

# ダムコンクリートの圧縮強度に及ぼす粗骨材の影響

梅原秀哲\*・張 剣\*\*・上田 稔\*\*\*  
吉田弥智\*\*\*\*

ダムコンクリートのように、粗骨材最大寸法が 150 mm 程度の粒形の大きな粗骨材を用いると、ブリージングによって生じる粗骨材下部の空隙により、圧縮強度が低下する。本研究は、モルタル製の複数のモデル骨材からなるコンクリート供試体を作製し、圧縮強度試験を行うとともに、有限要素法を用いた解析を行うことにより、骨材の寸法、形状、個数等が圧縮強度に与える影響を検討し、圧縮強度低下機構を明らかにするものである。

**Keywords :** dam concrete, coarse aggregate, bleeding, compressive strength, finite element method

## 1. まえがき

粗骨材がコンクリートの力学的特性に及ぼす影響に関して、これまでに数多くの研究が行われている。中でも、コンクリートの圧縮強度に関する研究が最も多く、粗骨材とセメントペーストとの付着が圧縮強度に与える影響を微視的に調べた岩崎ら<sup>1)</sup>、鈴木ら<sup>2)</sup>、川上ら<sup>3)</sup>、森野ら<sup>4)</sup>の研究、粗骨材の圧縮強度がコンクリートの圧縮強度に与える影響を調べた爾見ら<sup>5), 6)</sup>の研究、モデル骨材を用いて粗骨材の材質、表面状態、形状等がコンクリートの圧縮破壊機構および圧縮強度に与える影響を調べた加場ら<sup>7), 8)</sup>、小阪ら<sup>9)~12)</sup>の研究がある。

粗骨材とセメントペーストとの付着を微視的に見ると、粗骨材とセメントペーストとの界面には  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の薄膜が存在し、界面が多孔質であるとそこに  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  がたい積し、付着強度が低下することが認められている。さらにモデル骨材を用いた研究から、粗骨材とセメントペーストとに全く付着がなければ、コンクリートの圧縮強度は粗骨材がほとんどない状態の圧縮強度に等しくなるため、圧縮強度に与える付着の重要性が指摘されている。

また、粗骨材の圧縮強度がモルタルの圧縮強度より小さい場合には、コンクリートの圧縮強度は粗骨材の圧縮強度に影響される。モデル骨材を用いて圧縮試験を行うと、まず母材モルタルと粗骨材間にボンドクラック（粗骨材とモルタルの付着面に沿って発生するひびわれを言う）が生じる。その後、粗骨材の中央部及び上下端近傍の母材モルタル部にほぼ同時に載荷軸方向のひびわれが生じ、最後に粗骨材で破壊することが明らかにされている。

次に、粗骨材の圧縮強度がモルタルの圧縮強度より大きい場合には、コンクリートの圧縮強度は粗骨材の圧縮強度にほとんど影響されない。母材モルタルと粗骨材間にボンドクラックが生じた後、ボンドクラックが母材モルタル部に進展して載荷軸方向のモルタルクラックを発生させ、その後粗骨材の上下端近傍の母材モルタル部分が破壊することが明らかにされている。さらにモデル骨材を用いた研究から、ボンドクラックはモルタルクラックよりも早期に進展し、ボンドクラックは圧縮強度の 50% で、またモルタルクラックは圧縮強度の 70% で発生することが認められている。一方、田沢<sup>13)</sup>らによってモデル骨材を用いて、ブリージングによる粗骨材の下部の空隙が圧縮強度に及ぼす影響が調べられており、同一ブリージング量ならば寸法の大きな粗骨材の下部の空隙から、モルタルクラックが進展することが明らかにされている。

以上をまとめると、粗骨材の圧縮強度および粗骨材とセメントペーストとの付着がコンクリートの圧縮強度に大きく影響し、さらにこの付着はブリージングによって影響される。したがって、ブリージングによる粗骨材下部の空隙の程度を把握することが、コンクリートの圧縮強度を予測する上で最も重要な点であると考えられる。

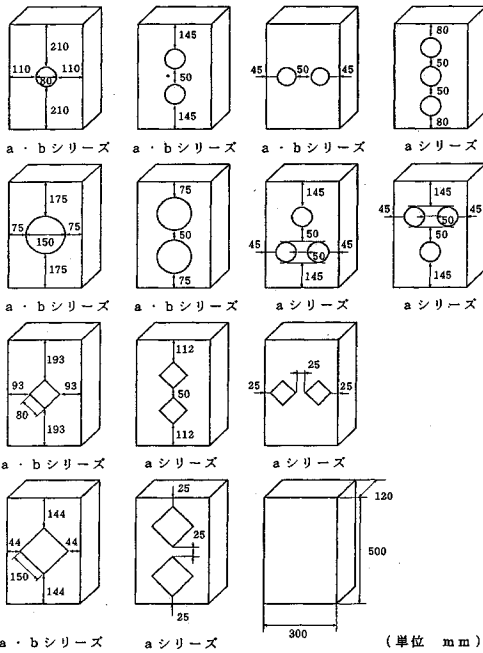
ところで、これまでの研究はほとんどが  $G_{\max}$ （粗骨材の最大寸法）が 40 mm 以下についての研究であり、ダムコンクリートなどを対象とした  $G_{\max}$  が 150 mm 程度の配合ではほとんど行われていない。また、ダムコンクリートの品質管理手法として圧縮強度試験が行われているが、 $G_{\max}$  が 40 mm 以上の配合の場合には、ウェットスクリーニングを行って供試体を作製している。特に骨材の影響が大きいダムコンクリートにおいてウェットスクリーニングを行うことは、40 mm 以上の粗骨材の影響が全く反映されないため、ウェットスクリーニングさ

\* 正会員 Ph.D 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

\*\* 正会員 工修 矢作建設工業(株)

\*\*\* 正会員 工修 名古屋工業大学大学院 工学部社会開発工学科

\*\*\*\* 正会員 工博 名古屋工業大学長



図一 供試体の概要

れたコンクリートの品質は、実際のコンクリートの品質と相違していると思われる。

そこで、ウェットスクリーニングがコンクリートの圧縮強度などに及ぼす影響を粗骨材の最大寸法および単位水量を指標として検討を行った結果、40 mm 以上のふるいでウェットスクリーニングを行うと、 $G_{max}$  が 150 mm でウェットスクリーニングを行わない場合の圧縮強度およびコンクリート内部の挙動と類似した傾向を示すが、ふるい目を 25 mm 以下とすると圧縮強度および内部挙動とも 150 mm の場合と全く異なる傾向を示すことが著者らの研究により明らかとなった<sup>14)</sup>。そしてその原因として、ブリージングによって生じる粗骨材下部の空隙の影響、その中でも特に粒径の大きな粗骨材において空隙の影響の大きいことが考えられた。さらにこの考察を検証するために、著者らは母材コンクリートと  $G_{max}$  が 40 mm 以上のモルタル製の単一モデル骨材からなるモデルコンクリートを作製し、モデル骨材の寸法、形状および母材コンクリートの単位水量をパラメータとした圧縮試験を行った<sup>15)</sup>。なお、実際の骨材では骨材品種が相違すると骨材の材質、形状や表面状態などが異なるため、コンクリートの力学的特性に及ぼす骨材の影響を調べる場合に、従来から用いられているモデル骨材を用いる方法をここでは採用した。その結果、モデル骨材下部のブリージングによる空隙がひびわれや圧縮強度に影響を与え、特に 80 mm 以上のモデル骨材でその影響が顕著となることが明らかとなった。しかし、単一モデル骨材であるため、骨材相互の影響が考慮されていないこと

