

土木材料としての石炭灰等残滓材料の有効利用

戸 田 五 郎*
長 谷 川 幸 雄**

1. ま え が き

国土開発が進み、社会生活環境が高度化するにつれ、技術的な分野においても、先進的な面と出遅れの面との格差が目立つようになってきている。特に新技術の開発に対する努力はたえず行なわれているが、われわれの身近かに存在する、いわゆる工場残滓を、土木建築の分野における材料として有効に利用することは、大いに意義があるのではないかと思う。

そこで、まずこれら工場残滓の現況について概説してみよう。かつては黒ダイヤと呼ばれ、貴重品扱いされた石炭もコストの低い石油の前に影をひそめる時勢となってきた。さらに、その残滓（石炭灰、炭がら）ともなると、路上に散乱して都市の美観を損ねるばかりでなく、風塵となって、大気汚染などの公害因子ともなりかねない。

全国の石炭燃焼火力発電所から産出される石炭灰—シンダーアッシュをその状態によって分類すると、微粉（フライアッシュ）、粗粉（コースアッシュまたはグリーンアッシュ）、クリンカーアッシュ（コールサンド）に大別され、それぞれ一部はコンクリート用混和材、肥料、路盤固め等に利用されているが、大部分は埋立地に廃棄されている。しかも、埋立処理されている量は、全灰量の約6割にも及ぶうえ、多額の経費がそのためにかけられている現状である。そのため、これらの廃棄物をセメント質材料として、またコンクリート用骨材として有効に利用することを考えれば、土木施工面における特異な場所に使用することが期待できよう。

また、このフライアッシュの中には、量的には0.7%にも満たないが、球形をした中空状態のものが含まれており、これが海辺の灰処理池で海面に浮遊し、干満差、風波により海洋へ流出して、のり養殖、漁業、海水浴、風致関係等に影響して公害問題となる場合もある。しか

し、この中空フライアッシュは、内部にガス（CO₂）を封入しているため、比重が小さいので、この性質を生かした特殊建材等として有効利用を計ることが得策である。さらに、粗粒のクリンカーアッシュは、冷却方法にもよるが、個々の粒子は多孔質で強度がないため、単にそのままコンクリート用の骨材として用いられないが、適当な粒度区分帯を設定し、それに適応した使い方を考えれば、多方面に利用化の道が開ける。

他方、製鉄所において出銑の際生ずる鋳滓は、徐冷スラグと急冷スラグとがあり、前者は鋳滓パラスとして骨材に、後者は独特の潜在水硬性を生かしてセメント業界では古くから使われているほか、最近では肥料としてもかなり利用されているようである。

また、合成化学工場において、カーバイトの水和作用によりアセチレンガスを採取したのちの残滓は、カーバイトマッドとして、これも大部分が廃棄物として捨てられている。しかし、これは主成分が消石灰 Ca(OH)₂であることから、これに SiO₂ を大量に含むシンダーアッシュ、および潜在水硬性のある水滓スラグを適量配合すると、有効なセメント質材料として使用することができる。

以上のように、現在のところ、無為に廃棄処分されている火力発電所の石炭灰その他の工場残滓を、土木材料として有効に利用することについては、いまや全国的な問題となっており、各所で具体的な研究が行なわれている。それぞれの材料が有している特性を生かして組み合わせ、使用する目的に合致させるならば、土木材料として意外に各方面での用途が開ける可能性も確認されてきたので、以下筆者らの検討した内容を報告して、各位のご参考に供したいと思う。

2. フライアッシュの有効利用

微粉のうち、ブレン値 2700 cm²/g 以上のものは、JIS によってフライアッシュとして規定され、その過半数近くはセメントに混和して使用されていると予想され

* 正会員 中部電力（株）水力部土木工事課

** 正会員 中部電力（株）総合技術研究所土木研究室

るが、残りは、粗粉クリンカーアッシュとともに捨てられている。昭和 44 年度には石炭産出量 4 500 万 t のうち火力発電所で消費される量は約 1 800 万 t として、その 18% が灰分と考えられるので、ある程度まとまった箇所に産出されるシンダーアッシュは 300 万 t 以上におよぶであろう。前記のように利用分を差し引いた残りは、灰処理池へ廃棄されることになる。その量は、全国的には恐らく 200 万 t にもなるであろうと思われる。

