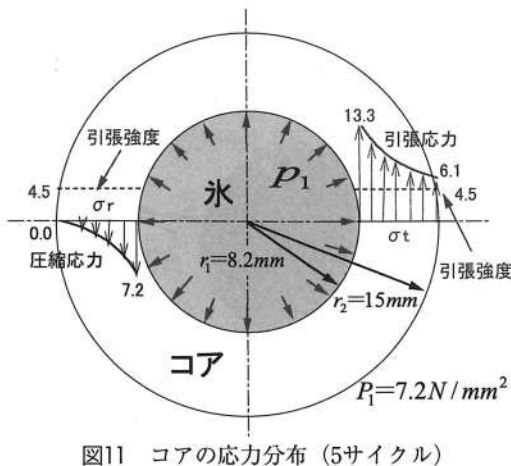


図11 コアの応力分布 (5サイクル)

が小さく、しかも凍結によって膨張するコアが存在するためである。モルタルにとっては、収縮を拘束され、その分、コアによって膨張させられていることになる。膨張させられているモルタルは、収縮しようとする。この収縮しようとする力を、複合体のモルタルに働く外力 p_2 と考える。

この外力 p_2 は、複合体のコアが受ける外力を求める場合と同じようにして求まる。ひずみ ε_i には、モルタル単体と複合体のモルタルのひずみの差を用いる。外力 p_2 は、次のように算出される。

$$p_2 = \frac{-(-103 \times 10^{-6}) \times 2.64 \times 10^4}{(1 - 0.25)}$$

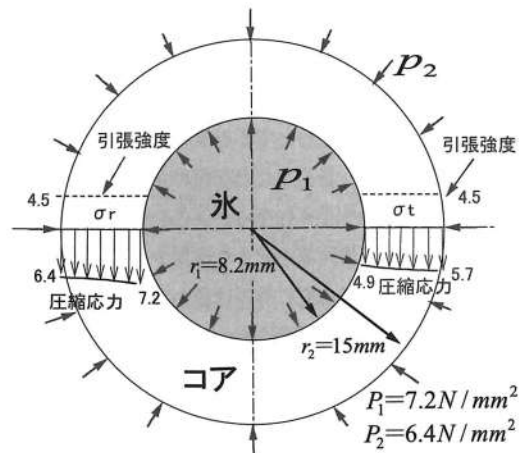
$$= 3.6 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

複合体のモルタルは、コアの膨張によって内圧 p_1 を受けるが、これは力の釣合いから、コアに作用する外力 p_2 に等しい。

5.2 応力の算出

厚肉円筒モデルを想定し、水セメント比30%で、凍結融解5サイクルにおける凍結時を例として、モデルに作用する内圧および外圧を算出した。これらの圧力によって発生する応力は、式(1)および(2)を用いて求めることができる。

コア単体の場合、図10のようにモデル化すれば、内圧 p_1 によって、想定した実質部分には、図11に示すような応力が発生することになる。半径方向では、内面($r=r_1$)

図12 複合体中のコアの応力分布
(W/C=30%, 5サイクル)

から外面($r=r_2$)にかけて、圧縮応力が分布しているのに対し、接線方向では、引張応力となっており、その値は内面で大きく、外面に向かって次第に小さくなる。前掲の表2に示した引張強度と比較すれば、接線方向に発生する引張応力は、これを上回ってしまい、コアは内部に存在する水の凍結によって、引張破壊することになる。コアはコーティングされており、目視によっては状態を確認できなかったが、もし破壊しているとなれば、ひずみゲージも破損し、ひずみの測定は不可能となるはずである。しかし、ひずみは測定できており、コアが引張破壊しているとは考えにくい。

厚肉円筒モデルを用いて解析するため、コアのモデル化では、コアの中の水を中心部に集めて一塊としており、水が分散して存在している実際のコアとは、状況が大きくかけ離れている。水が分散していれば、局部的な破壊は生じるとしても、全体的な破壊までには容易に至らない可能性が強い。このようにモデルの設定に問題があり、算出した内力および応力は、絶対的検討に耐え得ない面を有するが、たとえば接線方向に引張応力が発生するといった点は、現象的に的確に捉えられていると判断し、解析を進めることにした。