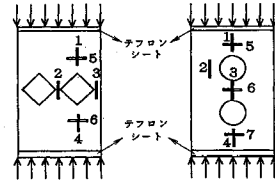
表一 配合表

母材コンクリート (28日設計強度 200kgf/cm<sup>2</sup>)

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
25	10	1.5	70	44.5	179	252	808	1079

モデル骨材用モルタル (28日設計強度 500kgf/cm<sup>2</sup>)

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
		水 W	セメント C	細骨材 S
30	44.5	430	1430	290



図二 載荷状況

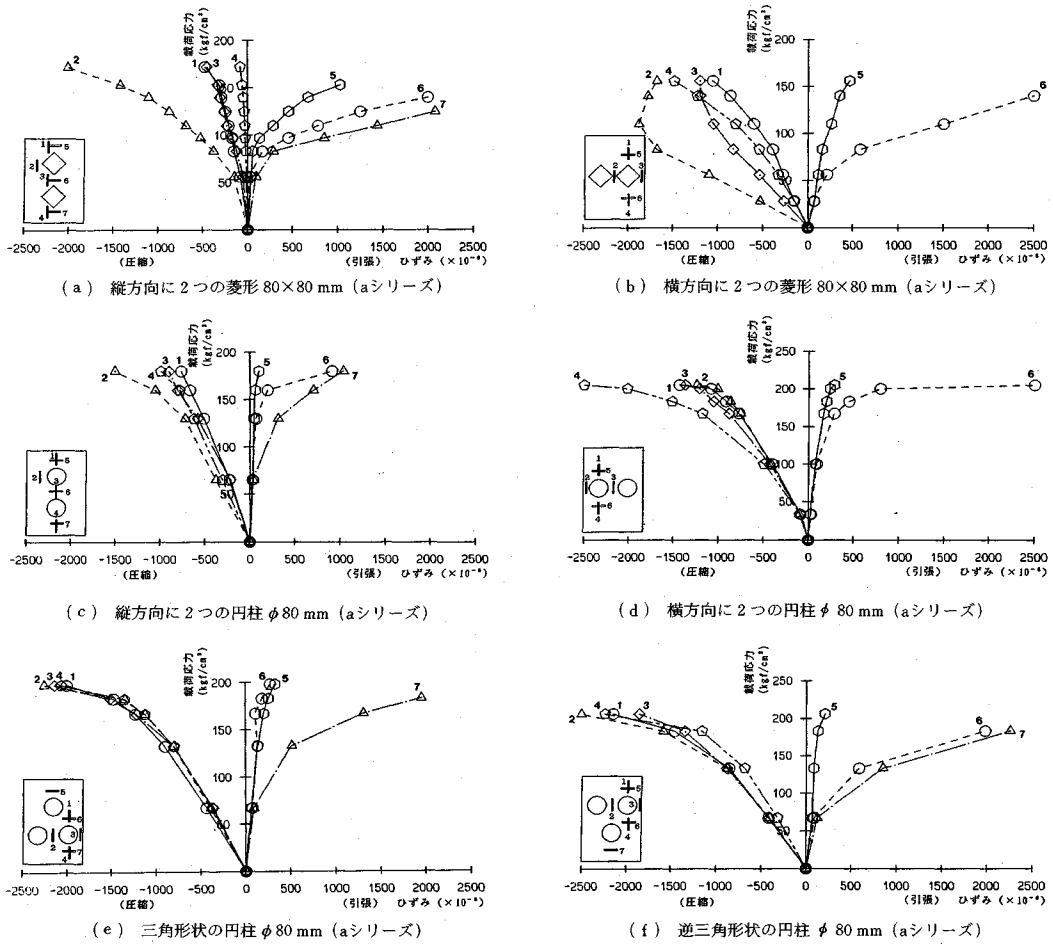
や、実験結果より複数個のモデル骨材を用いれば、単一の場合よりも圧縮強度がさらに低下する可能性が示唆されたことから、複数個のモデル骨材を配置して、より実際に近い実験を行う必要性が生じた。

そこで本研究では、 $G_{max}$  が 80 mm 以上のモルタル製の複数のモデル骨材からなるモデルコンクリートを作製し、モデル骨材の寸法、形状、個数、配置位置および表面状態を変化させて実験を行うとともに、有限要素法を用いた解析を行うことにより、粗骨材下部の空隙によるダムコンクリートの圧縮強度低下機構を解明することを試みた。

## 2. 実験概要

### (1) 供試体

図一に示すように、中央に高強度のモルタルで作った複数のモデル骨材を配置した 50×30×12 cm の直方体の供試体を作製した。モデル骨材には、80×80 mm、150×150 mm の菱形、および  $\phi$  80 mm、 $\phi$  150 mm の円柱を用いた。モデル骨材の形状は、川砂利など丸みを持つ骨材や砕石などの角を持つ骨材の代表例として、それぞれ円形と菱形とし、有限要素法による解析が二次元であることを考慮して柱状とした。また、供試体の大きさは、縦は 2 個の 150 mm の菱形が上下に並べられ、横は 2 個の 80 mm の菱形が左右に並べられ、さらに骨材間距離が母材コンクリートの粗骨材最大寸法 ( $G_{max}=25$  mm) 以上となるように配慮した。モデル骨材と母材コンクリートの付着面は、モデル骨材の型枠により表面が滑らかに仕上がるため、砕石の表面のように凹凸があるものとは明らかに付着性状が異なると思われる。そこで、モデル骨材の表面に次に示す 2 種類の処置を施した。a



図—3 載荷応力-ひずみ関係

シリーズは、モデル骨材表面に深さ 1 mm、幅 2 mm で間隔 1 cm のこぎり歯状の凹凸を付けたもの、b シリーズは、モデル骨材表面にのこぎり歯状の凹凸を付け、さらに実際の骨材より付着を強固にするために、母材コンクリートを打込む前にセメントペーストを塗ったものである。なお、母材コンクリートはモデル骨材を所定の位置に設置した後、図—1 に示す各供試体の上方より打込まれた。このようにして、モデル骨材の寸法、形状、個数、配置位置および表面状態を変え、供試体の数を 21 個とした。

