

流砂による河川構造物の耐摩耗性材料 に関する研究

A RESEARCH ON ABRASION RESISTANCE MATERIAL TO SEDIMENT LOAD FOR STURAUUCURES ON RIVER

新井宗之¹・三ツ井達也²・和泉彰彦²
Muneyuki ARAI, Tatsuya MITSUI and Akihiko IZUMI

¹正会員 博士(工), 博士(農) 名城大学准教授 理工学部建設システム工学科 (〒468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口1-501)

²正会員 徳倉建設株式会社 技術環境部 (〒460-8615 愛知県名古屋市中区錦三丁目13-5)

This paper describes an abrasion resistance material of the hydraulic structures by the flow with sands. Concrete is generally used for the material of these structures. The reason is that it is excellent in the economy and the workability. However, when a lot of sand is contained in the flow of the river, the damage of the structure becomes a big problem. Here, it is shown that cement including the polymer has a characteristic of abrasion resistance. It is useful for abrasion resistance if the polymer is included 0.5 or more of the cements compared with weight. Especially, if 0.75 or more is included, the polymer has a character of very excellent abrasion resistance. These were experimentally clarified. Moreover, some materials were examined in an actual river. The results have proven the characteristic of the material by the experiments.

Key Words : *Abrasion resistance material, Hydraulic structure, Cement with polymer, Damaged structure by flow with sediment*

1. はじめに

河川構造物の材料は、圧縮強度や剛性、耐腐食性、耐火性、および経済性や施工性に優れたコンクリート材料が広く用いられている。しかし、山地河川など流砂の多い場所では流砂によるコンクリート材料の摩耗が無視しえない場合がある。また、排砂用の水路においては、トンネルのインバート部で数十センチ以上も摩耗してしまうことも報告されている¹⁾。

コンクリート材料の摩耗に関する研究は、道路舗装におけるコンクリート材料の摩耗の問題もあり比較的多くの研究がある。衝撃作用によるコンクリート材料の摩耗については、戸川・中本²⁾、小柳ら^{3),4)}、豊福ら^{5),6)}の研究がある。排砂に伴う摩耗・損傷に関する研究としては、石橋⁷⁾、柏井ら⁸⁾の研究がある。また、砂礫による摩耗に関する研究は小玉ら⁹⁾の研究、粒子の壁面衝突による摩耗量のモデル化に関する新井ら^{10),11)}、大野・林¹²⁾の研究がある。さらに、農業用コンクリート水路を念頭に置いた水路摩耗に関する石神・渡嘉敷ら^{13),14),15)}の研究がある。砂防堰堤などの構造物の摩耗に関しては堀内^{16),17)}などの研究がある。耐摩耗性コンクリート材料の研究とし

ては、おもに高強度材料の開発研究が多くなされている^{18)~27)}。

以上のように、流砂によるコンクリート材料に対する耐摩耗性材料としては、高強度の材料を開発することが主要な目的であると考えられる。このため、モルタルの強度を高めるとともに、炭素繊維等の混入により非常に高強度の材料が開発された。しかしながら、流砂などによる固体粒子の衝突によるコンクリート材料などの摩耗には、高強度だけでは必ずしも十分抗しきれていない面がある。

本研究では、材料の有する特性の中で材料自身の弾性特性を考慮した衝突粒子の運動エネルギーを吸収・緩和させて耐摩耗性を検討したものである。

2. 粒子衝突摩耗

河川での水理構造物におけるコンクリート材料等の摩耗において、その摩耗機構としては4つの要素が考えられる。つまり、(1)粒子衝突による壁面材料の剥離、(2)粒子の壁面接触移動による壁面の剥離・損傷、(3)流体の作用力による壁面突起部の剥離、(4)融解等による化

