

論文

[1137] 大型供試体によるアルカリ骨材反応の劣化特性

正会員 ○立屋敷久志 (三菱鉱業セメント中研)

正会員 窪山 潔 (三菱鉱業セメント中研)

正会員 高田 潤 (鉄道総合技術研究所)

中村 亨 (鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

現在、日本においてもアルカリ骨材反応（以後AARと記す）の研究が、数多く行われるようになって、骨材の反応性、反応に及ぼす要因、AARによるコンクリート劣化特性などに関し多数の知見が得られている^{1) 2) 3)}。しかし、AARに関する研究では、モルタルや小型供試体で行われる例が多く、得られた知見が実構造物の劣化特性に対応しない場合も多い。

そこで、本報告では、実構造物を模擬した無筋及び鉄筋構造の大型供試体を作製し、鉄筋による拘束の有無によって、①ひずみ特性の違い、②コンクリート表面と内部のひずみ特性の違い、③ひびわれ特性、④物理的性状の違いについて検討する。

また、本試験で得られた知見を実構造物の劣化状況に対応させ比較検討する。さらには、今後の実構造物劣化調査に対して、いくつかの指標を提案することを目的とする。

尚、試験は反応性骨材として火山岩系と堆積岩系のそれぞれについて実施しているが、本報告では、反応の速い火山岩系に限って検討した。

2. 試験概要

2.1 大型供試体の作製と種類

寸法80×50×100cmの無筋及び鉄筋構造の大型供試体を作製した。鋼材（SD30）は主鉄筋にD25を8本、せん断補強筋にD10を使用し、かぶり7cmで行った。図1に、鉄筋構造の配筋を示す。保存方法はコンクリート成型後1週間で脱型し、その後24ヶ月間屋外で暴露した。

2.2 使用骨材

反応性粗骨材には瀬戸内産古銅輝石安山岩
(Sc=613mmol/l, Rc=262mmol/l, 潜在的有害)

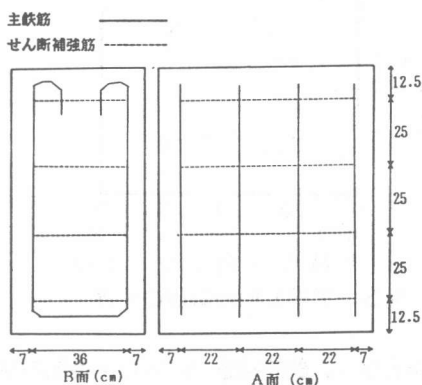


図1 配筋図

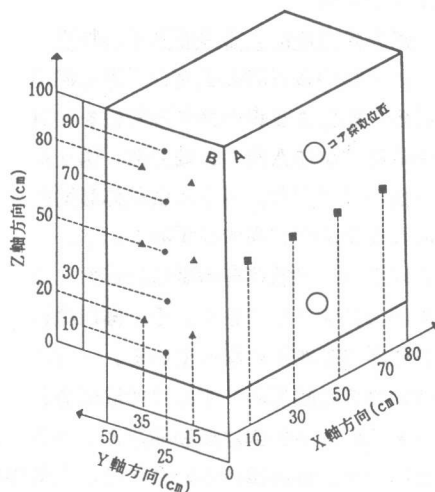


図2 表面測定位置とコア採取位置

を使用した。非反応性の粗骨材 ($Sc=56\text{mmol/l}$, $Rc=76\text{mmol/l}$, 無害) と非反応性細骨材 ($Sc=52\text{mmol/l}$, $Rc=92\text{mmol/l}$, 無害) には八王子産硬質砂岩を使用した。

2.3 コンクリートの配合

コンクリートの配合は、セメント量 350kg/m^3 、水セメント比 55% 、細骨材率 47% で行った。セメントは $Na_2O=0.27\%$ 、 $K_2O=0.31\%$ の普通ポルトランドセメントを使用した。アルカリ量の調整は特級試薬の $NaOH$ と KOH を練り混ぜ水に混入して Na_2O 換算でセメント重量に対して 3.0% になるように行った。反応性粗骨材混入率はベシマムを考慮して 60% とした。

2.4 測定方法

(1) ひずみの経時変化

脱型後1週間以内に供試体表面にコンタクトチップを取り付け、その時点を経時とし、以後4ヶ月に1回程度の間隔でコンクリート表面のひずみを測定した。この際、測定時の気温を用いて、温度による熱膨張の影響を除去した。図2に、コンクリート表面ひずみの測定位置を示す。