(2) 配合

母材コンクリートおよびモデル骨材の配合を表—1 に示す。モデル骨材はモルタル製であるが、モデル骨材が先に破壊しないように、母材コンクリートおよびモデル骨材の設計基準強度をそれぞれ 200 kgf/cm<sup>2</sup>、500 kgf/cm<sup>2</sup> とした。セメントはいずれも普通ポルトランドセメントで、細骨材は揖斐川産で粗粒率 2.61 であり、粗骨材は天竜川産で粗粒率 6.80 である。なお、実際の

アーチダムでは単位セメント量が約 180kg/m<sup>3</sup>、単位水量が約 100 kg/m<sup>3</sup> 程度であるが、ウェットスクリーニングにより粒径が 25 mm 以上の粗骨材とその表面に付着したモルタル分の失われたものが母材コンクリートであるとすると、見かけ上単位セメント量と単位水量は増加する。この点を考慮して母材コンクリートの配合を定めた。

(3) 載荷および計測方法

供試体への載荷は、図—2 に示す方向へ 500 tf の耐圧試験機を用いて行った。なお、供試体と載荷板の間に端面拘束の影響を除去するため、グリースを塗布したテフロンシートを敷いた。載荷の際に、載荷荷重と供試体に貼りつけたストレインゲージによるひずみの計測を行い、ひびわれ進展状況を観察した。ストレインゲージの位置は、モデル骨材の上下および側方で、その一例を図—2 に示す。

(4) 実験結果及び考察

a) モデル骨材周囲のひずみ分布状況

図-3に各供試体の荷重応力とひずみの関係のいくつかの特徴的な例を示す。図-3(a)に示す縦方向に二つのaシリーズの80×80mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体では、モデル骨材の上下部の圧縮ひずみが非常に小さく、圧縮ひずみがほとんど骨材の両側のコンクリートに集中している。その原因としては、上側のモデル骨材下部の境界面上側のモデル骨材と母材コンクリートとがずれを生じ、上側のモデル骨材の下部頂点から下側のモデル骨材の上部頂点までにひびわれが発生することによって、下側のモデル骨材の両側のボンドクラックが上部頂点まで進展し、モデル骨材の上下部に荷重が鉛直に伝わりにくくなるためと考えられる。引張ひずみについては、上側のモデル骨材上部の引張ひずみが最も小さいが、2つのモデル骨材の間および下側のモデル骨材下部の引張ひずみは、単一モデル骨材を用いた供試体のモデル骨材下部の引張ひずみと同様かなり大きな値を示している。図-3(b)に示す横方向に二つのaシリーズの80×80mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体でも、引張ひずみの分布状況は単一のモデル骨材を用いた供試体と同じ傾向である。圧縮ひずみについては、モデル骨材下部にある空隙の影響で、モデル骨材下部と母材コンクリートとの境界面は付着が弱く、モデル骨材中は荷重が鉛直に伝わりにくくなり、低荷重域ではモデル骨材両側の圧縮ひずみが上下部の圧縮ひずみより大きい。そして、両骨材間の圧縮ひずみは両端部の圧縮ひずみよりさらに大きい。しかし、高荷重域になると、モデル骨材両側のボンドクラックが斜め上方へ母材コンクリートに進展した後、モデル骨材両側に作用している圧縮応力が骨材の中央部に移動するため、モデル骨材の上下部の圧縮ひずみが大きくなって、モデル骨材両側の圧縮ひずみが小さくなることが明らかとなった。

図-3(c)に示す縦方向に二つのaシリーズのφ80mmの円柱モデル骨材を用いた供試体では、圧縮ひずみがモデル骨材の両側に集中するが、その程度が菱形の場合よりかなり弱くなることが明らかとなった。また、引張ひずみについても、菱形の場合よりかなり小さくなり、モデル骨材下部の空隙の領域が菱形に比較して小さいことを示している。図-3(d)に示す横方向に二つのaシリーズのφ80mmの円柱モデル骨材を用いた供試体では、菱形のモデル骨材を用いた供試体のように、圧縮ひずみが二つのモデル骨材の中間のコンクリートに集中しないことが明らかとなった。また、引張ひずみについては、低荷重域では菱形の場合よりかなり小さい。

図-3(e),(f)にそれぞれ、aシリーズのφ80mm円柱モデル骨材を三角形の頂点および逆三角形の頂点に配置した供試体の荷重応力とひずみの関係を示す。モデル骨材の周囲に発生する圧縮ひずみの傾向はいずれも、φ80mm円柱モデル骨材を2個配置した供試体とほ

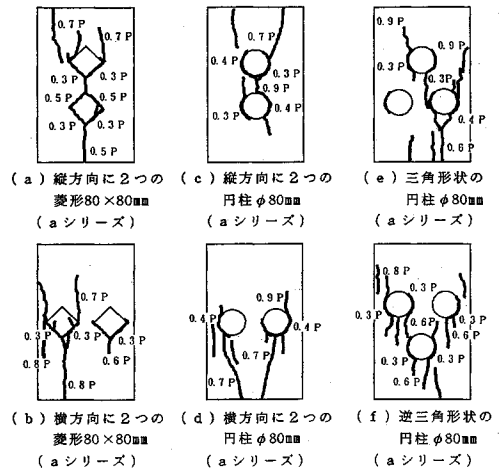


図-4 ひびわれ状況

んど同じである。一方、引張ひずみもモデル骨材が鉛直方向に配置されていないので、下側のモデル骨材が上側のモデル骨材下部の母材コンクリートを拘束せず、モデル骨材下部の母材コンクリートに大きな引張ひずみが生じることが明らかとなった。

なお、bシリーズのモデル骨材を用いた供試体は、モデル骨材と母材コンクリートとの付着が強いため、aシリーズのモデル骨材を用いた供試体に比べて、全体的に圧縮ひずみが骨材の両側に集中する傾向が弱く、骨材下部の引張ひずみが少し小さくなる傾向を示した。

b) ひびわれ状況

図-4に図-3示した供試体のひびわれ状況を示す。なお、ひびわれの進展を示すために、圧縮強度との比率で表した荷重応力を図中に示す。図-4(a)に示す縦方向にaシリーズの二つの80×80mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体では、低荷重域でモデル骨材の両側にボンドクラックが発生した。その後、モデル骨材下部の境界面で母材コンクリートとずれを生じ、骨材下部の中央から母材コンクリートにひびわれが発生した。最後に、上部のモデル骨材の方は両側のボンドクラックが上部境界面へ少し進展して、両側のボンドクラックから上部の母材コンクリートにひびわれが生じた。下部のモデル骨材の方は上部のモデル骨材の下部頂点から下部モデル骨材の上部頂点までひびわれが進展することによって、両側のボンドクラックが上部境界面の頂点まで進展した。図-4(b)に示す横方向にaシリーズの二つの80×80mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体では、ひびわれの発生状況は単一モデル骨材を用いた供試体とほとんど同じであるが、両モデル骨材の外側の端から供試体の端部までの距離が短いので、両骨材外側のボンドクラックから斜め上方向へ供試体の端部までひびわれが生じた。

