

論文

[1123] 粗骨材がダム用コンクリート強度特性に及ぼす影響

正会員 ○安藤兼治 (中部電力電力技術研究所)
 正会員 張 剣 (名古屋工業大学大学院)
 正会員 梅原秀哲 (名古屋工業大学工学部)
 正会員 吉田弥智 (名古屋工業大学工学部)

1. まえがき

コンクリートへの骨材の影響に関する研究はこれまでに数多くなされているが、そのほとんどがGmax(粗骨材の最大寸法)が40mm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Gmaxが40mm以上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強度試験が行われているが、Gmaxが40mm以上の場合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、40mm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れたコンクリートの品質が、実際のダムコンクリートの品質と相違していると思われる。

そこで、これまでに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、40mm以上のふるいでウェットスクリーニングを行うと、Gmaxが150mm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ことが明らかとなった。¹⁾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面の空隙の影響が考えられた。

本研究では、ブリージングによって生じる粗骨材下面の空隙や粗骨材とモルタルとの付着面に発生するひびわれなどのコンクリート内部の挙動を把握するために、母材コンクリートとGmaxが40mm以上のモルタル製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、形状および母材コンクリートの単位水量を変化させることにより、これらの要因がコンクリート内部の挙動やコンクリート強度に及ぼす影響を実験的に検討するとともに、有限要素法を用いた解析を行うことによりコンクリート内部の挙動を解析的に明らかにすることを目的とする。

2. 実験の概要

2.1 実験方法

実験では、モデル骨材の寸法、形状及び母材コンクリートの単位水量の変化が、ブリージングによって生じるモデル骨材下面の空隙やモデル骨材と母材コンクリートの付着に与える影響について、コンクリート内部の力学的挙動を中心に検討を行った。母材コンクリート中にモデル骨材を1個埋め込んだ供試体について、図-1に示すようにモデル骨材の表面、モデル骨材と母材コンクリートとの付着面及び周囲の母材コンクリートにひずみゲージを貼り、圧縮強度試験を行った。

2.2 供試体の作製

供試体の形状とモデル骨材の位置を図-2に示す。モデル骨材(φ40, φ80, φ150 および立

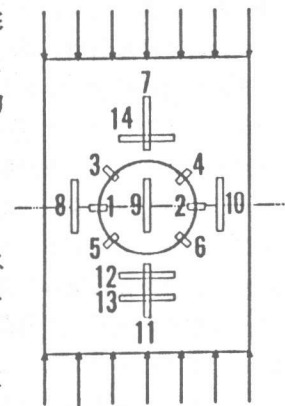


図-1
ひずみゲージ位置

方体150 × 150 mm) はあらかじめモルタルにより作製した。45 × 30 × 15 cmの型枠にモデル骨材を図-2に示すように配置し、母材コンクリートを打設することによって供試体を作製した。なお、モデル骨材形状は有限要素法による解析が二次元であることを考慮して、図-2に示すように球状ではなく円柱状とした。母材コンクリートの配合は、ブリージングの影響が単位水量と関係があることを考慮して、単位水量を大、小の2種類とし、またモデル骨材から破壊しないように、モデル骨材の方が母材コンクリートよりも十分な強度をもつように配慮した。各供試体の配合および一軸圧縮強度を表-1に示す。

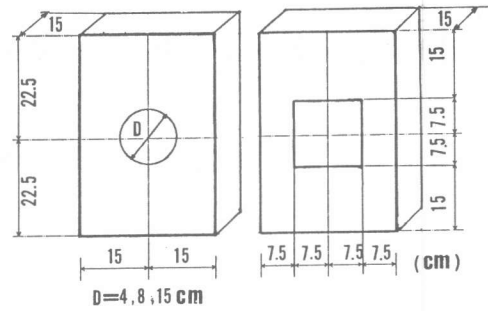


図-2 供試体寸法

表-1 配合及び一軸圧縮強度

	単位水量 (kg/m ³)	単位セメント量 (kg/m ³)	W/C (%)	一軸圧縮強度 (kg/cm ²)
モデル骨材	430	1430	30	470
母材コンクリート(大)	179	320	56	283
母材コンクリート(小)	153	273	56	245