さらに、コンクリート内部には、温度補正ができる埋込型ひずみゲージを供試体中心部のZ軸方向に埋め込んで、経時的にコンクリート内部ひずみを測定した。

(2) 外観観察

構造形式の違いによるひびわれ発生状況を検討するために、ひびわれのスケッチを行った。さらに、コンタクトチップを取り付けたA、B面に 10cm 間隔で測定線を描き、この測定線と交わるひびわれ幅 0.1mm 以上のひびわれの本数を測定し、結果はひびわれ数を測定線総延長で除したひびわれ密度として評価した。ひびわれ密度の測定は、幅 $0.1\sim 0.2\text{mm}$ のひびわれが現われ始めた材令7ヶ月から開始して、劣化が急激に進行し最大ひびわれ幅 $0.4\sim 0.5\text{mm}$ になった9.5ヶ月、ひずみがほぼ終局に達した21ヶ月の3回行った。

(3) 静的破壊試験

材令21ヶ月経過した時点で、無筋及び鉄筋構造の両供試体表面から $\phi 10 \times 20\text{cm}$ のコアを図2に示す位置から採取し、圧縮強度及び静弾性係数の測定を行った。

3. 結果及び考察

3.1 鉄筋の有無による表面ひずみ特性

X、Y、Z軸の3方向の表面ひずみを測定し、鉄筋の有無による表面ひずみ特性を検討した。図3に供試体A面のX軸方向、図4に供試体B面のZ軸方向、図5に供試体B面のZ位置の異なるY軸方向のひずみを示す。

X軸方向では、無筋構造の場合に端部に比べて中央部のひずみが大きく、その傾向は材令の経過に伴って顕著になっている。一方、鉄筋構造の場合に端部のひずみは無筋構造と同程度であるが、中央部は無筋構造より小さい。

Z軸方向でも、無筋構造の場合には中央部のひずみが大きく、鉄筋構造では逆に中央部のひずみは小さい。そして、その傾向は、X軸方向以上に明確である。

Y軸方向の材令7ヶ月の時点では、X、Z軸方向と同様に鉄筋構造の中央部でのひずみが抑え

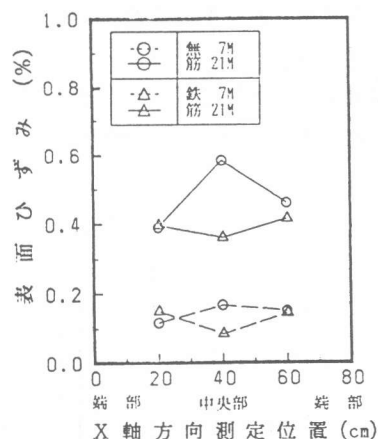


図3 X軸方向の表面ひずみ

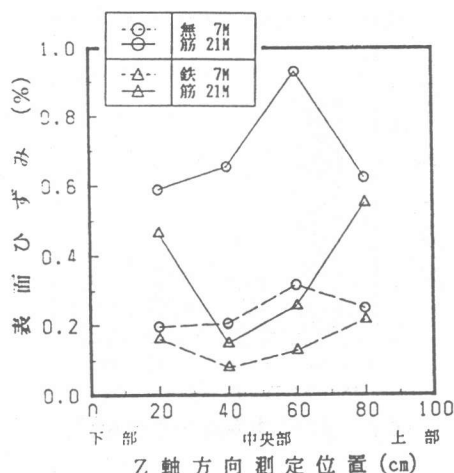


図4 Z軸方向の表面ひずみ

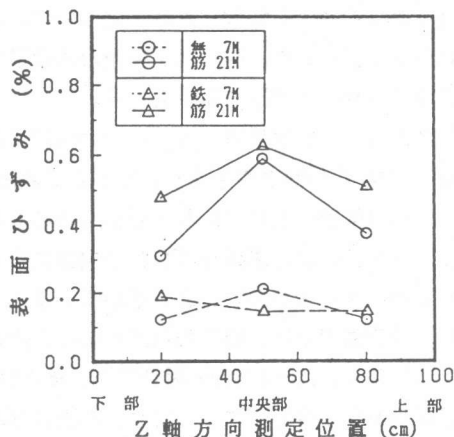


図5 Y軸方向表面ひずみ

られている結果であるが、それ以降は中央部のひずみが増大し、材令21ヶ月では無筋構造と同じように中央部のひずみが最大値を示している。これは、Z軸方向に配筋された主鉄筋が中央部を強固に拘束しているために発生した鉛直方向ひびわれによるものと考えられる。