表—2 圧縮強度

モデル骨材の寸法・形状	モデル骨材の配列	骨材表面の付着状態		P (aシリーズ骨材)	P (bシリーズ骨材)
		aシリーズ P (kgf/cm <sup>2</sup> )	bシリーズ P (kgf/cm <sup>2</sup> )	P (骨材無し) (X)	P (骨材無し) (X)
円柱 φ80mm		208	217	97	101
		192	201	89	93
		207	212	96	99
		199	—	93	—
		197	—	92	—
		203	—	94	—
円柱 φ150mm		191	209	89	97
		175	218	81	101
菱形 80×80mm		197	215	92	100
		172	—	80	—
		156	—	73	—
菱形 150×150mm		154	176	72	82
		121	—	56	—
骨材無し		215		100	100

図—4 (c) に示す縦方向に a シリーズの二つの φ80 mm 円柱モデル骨材を用いた供試体では、初めにモデル骨材の両側にボンドクラックが発生した。その後、モデル骨材下部の境界面で母材コンクリートとずれを生じ、骨材下部の母材コンクリートにひびわれが発生した。それと同時にモデル骨材両側のボンドクラックが上部境界面へ進展し、モデル骨材上部の母材コンクリートにひびわれが生じた。下部のモデル骨材の方は、上部のモデル骨材の下部から下部モデル骨材の上部までひびわれが進展することによって、両側のボンドクラックが上部境界面へ進展した。最後に、上部のモデル骨材下部のひびわれと下部のモデル骨材両側のボンドクラックがつながった。図—4 (d) に示す横方向に a シリーズの二つの φ80 mm 円柱モデル骨材を用いた供試体では、互いの骨材に面した側 (内側) のボンドクラックより外側のボンドクラックの方が先に生じた。そして、両骨材の下部のひびわれが供試体の下端の中心部へ進展した。最後に、骨材外側に生じたボンドクラックから上部へひびわれは進展したが、内側のボンドクラックから上部へ進展するひびわれは、顕著に現れなかった。

図—4 (e) に示す三つの a シリーズの φ80 mm 円柱モデル骨材を三角形の頂点に配置した供試体では、初めに各モデル骨材両側にボンドクラックが発生し、モデル骨材と母材コンクリートがずれを生じ骨材下部から下方へひびわれが進展した。そして、下側のモデル骨材下部からのひびわれが供試体下端にまで進展した。最後に、モデル骨材の外側のボンドクラックから供試体の上方へのひびわれが生じた。しかし、内側のボンドクラックからは、ほとんどひびわれは進展しなかった。図—4 (f) に示す三つの a シリーズの φ80 mm 円柱モデ

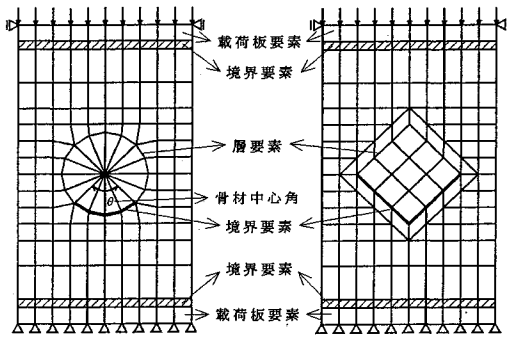
ル骨材を逆三角形の頂点に配置した供試体では、初めに各モデル骨材両側にボンドクラックが発生し、モデル骨材と母材コンクリートがずれを生じ骨材下部から下方へひびわれが進展した。そして、モデル骨材両側のボンドクラックからひびわれが下方へ進展し、下側のモデル骨材のボンドクラックから上方へのひびわれは、上側のモデル骨材へ到達した。最後に、上側のモデル骨材外側のボンドクラックから上方へのひびわれが発生した。しかし、上側のモデル骨材内側のボンドクラックから上方へのひびわれは顕著に現れなかった。

なお、b シリーズのモデル骨材を用いた供試体のひびわれ状況は、a シリーズのモデル骨材を用いた供試体に比べて低荷重域でのボンドクラックの発生が少なかったが、全体のひびわれの傾向にほとんど差は生じなかった。

### c) 圧縮強度

表—2 に各供試体の圧縮強度を示す。a シリーズのモデル骨材を用い、モデル骨材と母材コンクリートとの境界面の付着が弱い供試体は、モデル骨材のない供試体に比べて、明らかに圧縮強度が低下している。低下の割合は、φ80 mm の円柱、φ150 mm の円柱、80×80 mm の菱形、150×150 mm の菱形のモデル骨材を用いた供試体の順に大きくなる。これは、円柱のモデル骨材を用いた供試体のような骨材下部の円周の境界面にある空隙に対して、菱形のモデル骨材を用いた供試体のような骨材下部の 45 度の傾きを持つ境界面にある空隙の方が、よりコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響が強いためと考えられる。また、骨材の寸法の増加に伴い、骨材の下部にある空隙の長さも増加し、供試体の圧縮強度に及ぼす影響が強くなるためと考えられる。さらに、同じ形状、同じ大きさのモデル骨材を用いた供試体では、モデル骨材の個数の増加に伴い、明らかに供試体の圧縮強度が低下している。これは、モデル骨材の個数の増加に伴い、供試体の中に空隙の量が増加し、各モデル骨材の下部にある空隙によって生じるひびわれがつながって、供試体が早く破壊するためと考えられる。

b シリーズのモデル骨材を用い、モデル骨材と母材コンクリートとの境界面の付着が強い供試体の場合では、円柱及び 80×80 mm の菱形のモデル骨材を用いた供試体は、圧縮強度がほとんどモデル骨材の影響を受けていない。これは、b シリーズのモデル骨材を用いた供試体の場合では、モデル骨材と母材コンクリートとの境界面の付着が強いため、低荷重域でモデル骨材の両側のボンドクラックおよび下部の境界面における母材コンクリートとのずれが発生せず、モデル骨材のない場合とほとんど同じ挙動を示したためと考えられる。しかし、150×150 mm の菱形のモデル骨材を用いた供試体は、モデル骨材と母材コンクリートとの境界面の付着が強くなり、154 kgf/cm<sup>2</sup> から 176 kgf/cm<sup>2</sup> へと圧縮強度は大きくなる