複合体中のコアについても、コア単独と同じようにモデル化すれば、実質部分は水の凍結による内圧と、モルタルの拘束による外圧を受けることになる。これらの圧力によって発生する応力は、図12のように算出された。

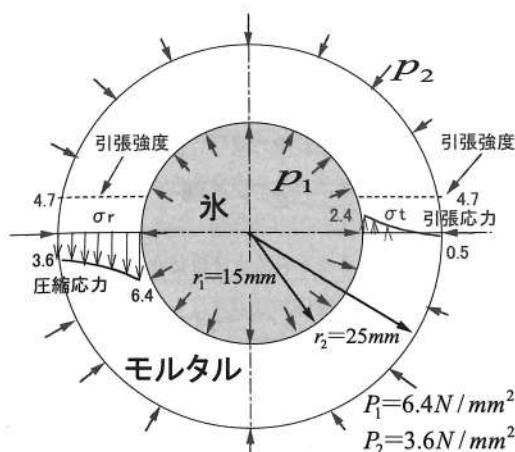


図13 複合体中のモルタルの応力分布
(W/C=30%, 5サイクル)

応力は、内面から外面にかけ、半径方向および接線方向とも圧縮であり、引張は生じない。発生する応力は、コアの圧縮強度に比べてきわめて小さく、コアが破壊することはない。コア単体では、計算上破壊をもたらすような引張応力が発生するが、モルタル中では膨張を拘束する外力が作用し、破壊を免れることになる。

複合体のモルタルについては、コアの膨張を拘束する反作用としての内圧およびコアによって拘束された収縮を実現しようとする外圧によって、応力が発生する。算出された応力を図13に示す。

半径方向では、内面から外面にかけ、圧縮となっている。一方、接線方向では、内面側で引張となり、外面側では圧縮となる。問題となるのは、内面側の引張応力であり、計算上の値は、モルタルの引張強度を超えていないが、サイクルが進めば、モルタルの破壊をもたらす引張応力になる恐れがある。

以上、水セメント比30%の場合を対象に、凍結融解5サイクル目の凍結時に発生する圧力と応力の算出方法と結果について述べてきた。同じサイクルで、水セメント比50%の場合の複合体のコアおよびモルタルに発生する応力を示したのが、図14および図15である。

水セメント比30%の場合とは、応力状態が幾つかの点で異なっている。ひとつは、コアの内面側に接線方向の引張応力が発生している点であり、計算上の応力は、引張強度を上回っていないものの、サイクルの進行に伴い、

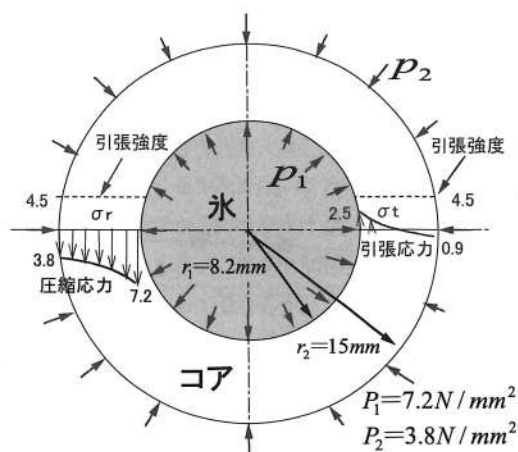


図14 複合体中のコアの応力分布
(W/C=50%, 5サイクル)