これらのことから、無筋構造の場合、端部のひずみより面中央部のひずみが大きく、これは、端部と中央部の乾燥差の影響を受けた結果と考えられる。

一方、鉄筋構造の場合、ひびわれ発生に方向性があり、表面ひずみの測定位置によって、そのひずみに大きな違いが認められる。

したがって、実構造物の表面ひずみを測定する場合、調査目的に応じた測定位置と測定数を計画する必要がある。

3.2 鉄筋の有無による表面と内部のひずみ特性

3.1で表面ひずみの特性について検討したが、ここではコンクリート表面と内部のひずみの比較検討を行う。図6に、無筋及び鉄筋構造の表面ひずみ(平均値)と内部ひずみの関係を示す。

これによると、無筋構造の場合に0.5%程度のひずみの範囲では、コンクリート表面と内部のひずみは、ほぼ等しい値を示していることがわかる。

一方、鉄筋構造の場合には、表面ひずみと内部ひずみとは正の相関を有しているものの、内部ひずみは表面ひずみの50%以下にすぎない。

これは、無筋構造では、AARによる膨張ひびわれが内部にまで及ぶ可能性が高いことを示唆し、鉄筋構造では、膨張ひびわれがかぶり相当の表層部分に限られて、内部にはそれほど進行しないことを示唆している。

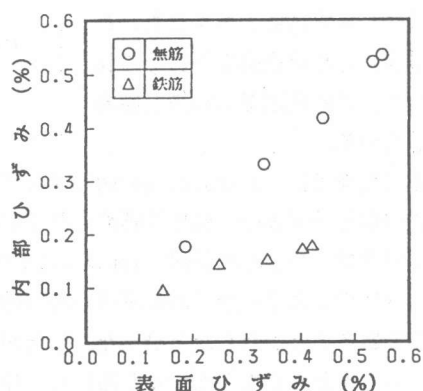


図6 表面ひずみと内部ひずみの関係

次に、このことを実構造物の調査結果と比較対応する。AARによって劣化したと判断された30余りの構造物から採取したコアについて、ひびわれ深さを測定した。図7に、構造形式の違いによるひびわれ深さの調査結果を示す。

これによると、無筋構造では、ひびわれ深さが150mm以上の発生件数が最も多く、なかには表面から1500mmの位置にもひびわれが認められるものがあり、AARによる膨張ひびわれが内部にまで進行しているケースが多いことを示している。

一方、鉄筋構造では、ひびわれ深さ50mm以内のものが最も多く、50～100mmの場合でも、そのほとんどがかぶり部分で止まっており、膨張ひびわれは表面からかぶり部分に集中していることがわかる。

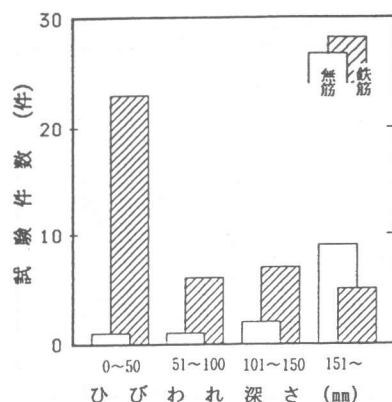


図7 ひびわれ深さの調査結果

3.3 ひびわれ特性と表面ひずみ

材令21ヶ月時点で無筋構造の場合は、最大ひびわれ幅が1mm以上に達するものがあり、ひびわれはほぼ均等にマップ状に広がっている。鉄筋構造の場合は、主鉄筋の拘束によりZ軸方向に幅0.3mm以上の大きなひびわれが多く認められ、X、Y軸方向には0.3mm以下のひびわれが多い。

図8と図9に無筋及び鉄筋構造の表面ひずみの推移とひびわれ密度の経時変化を示す。これによると、無筋構造では、表面ひずみの増大に伴ってひびわれ密度も大きくなり、この両者間には高い相関性が認められる。また、鉄筋構造でも同様な傾向を示している。