この未利用分の効果的な利用をはかる目的で、土本的な分野から調査、研究した結果、(1) セメントの混和材、(2) 路盤材料としての混合材、(3) CS モルタルおよびコンクリートによる二次製品、(4) 軟弱地盤改良材等への利用が考えられる。このうち、(1) についてはすでに実用化され、ダム用をはじめ各種コンクリートに使用されている。(2) についてはケミカル舗装材として水滓スラグと混合したうえ、簡易路盤材として使用するものであり、(3) は普通セメントを用いないコンクリートとしてプレキャスト製品に使用するものであるが、この両者については具体化の実例が少ない。また、(4) についても大量に実施された例はあまり聞かれない。(3) の Cinder Ash Slag Concrete (略 CS コンクリート) はフライアッシュに製鉄所で生成される水滓スラグを微粉碎したものと、石灰質微粉の 3 材料を練り混ぜてつくるモルタルコンクリートで、その物理的ないし力学的特性の一部については、すでに関氏¹⁾や筆者²⁾らによって発表されている。いずれも、その諸性状については、非常にすぐれた結果が得られている。

CS モルタルおよびコンクリートでつくられる二次製品の経済性について、実験的考察を行なった結果、総括的にいえることは、普通コンクリートに比して材料費が安価であり、重量が 20% 以上軽くなるので、運搬や施工面で費用の軽減をはかることができる、ということである。

コンクリート用骨材の需要は、最近ますます高まっている反面、天然河川の骨材に多くを望めず、碎石の使用に移行しているが、さらに交通事情の悪化により、骨材のコストが次第に高騰する傾向にある。こういう時期

に、天然骨材の入らない CS モルタルおよびコンクリートのプレキャスト製品化を考えることは、大いに意義がある。そこで JIS 規格にある二次製品の中で、各種ブロック類を中心に、市販性と利益率の高いものを選択して製品化すれば、かなりの経済性が得られるものと思われる。いま、一例として、石積用ブロックの場合を例にとって、普通コンクリートと CS コンクリートで 1m³あたりの材料費を比較検討すると、表-1 のようになる。材料の入手条件にもよるが、コンクリートの方が割安でしかも 1 個あたりの重量もかなり軽くなっていることがわかる。

製品の重量が 25% 以上軽くなるということは、個数あたりの運賃経費が安くなり、現地での施工面においても、現場の加工費、小運搬費、取りこわし費等は、いずれも軽減できることになり、これらは労務費が少なくてすむばかりでなく、金額以外にも益する点となるのである。

以上、CS コンクリートの場合を取上げてその検討結果の利点を述べたが、これはあくまでも、地理的に有利な位置に製造プラントがあり、組み合わせる数種の材料が、近接の場所で安価に入手できるといことが最大の要素であろう。また、CS コンクリートでは、普通セメントによるコンクリートより多量に微粉の細粒子を扱ううえ、引張強度が普通コンクリートより若干劣ることから、板状の薄物、長大尺物、複雑な形状の製品の場合は、外気温の影響を受けて、ひびわれを発生したり取扱い上の損耗が多く、商品価値をなくする恐れがあるので、製造の過程で養生などの管理については、十分留意する必要がある。

CS セメント質材料のうち、フライアッシュは、火力発電所の石炭割当量が減少する傾向にはあるが、一時に廃棄量がなくなるものとは考えられないし、一方、スラグは鋳炉の大型化に伴い、今後ますます増産される傾向にあるので、社会情勢を大局的にみて、場所別の経済性を検討したうえで、これらの残滓の有効利用を計画することが必要になる。

また、CS コンクリートを製造する場合の設備につい

表-1 石積用コンクリートブロック材料費比較表 (コンクリート 1m³あたり)