図—5 解析モデル

が、モデル骨材のない場合の圧縮強度の約 80% にすぎない。これは、150×150 mm の菱形のモデル骨材を用いた供試体の場合では、80×80 mm の菱形のモデル骨材を用いた供試体より、モデル骨材下部の空隙が長く、モデル骨材下部の境界面に作用するせん断力も大きいので、モデル骨材と母材コンクリートとの境界面の付着が強くなったにもかかわらず、モデル骨材の両側のボンドクラックおよび下部の境界面における母材コンクリートとのずれが早く発生したためと考えられる。

### 3. 解 析

#### (1) 解析の概要

実験を行った供試体について有限要素法による解析を行い、実験結果を検証することを目的とした。解析に用いた有限要素法の解析プログラムは、前川ら<sup>16)</sup>によって開発されたものである。このプログラムでは、ひびわれは各要素ごとに最大主応力がコンクリートの引張強度に達すると、最大主応力方向に垂直に発生すると仮定し、ひびわれ発生後はその要素における最大主応力方向の剛性を零として剛性マトリックスを修正し、逐次計算を行うことにより解を求めている。解析モデルは図—5に示すように、供試体と載荷板の間に載荷板による拘束を表す境界要素、モデル骨材下部の空隙を表す境界要素、さらにそれ以外の境界面に、モデル骨材と母材コンクリートとの付着状態を表すために、ヤング係数を母材コンクリートより小さくした層要素を用いて解析を行った。なお、境界要素は摩擦によるせん断伝達を表すことができる。境界要素に作用する摩擦力をプログラムでは、式(1)、(2)のように表すことにした。

供試体と載荷板の間において、

$$\text{摩擦力} = A \times \text{圧縮力} \dots\dots\dots (1)$$

モデル骨材下部の空隙の部分において、

$$\text{摩擦力} = \begin{cases} B \times \text{圧縮力} & (\text{圧縮ひずみ} \geq 0) \\ 0 & (\text{圧縮ひずみ} < 0) \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

係数 A は、供試体と載荷板の間が摩擦を伴い滑る場合の摩擦係数である。本解析では、モデル骨材を持た

表—3 解析条件

解析要素	解析条件決定用の実験	複数モデル骨材の実験	
		a シリーズ骨材	b シリーズ骨材
母材コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	2 1 5	2 1 5	2 1 5
モデル骨材の圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	5 0 0	5 0 0	5 0 0
載荷板要素の圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	5 0 0 0	5 0 0 0	5 0 0 0
空隙以外の境界面にある層要素のヤング係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	1. 5 × 10 <sup>5</sup>	1. 5 × 10 <sup>5</sup>	1. 8 × 10 <sup>5</sup>
菱形のモデル骨材下部の空隙の長さ	—	モデル骨材の下部の全長	モデル骨材の下部の全長
円柱モデル骨材下部の空隙の長さ (θ)	6 0° 1 3 5°	9 0°	9 0°
供試体と載荷板の間の摩擦係数 (A)	0. 3	0. 3	0. 3
境界面の摩擦係数 (B)	0. 1 5	0. 1 5	0. 3

ない供試体において、載荷板の拘束が供試体のひずみ分布に与える影響に対する実験結果と解析結果との比較によって、0.3に決定した。一方、係数 B は、モデル骨材下部の空隙部分の境界面が摩擦を伴い滑る場合の摩擦係数である。この係数は、実験におけるモデル骨材の表面状態およびモデル骨材下部の空隙部分の付着状態によって決定される。なお、空隙を表す境界要素の長さは、菱形のモデル骨材の場合は下部の2辺の長さとし、円柱のモデル骨材の場合は図—5に示すように、骨材の中心角 θ で表すこととした。

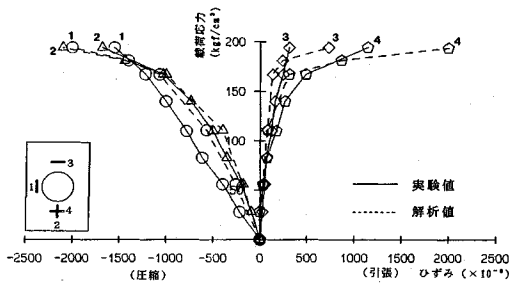
#### (2) 解析条件の決定

##### a) 実験方法

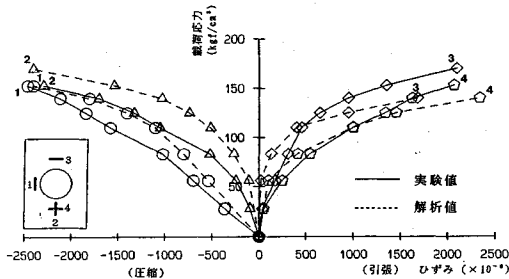
本解析プログラムを用いて実験結果を解析するにあたり、特に円柱のモデル骨材下部の空隙の長さを定める必要がある。そこで、中央に φ150 mm の円柱の単一モデル骨材を配置した 50×30×12 cm の直方体の供試体を2つ作製し、載荷実験を行った。なお、これらの供試体はモデル骨材下部の表面に、骨材の中心角 θ がそれぞれ 60° と 135° の範囲でグリースを塗布し、空隙の長さを特定したものである。モデル骨材のそれ以外の表面には、のこぎり歯状の凹凸を付けた。母材コンクリートおよびモデル骨材の配合は表—2に示すように、複数モデル骨材の実験と同じである。また載荷方法も同じである。

##### b) 解析方法

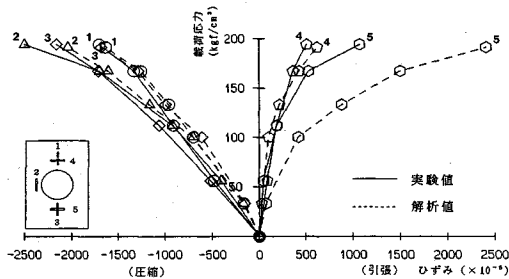
表—3に解析条件を示す。母材コンクリートおよびモデル骨材の圧縮強度はそれぞれの実験値を、またヤング係数は、応力-ひずみ関係を二次曲線と仮定し、その接線をヤング係数とした。空隙以外のモデル骨材と母材コンクリートとの境界面にある層要素のヤング係数は、1.5×10<sup>5</sup> kgf/cm<sup>2</sup>を用いた。さらに、モデル骨材下部における境界要素の摩擦係数 B は、実験において空隙部分の表面にグリースを塗布したが、摩擦が完全にはなくなることを考慮して 0.15 とした。



(a) グリース塗布 ( $\theta=60^\circ$ )



(b) グリース塗布 ( $\theta=135^\circ$ )