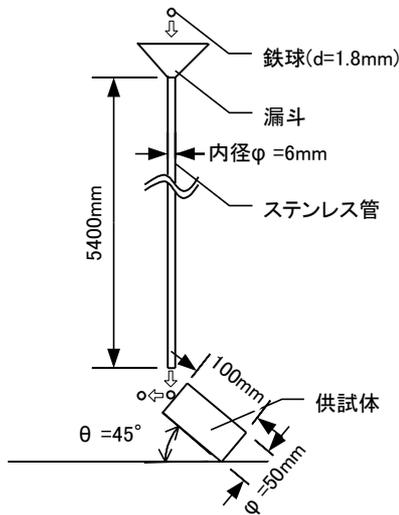


図-1 粒子衝突摩耗実験概念図

学反応による壁面の損傷である。実際の河川では、これらが複合して摩耗をもたらしていると考えられるが、ここでは(1)の比較的小粒子の砂礫程度の粒子衝突による摩耗を扱うものとする。

球形粒子が平面に衝突し、 t_{δ} の壁面接触時間で衝突する場合、その前後の運動量の変化によって生じる力が、衝突する粒子の接触面に相当する部分を剥離するものとする。1粒子の衝突による剥離量(体積)は次のように表わされる^{10),11)}。

$$\Delta V = \frac{1}{72} \pi d^5 \left(\frac{C_D \cdot \rho_s}{\tau_c \cdot t_{\delta}} \right)^2 (1 - e)^2 v^2 \quad (1)$$

ここに、 ΔV : 1粒子衝突による壁面剥離量、 C_D : 定数、 t_{δ} : 粒子の壁面衝突接触時間、 ρ_s : 粒子の密度、 e : 粒子の跳ね返り係数、 v : 粒子の壁面衝突速度、 τ_c : 壁面のせん断降伏力。

このモデルによると摩耗量は粒子の壁面衝突速度の2乗、粒子径の5乗に比例する。したがって、粒子の衝突速度や粒径は摩耗量に大きな影響を与える。また、壁面材料のせん断降伏応力は摩耗量と2乗の反比例の関係にあり、耐摩耗性材料の特性としてせん断強度を強くすることは一つの方法であることが解る。しかしながら、その他に粒子の跳ね返り係数、粒子の壁面衝突における接触時間に関係していることを示している。また、このモデルでは粒子の跳ね返り係数が大きいほど摩耗量は少なく、接触時間が長いほど摩耗量が少ないことを意味している。

3. 粒子衝突による摩耗実験

(1) モルタル材料等の基礎的摩耗実験

モルタル等の材料への粒子衝突による摩耗量の実験は次のようである。

(a) ポリマー含有モルタルの摩耗基礎実験

図-1はモルタル等の材料に鉄球粒子を衝突させて摩耗

表-1 実験材料一覧(A)

No.	EXP. No.	材料
1	A01-20N	20N/mm ² モルタル
2	A02-50N	50N/mm ² モルタル
3	A03-P25	セメント：ポリマー；1：0.25
4	A04-P50	セメント：ポリマー；1：0.50
5	A05-P75	セメント：ポリマー；1：0.75
6	A06-P100	セメント：ポリマー；1：1.00