種 別	単 価 (円/kg)	普通コンクリート		CSコンクリート		摘 要	
		数量 (kg)	金額(円)	数量 (kg)	金額(円)		
セメント	6.05	240	1 452	—	—	大きさ 42.4×28.3×35 cm 体積 0.0194 m ³ /箇 重量 45.6 kg/箇……………普通($\rho=2.35$) 重量 33.6 kg/……………CS ($\rho=1.73$)	
砂	0.767	740	570	—	—		
砂利	1.117	1 251	1 397	—	—		
シンダーアッシュ	0.40	—	—	740	296		
クリンカー	0.30	—	—	553	165.9		
スラグ	2.00	—	—	255	510		
石灰	5.50	—	—	111	611		
計			3 419		1 583		△ 1 836 円

て検討した結果によると、セメント質材料が、アッシュ、石灰、スラグの3種類あるので、これらの予備混合を行なうか、防湿の収容サイロと混合のための高速ミキサを必要とする点が、現在プラントによる普通コンクリートの場合と多少異なるのみで、ミキシング以降の工程は大差なく、設備費も比較的少なくてすむ。ただ、留意すべき点は、CS コンクリートの場合は、普通コンクリートの場合より硬化時間が多少遅いようであるので、冬期寒冷地では年平均気温の状態では硬化させ、養生するように配慮することが必要である。

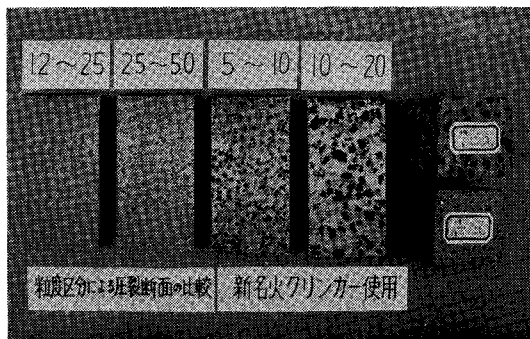
3. 石炭クリンカーアッシュの有効利用

石炭を燃料とする火力発電所のボイラー底部において、高温熔融状態で残り、外気温にまで徐冷された多孔質、ガラス質塊状の石炭クリンカーアッシュは、成分的には、フライアッシュと同一組成を有しているのので、これを微粉碎してセメント中に混合し、使用してもなんら支障がないものと考えられる。また、産出時の粒度分布をみると、5 mm 以下が約 60% を占めているので、これをそのまま砂の代りに細骨材として使用することが考えられる。ただ、クリンカーアッシュ自体の強度が不足するので、コンクリートの場合、天然砂を用いたものより強度が低下することは避けられない。そこで、この強度の低下を最小限度に止めるようなミキシング、粒度分布、細粒子化、混和剤等を考慮して強度を発現させるための効果的な手法を採用すれば、普通コンクリートと大差なく十分実用化することができる。クリンカーアッシュの比重は、細粒(5 mm 以下)で 1.95、粗粒(5 mm 以上)で 1.64 と、普通の骨材に比べて 25~40% 程度軽い。

クリンカーアッシュを普通コンクリート用骨材として用いた場合に比較した試験結果についてみると、細粗骨材ともクリンカーを用いた場合は、天然骨材のみを用いた場合に比べ、強度は極度に低下し、材令 28 日で、約 1/3 となり、また、細骨材のみクリンカーを用いた場合、同じく材令 28 日で約 1/2 の圧縮強度となる。したがって、あまり強度を必要としない構造用製品としてならば使用することが可能である。

一方、CS コンクリートの場合、5 mm 以下の部分を砂として使用し、川砂との混合比率を種々変えた場合の比較試験を行なったが、この場合には、圧縮強度の低下は比較的少なく、天然砂を用いた場合に比べて、その強度低下は 15% 程度であり、しかも、材令 28 日で 480 kg/cm² の最高強度が得られているので、二次製品に対して十分適用できるものと考えられる。次にクリンカーアッシュを用いたコンクリートの比重を天然骨材を用いた

