

◆ ダム技術特集 ◆

コンクリートダムに関する最近の研究活動

吉田 等* 佐々木隆** 平山大輔***

1. はじめに

私たちの生活に必要な「衣、食、住」の3要素のうち、「衣」と「食」の面ではほぼ満足しうるレベルに達しているが、「住」の面ではなお解決すべき課題が多く残されている。日照りが続いても断水や減水を生じることなく上水が安定して供給されること、大雨が降っても住宅が浸水することなく洪水被害から守られることは、「住」の面で解決が急がれる日々の暮らしに直結する課題である。ダムは、このような課題を解決し、豊かで潤いのある国土をつくるために建設されている。

地質条件の良好でない地点にも安全で経済的なダムを建設する技術、自然環境に調和し環境を内部目的化したダムを建設する技術、既存のダムを良好な状態で維持管理し有効利用する技術などの開発が求められている。

土木研究所では、室内や原位置での調査試験、現場での試験施工、応力解析、実測解析など種々の手法を用いて、ダムの調査、設計、施工、管理に係わる調査、研究を実施している。ここでは、コンクリートダムに関して現在取り組んでいる主要な研究課題を紹介する。

2. 基礎岩盤の合理的設計法

ダムは巨大な構造物であり、基礎岩盤には貯水とともになう水圧荷重やダム堤体の自重などが作用する。基礎岩盤の地質条件が良好でない場合にも、これらの荷重に対するダムの安全性を確保するとともに貯留水が流出しないように、基礎岩盤の設計や基礎処理を確実に行う必要がある。

ここでは、基礎岩盤の強度が不足する場合の対策としての人工岩盤基礎の設計法と、ダム基礎グラウチングの効率化を目的とした透水性試験の合理化に関する研究事例を紹介する。

(1) 人工岩盤基礎の設計法

基礎岩盤は、堤体を通して基礎岩盤に伝えられる貯水圧などの荷重に対して十分なせん断抵抗力を必要とする。せん断強度が小さい岩盤上に重力式コンクリートダムを建設する場合には、堤体の

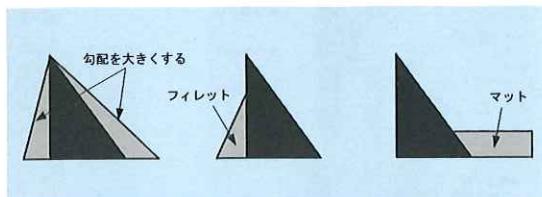


図-1 堤体形状によりせん断抵抗力を増加

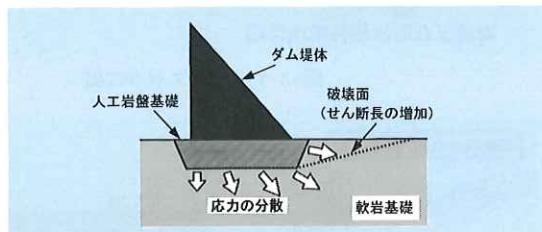


図-2 人工岩盤基礎の概念

滑動が懸念される。その対策としては、ダム堤体での対応と基礎岩盤での対応の2つがある。

ダム堤体での対応としては、たとえば図-1に示すように、上下流面勾配を大きくすること、あるいは上流側のフィレットや下流側のマットを設けることなどの方法がある。これらは、堤体断面を大きくすることにより、せん断面の長さを長くするとともに、せん断面に働く垂直力を増加することをねらいとしている。

一方、基礎岩盤での対応としては、岩盤の一部に断層等の弱部が存在する場合に、これを掘削除去しコンクリートで置き換えることにより岩盤のせん断強度の増加を図る方法がある。

現在検討を進めている人工岩盤基礎とは、基礎岩盤での対応の一つであり、図-2に示すように岩盤全体が軟質な場合に、基礎岩盤を掘り下げて人工材料で置き換える方法である。