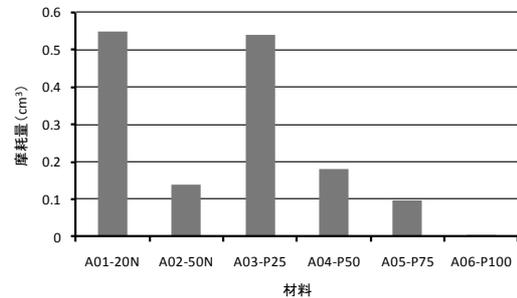


図-2 材料の摩耗

させる実験の概念図である。供試体から高さ5.4mの位置より直径 $d_{50}=1.8$ mm、密度 $\sigma=7.9$ g/cm³の鉄球を、内径 $\phi=6$ mmのステンレス管の中を落下させ供試体面に衝突させてその供試体面の摩耗量等を測定した。実験用粒子として鉄球を用いたのは摩耗量を顕著にするためである。供試体は、直径5cm、高さ10cmの円柱状の形状である。粒子の衝突する供試体面は約45°に傾けた。これは落下する粒子と供試体面で跳ね返った粒子が衝突することを避けるためである。供試体の摩耗量は、粒径 $d_{50}=0.1$ mmのガラスビーズを摩耗部分に充填しその重量を測定して摩耗した部分の体積に変換している。表-1は実験に使用した供試体の材料である。No. 1, 2はモルタルの圧縮強度をそれぞれ50N/mm², 20N/mm²の供試体であり、No. 3～No. 8はそれぞれセメントとアクリル系の高分子材(ポリマー)を重量比でそれぞれ1対0.25, 1対0.5, 1対0.75, 1対1の材料である。

図-2は鉄球粒子を50kg(約207万個)供試体に衝突させた結果である。モルタルの20Nと50Nを比較すると圧縮強度の大きい50Nは20Nのモルタルと比較すると約1/4の摩耗量である。前述の式(1)によれば50Nの材料は20Nの約1/6の摩耗量となるがほぼ材料の強度の2乗に反比例している。しかしながら高分子材料を多量に含有すると大きなひずみ量を有し、セメントだけのモルタルのような圧縮による破壊が生じなくなる。このため圧縮破壊強度としての摩耗量の比較はできないがポリマーの含有量による摩耗量の変化を示している。特にポリマーが重量比で75%以上になると摩耗量が非常に少なくなりセメントと同程度の量を含む材料では同条件で測定不能の摩耗量であることを示している。

表-2 実験材料一覧(B)

No.	EXP. No.	材料
1	B01-20N	20N/mm ² モルタル
2	B02-30N	30N/mm ² モルタル
3	B03-P25	セメント：ポリマー；1：0.25
4	B04-P50	セメント：ポリマー；1：0.50
5	B05-P75	セメント：ポリマー；1：0.75
6	B06-P100	セメント：ポリマー；1：1.00
7	B07-ARMOL	アクリル樹脂モルタル
8	B08-ACRE	アクリル系樹脂