写真—1 クリンカー骨材の化粧ブロック

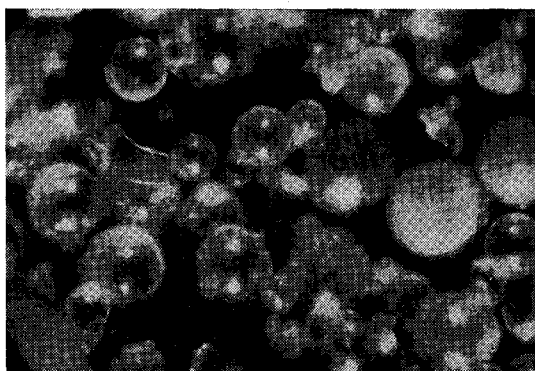


場合と比べてみると、約 27% 軽量になることがわかった。クリンカーアッシュを骨材とした、モルタル、コンクリート供試体の破断面、ならびに装飾用化粧ブロックの一例を写真—1 に示す。

4. フライアッシュ中に含まれる中空アッシュの有効利用

フライアッシュ中には、前にも述べたように量的にはわずかではあるが、写真—2 に示すように球形をした中空の粒子が含まれている。これは比重が 0.6 程度で、非常に軽いから、特殊建材等として有効に利用することについて検討してみた。前節のクリンカーアッシュと同様、主成分はフライアッシュと同様なので、セメント質材料として水和反応を起こさせ、硬化させることができる。材料が中空のガラス状をした完全球形であるため、その生成物は超軽量であるうえ、切断、切削等の加工が容易であるという特異な性状を有することが判明した。この中空アッシュが生成される過程は、1400°C 以上の高温で、熔融状態の灰が、内部にガス(CO₂)を封入し、このガスが膨張して、ガス圧と表面張力がバランスした状態で冷却されたものと考えられている。したがって、この中空アッシュを、その生成条件からみた場合、その生成を完全に抑制、防止したり、または、生成されたも

写真—2 中空アッシュ(70倍)



のを、フライアッシュ中から100%分離して、捕集することは、きわめて困難な問題であると判断される。この中空アッシュを採取する方法として、水理的に浮上させてこれをろ過するという分離方式を考案し、さらに、この材料を用いて有効に利用する方法についての検討を試みた。

中空アッシュの物理的、化学的特性をまとめてみると次のとおりである。

- ① 中空ガラス状の完全な球形である。
- ② 実質部の比重 0.66, 中空容積をふくめた粒子としての比重 0.3~0.4 程度で非常に軽質である。
- ③ 化学成分は SiO_2 が 60% 以上, Al_2O_3 が 18% である。
- ④ 粒径は 74~149 μ の間が 68% を占め、微粒である。
- ⑤ 材料は燃焼済みの石炭灰としての廃棄物であり、放置すれば公害の原因となる恐れがある。

これらは、他にあまり例をみない非常に特異な物質であるので、それぞれの特性を利用して効果的な有効利用を計ることができる。

いま、この中空アッシュに生石灰または消石灰（後述のカーバイトマッド）ならびに水滓スラグを配合し、それに砂またはクリンカーを加えてモルタル、およびコンクリートをつくると、比重 0.57~1.91, 強度が 1.0~100 kg/cm^2 程度の広範囲の品質のものを得ることができるが、これらは耐摩耗性に乏しいので、この点を考慮した方面での利用が望まれる。それらの軽量で経済的な方面での利用方法としては、①壁材としての下地、②床敷ならしモルタル、コンクリート、③室内装飾用擬石（茶室、料亭、旅館等）、④人造石（人造大谷石、庭石、灯籠等）、⑤店舗、風俗営業場所のように、改装が頻繁な施設における内部造作、または造形工事、⑥吸音材料、⑦断熱材料、⑧浮上標識（海上ブイ等）、⑨教習用彫刻材料、等が考えられるが、このうち⑨の彫刻用ブロックとすれば、代用石こうとして安価であるのみならず、中空粒子の集合体であるので、ナイフ加工がきわめて容易である。

5. カーバイト残滓を用いた特殊セメントの有効利用

土木建築材料として欠くことのできないセメントは古くから大量に生産され、木材、石材、土、鉄類と比較対照しても、ほぼ完璧な域にまで進歩している。この代表的なポルトランドセメントとは、生産方式を変えた着想で、工場残滓に多少の物理的、化学的な手を加えてひとつの集合材料とすれば、きわめて有効な特殊セメントとし