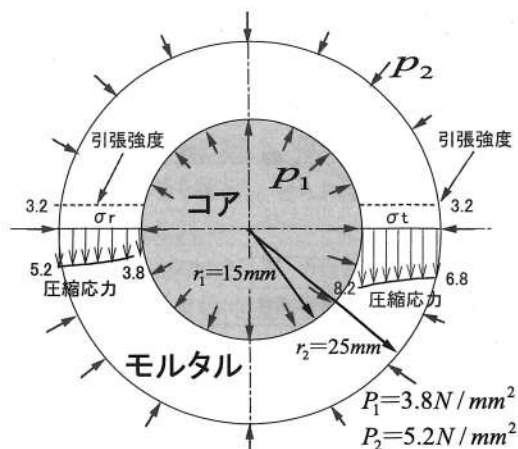


図15 複合体中のモルタルの応力分布
(W/C=50%, 5サイクル)

引張応力が大きくなれば、破壊の危険性が出てくる。さらに注目すべきは、モルタルの応力分布であり、半径方向のみならず、接線方向も圧縮となっている。したがって、この段階で、モルタルが引張破壊する懸念はない。

5.3 凍結融解サイクルの進行に伴う応力の変化

ひずみの測定は、凍結融解50サイクルまで行い、この測定値から、前述のようにして凍結時に発生する最大の圧力およびその圧力によってもたらされる応力を算出した。図16は、凍結時にコア単体の接線方向に発生する応力の凍結融解の進行に伴う変化を示している。

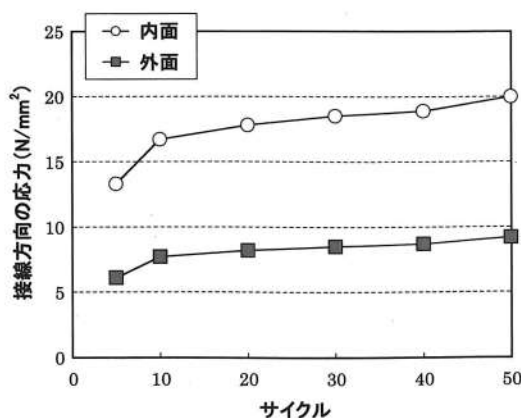


図16 コア単体の接線方向に発生する応力の変化

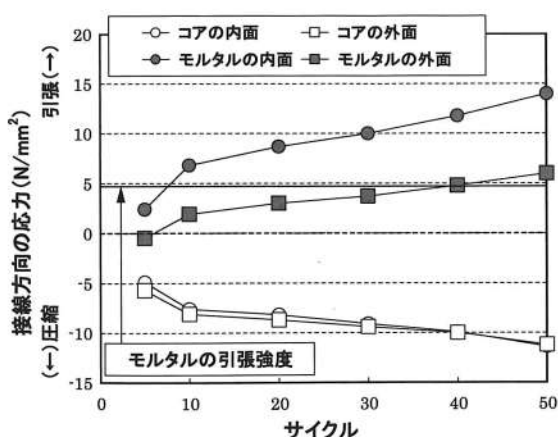


図17 複合体のコアおよびモルタルに発生する接線方向の応力の変化 (W/C = 30%)

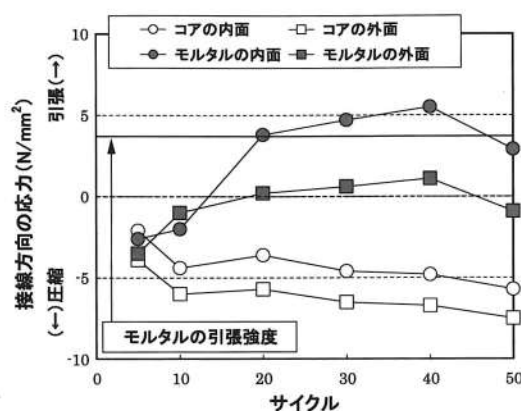


図18 複合体のコアおよびモルタルに発生する接線方向の応力の変化 (W/C = 40%)