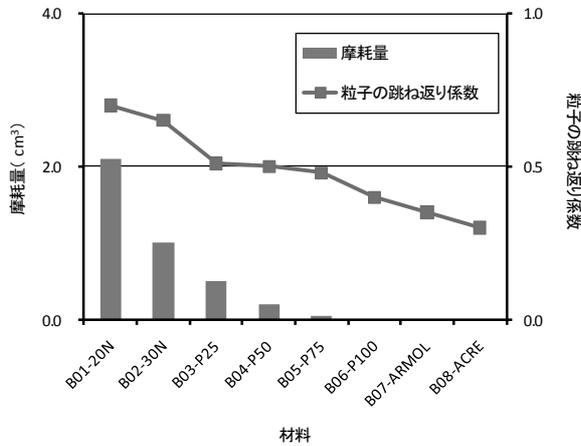


図-3 供試体の摩耗量および粒子跳ね返り係数

(b) 粒子跳ね返り係数と摩耗量

前項で述べたように高分子材を含むモルタルは耐摩耗性に優れた特性のあることが解る。そこで摩耗量と材料の特性として粒子の跳ね返り係数について検討する。実験は前述の図-1で示した装置を用いるとともに、粒子が供試体に衝突する状態を高速度CCDカメラ(フォトン製)で記録し、粒子の衝突前後の速度より跳ね返り係数を求めている。画像は5000frames/secで記録している。表-2は実験材料の一覧である。実験材料は、20N/mm²、30N/mm²圧縮強度のモルタル、セメントとポリマーの重量割合で1：0.25～1：1の4種類およびアクリル樹脂モルタルと特殊アクリル樹脂の材料を実験に供した。実験方法は前述と同じであるが衝突させた鉄球量は2倍の100kgを供試体に衝突させた。供試体の摩耗量の測定は粒径d=0.1mmのガラスビーズを摩耗部分に充填しその重量から供試体の摩耗体積を求めている。図-3は鉄球衝突後の供試体摩耗量と衝突粒子の供試体衝突前後による跳ね返り係数の関係を示している。粒子の跳ね返り係数は約100個の粒子の平均値である。この実験結果によるとこのポリマーの含有量が多いほど摩耗量が少なく、粒子の跳ね返り係数も小さくなっている。式(1)の関係は供試体のせん断強度や粒子衝突速度等が同じであれば粒子の供試体への衝突における跳ね返り係数が小さいほど摩耗量は大きくなることを示している。しかしこの実験結果は跳ね返り係数が小さいほど摩耗量も小さくなって

表-3 耐摩耗性実験材料一覧(C)

No.	EXP. No.	水セメント比 W/C	ポリマーセメント比 P/C
1	C01	1.24	0.00
2	C02	1.00	0.00
3	C03	0.75	0.28
4	C04	0.95	0.36
5	C05	0.50	0.41
6	C06	0.62	0.45
7	C07	0.30	0.45
8	C08	0.70	0.51
9	C09	0.48	0.52
10	C10	0.35	0.53
11	C11	0.40	0.60
12	C12	0.50	0.65
13	C13	0.45	0.68
14	C14	0.62	0.69
15	C15	0.50	0.74
16	C16	0.50	0.76
17	C17	0.50	0.76
18	C18	0.50	0.76
19	C19	1.00	1.29
20	C20	1.00	1.49
21	C21	1.00	1.53
22	C22	1.00	1.53

いる。式(1)の関係では粒子が供試体に衝突する接触時間とも関係しているが、ここでの実験方法では精度よく接触時間を測定することが困難である。また、ポリマーを含む供試体はモルタルだけの供試体のようなせん断破壊を生じず、20%以上もの塑性変形をする特性を有している。したがって、この実験に供しているポリマーを含有する供試体は粒子が壁面に衝突して離脱するまでの変化時間を長くする材料変形特性を有し運動量変化速度を小さくすることにより粒子の作用力を低減させることができるものと考えられる。

(2) 耐摩耗性材料の摩耗特性

セメントにポリマーを含有した材料は、大きなひずみ率を有し、それが粒子衝突時において粒子の壁面接触時間を長くすることにより粒子の衝突作用力を低減する特性を持っているものと考えられる。そこで、材料のひずみ率と圧縮強度および摩耗量との関係を求めることにする。実験に供した材料は表-3のようである。表中のポリマーセメント比(P/W)はポリマーとセメントの重量比である。P/Wは0から1.53の実験を行った。No. 1, No. 2のP/W=0はポリマーを含有せずセメントのみのモルタル供試体である。水セメント比(W/C)も水とセメントの重量比である。セメントだけの場合は一般にW/Cが小さいほど圧縮強度が大きい。図-4は圧縮強度と圧縮によるひずみとの関係を示している。図-4の(a)●印はポリマーを含まない材料の関係で、圧縮ひずみが3%位で圧縮破壊が