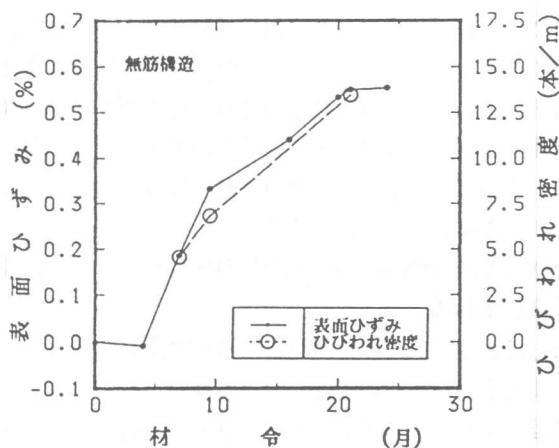


図8 表面ひずみとひびわれ密度の関係

過去の報告では、ひびわれ幅の総和が必ずしもひずみと一致しないものの、総ひびわれ幅やひびわれ密度とひずみの相関性は認められている^{4) 5)}。

本試験では、ひびわれ幅が0.1mm以上のものについてひびわれ密度を測定しているものの、図8や図9に示すようにひびわれ密度の経時的変化量から表面ひずみの推移を十分に推定することが可能であることが明らかとなった。したがって、実構造物においてAARによる膨張劣化が進行しているかどうかを判断するためには、ひびわれ密度を経時的に測定することが合理的な指標であると考えられる。

3.4 物理的性状

材令21ヶ月時点で無筋及び鉄筋構造の供試体から採取したコア供試体の静的破壊試験の結果

を表1に示す。過去の報告によると、AARによって劣化したコンクリートは微細なひびわれのために、同一強度レベルでの静弾性係数が低下するといわれている⁶⁾。そこで、建築学会標準の圧縮強度と静弾性係数の関係式である①式に基づいて⁷⁾、本試験で得られた圧縮強度に対する健全なコンクリートの静弾性係数を算出した。両供試体の静弾性係数は健全なコンクリートの60～50%に低下しており、目視観察ではいずれのコアも骨材近傍で同程度の劣化が確認された。

また、測定値に多少のばらつきはあるものの、鉄筋の有無が圧縮強度及び静弾性係数には影響していないことが認められ、この結果は富田ら⁸⁾の報告と一致する。

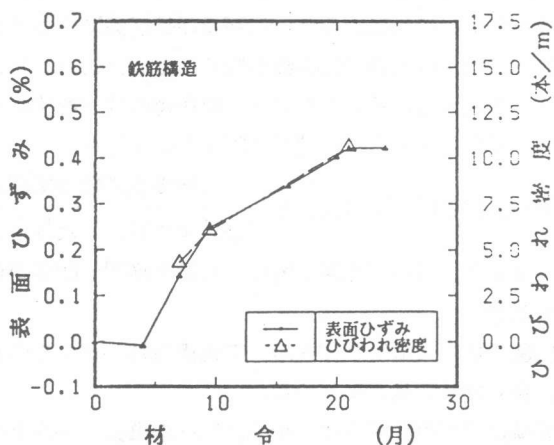


図9 表面ひずみとひびわれ密度の関係

表1 静的破壊試験結果

供試体の種類	単位体積重量 (t/m^3)	圧縮強度 (kgf/cm^2)		静弾性係数 (kgf/cm^2)		
		平均	実測値	平均	計算値	
無筋構造	2.29	186	11.8 $\times 10^4$	11.9 $\times 10^4$	21.3 $\times 10^4$	
	2.30	173	11.9 $\times 10^4$		20.7 $\times 10^4$	
鉄筋構造	2.32	149	10.2 $\times 10^4$	9.5 $\times 10^4$	19.4 $\times 10^4$	
	2.31	182	8.7 $\times 10^4$		21.3 $\times 10^4$	