この場合、せん断破壊は堤体と人工岩盤との間で生じるのではなく、人工岩盤と軟質な基礎岩盤との境界で生じる。このため、結果的にせん断長さが長くなることをねらいとしている。

図-1のマットあるいはフィレットはダム堤体として取り扱うため、引張破壊することは許されず、また、ダムコンクリートとして必要な強度や水密性、耐久性を満足する必要があり、設計、施工上の制約条件が多い。一方、人工岩盤基礎は岩

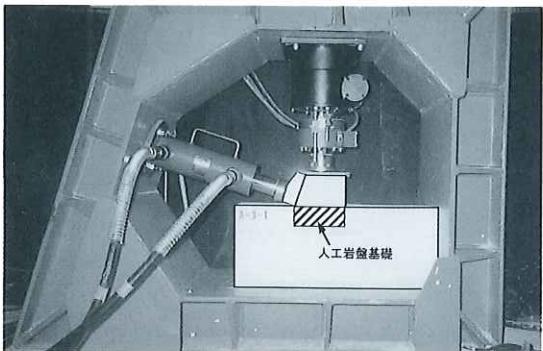


写真-1 人工岩盤基礎室内模型実験

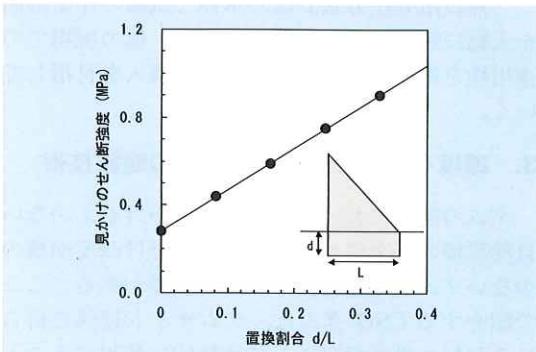


図-3 置換深さとせん断強度の関係

盤として取り扱うため、岩盤としての所要の要件を満足するものであれば、たとえば貧配合コンクリートなどの利用が考えられる。また、堤体コンクリートに比べて施工が簡略化できるなど、経済的な面で有利となる可能性がある。

人工岩盤基礎は、これまで実施事例がほとんどなく、人工岩盤基礎の設計手法を確立する必要がある。現在、人工岩盤基礎の形状や規模が基礎岩盤のせん断強度の増加に及ぼす効果を明らかにするため、模型実験(写真-1)と数値解析による検討を行っている¹⁾。

図-3は、模型実験の結果の一例で人工岩盤基礎の深さと見かけのせん断強度(人工岩盤基礎を施工することにより得られるせん断抵抗力をダム堤体底面でのせん断強度に換算したもの)の関係を示したものであるが、人工岩盤基礎の深さが大きいほど、見かけのせん断強度が増加していることが分かる。

今後、人工岩盤基礎の設計、施工方法についての検討を進め、設計方法の確立を目指していく。

(2) グラウチング作業時間の短縮化を目指した簡易透水試験の検討

ダムの基礎岩盤は、貯水機能を果たすとともに、浸透破壊を防ぎダムの安全性を損なわないように

十分な遮水性を有していなければならない。基礎岩盤内に難透水性ゾーンを形成するために、岩盤内の亀裂にセメントミルクを注入する作業をグラウチングと呼んでおり、ダムの止水工法として一般的に用いられている工法である。

近年、地質条件が複雑化するに伴い、基礎岩盤グラウチングの施工数量が増加し、費用が増大化する傾向にあり、コスト縮減が強く望まれている。グラウチングのコスト縮減を図るために、施工範囲の規模縮小や改良目標値の緩和など設計面での合理化と、効率的な注入が可能な注入工法の開発や施工時間の短縮など施工面での合理化の2つの合理化を進める必要がある。ここで紹介するのは、施工面での合理化の一環としてグラウト施工時間の短縮を目的としたものである。