て十分利用できることが確認された。合成化学工場において、カーバイトの水和作用によりアセチレンガスを採取したあとの残滓は、カーバイトマッド（以下 CM 材と呼称する）として、大部分が廃棄されている。その主成分は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ であることから、これに SiO_2 を大量に含む石炭灰と、潜在水硬性を有する水滓スラグを適量配合したものは、通常の高炉セメントとは一種変わった特殊セメントとなる。これは練混ぜ後の水和進行に伴う発熱がほとんど見られない特徴を有する。さらに、原材料が、すべて工場残滓だけを利用しているので、原料コストが地の利を得たならばきわめて安価であり、しかも、標準養生で最高 300 kg/cm^2 の圧縮強度が得られている。

この CM 材に石炭灰と水滓スラグを配合した特殊セメントを製造するためにもっとも重要な点は、マッドの乾燥と、CM 材、石炭灰、水滓スラグの各粉体を完全に混合させることである。一般には、湿式によりアセチレンの生産が行なわれているので、その残滓として処理されるときには含水率約 50% 程度の、輸送しやすい状態にされている。よって、前者の脱水、乾燥について、熱風による通気乾燥試験を行なった結果によると、熱風温度 120°~130°C, 速度 1.5~2.0 m/sec, マッド厚 3.5 cm の条件で、20 分後には含水率 3% 以下のほぼ完全に近い粉状、粒状の白色体となる。したがって、これらのファン動力、風量、所要熱容量、プラント設備計画等、所要の製造過程を検討した結果、加熱加工の工場排熱や火力発電所の排熱利用等を採用すれば、十分採算のとれるものであると判断した。さらに乾燥後は、一部固結して、ポーラスな弱い塊状となるので、簡易なローラーミルによって粉碎し、アッシュ、水滓スラグ粉末とあわせて、効率のよいエアームキサー等により、高速混合すれば好結果が得られる。

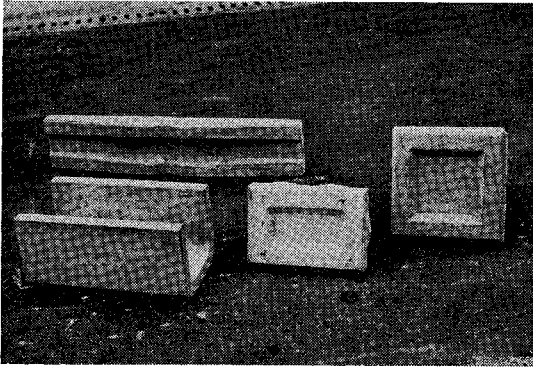
前述のように、年間数百万トン以上に及ぶカーバイト滓を用いた特殊セメントの性状が低熱であり、300 kg/cm^2 程度の強度が得られ、しかも均一微粒子であることは他に見られない利点であるとともに、比重が小さく、美観もあるので、各分野での経済性が得られ、特にプレキャストコンクリートブロック等の製作、施工に有益である。

この特殊セメントの適用範囲を判定するために、具体的な試作実験を行なった項目は、以下に示すとおりである。

① 土建用コンクリート二次製品（写真—3）：石積用コンクリートブロック、建築用間仕切りブロック、根柵、U字溝、道路境界ブロック等、比較的小さいプレキャスト製品の製作に適する。

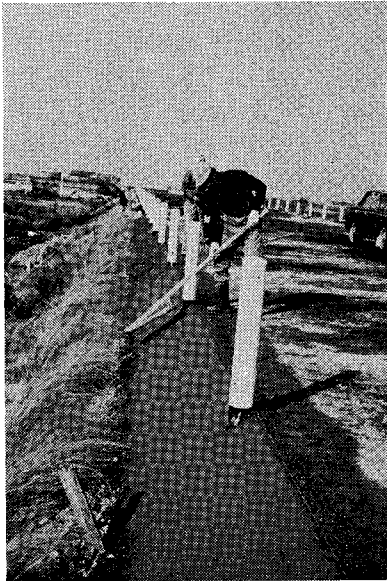
② のり面保護材（写真—4）：切取、盛土ののり面の保護用に使用して経済的である。これは疎性状の非流動