(c) グリース塗布せず

図-6 載荷応力-ひずみ関係 (円柱  $\phi 150\text{ mm}$ )

c) 実験結果と解析結果との比較

図-6 (a), (b) に、それぞれ骨材の中心角  $\theta=60^\circ$ ,  $135^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体の載荷応力とひずみの関係の実験値と解析値との比較を示す。  $\theta=135^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体は、  $\theta=60^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体に比べて、圧縮ひずみがモデル骨材の両側のコンクリートに集中し、モデル骨材の下部に大きな引張ひずみが生じることが実験結果と解析結果で一致した。また、図-7 (a), (b) にこれら2つの供試体の実験および解析で得られたひびわれ状況の比較を示す。この図においても、  $\theta=60^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体と  $\theta=135^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体のいずれも、ひびわれの発生位置および分布状況が実験結果と解析結果でほとんど一致した。さらに、表-4 に2つの供試体の実験および解析で得られた圧縮強度の比較を示す。解析における圧縮強度は、支点反力が最大値に至る時の荷重より求めた。表に示すように、骨材の中心角  $\theta=135^\circ$  の範囲でグリースを塗布

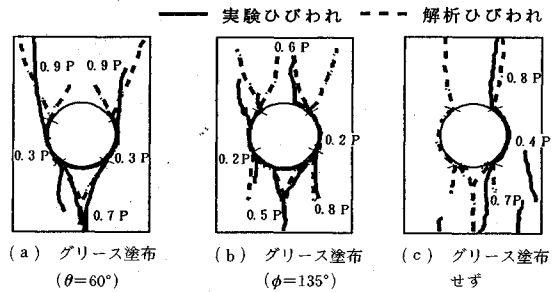


図-7 ひびわれ状況 (円柱  $\phi 150\text{ mm}$ )

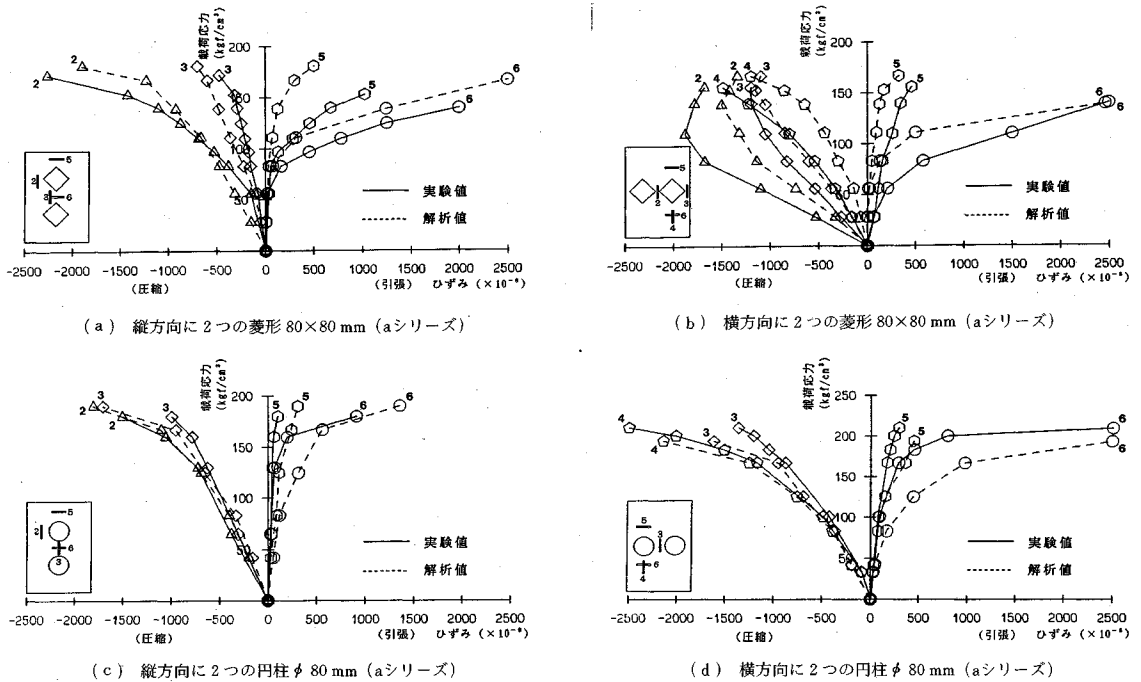
表-4 圧縮強度 (円柱  $\phi 150\text{ mm}$ )

グリースを塗布した骨材の中心角 $\theta$	実験値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	解析値 (kgf/cm <sup>2</sup> )	実験値 / 解析値
135°	170	181	0.94
60°	207	208	0.99
グリースを塗布せず	191	189	1.01

した供試体は、  $\theta=60^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体に比べ、明らかに圧縮強度が低下することが実験結果と解析結果で一致した。

d) 中心角  $\theta$  および摩擦係数  $B$  の決定

図-1 に示す複数モデル骨材の実験において得られた中央に a シリーズの  $\phi 150\text{ mm}$  の円柱の単一モデル骨材を配置した供試体の載荷応力とひずみの関係、ひびわれ状況および圧縮強度をこれら2つの供試体と比較し、中心角  $\theta$  を定めることにした。図-6 に示すように、モデル骨材下部の表面を処理しない場合の載荷応力とひずみの関係は、  $\theta=60^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体の載荷応力とひずみの関係にほとんど一致している。一方、図-7 に示すひびわれ状況においては、ポンドクラックがモデル骨材の上部へ達している点で、  $\theta=135^\circ$  のグリースを塗布した供試体のひびわれ状況に近いと思われる。さらに表-4 に示すように、圧縮強度においては  $\theta=60^\circ$  と  $\theta=135^\circ$  の範囲でグリースを塗布した供試体の圧縮強度のほとんど中間の値を示している。このように、グリースを塗布しない場合の挙動が、  $\theta=60^\circ$  と  $\theta=135^\circ$  の範囲でグリースを塗布した場合の挙動の中間を示したことから、表-2 に示す配合の母材コンクリートでは、ブリージングの影響によりほとんど摩擦がなくなる程度 of 空隙が、およそ中心角  $\theta=90^\circ$  の範囲で骨材下部に生じていることが明らかとなった。したがって、複数モデル骨材の実験における円柱のモデル骨材下部の空隙の長さは、解析では中心角を  $\theta=90^\circ$  と仮定することにした。また、モデル骨材下部における境界要素の摩擦係数  $B$  は、グリースを塗布した場合と同様、0.15 を用いることにした。なお、検証のためこの条件で解析を行った結果、図-6 (c), 図-7 (c) および表-4 に示すように、いずれも解析値は実験値とほとんど同じ傾向を示した。



図—8 載荷応力-ひずみ関係(実験と解析の比較)