2.3 载荷方法

供試体と载荷板の間には、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て载荷した。

2.4 実験結果及び考察

1) モデル骨材周囲のひずみ分布状況

図-3、図-4に一例として単位水量が大の場合で、円柱モデル骨材を用いた供試体の载荷応力とひずみの関係を示す。なお、载荷応力とは载荷荷重を供試体断面積で除したものである。図に示すように、80mm、150mmのいずれのモデル骨材を用いた供試体ともに、モデル骨材の両側のコンクリートのひずみが大きく、下部のコンクリートのひずみが上部の方よりも大きいことが明らかとなった。このような挙動を示す原因は以下のようなものである。モデル骨材下部のブリージングによる空隙のために、骨材と母材コンクリートとの境界面の付着強度が弱く、上部荷重が鉛直に伝わりにくくなることによって、圧縮応力が両側のコンクリートおよびモデル骨材下部のコンクリートに集中するためと考えられる。そして、単位水量が小の場合には、ブリージングによる空隙も小さくなるので、その傾向は弱くなることも明らかとなった。しかし、骨材の上

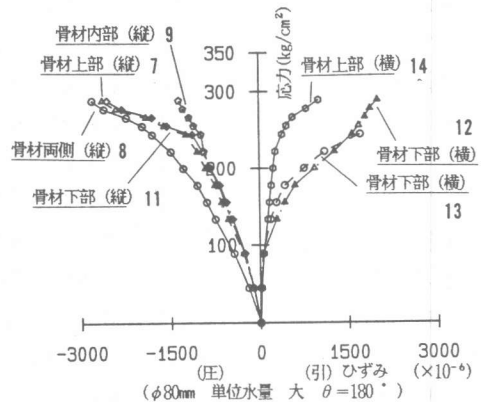


図-3 応力とひずみの関係

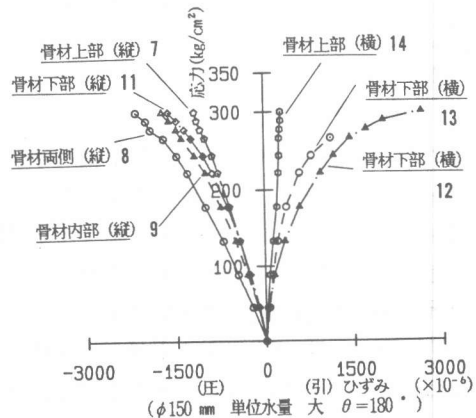


図-4 応力とひずみの関係

部と下部のコンクリートのひずみは、図に示すように 150mmのモデル骨材を用いた供試体より、80mmの方が大きいことが認められた。これは150mmの供試体の方が、モデル骨材の上下端部と母材コンクリートの接触面が水平に近くなるために、モデル骨材の上下端部に広い範囲で均一した応力が働き、特に上端部に応力集中が生じないためと思われる。

また、立方体のモデル骨材を用いた供試体では、低荷重域においてモデル骨材の下部にブリージングによる空隙があるため、両側の圧縮ひずみが大きく生じ、高荷重域になると、モデル骨材は母材コンクリートよりヤング係数が大きいため、その上下部に応力集中が発生し、上下部の圧縮ひずみが両側よりも徐々に大きくなることとなった。

2) ひびわれの発生状況

円柱のモデル骨材を用いた供試体では、表-2、図-5に示すように、低荷重域でモデル骨材両側にボンドクラック（粗骨材とモルタルの付着面に発生するひびわれを言う）が発生した。（図-5（a）-1参照）その後、荷重の増加に伴って、モデル骨材の下部の両側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。（図-5（a）-2参照）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、最後に、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。（図-5（a）-3参照）次に、モデル骨材の大きさでひびわれ状況を比較すると、80mmのモデル骨材の場合は150mmより各ひびわれの発生する荷重が小さいこと、また80mmの場合では、図-5（a）に示すようにモデル骨材下部のコンクリートのひびわれがほぼモデル骨材下部中央に発生し、150mmの場合では、図-5

（b）に示すようにモデル骨材下部中央から離れた面から発生することがわかった。また、単位水量が小の場合は表-2に示すように、ブリージングによるモデル骨材下部の空隙が少なく、単位水量が大の場合よりも境界面の付着が強いため、各ひびわれの発生する時期も遅くなることが判明した。一方、立方体のモデル骨材を用いた供試体では、単位水量が大の場合にモデル骨材の両側及び下部にブリージングによる大きな空隙が存在するため、低荷重域でモデル骨材側面にボンドクラックが発生し、その後、荷重の増加に伴ってボンドクラックが上部に進展した。一方、単位水量が小の場合には、低荷重域でほとんどひびわれが発生しなかった。