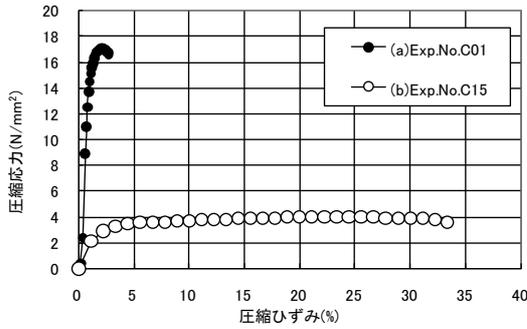


図-4 圧縮ひずみと圧縮強度の関係

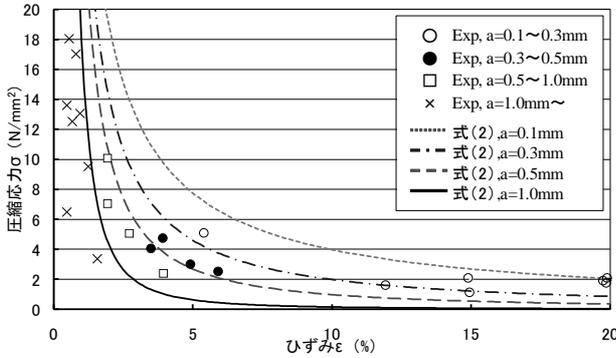


図-5 圧縮応力、ひずみ率、摩耗量の関係

生じていることを示している。図-4の(b)○印の場合は圧縮ひずみが30%を超えても圧縮によるせん断破壊は生じないことを示している。このためポリマーを含有する材料の場合は、ひずみ率が大きく変化する変曲点でのひずみ率と圧縮強度を用いるものとする。これらの材用に前節で使用した鉄球粒子を同様な実験方法で50kg衝突させた摩耗量との関係を図-5に示す。図中の実線、破線は実験結果から求めた次式の圧縮強度(N/mm²)、ひずみ率(%)および摩耗量(mm)の関係を示したもので、摩耗量がa=0.1, 0.3, 0.5, 1.0mmの場合を示している。

$$\sigma = (38.7 - 20.7 a) \varepsilon^{-0.25a+0.84} \quad (2)$$

ここに、 σ : 圧縮応力(N/mm²)、 ε : ひずみ率(%), a : d=1.8mm鉄球50kg衝突における摩耗量(mm)。また、供試体の摩耗量の実験結果を○, ■, □, ×で摩耗量を示している。ひずみ率が大きな材料は○印(0.1mm程度)のように摩耗量が小さいことを示している。特にポリマーセメント比が0.75程度以上の場合には摩耗量が非常に少なくなり、摩耗量を測定できない程度の場合もある。

以上の結果からポリマーセメント比がP/C=0.5以上、特に0.75以上になると粒子衝突による材料の摩耗量が非常に低減し、耐摩耗性に優れた材料であることが解った。これは非常に大きなひずみ率を有する材料特性が衝突する粒子の運動量変換過程での作用力を低減させる効果によるものと考えられる。

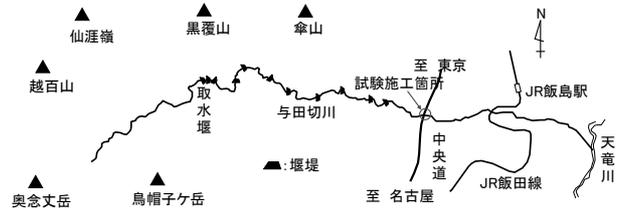


図-6 試験施工場所(与田切川)

表-4 試験施工材料一覧(D)

No.	EXP. No.	材料
1	D01-P76	セメント：ポリマー；1：0.76
2	D02-35N	早強モルタル
3	D03-UR	ウレタン系樹脂

4. 天竜川水系与田切川での現場試験

(1) 与田切川の概要と試験場所

現場実験は、国土交通省中部建設整備局天竜川上流河川事務所の協力により長野県上伊那郡飯島町の天竜川水系与田切川の河川構造物で実施した。図-6に与田切川と施工箇所位置図を示す。与田切川は流域面積42.7m²、流路延長15.9kmである。また、天竜川の合流地点において標高は約550m、源流地点での標高が約1,800mの勾配*i*=1/12.3の急流河川である。試験施工場所は天竜川の合流地点から約4.2km上流の位置で、中央高速道路の直下に位置したところにある。

(2) 試験材料および試験方法

現場試験に使用した材料は表-4のように3種類の材料を用いた。現場試験では条件が制約されるために多くの種類の材料を用いることができない。このため、コンクリートとの比較のためにモルタルだけの材料と摩耗量の少ないポリマーセメント比P/C=0.76の材料、および樹脂のみの材料を用いた。また、試験においては実用的な施工を考慮した試験も行っている。