### (3) 複数モデル骨材供試体の解析

#### a) 解析条件

表—3 に本解析で用いた解析条件を示す。a シリーズの骨材を用いた場合は、空隙以外の境界面にある層要素のヤング係数、円柱モデル骨材下部の空隙の長さ、および空隙の境界面の摩擦係数  $B$  について、前節で述べた解析と同様の値を用いた。しかし、b シリーズの骨材を用いた場合は、モデル骨材と母材コンクリートとの付着が強いことを考慮して、空隙以外の境界面にある層要素のヤング係数を  $1.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  から  $1.8 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$  へ、また空隙の境界面の摩擦係数  $B$  を 0.15 から 2 倍の 0.3 へ増加させた。なお、円柱モデル骨材下部の空隙の長さは変化させていない。このような解析条件を用いて解析を行った。

#### b) 実験結果と解析結果との比較

例として、縦方向および横方向に2つの a シリーズの  $80 \times 80 \text{ mm}$  の菱形および  $\phi 80 \text{ mm}$  の円柱モデル骨材を用いた供試体の場合を示す。

##### ① 載荷応力とひずみ関係

図—8 (a) に示す縦方向に2つの a シリーズの  $80 \times 80 \text{ mm}$  の菱形のモデル骨材を用いた供試体の場合では、モデル骨材上下部の圧縮ひずみが非常に小さく、圧縮ひずみがほとんど骨材の両側の母材コンクリートに集中すること、およびモデル骨材の下部の母材コンクリートに大きな引張ひずみが生じることは、解析結果と実験結果で一致した。また、モデル骨材の上部の引張ひずみにつ

いては、実験値より解析値の方が少し小さい。これは、解析の場合では、モデル骨材の上部の境界面の付着が実際の状態より少し強く、モデル骨材の両側のボンクラックが上部の境界面へ進展しにくくなるためと考えられる。図—8 (b) に示す横方向に2つの a シリーズの  $80 \times 80 \text{ mm}$  の菱形のモデル骨材を用いた供試体の場合では、低荷重域で、圧縮ひずみが骨材の両側、特に両骨材間の母材コンクリートに集中し、高荷重域になると、モデル骨材の両側の応力集中による大きな圧縮ひずみの戻りが生じることは、実験結果と共に解析的にも明らかとなった。そして、モデル骨材の上下部の引張ひずみの分布も解析結果と実験結果でほとんど一致した。

図—8 (c) に示す縦方向に2つの a シリーズの  $\phi 80 \text{ mm}$  の円柱モデル骨材を用いた供試体の場合では、菱形のモデル骨材を用いた供試体より、圧縮ひずみが骨材の両側の母材コンクリートに集中しないことは、実験結果と共に解析結果においても、その傾向が認められた。そして、骨材の上下部の引張ひずみの分布も解析結果と実験結果で一致した。図—8 (d) に示す横方向に2つの a シリーズの  $\phi 80 \text{ mm}$  の円柱モデル骨材を用いた供試体の場合では、菱形のモデル骨材を用いた供試体より、圧縮ひずみが両骨材間の母材コンクリートに集中しないことは、実験結果と共に解析結果においても、その傾向が認められた。また、モデル骨材の下部の引張ひずみについては、実験値より解析値の方が少し大きい。これは、解析の場合では、モデル骨材の下部にある空隙を表す境



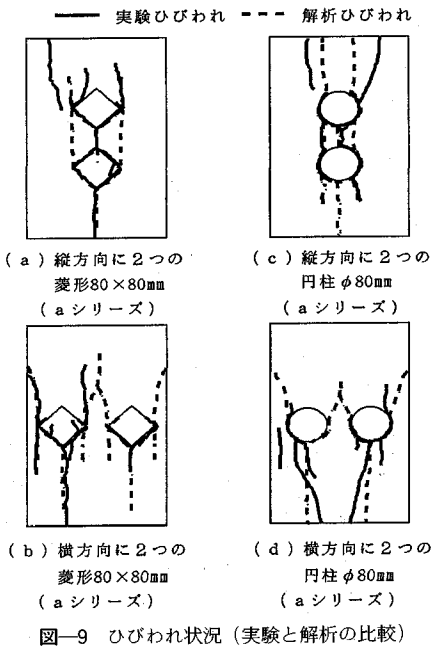


表-5 圧縮強度(実験と解析の比較)

モデル骨材の寸法・形状	モデル骨材の配列	骨材表面の付着条件					
		aシリーズ(kgf/cm <sup>2</sup> )			bシリーズ(kgf/cm <sup>2</sup> )		
		実験値	解析値	p1/p2	実験値	解析値	p1/p2
円柱φ80mm	○	208	202	1.03	217	210	1.03
	○	192	186	1.03	201	210	0.96
	○○	207	194	1.07	212	214	0.99
	○○	199	175	1.14	—	—	—
	○○	197	181	1.09	—	—	—
	○○	203	188	1.08	—	—	—
円柱φ150mm	○	191	189	1.01	209	208	1.00
	○	175	160	1.09	218	210	1.04
菱形80×80mm	◇	197	194	1.02	215	208	1.03
	◇	172	180	0.96	—	—	—
	◇	156	165	0.95	—	—	—
菱形150×150mm	◇	154	166	0.93	176	166	1.06
	◇	121	125	0.97	—	—	—
骨材無し		215	218	0.99	—	—	—

界面の付着が実際の状態より少し弱く、モデル骨材の下部境界面において低荷重域でモデル骨材と母材コンクリートとがずれを生じるためと考えられる。

② ひびわれ状況

図-9(a)に示す縦方向に二つのaシリーズの80×80mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体の場合では、特に下部のモデル骨材において、上部のモデル骨材の下部頂点から下部のモデル骨材の上部頂点までにひびわれが発生することによって、両側のボンドクラックが上部境界面の頂点まで進展する傾向が、解析結果と実験結果で一致した。図-9(b)に示す横方向に二つのaシリーズの80×80mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体の場合では、骨材の両側のボンドクラックからのひびわれの進展状況、および骨材の下部頂点から下方へのひびわれの進展状況が、解析結果と実験結果で一致した。

図-9(c)に示す縦方向に二つのaシリーズのφ80mmの円柱モデル骨材を用いた供試体の場合では、特に下部のモデル骨材において、上部のモデル骨材の下部から下部のモデル骨材の上部までひびわれが進展することによって、両側のボンドクラックが上部境界面へ進展し、最後に、上部のモデル骨材下部のひびわれと下部のモデル骨材両側のボンドクラックがつながる状況が、解析結果と実験結果で一致した。図-9(d)に示す横方向に二つのaシリーズのφ80mmの円柱モデル骨材を用いた供試体の場合では、モデル骨材の下部にある空隙によって生じるひびわれの傾向、およびモデル骨材の内側よりむしろ外側のボンドクラックから上部の母材コンクリートにひびわれが進展する傾向が、解析結果と実験結