写真一三 土建用 CS コンクリート二次製品



性コンクリート材料の状態では路肩等に表層張りを行なえば、ガードレールの保全、境界部の安定、雑草の防止および雨水による浸食の防止等に役立ち効果がある。

写真一四 道路のり肩保護工事 (特殊セメント使用)

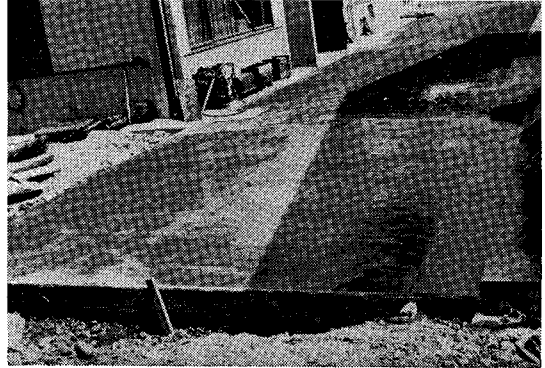


③ グラウティング材、てん充コンククリート用：無圧力によるモルタル注入、および建築用コンクリートポンプ（連続式ミニクリート PC 50）により輸送テストを実施した結果、最大骨材 15 mm までのコンクリートはポンプ輸送が可能である。

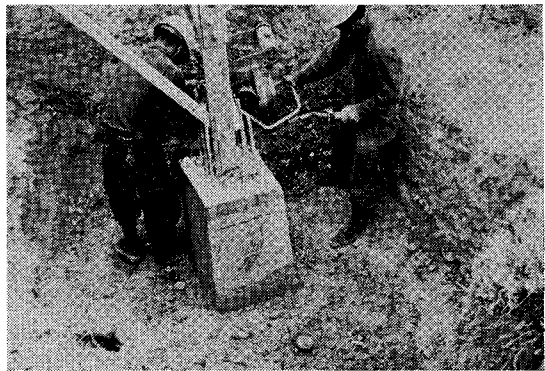
④ 床工事、簡易舗装工事用（写真一五）：天然骨材、およびクリンカー骨材（15 mm <）を使用して厚さ 20 cm の舗装を施し、比較試験を行なった結果、材料に細粒子が多いため、表面の仕上げをあまり平滑にすると摩擦が少なくなり、また、耐摩耗性もいくぶん乏しいように思われる。

⑤ 軟弱地盤改良用³⁾（写真一六）：自然含水比が高く、軟弱で車の通行できない場所で、深さ 30 cm 厚表層に本材を 5%、7% 添加し、転圧後は 10 トン車の乗入れが可

写真一五 特殊セメントを用いた簡易舗装



写真一六 送電鉄塔基礎地盤改良工事 (特殊セメント使用)



能となった。また、大型送電鉄塔基礎に適用した結果、地耐力と引揚げ抵抗を増し安定性が得られる。このような軟弱地盤には経済効果があり、目的を達せられよう。

⑥ 透水性特殊コンクリート用：平地帯を通る農業用工業用の水路は外方からの水の影響を受け易い。たとえば、水田を通過するコンクリート水路は地下水によって空虚時には外圧を受け、鉄筋構造にしたり、水抜きに苦慮する場合がある。このような場所にはポーラスなクリンカー骨材を用い、透水性を持たせた CM コンクリートを施こせば揚圧力を減じ、工事費の節減ともなり効果的であろう。

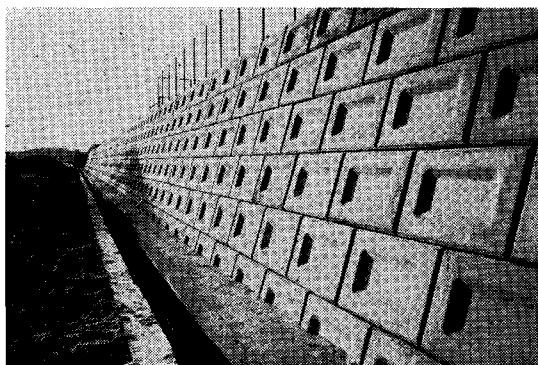
⑦ その他：一般の土木工事以外、建築用のモルタル吹付け、壁材、および軽量な人造石等にも適用することが考えられる。前者の場合は、乾燥収縮について留意する必要があると思われる、また後者の場合は、形状は意のままにすることができるが、着色技術がむずかしい。