図-7は試験施工を行った河道内の魚道の平面図である。魚道は長さ25.89m、幅3.00m、平均勾配は*i*=1/8.9で6段の石組みのプール状の魚道である。石組みの下流側に長さ10cmで水路幅にわたり試験材料を設置した。1段目と最下端の6段目にモルタルだけの材料、2段目にはP/C=0.76の材料を厚さ60mm、3段目にはP/C=0.76の材料を20mm、4段目と5段目はウレタン系樹脂のみの材料を設置した。写真-1は魚道の状況を下流の6段目から上流を映したものである。摩耗量の測定のためにそれぞれの試験材料の魚道の両側壁に基準点を設け、その基準点を結んだ直線から材料表面までの垂直距離をメジャーで測定した。材料表面の測定箇所はなるべく水流の流下する礫と礫の間を選び通常の流水でも流砂がある場所とし、それぞれの供試体で3点を選んで測定した。測定値は、3点の単純平均で評価した。

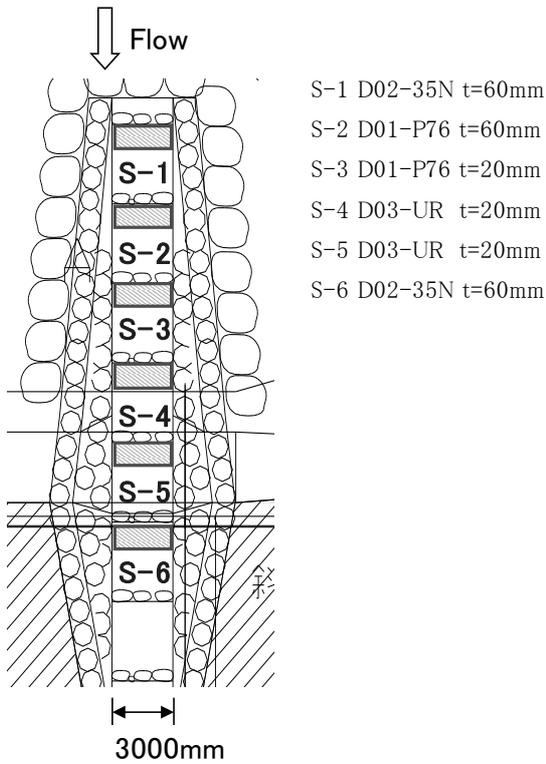


図-7 魚道形状と試験材料の配置

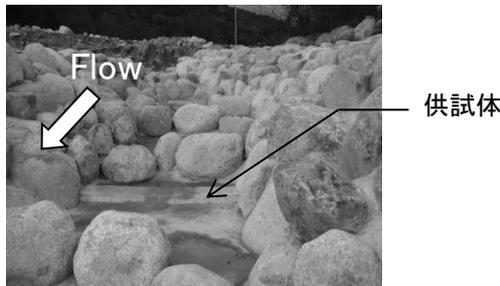


写真-1 魚道状況

(3) モニタリング結果および考察

魚道での材料設置は平成21年12月に行い186日後および357日後の測定結果を図-8に示す。横軸は試験材料を示し、縦軸は摩耗量を示している。また、摩耗量は186日後および357日後の結果を示している。魚道内への流砂量や平面的な流砂量の関係は測定できないため量的に厳密な比較は困難であるが相対的な比較検討は可能であると考えられる。

図-8の現場試験結果によるとモルタルだけの材料では375日後で、1段目の摩耗量が10.3mm、魚道下流端の6段目で9.0mmの摩耗量があった。ポリマーセメント比P/C=0.76で厚さ60mmに施工した材料は1.0mm、厚さ20mmに施工したものは4.3mmの摩耗が測定された。ただし厚さ20mmの場合は材料の厚さが薄いため一部破損した部分もありその平均を摩耗量としているため大きめな4.3mmの値を示している。樹脂のみの場合は摩耗量を測定できない程度の量でほとんど摩耗していない。