表-2 ひびわれ発生荷重の圧縮強度に対する比（%）

モデル骨材寸法	φ80mm		φ150mm	
	大	小	大	小
ボンドクラック 骨材両側 ゲージ (1)(2)	2.3	2.6	3.7	5.0
ボンドクラック 骨材斜め上 ゲージ (3)(4)	3.8	6.6	9.6	9.2
付着面のずれ 骨材斜め下 ゲージ (5)(6)	6.5	6.6	8.9	7.5
骨材下部コンクリートの 引張りひびわれ ゲージ (12)	6.5	6.6	8.1	9.6

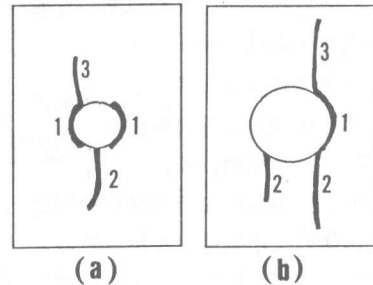


図-5 ひびわれ発生順序

表-3 供試体圧縮強度

モデル骨材の寸法及び形状	単位水量		q_1/q_2
	大 q_1	小 q_2	
円柱 φ150mm	300	267	1.1
円柱 φ80mm	290	253	1.1
円柱 φ40mm	311	249	1.2
立方体15×15cm	300	322	0.9
無	322	289	1.1
一軸圧縮強度	283	245	1.1

注) 単位 (kg/cm²)

3) 圧縮強度

各供試体の圧縮強度を表-3に示す。単位水量が大の場合、モデル骨材の無いものが最も強度が大きくなった。そして、80mm、150mmのモデル骨材を用いた供試体はモデル骨材のないものに比べ明らかに強度が低下したが、80mmの方が150mmよりも強度が少し低くなった。この原因として、粗骨材が大きくなるとブリージングによって生じる粗骨材下面の空隙により圧縮強度が低下するが、150mmの方は、ひびわれの挙動より明らかになったように、骨材の上部が水平に近いことでモデル骨材上下面の摩擦が強くなり、強度低下がおさえられることが考えられる。したがって、骨材の粒径が大きい方が圧縮強度が弱くなるとは必ずしも言えないと思われる。なお、単位水量が小さい場合もこの傾向が現れるが、ブリージングの程度が小さいことから、圧縮強度への影響が弱いものと思われる。

一方、立方体のモデル骨材を用いた供試体の圧縮強度は単位水量の大小に関わらず、円柱のモデル骨材を用いた供試体よりも大きかった。これは、空隙のある境界面が立方体のモデル骨材のように荷重方向と水平または垂直にある場合は、コンクリートの圧縮強度に与える影響が小さいが、円柱のモデル供試体のように境界面が荷重方向と斜めにある場合は、コンクリートの強度が低くなり、大きな弱点となることを意味している。

3. 解析

3.1 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²⁾ら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最大主応力方向に垂直に発生し、ひびわれ発生後は最大主応力方向の剛性を零とし、逐次計算を行うことにより解を求めている。コンクリートの各要素は、4節点の四角形要素を基本とし、モデル骨材と母材コンクリートの境界に、ブリージングによって生じた空隙を表す境界要素を考慮して解析を行った。解析モデルは図-6に示すように実験で用いた供試体をモデル化したものである。分割図の下端の拘束条件は、実験条件に合わせて中央の1節点を固定支承、その他の節点を単純支承とした。なお解析条件を表-4に示す。

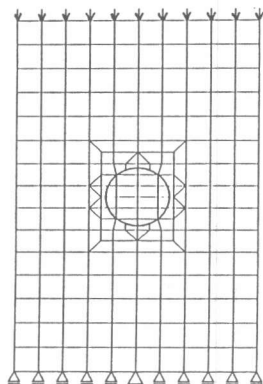
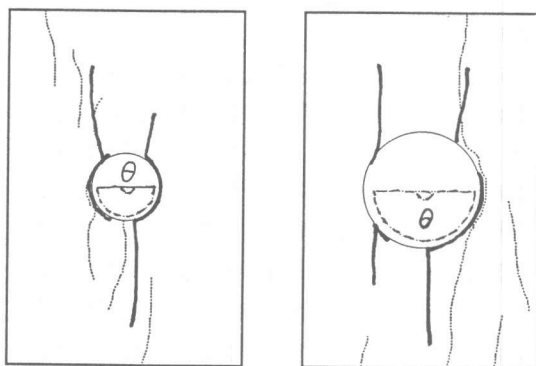