グラウチングの作業は、基礎岩盤にボーリングを行い削孔した孔に、セメントミルクを注入する作業であり、通常深さ5mの区間を1ステージとして所定の深度に達するまで繰り返す。1ステージの作業は、①削孔、②孔内洗浄、③水押し試験、④グラウト注入、⑤だめ押しの5つのプロセスからなっている。このうち、③の水押し試験に着目して、施工時間短縮化の可能性を検討している。

水押し試験は、グラウト注入に先だってボーリング孔を利用して行われる透水試験の一つであり、グラウチングによる止水性の改良状況の確認と、追加孔の必要性を判断することを目的としている。その方法は図-4(1)に示すように、段階的に注入圧力を変化させ流量を計測する「段階昇圧方式」(以下、「段階水押し試験」という)を採用しているため、高い注入圧力で実施される岩盤深部の改良においては圧力段階数が多くなり、試験に長時間を要している(なお、この方式では、注入圧力(図-4の有効圧力)が0の時も一つの段階と捉え、流量の安定を確認している)。

そこで、注入圧力段階を設けない「無段階昇圧方式」による水押し試験(以下、「無段階水押し試験」という)の試験をダムの現場で行い、従来の段階水押し試験と比較することにより、基礎岩盤の透水性の評価が可能であるかを検討した。この方式は図-4(2)に示すように、水押し試験の昇圧過程で流量を連続的に測定し岩盤の透水性を評価するもので、水押し試験時間の大幅な短縮が期待される。試験は、同一孔の同一ステージにおいて、従来の段階水押し試験と無段階水押し試験を行い、それぞれの試験により得られる岩盤の透水性の指標であるルジオン値(注入圧力10kgf/cm²のもと

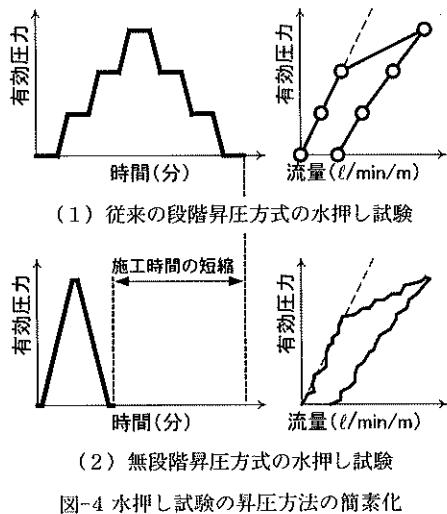


図-4 水押し試験の昇圧方法の簡素化

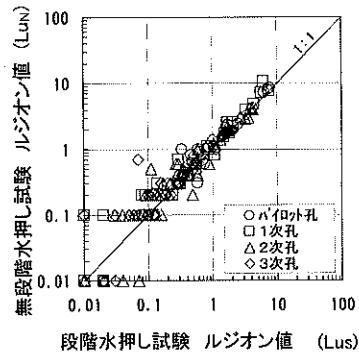


図-5 段階水押し試験と無段階水押し試験のルジオン値の比較

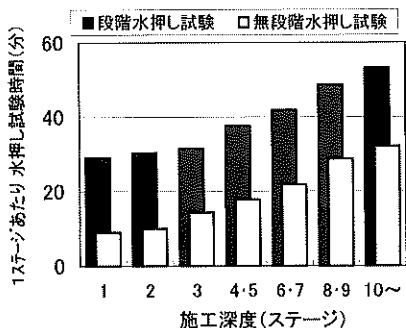


図-6 段階水押し試験と無段階水押し試験の1ステージあたり施工時間の比較

で、孔の長さ 1m あたりの毎分の注入量 [リットル/min] を比較した。図-5²⁾ にその結果を示す。

これによると、両者のルジオン値は概ね一致しており、無段階水押し試験は岩盤の透水性をほぼ正確に評価できることがわかる。また、無段階水押し試験に要した時間は段階水押し試験に要した時間より、どの深度においても 1ステージあたり