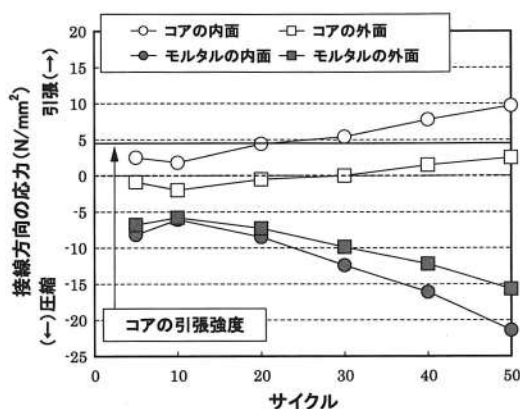


図19 複合体のコアおよびモルタルに発生する接線方向の応力の変化 (W/C = 50%)

計算上は、5サイクルで既にコアの引張強度を超える引張応力が発生することになり、その後、応力は漸増している。それでも、50サイクルまで、ひずみの測定が可能であったことから、コアは破壊しているとは思われず、実際に比べ、計算値は過大であるといえる。

水セメント比30%の場合の複合体のコアおよびモルタルに発生する接線方向の応力の変化を図17に示す。コアに発生するのは、圧縮応力であり、サイクルの進行とともに増大するが、圧縮強度に比べればきわめて小さいままであり、圧縮破壊することはないと思われる。

これに対し、モルタルでは、5サイクルまでに内面側が引張となり、その引張応力は10サイクルまでに引張強

度を超え、その後も増大している。5サイクルで圧縮であった外面側も10サイクルまでに引張に転じ、50サイクルまでに引張強度を超える。計算上は、モルタルが引張破壊することになるが、コア単独の場合で考察したように、ひずみの測定が50サイクルまで可能であったことから、実際は破壊が生じていないと思われる。ただし、接線方向に引張応力が発生し、サイクルの進行とともに増大するのは疑いなく、いずれは引張破壊に至る可能性がある。コンクリートの凍結融解試験でも、このモデルに該当する水セメント比30%のコンクリートの場合、試験終了時には幅の広いひび割れが多数観察された。ここでの解析結果からすれば、骨材の膨張による圧力がモルタ

ルに引張応力を発生させ、コンクリートにひび割れをもたらしことになる。

水セメント比30%のコンクリートの場合、凍結融解作用によって骨材にもひび割れが発生し、中には崩壊ともいえる状況を呈した骨材もみられた。ところが、ここでの解析結果によれば、複合体中のコアには圧縮応力のみが作用し、それが破壊をもたらすような値になるとは考えにくい。ただし、これは周囲のモルタルが健全で、コアの膨張を抑制できている場合であり、モルタルが破壊すれば拘束効果が損なわれ、コアにとっては、自由に膨張できる状態に近づく。もし、まったく自由に膨張できれば、図16のコア単体と同様の状態となり、複合体中のコア内部にも接線方向の引張応力が発生すると考えられる。この引張応力が引張強度を超えれば、ひび割れが発生したり、崩壊状態になったりすることになり、実際にも、コンクリートの凍結融解試験で、この現象が生じたものと推察される。

水セメント比40%については、図18に示す計算結果が得られた。傾向としては、水セメント比30%と同様であり、コアには圧縮応力が、モルタルにはあるサイクルを過ぎると引張応力が作用し、モルタル内面の引張応力は、20サイクルまでに引張強度を超える。この水セメント比40%のコンクリートも、凍結融解試験において、著しい劣化を示した。この劣化の原因は、水セメント比30%の場合と同じ因果関係で説明できる。

図19は、水セメント比50%の場合を示している。5サイクルの段階で、コア内面には、引張応力が発生しており、この引張応力は、サイクルの進行とともに増大して、計算上は30サイクルまでに、引張強度を超える。外面も、サイクルが進行すれば、圧縮から引張に移行する。コンクリートの凍結融解試験では、水セメント比50%の場合、基本的に、耐凍害性を確保できたが、試験終了後の断面観察では、ひび割れが発生している骨材も見受けられた。このひび割れは、ここでの解析で見られた引張応力によると考えられる。

モルタルに発生するのは、圧縮応力であり、サイクルの進行に伴い、この圧縮応力は、かなりの値になるが、圧縮強度を超えるほどではない。この計算結果からすれば、モルタルに引張応力によるひび割れが入ることはなく、事実、コンクリートの凍結融解試験でも、目だった