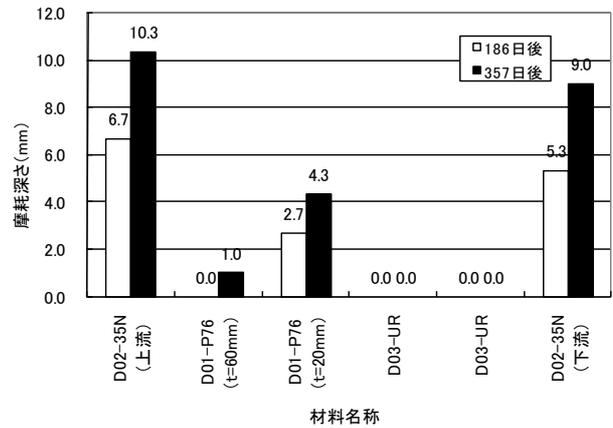


図-8 試験材料とモニタリング結果

以上のように実際の河川における現場試験においてもポリマーセメント比の含有量が高い場合には耐摩耗性に優れていることが解った。

5. 結論

流砂による河道内の水理構造物の耐摩耗材料について検討した。セメントに高分子材料(ポリマー)を含有した材料に鉄球を衝突させてその摩耗特性を詳細に検討した。

その結果、ポリマーセメント比が50%以上、特に75%以上になると耐摩耗性に優れていることが解った。これは、粒子が衝突する時の壁面材料との接触時間が長くなり粒子の衝突による作用力を低減させることによるものであることが考えられる。このことより、材料特性としてのひずみ率、圧縮応力、摩耗量の実験的關係から、大きなひずみ率を有する材料が耐摩耗性に有用であることを明らかにした。この実験的な結果をふまえて、天竜川水系と田切川で現場試験を行った。その結果からもセメントにポリマーを含有したひずみ率の高い材料が耐摩耗性に優れており、ポリマーセメント比P/C=0.75程度で30N/mm²程度のモルタルの場合の約1/10程度の摩耗量であることが解った。

しかしながら、長時間の紫外線照射や凍結融解の影響についてはまだ十分なデータが得られていない。今後の課題としたい。

謝辞

現場試験施工の実施において国土交通省中部整備局天竜川上流河川事務所、同飯島砂防出張所に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Ottavio Martini : La Galerie de Derivation de Plagnedra, Proceedings of the Workshop, International Workshop and Symposium on Reservoir Sedimentation Management, pp.79-86, 2000-10.