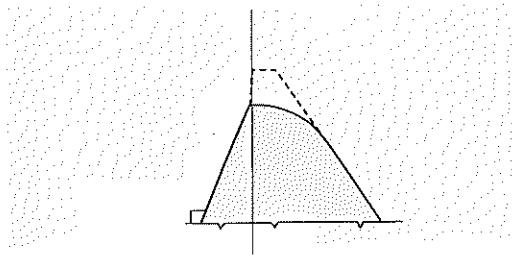


図-7 台形断面形状 (長島貯砂ダムの例)

約 20 分割減されており、時間短縮効果が極めて大きいことが分かる (図-6)。

「無段階昇圧方式」は、水押し試験の作業時間を大幅に短縮しうる可能性が高く、他の現場での適用性を確認したうえで本格的な導入を目指していく。

3. 環境を内部目的化したダムの建設技術

ダムの建設においては、周辺のかけがえのない自然環境の保全につとめ、できるだけ改変面積の少ないダム造りを目指していく必要がある。ここで紹介する CSG ダムは、ダムサイト近傍で得られる材料を堤体材料として積極的に使用することにより、ダム建設による自然環境への影響を極力少なくすることを目指した新しい型式のダムである。現在のところ、CSG ダムについてはまだ検討の緒についた段階であり、今後設計、材料、施工の各点において検討を進めていく必要があるが、ここでは今までの検討内容の概要を紹介する。

CSG ダム

CSG(Cemented Sand and Gravel) ダムとは、河床砂礫や掘削ズリなど、ダムの建設サイト周辺で容易に得られる現地発生材にセメントを簡易な方法で混合した材料 (以下、「CSG 材料」という) を堤体材料とする台形形状のダムである。

図-7 に示すように、設計面から堤体断面を台形形状とすることにより堤体内に発生する応力を小さくしている。これを材料面からみれば、堤体材料となる CSG 材料の所要強度を小さくすることが可能となるため、原材料となる岩石質材料への要求性能を低く設定することができる。たとえば掘削ズリなどの現場発生材を利用したり、廃棄岩の比率を低くすることにより材料の有効利用が可能となる。また、施工面から見れば、堤体材料である CSG 材料への要求性能が低いために、簡単な施工設備で迅速な施工が可能となる³⁾。

このように、CSG ダムは堤体材料を調達するための原石山を設けず、環境への影響を極力減ら

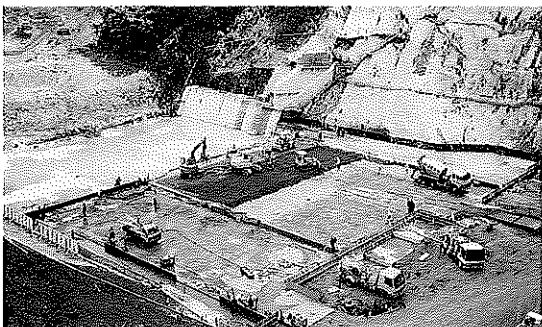


写真-2 長島貯砂ダムの施工状況

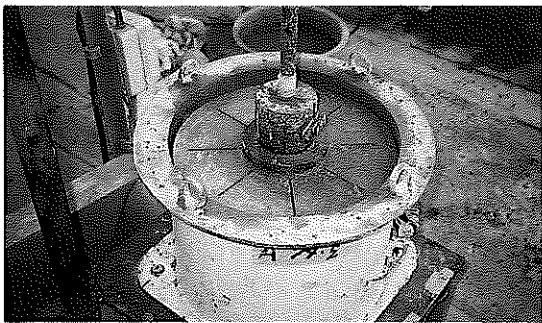


写真-3 CSG の大型 VC 試験

することを目指したダムであるが、同時に設計の合理化、材料の合理化、施工の合理化の3つの合理化をねらったダムでもある。材料調達コストの低減化や工期の短縮化、施工設備の簡略化などの面でメリットが期待されるが、一方では、堤体断面を台形形状とすることにより、従来の重力式コンクリートダムに比べて堤体積が増加するため、具体的な候補地点ごとに環境に及ぼす影響や経済性、工期の面で比較検討を行う必要がある。