以上の中で、大部分はその具体化のための試験を行なったが、③の項については河海の護岸堤防の補修工事用として大量使用の望みもあるので、経済性のある本セメントモルタルの注入試験を実地に計画中である。なお、写真一七に示すように、このセメントを用い、蒸気養生を行なわないで試作した石積用ブロックを約 800 個積

んで、耐久性のテストを行なっているが、現在なんらの異常も認められていない。骨材として天然骨材を用いた普通コンクリートブロックが40 kg/個であるのに対し、石炭クリンカーアッシュを用いたものは約30 kg/個となり軽量にすることができ、しかも施工が容易である。

さらに、この特殊セメントまたは CM 材単独でも、

写真-7 特殊セメントによるブロック石積



前記のような特性を生かすことにより、土質分野に拡大利用することができる。現在は、軟弱地盤の性状と、その使用目的に応じて、サンドドレーン工法等のほか、ソイルセメント、瀝青材、高分子材等の注入工法によって、土質改良が行なわれているが、施工が容易で経済的な方法として石灰添加による土壌の安定工法も実施されている。これは、生石灰、消石灰の区別なく適当量を配合すれば固結化して強度を増し、自然含水比を調整することができるので、シャ水構造物やのり面安定材等、土質構造体としての広範囲な利用が考えられよう。これらについては、いまのところ、まだ多くの実績を持たないが、土質添加材料として、今後幅広い分野に活用できるであろうと思われる。

6. あとがき

以上、筆者らは都市周辺部における工場残滓を土木材料として有効に利用するための調査、研究を行なっており、現在までの検討結果を取りまとめて概要を報告したのであるが、これらの工場残滓は、それぞれ固有の特質を有しているため、それらの特質を生かすと同時に、いくつかの材料を組み合わせることによって、土木材料としての諸条件が満足され、プレキャストのコンクリート製品をはじめ、その他の用途に対して、十分価値あるものに再生することができることを確認した。これら各種材料の混合には、すべて、筆者らの開発した大型高速ミキサによって実用具体化することができたものである。さらにまた、本文で取上げた諸材料は、土質改良等への利用の道も開けており、公害ともなるような廃棄される残滓物が、きわめて有効な土木材料として利用されるならば、社会的見地からみても、大いに推しようされるべきものであろうと考えられる。

終りに、これら残滓材料の有効利用に関する研究に対し、基本にご指導をいただいた電力中央研究所 関顧問、材料を提供していただいた小野田セメント田原工場、三井化学工業(株)、東亜合成化学工業(株)の各位に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 関 慎吾ほか：シンダーアッシュを利用したコンクリート製造方法の研究，電力中央研究所技術研究所報告 土木 No. 68012, 1968 年7月
- 2) 戸田五郎・長谷川幸雄：石炭灰を使用したモルタルおよびコンクリートの強度，土木学会論文報告集第 169 号, 1969 年9月
- 3) 戸田五郎・朝倉喜美男・浦野哲也・大口 功：石灰添加土の特性と利用について，中部電力研究資料第 42 号, 43 年 12 月 (1970.7.18・受付)

土木材料実験指導書 44 年版 B5・134 頁 データ 53 枚 490 円 (〒70 円)

土質実験指導書 45 年改版 B5・66 頁 データ 32 枚 340 円 (〒70 円)

水理実験指導書 42 年版 B5・38 頁 データ 21 枚 250 円 (〒70 円)

構造実験指導書 45 年版 B5・112 頁 データ 36 枚 450 円 (〒70 円)

測量実習指導書 45 年版 新書・224 頁 折込付図 13 枚 450 円 (〒80 円)