果で一致した。

③ 圧縮強度

表-5に各供試体の圧縮強度の解析値と実験値との比較を示す。aシリーズのモデル骨材と母材コンクリートとの境界面の付着状態が弱い供試体は、モデル骨材を持たない供試体に比べて圧縮強度が低下し、その低下の割合はφ80mmの円柱、φ150mmの円柱、80×80mmの菱形、150×150mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体の順で大きくなることは解析的にも明らかとなった。そして、同じ寸法、形状のモデル骨材を用いた供試体では、モデル骨材の個数の増加に伴い、供試体の圧縮強度が低下することも解析結果と実験結果で一致した。また、bシリーズのモデル骨材と母材コンクリートとの境界面の付着状態が強い供試体では、円柱及び80×80mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体は圧縮強度がほとんどモデル骨材の影響を受けないが、150×150mmの菱形のモデル骨材を用いた供試体は、明らかに圧縮強度が低下することは解析結果と実験結果で一致した。

4. 結 論

本研究で得られた結果を要約すると、以下のようなる。

- (1) 単一のモデル骨材を用いた供試体に対して、複数のモデル骨材を用いた供試体の場合では、モデル骨材の個数の増加に伴い、各モデル骨材の下部にある空隙によって生じるひびわれがにつながり、供試体の圧縮強度が低下する。そして、その低下の割合は、φ80mmの円柱、φ150mmの円柱、80mm×80mmの菱形、150mm×

150 mm の菱形のモデル骨材を用いた供試体の順に大きくなることが実験および解析により明らかとなった。これは、実際のダムコンクリートにおいて、 $G_{max}$  が 150 mm 程度の骨材を使用することによる圧縮強度の低下を示しており、特に碎石による低下の割合が大きいことを示唆している。またウェットスクリーニングによって  $G_{max}$  の大きい粗骨材を除いて圧縮強度試験を行うことは、実際の圧縮強度を過大評価する可能性があることも示していると言えよう。

(2) 円柱のモデル骨材を用いた供試体に比べて、菱形のモデル骨材を用いた供試体のように骨材下部の 45° の傾きを持つ境界面にある空隙の方が、コンクリートの圧縮強度低下に及ぼす影響が大きいことが実験および解析により明らかとなった。

(3) ブリージングによって円柱のモデル骨材下部に生じる空隙は、中心角  $\theta=90^\circ$  程度の範囲であり、骨材表面にグリースを塗布した状態と同様のほとんど母材コンクリートと摩擦がない程度の空隙となることが、実験と解析により判明した。

(4) 本研究で用いた有限要素解析手法により、複数モデル骨材を用いた供試体に対して、ブリージングによるモデル骨材下部の空隙がひびわれ性状や圧縮強度に及ぼす影響を十分な精度で予測することが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 岩崎訓明・富山泰全：セメントペースト—骨材界面の結合・破壊機構と強度，セメント技術年報，第 30 巻，pp. 354~357，1976 年。
- 2) 鈴木銃也・富山泰全：骨材とペーストの付着について，セメント技術年報，第 30 巻，pp. 351~353，1976 年。
- 3) 川上英男・岡田徳一：骨材岩質が付着性状及びモルタル強度に及ぼす影響，セメント技術年報，第 37 巻，pp. 120~123，1983 年。
- 4) 森野奎二・山口典良・内藤幸雄：各種岩石骨材とセメントペーストとの付着性状：コンクリート工学年次講演会講演論文集，第 2 巻，pp. 93~96，1980 年。
- 5) 爾見軍治・嶋谷宏文：コンクリート用骨材の破砕値とコンクリートの強度，セメントコンクリート，第 235 号，1966 年 9 月。
- 6) 爾見軍治・嶋谷宏文：骨材の強度とコンクリート強度の関連について，セメント技術年報，第 21 巻，pp. 321~325，1967 年。
- 7) 榎場重正・宮北 啓・斎藤 満・佐伯繁樹：コンクリートの破壊機構に関する基礎的研究，セメント技術年報，第 28 巻，pp. 197~201，1974 年。
- 8) 榎場重正・斎藤 満・宮北 啓・今井 悟：コンクリートの破壊機構に関する基礎的研究，セメント技術年報，第 30 巻，pp. 366~369，1976 年。
- 9) 小阪義夫・谷川恭雄・太田福男：モデル骨材コンクリートの力学性質におよぼす粗骨材間隔の影響，セメント技術年報，第 27 巻，pp. 212~216，1973 年。
- 10) 小阪義夫・谷川恭雄・太田福男：各種の骨材を用いたコンクリートの力学特性，セメント技術年報，第 27 巻，pp. 238~242，1973 年。
- 11) 小阪義夫・谷川恭雄・太田福男：コンクリートの破壊挙動におよぼす粗骨材の影響（第 1 報：モデル解析法による検討），日本建築学会論文報告集，第 228 号，pp. 1~11，1975 年 2 月。
- 12) 小阪義夫・谷川恭雄：コンクリートの破壊挙動におよぼす粗骨材の影響（第 2 報：マイクロクラック観察法による検討），日本建築学会論文報告集，第 231 号，pp. 1~11，1975 年 5 月。
- 13) 田沢栄一・南 和孝・岡本修一・西川 毅：ブリージングを想定したモデルコンクリートの圧縮破壊性状，コンクリート工学年次論文報告集，第 9 巻 1 号，pp. 133~138，1987 年。
- 14) 安藤兼治・杉本忠男・梅原秀哲・吉田弥智：ダム用コンクリートの強度特性に及ぼす粗骨材の影響，コンクリート工学年次論文報告集，第 11 巻 1 号，pp. 41~46，1989 年。
- 15) 安藤兼治・張 劍・梅原秀哲・吉田弥智：粗骨材がダム用コンクリート強度特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，第 12 巻 1 号，pp. 721~726，1990 年。
- 16) 前川宏一：鉄筋コンクリート用解析プログラム「COMM 2」，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp. 79~86，1983 年 10 月。  
(1992. 2. 3 受付)

## EFFECTS OF COARSE AGGREGATE ON COMPRESSIVE STRENGTH OF DAM CONCRETE

Hidetaka UMEHARA, Jian ZHANG, Minoru UEDA and Hiroto YOSHIDA

The effects of the voids caused by bleeding under the bottom of coarse aggregates to the mechanical behavior such as cracks and compressive strengths were investigated in dam concrete with coarse aggregates of less than 150 mm of maximum size. Rectangular concrete specimens which have several model aggregates made by mortar with the shape of circle and rhombus were tested in order to grasp the behavior of cracks and compressive strengths. In addition to the experimental study, the analysis using finite element method also was conducted for verifying the results of experiments. It has been cleared that the voids under the aggregates of large size deteriorate the compressive strengths in dam concrete greatly.