永久構造物をCSG工法で初めて施工したものが、長島ダムの貯砂ダムである(写真-2)。原材料には河床砂礫を用い、これを2分級することで粒度分布の変動を抑え、品質変動の少ない十分な強度を有するダムを建設することができた⁴⁾。

CSG材料の物性は、原材料となる岩石質材料の物性に大きく左右されるため、現場ごとに材料特性に応じたダムを設計する必要がある。

現在、CSGダムの設計方法についての検討を進めるとともに、材料の粒度分布がCSG材料のコンシステンシー、締固め密度、強度に及ぼす影響を明らかにするために実験を行っている。CSG材料は単位水量、単位セメント量が少ない超硬練り貧配合の材料であり、通常のスランプ試験ではフレッシュ性状の評価が困難であるため、標準VC試験(VC試験は、コンクリートを入れたモール

ドをVC試験機の振動台上に載せて振動を与えた際に、表面にペーストが完全に浮上してくるまでの時間を測るものである。)やフルスケールの骨材を用いた大型VC試験(写真-3)等によりコンシステンシーや締固め密度を評価している。

今後、現場での材料粒度の管理方法や練混ぜなどの施工方法に関する調査、検討も同時に進めていく。

4. 施工の省人化とコストの縮減

他の土木工事と同様、ダム工事現場においても作業員の高齢化と熟練技術者の不足が顕在化している。特殊技能を要する作業、危険作業、苦渋作業ができる限り解消し、作業の省人化を進めいく必要がある。

建設コストの削減と工期短縮を図るには、ダム工事を構成している工事要素の中のどこにコストを要し、どの要素が工程上クリティカルになっているかを分析し、その要素について集中的にコストや工期の削減可能性を検討する必要がある。ここでは、施工の省人化とコストの縮減を目的として現在検討を進めている高流動コンクリートについて紹介する。

ダム用高流動コンクリートの開発

RCD工法などの合理化施工法は、ダム建設コストの削減や工期の短縮などの面で大きな成果を上げてきた。しかし、コンクリートダム内部に設置される放流管や監査廊、堤内仮排水路などの周辺には数多くの鉄筋が配置されるため、依然として多くの時間と労力を要している。

その対策として、ダム用高流動コンクリートの開発を進めている。監査廊と周辺鉄筋部を一体化したプレキャスト監査廊を導入することにより、多くのダムでコスト縮減や工期短縮の面で大きな成果を挙げているが、締固め不要の高流動コンクリートはプレキャスト監査廊や放流管を据え付けた後の底面狭隘部のコンクリート打設を効率的に行うために用いている。

宇奈月ダムでは、堤内通廊全体をプレキャスト化して打設現場での型枠や支保工及び鉄筋の組立て作業をなくすことにより、施工の省人化と本体打設の工期短縮を図っている。写真-4は、プレキャスト通廊底面への高流動コンクリートの打設状況を示す。他のダムでも、放流管などの鋼構造物の周辺で人力での締固めが困難な部位のコンクリート打設に高流動コンクリートの利用を進めている⁵⁾。