- 2) 戸川一夫, 中本純次: モルタル, コンクリートの表面破壊特性と衝撃摩擦特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集(282), pp. 115-125, 1979-02.
- 3) 小柳 洽, 河合 敦, 近藤 吉信: コンクリートの衝撃摩耗について, セメント技術年報41, pp. 237-240, 1987.
- 4) 小柳 洽, 六郷恵哲, 齊藤保則: コンクリートの衝撃摩耗におよぼす乾湿条件および衝撃角度について, コンクリート工学年次論文報告集11(1), pp. 265-270, 1989.
- 5) 豊福俊泰, 宮川邦彦, 豊福俊英: コンクリートの衝撃摩耗特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集20(2), pp. 835-840, 1998-06-30.
- 6) 豊福俊泰, 豊福俊英: 各種コンクリートの衝撃摩耗特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集21(2), pp. 901-906, 1999-06-31.
- 7) 石橋 毅: ダム排砂設備の流下砂礫による摩擦・損傷に関する水理学的研究, 土木学会論文報告集(334), pp. 103-112, 1983-06.
- 8) 柏井条介, 井上清敬, 箱石憲昭: 排砂による直線コンクリート水路の摩耗・損傷量の推定, ダム技術(274), pp. 36-51, 2009-07.
- 9) 小玉美宇, 小玉芳敬, 池田 宏: 砂礫を伴う水流による巨礫の摩耗に関する実験的研究, 筑波大学水理実験センター報告17, pp. 31-44, 1993.
- 10) 新井宗之, 澤木洋一: 流砂によるコンクリート製水路の摩耗予測に関する研究, 土木学会, 水工学論文集, Vol. 49, pp. 931-936, 2005.
- 11) 新井宗之, 加藤隼平: 流砂によるコンクリート製水路の摩耗に与える土砂粒径の影響に関する実験的研究, 土木学会, 河川技術論文集, Vol. 14, pp. 271-278, 2008.
- 12) 大野善雄, 林 栄港: コンクリート河川構造物の摩耗予測の一手法, 電力土木(211), pp. 112-117, 1987-11.
- 13) 渡嘉敷 勝, 石神暁郎, 森 充広, 増川 晋: 水流摩擦試験機を用いたモルタルおよびペーストの摩耗試験, コンクリート工学年次論文報告集28(1), pp. 695-700, 2006.
- 14) 渡嘉敷 勝, 森 充広, 中矢哲郎, 森 丈久: 水流摩擦試験における吐出圧力および回転速度が摩擦性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集30(1), pp. 705-710, 2008.
- 15) 石神暁郎, 渡嘉敷 勝, 森 充広, 増川 晋: 農業用コンクリート水路における断面修復材の耐摩耗性評価, コンクリート工学年次論文報告集28(1), pp. 1739-1744, 2006.
- 16) 堀内照夫: 砂防堰堤用コンクリートの突砕き摩耗に関する実験的研究(II), 新砂防, pp. 8-15, 1981-09.
- 17) 堀内照夫: 砂防堰堤用コンクリートの突砕き摩耗に関する実験的研究(I), 新砂防, pp. 10-21, 1981-05.
- 18) 豊福俊英, 平岡幹上: 高強度コンクリートの衝撃摩耗特性, 技苑(98), pp. 32-36, 1992-02.
- 19) 豊福俊英, 片岡譲治: 炭素繊維補強コンクリートの摩耗特性, 香川大学農学部学術報告41(2), pp. 169-178, 1989-10-31.
- 20) 柴田辰正, 小幡浩之, 田中秀樹, 石川高志: 超高強度繊維補強コンクリートの0式磨耗試験機による磨耗試験, 土木技術資料51-2, pp. 62-65, 2009.
- 21) 吉田正紀, 飯田 忍, 松原智志: 超高強度繊維補強コンクリートパネルによる余水路源勢工敷の摩耗対策, 電力土木(320), pp. 9-12, 2005-11-05.
- 22) 取違 剛, 渡邊賢三, 横関康祐, 盛岡 実: コンクリートの炭酸化による耐摩耗向上に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集30(1), pp. 573-578, 2008.
- 23) 豊福秀英: アラミド繊維補強コンクリートの掃流摩耗および衝撃摩耗特性, 技苑(76), pp. 43-48, 1993-09.
- 24) 馬越唯好, 河野 清, 山地功二, 川崎真治: 非JIS灰を細骨材の一部に代替したコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文報告集19(1), pp. 349-354, 1997-06-09.
- 25) 山田信夫, 高木 淳, 中島良光: 小田切ダムエプロンの補修工事への自己充てん型高強度高耐久コンクリート適用, 電力土木(338), pp. 52-55, 2008-11-05.
- 26) 横関康祐, 盛岡 実, 伊藤祐二: 長寿命コンクリート「E1EN」による構造物の高耐久化, 電力土木(342), pp. 60-62, 2009-07-05.
- 27) 高林利秋: 真空工法による耐摩耗仕上げ, セメント・コンクリート(463), pp. 113-117, 1985-09.

(2011. 5. 19 受付)