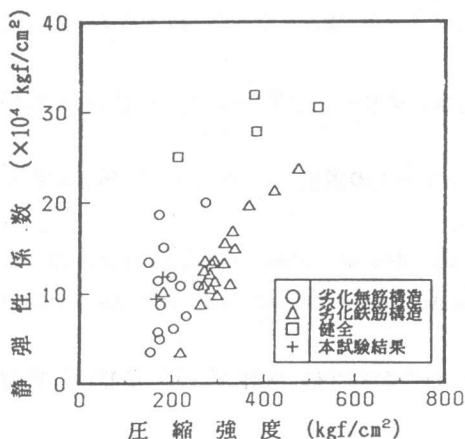


図10 圧縮強度と静弾性係数の関係

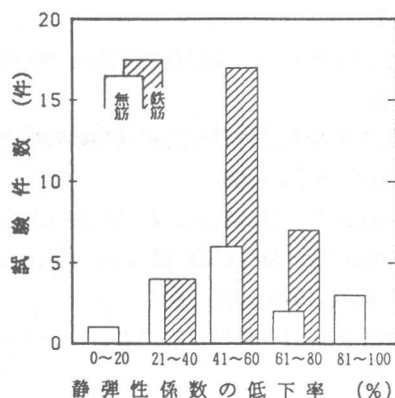


図11 静弾性係数低下率の結果

$$E_c = 2.1 \times 10^5 \cdot (\rho / 2.3)^{1.5} \cdot (F_c / 200)^{0.5} \dots \textcircled{1}$$

E_c : 静弾性係数(kgf/cm^2)

ρ : 単位体積重量(t/m^3)

F_c : 圧縮強度(kgf/cm^2)

さらに、ここで得られた結果を、筆者らが行った実構造物調査の中からAARによる劣化と判

断された44件の調査結果と比較検討する。図10に構造形式別に分けた圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。これによると、無筋及び鉄筋構造の両者とも、健全なコンクリートに比べて同一強度レベルにおける静弾性係数が明らかに低いことがわかる。

また、AARによるコンクリート物性値の低下を検討するために、②式から求めた値を静弾性係数の低下率と定め、その結果を図11に示した。

$$\text{静弾性係数の低下率 (\%)} = \frac{(\text{静弾性係数の実測値}) \times 100}{(\text{①式より算出した健全コンクリートの静弾性係数})} \quad \dots \text{②}$$

これによると、鉄筋の有無に関係無く低下率40～60%が最も多く、同様の傾向を示している。

4 まとめ

本試験では、大型供試体を用いて実構造物レベルでのAARによる劣化特性を明らかにした。以下、得られた知見をまとめる。

- ①無筋構造の表面ひずみは、端部に比べ中央部分が大き。鉄筋構造では、逆に中央部分のひずみが小さい傾向を示すが、測定位置に方向性のあるひびわれが発生すると、無筋構造同様、中央部分の表面ひずみが大きくなるケースがある。
- ②無筋構造では、内部ひずみと表面ひずみは等しく、鉄筋構造では、内部ひずみは表面ひずみの50%程度である。
- ③無筋及び鉄筋構造の両者とも、表面ひずみとひびわれ密度には正の相関がある。
- ④AARによって劣化したコンクリートの静弾性係数は著しく低下する。
- ⑤以上のことから、実構造物の調査において、AARによる劣化が進行しているか否かを合理的に判断する手法としては、ひびわれ密度の経時的測定が有効であり、劣化程度の判断には、静弾性係数の低下率を求めることが有効である。

参考文献

- 1)脇坂他：鉱物学的にみた岩石のアルカリ反応性,セメント・コンクリート, No.499, Sept., 1988, pp9-17
- 2)田村：コンクリート用材料とアルカリ骨材反応,コンクリート工学, Vol.24, No.11, Nov.1986, pp23-28
- 3)立松他：アルカリ骨材反応生成物の特徴とコンクリートの劣化,コンクリート工学年次論文報告集, 1987, pp561-566
- 4)S.Diamond & N.Thawlow : A Study of Expansion due to Alkali-Silica Reaction as Condition by the Grain Size of the Reactive Aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.4, No.4, 1974, pp591-607
- 5)西林他：アルカリ骨材反応によるコンクリートのひびわれ評価,材料,第38巻,第431号, 1989, pp72-78
- 6)G.E.Blight et al. : The Effect of Alkali-Aggregate Reaction on the Strength and Deformation of Reinforced Concrete Structure, 6th International Conference ALKALI IN CONCRETE-Pro., 1983, pp401-410
- 7)鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1982, pp47-49
- 8)富田他：コア採取法によるASR変状構造物診断の基礎的研究,セメント技術年報, 1988, pp335-338