ひび割れが観察されていない。

水セメント比50%の場合、モルタルの弾性係数が小さく、コアの膨張を拘束する能力が相対的に小さい。コアの膨張をある程度許すため、コアには引張応力が発生すると考えられる。モルタルは、コアの膨張を抑制する反作用として、コアから内圧を受ける。抑制の程度が小さければ、内圧も小さい。モルタル内部の応力は、外圧と内圧の大きさによって異なるが、水セメント比50%の場合、内圧が外圧に比べて相対的に小さくなって、内部は引張状態にならないと推察される。そのため、コンクリートの凍結融解試験でも、モルタルは健全な状態を保ち、結果的に耐凍害性を確保したと解釈できる。

6. おわりに

低品質骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験で、水セメント比の大きいほど耐凍害性に優れるという一見不可解な現象がみられた。本研究では、この現象の原因を究明するため、コンクリートを低品質粗骨材とモルタルとからなる複合体とみなし、厚肉円筒モデルを用いて、凍結時の応力解析を試みた。得られた結果を要約すれば、以下ようになる。

1) 解析にあたっては、多くの仮定を設けた。たとえば、粗骨材中の空隙を中心部に集めたり、モルタルについては、凍結融解中に力学的性質が変わらないとしたりしている。複合体では、凍結融解時に粗骨材とモルタル間で水分移動が生じ、それぞれのひずみの変化に影響を与える可能性がある。ところが、解析では、モルタルに包まれた粗骨材のひずみの挙動は、粗骨材単独で測定した場合と同じであるとし、水分移動の影響を考慮していない。粗骨材およびモルタルとも、解析を通して、弾性体とみなした。これらの仮定は、場合により解析値に大きく影響する恐れがある。実際にも、算出された応力の値には、現実とかけ離れた面があって、必ずしも定量的検討に耐え得るとは言いがたい。しかしながら、特異な現象の原因を明らかにするうえで必要な力学的傾向は把握できたと思われる。

2) 解析によれば、骨材が低品質の場合、それ自体が凍結によって膨張しようとするが、その膨張をできるだけ拘束しないようなモルタルとすれば、モルタルに引張応力が発生せず、耐凍害性を確保できると解釈できる。

3) 具体的には、骨材の品質に見合った配合を設定することであり、本例では、水セメント比を大きくした場合に、モルタルの弾性係数が小さくなって、骨材の膨張を拘束する程度が弱まり、結果的に耐凍害性を確保したことになる。

4) 低品質骨材を用いたコンクリートの凍結融解試験では、ここで対象とした碎石以外にも、水セメント比と対応しない耐凍害性を示す例が見られた。これらは、紛れもない実験的事実であり、本研究では、この原因を力学的な観点から説明できる可能性を示したといえる。

謝 辞

本研究の遂行に際しては、岩手県生コンクリート工業組合・ワーキンググループのメンバーの方々のご協力を頂いた。また、本論文をとりまとめるにあたり、査読の過程で匿名の査読者から有益なご指摘・ご助言を頂いた。以上の方々に、深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 袴田豊・藤原忠司・増田健・村井松雄 (2006) : 凍結融解繰返し作用に対する低品質骨材自体の抵抗性、セメント・コンクリート論文集、Vol.60、pp.382-389.
- 2) 袴田豊・藤原忠司・小山田哲也・藤原裕介 (2007) : 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に及ぼす配合の影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、pp.1143-1148.
- 3) 阿波稔・庄谷征美・月永洋一・杉田修一 (2000) : 低品質骨材を用いたコンクリートの耐凍害性、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.1、pp.85-90.
- 4) 邊吾一・藤井透・川田宏之[編] (2005) : 標準材料の力学、日刊工業新聞社、p.p.211-217.

Stress Analysis related to Frost-Resistance of Concrete Using Low Quality Aggregate

Yutaka HAKAMADA, Tadashi FUJIWARA, Tetsuya OYAMADA,
Yuya ODASHIMA, Shin KOSHIYA