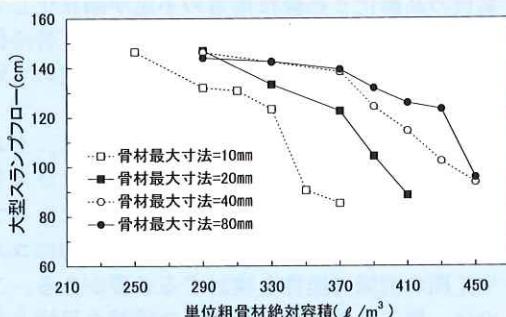


図-8 単位粗骨材絶対容積と大型スランプフローの関係



写真-5 大型スランプフロー試験

現在、高流動コンクリートの適用範囲をさらに広げ、ダム堤体自体を締固め不要の高流動コンクリートで施工することを目指した検討を行っている。

ダム堤体はマスコンクリートであるため、ダム用高流動コンクリートは、単位セメント量を低減することにより発熱量を抑制したうえで高い流動性と自己充填性を有するものでなければならない。そのため、このような高流動コンクリートの配合について検討を進めている^{6),7)}。具体的には、通常の土木構造物用高流動コンクリートの骨材最大寸法は25mm程度であるが、現在、骨材最大寸法を40mm~80mm程度に大きくしたコンクリートの流動性や充填性について実験を行っている。

図-8は単位粗骨材絶対容積(コンクリート1m³当たりの粗骨材量)と大型スランプフロー(写真-5、内径300mm、高さ600mm用の試験容器を使用)の関係を示したものである。良好な流動性を示すとされる所定のスランプフロー130cm程度を得るには、骨材最大寸法が大きいほど粗骨材量を多くすることができることがわかる。すなわち、粗骨材量を多くすることによりセメント使用量を減らすことができ、発熱量を抑制することができると考えられる。また、ダムの施工現場における大型模型を使用した打設試験^{8),9)}により、データの蓄積がなされてきている。

今後、ダム建設工事の省人化とコストの縮減を目指して、ダム用高流動コンクリートの技術開発をさらに進めていく。

5. ダムの耐震性評価手法の高度化

1995年1月に発生した兵庫県南部地震をはじめとして、日本においてこれまで地震により安全性に関わるような被害を受けたダムはない。しかし、人口稠密なわが国においては、万一にもダムに重大な被害が生じることは許されず、地震時の耐震安定性の確保に万全を期さなければならない。このため、地震動の特性、堤体材料の動的特性、ダムの動的解析手法および耐震性評価手法に関する研究が必要である。

現在、ダムの耐震性をより精度良く評価するための動的解析法の研究、堤体材料であるコンクリートの地震時における強度特性の研究¹⁰⁾、振動模型によるコンクリートダムの動的挙動に関する研究などを行っている。以下に現在の研究活動の一例を紹介する。

ダム堤体模型の振動実験

現在、コンクリートダムの設計は震度法に基づいて行われている。この設計法においては、重力式コンクリートダムの堤体内に、一般に引張応力の発生を認めていない。このため、コンクリートの設計基準強度は、堤体内に生じる圧縮応力に基づいて定めている。しかし、動的応答解析等によれば、地震時にはダムの堤体内に引張応力が生じている。兵庫県南部地震後に行われたダムの耐震性評価の結果によれば、兵庫県南部地震クラスの地震動を受けてもダム堤体に働く引張応力は十分許容できる値であり、安全性に支障がないことが確認されている。