図-6 解析モデル

表-4 解析条件

問題種類	要素一辺の積分点数	最大繰り返し計算回数	モデル骨材の一軸圧縮強度	母材コンクリートの一軸圧縮強度
平面応力	2	8	500	200



(φ80mm ブリージング 大 θ=180°) (φ150mm ブリージング 大 θ=180°)

— 解析ひびわれ
 ---- 実験ひびわれ

図-7 ひびわれ発生状況
 解析と実験との比較

3. 2 境界要素

骨材と母材コンクリートとの間の力の伝達を考えると、境界面と垂直方向に圧縮力が、また境界面と平行に摩擦力が生じる。そこで本解析では、骨材下部の空隙の位置に一種のバネモデルである境界要素を使用した。単位水量の大小によって、ブリージングによる骨材下面の空隙の長さを変化することから、境界要素の長さを変化させた。なお、この長さを図-7に示すように、骨材中心角 θ で表した。そして境界要素に作用する摩擦力と圧縮力をプログラムでは以下のように表すことにした。

$$\text{摩擦力} = \begin{cases} A \times \text{ズレ} & (\text{圧縮量} \geq 0) \\ 0 & (\text{圧縮量} < 0) \end{cases}$$

$$\text{圧縮力} = \begin{cases} B \times \text{圧縮量} & (\text{圧縮量} \geq 0) \\ 0 & (\text{圧縮量} < 0) \end{cases}$$

この関係式を用いて解析を行うため、変数A (kg/cm)、B (kg/cm)を実験結果と解析結果との比較により次のように仮定した。変数Aはモデル骨材と母材コンクリートとの付着の程度を表す係数で、単位水量が大の場合は3000kg/cm、小の場合は5000kg/cmの値を用いた。一方、変数Bはモデル骨材と母材コンクリートとの剛性の比率によって定まる係数で、単位水量の大小にかかわらず一定の値 3×10^5 kg/cmを用いた。

3. 3 解析結果および考察

1) ひずみ分布およびひびわれの発生状況

図-8、9にそれぞれ、80mmと150mmの円柱モデル骨材を用いた母材コンクリートの単位水量が大

の場合における載荷応力とひずみの関係の解析値と実験値との比較を示す。80mm、150mmのいずれの場合も圧縮ひずみは実験値と解析値が同じ傾向を示した。また引張りひずみについては、載荷応力が同じ場合、解析値の方が実験値よりも大きな値を示した。これは、実験では70mmのゲージを用いてひずみを測定したため、ひびわれ位置でのひずみが平均化されたことが原因と考えられる。しかし、ブリージングによって生じた骨材下部の空隙の影響で骨材下部では大きな引張りひずみを生じる傾向は実験および解析で一致した。ブリージングによって生じた骨材下部の空隙境界面の弱い付着の影響を受けて大きくなることも実験と解析で一致した。

図-7に実験および解析で得られたひびわれの状況の比較を示す。図に示すように、解析では

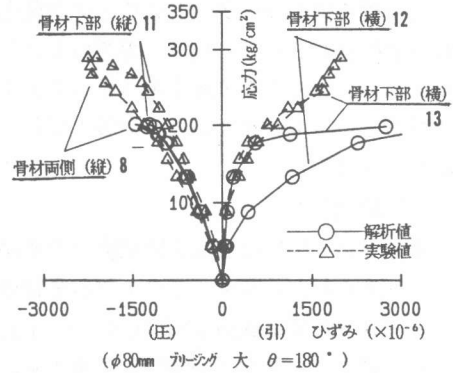


図-8 応力とひずみの関係
解析と実験との比較

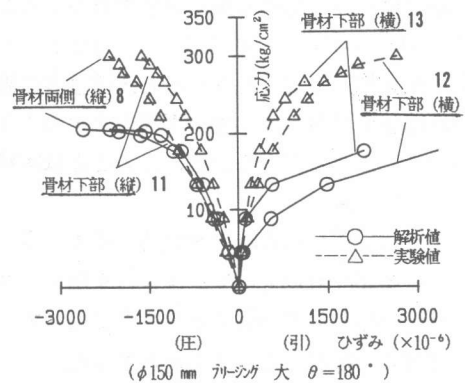


図-9 応力とひずみの関係
解析と実験との比較

表-5 供試体圧縮強度 (解析)

モデル骨材の寸法及び形状	ブリージングの角度				
	0°	40°	80°	135°	180°
無	2.58				
φ4.0mm	2.58	2.53	2.53	2.42	2.42
φ8.0mm	2.53	2.47	2.40	2.09	2.02
φ15.0mm	2.53	2.47	2.27	2.09	2.09
15×15cm	無	小	中	大	
	2.53	2.51	2.38	2.16	

注) 単位 (kg/cm²)

先に骨材の両側面にボンドクラックが発生し、その後骨材下部中央から母材コンクリートにひびわれを生じた。そして最後に両側のボンドクラックが上方へ進展し母材コンクリートにひびわれが生じた。単位水量の大小を考慮してブリージングの長さを表す角度 θ を 80° から 180° に変化させると、以上の現象がより顕著となり、さらにひびわれの幅も増加した。これらのことも実験結果と一致した。

2) 圧縮強度

表-5には解析による圧縮強度を示すが、モデル骨材の無い供試体の方が圧縮強度が大きいことが認められた。なお、そのモデル骨材の形状が一辺15cmの立方体の場合のブリージングの長さは、「大」が骨材底面と両側面に、「小」が骨材底面に、「中」はその中間に及んでいること、「無」はブリージングが無いことを示す。モデル骨材のある供試体では、ブリージングによって生じる空隙の長さが増加することによる骨材と母材コンクリートとの付着力の減少に伴って、圧縮強度が減少することが明らかとなった。また、80mmと150mmのモデル骨材を用いた供試体は、40mmの供試体に比べて圧縮強度が減少することが明らかとなった。次に、空隙の長さを表す角度 θ を 40° から 80° および 135° から 180° へ変化させても圧縮強度の減少は顕著に現れず、 θ を 80° から 135° に変化させると圧縮強度の減少が著しくなることがわかった。この現象は供試体の圧縮強度に対しては骨材下部の水平および垂直方向の空隙の影響が小さく、斜めの空隙の影響が大きいためと考えられる。このことは実験の結果と一致した。

4. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- ① 粒径が80mm以上のモデル骨材を用いたコンクリートは、骨材下部にブリージングの影響により空隙が生じ付着が弱くなることによって、骨材下部のコンクリートにひびわれを生じることが実験および解析により明らかとなった。
- ② モデル骨材下部のブリージングによる空隙は、コンクリートの圧縮強度に密接な関係があるが、骨材下部の水平および垂直方向の空隙は圧縮強度への影響が小さく、斜め方向の空隙の方が圧縮強度への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 モデル骨材を用いていない供試体は、モデル骨材を用いた供試体よりも圧縮強度が少し大きくなったが、骨材の粒径の大きい方が圧縮強度が低くなるとは必ずしも言えないことが明らかとなった。単位水量の大小が、圧縮強度に及ぼす影響は顕著に現れなかったが、単位水量の増加に伴いモデル骨材下部のブリージングによる空隙が大きくなりひびわれが早く生じるため、骨材を数個配置したものにおいては、強度が低下する可能性があると思われる。
- ④ 本研究で用いた有限要素解析手法により、ブリージングによる骨材下部の空隙がコンクリート強度やひびわれ性状に及ぼす影響を十分な精度で予測できることが明らかとなった。

今後は、モデル骨材を数個配置した供試体で実験を行うことにより、より実際に近い状態を対象として骨材の寸法、形状、および単位水量が骨材下部のブリージングによる空隙の大きさに与える影響および骨材下部境界面の鉛直圧縮力や摩擦力に与える影響を究明したいと考えている。

参考文献

- 1) 安藤、杉本、梅原、吉田：ダム用コンクリートの強度特性に及ぼす粗骨材の影響、第11回コンクリート工学年次論文報告集、〔1004〕、1989年、pp41~46
- 2) 前川、二羽、岡村：鉄筋コンクリート用解析プログラム「COMM2」、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、1983年10月