現在、ダムの耐震性評価手法の高度化を目指して、非線形動的解析法とその精度の向上に関する

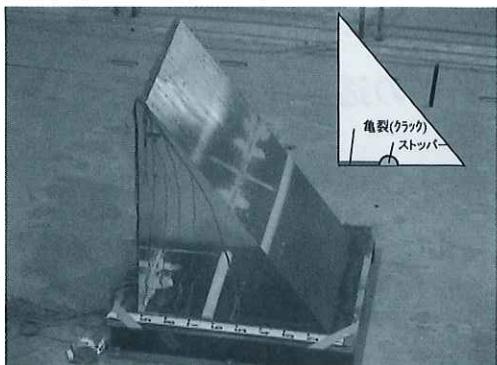


写真-6 シリコン模型による振動実験

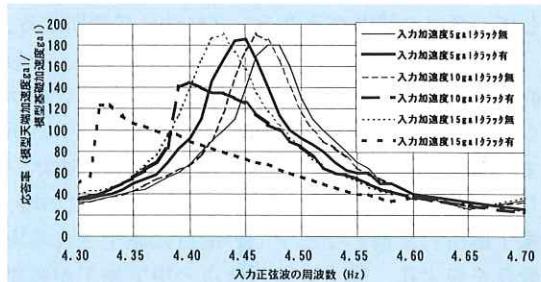


図-9 クラックの有無による応答率特性

検討を行うとともに、地震時のコンクリートダムの応答特性を把握するための模型実験を行っている¹¹⁾。写真-6は、シリコンゴム製の高さ1mのダム模型を用いた振動実験であり、模型の底部の1/3の部分にクラック（写真中、模型の左側鉛直面の底部からのクラック）をあらかじめ設けてある。図-9は、模型の頂点（堤体天端）の周波数応答特性を示したものであるが、クラックを有している模型と無い模型の振動実験結果の比較から、クラックの存在により共振周波数が低周波数側にずれること、入力加速度が大きいほどクラックが応答に与える影響が大きいことなどがわかる。

今後、模型振動実験やダム実測挙動の解析を通して、大地震時におけるコンクリートダムの安全性を合理的に評価する手法を開発していく。

6. おわりに

コンクリートダムの技術開発に関して実施中の研究活動の一部を紹介した。ダム建設が環境に及ぼす影響の最小化と、コストの縮減による経済性の追求という観点から引き続き検討を進めて行く予定である。

参考文献

- 平山大輔、吉田等、宮内茂行：置換処理工が基礎岩盤のせん断強度増加に及ぼす影響、第55回土木学会年次講演会講演概要集、Vol.III-A, 2000.9
- 吉田等、名波義昭、井川貴史、栗飯原稔：ダム基礎グラウチングにおける透水試験の合理化施工について、第31回岩盤力学シンポジウム講演集、2001.1
- CSG研究会：CSG材料を用いたダムの解析と設計方法の提案、ダム技術、No.166, 2000.7
- T. Yokotsuka, Y. Otaka, M. Kikui, T. Uesaka, I. Nagayama, H. Yoshida and T. Sasaki : Application of CSG method to construction of gravity dam, Transaction of ICOLD 20th Congress, C.14, Vol.IV, 2000.9
- 永山功、真下和彦、稻留裕一、佐藤健一、赤坂雄司：宇奈月ダムにおける通廊のプレキャスト化施工、コンクリート工学、Vol.33, No.8, 1995.8
- 永山功、渡邊和夫、町田宗久、新井博之：粗骨材最大寸法が高流動コンクリートの流動性に与える影響、コンクリート工学年次論文報告集、21-2, 1998.
- 吉田等、町田宗久、永山功、渡邊和夫、新井博之：高流動コンクリートの自己充填性に関する研究、ダム技術、No.158, 1999.11
- 飯田一彦、江幡一男、永山功、渡邊和夫、雜賀英麿：粗骨材最大寸法80mmのダム用高流動コンクリートの打設実験、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集第5部、1999.9
- 吉田等、佐々木隆、町田宗久：ダム用高流動コンクリートの現地試験、土木技術資料、41-12, 1999.
- 永山功、佐々木隆、波多野政博：載荷速度がコンクリートの引張強度に及ぼす影響、ダム技術、No.148, 1999.1
- 金子裕司、吉田等、佐々木隆、波多野政博：振動台実験による重力式コンクリートダムの非線形振動特性に関する検討、第55回土木学会年次講演会講演概要集、Vol.I-B, 2000.9

吉田 等*



国土交通省土木研究所ダム部
ダム構造研究室長
Hitoshi YOSHIDA

佐々木隆**



同 ダム構造研究室
主任研究員
Takashi SASAKI

平山大輔***



同 ダム構造研究室研究員
Daisuke HIRAYAMA