

環境負荷低減型建設材料の開発に関する研究

豊田工業高等専門学校 早川 尚志, 伊東 孝
ニーズ新環境技術サービス 玉山 豊
矢橋工業(株) 岩下 哲志

1. はじめに

現在我が国では、CO₂放出などによる地球温暖化、ヒートアイランド現象また産業廃棄物処理問題などの環境問題が大きくクローズアップされている。産業廃棄物の問題では、増え続けるごみの量(処分地の不足)と、その処理に伴う有害な物質の発生という問題を抱えている。この解決策として発生土の有効利用(Recycle)、廃棄物の排出低減(Reduce)、廃材の再利用(Reuse)の3Rの実行が官民を問わず強く求められており、特に排気太の排出量の多い建設業においては、工事の際のゼロミッション化を推進している。現在の社会資本整備のために最も広く用いられている代表的建設材料であるコンクリートは、きわめて耐久性は大きく、また、原材料、その製造過程で熱源として多くの廃棄物(焼却灰や古タイヤなど)を利用しているので社会貢献には寄与している。しかし、反面、焼成時においては大量の炭酸ガスを放出し、硬化後は鉄筋の防錆保護のために中性化(炭酸化)を抑制しているのが通常であり、炭酸ガスの還元という意味では長いスパンを要し、不完全であるといえる。また、舗装材に使用した場合には、一般的に明度が大きいのでアルベド(反射能)は大きいですが、強度を重視しているために緻密な構造で保水性に乏しく、ヒートアイランド現象に対する抑制能力にやや欠ける。また、供用を終えてそれを廃棄する際には、内部に6価クロムなどの重金属を含有している可能性が高いので、産業廃棄物として処理しなければならない。そこで、明治初期に開発され、護岸、用水路、水門などに採用されている「たたき工法」による人造石を舗装用平板として用いることを提案し、その環境負荷低減性及び適用性の評価をする。

2. たたき工法とは

昔作られた家の玄関や土間に、土で造られたところがあり、これを「たたき」と呼んでいた。現在では、ほとんど見られなくなったが、「たたき」は日本古来からの伝統的な左官技法の一つであり、広く使用されていたものである。そして、たたきを応用した人造石による構造物が全国各地で造られていた。特に愛知県に特徴的に多く作られている。その遺構が各地に残っているが、十分な解明が進んでいない。

また、愛知県の外郭団体、科学技術交流団体が愛知万博に向け、日本古来より伝わる「たたき工法」の研究開発に取り組むと発表した(中日新聞 平成9年7月17日)。同団体は、今後、原料となるサバ土の分布や、試作品を通じて最適な調査方法を調査し、最良の工法を開発し、万博会場内の歩道や側溝などに応用する方針を示した。人造石は環境との調和をうたう万博会場において、最適な建設材料と言われている。愛知万博の開催地である瀬戸市では、本来利用価値の低いとされているサバ土が豊富にあり、これを有効利用するたたき工法は、環境調和型の万博のテーマ『環境との共生』に沿った、自然工法といえる。

たたき工法は、明治時代初期に考案されたもので、日本各地で港湾や用水路の建設工事に採用され、その構造物は現在も残っている。しかし、明治後期になってコンクリートが普及するとともにたたき工法は廃れていった。その理由としては、セメントの国内生産が軌道にのり、量産体制になったためにセメントが安価になった事、またたたき工法の確立された共通の製法や力学特性等の基礎的なデータが一切なかったということとされている。

たたき工法とは、消石灰とサバ土を練り混ぜ、水で硬練りしたものを叩き固めて人造石を造る工法であり、

A study on development of construction material reducing environmental stress: Naoyuki Hayakawa, Takashi Ito (Toyota national college of technology) Yutaka Tamayama (NEEDS) Tetsushi Iwasita (Yabashi Industries Co.)

その硬化メカニズムは、主として消石灰が空気中の炭酸ガスと化合して石灰石に還元されるものである。炭酸ガスを封じ込め、劣化後には土に戻って自然に還るので、たたき工法による人造石は環境への負荷が低減された建設材料であるといえる。

前述以外の硬化反応としては、サバ土と石灰が少量の水を介して密になることにより、複雑な反応（ポゾラン反応）が生じ、粘土中のコロイド粒子や粘土の小さな粒子が互いに結合し、この結合を長時間にわたって強固にする物質が生成される。この反応によってたたきは長期間にわたり強く石のような硬い材料にかわる。ただし、これらの反応は、粘土の性質に負うだけでなく、調合、練り方、締め固め方、養生の仕方、経験的な知恵によっても違って来る。セメントや陶器と違って熱エネルギーを使わなくても時間経過とともに硬化する。

2. 研究内容

本研究は以下の内容について検討を行なった。まずは建設材料として用いるためには実際にどの期間まで所定の強度が維持できるかが問題になる。そのためにたたきである人造石供試体(円柱型)を作成し、一軸圧縮試験を行なった。さらにたたき平板を作成し曲げ強度の測定も行なった。また、たたき工法の特徴である環境負荷低減の1つであるヒートアイランドの抑制力をさらに引き出すために、保水能力があると考えられる産業副産物のクリンカーアッシュ、および珪藻頁岩を母材であるサバ土と一部置換した場合の供試体の一軸圧縮試験を行なった。「たたき」は化学反応をおこし硬化する過程で養生環境が大きく影響を与えることが予測される為、供試体作成後の養生条件を3パターン(気中養生、水中養生、散水養生)にわけてそれぞれの強度測定を行なう。舗装用平板として安全性を評価する目的として滑り抵抗試験器を用いてBPN値の測定、平板を歩道などに使用した際に足への負担を評価するためGB試験、舗装用平板の透水係数を変水位透水試験で測定を行なう。

研究の最大のテーマとなるヒートアイランド抑制の評価方法として、人造石のpF試験(吸引法と遠心法)による保水力の評価と、人造石を絶乾状態から気中に放置し質量を不定期に測定し自己給水能力の評価を行なう。実際に舗装用平板として使用した場合にコンクリート平板およびアスファルト平板とどの程度の温度差が現れるかを各季節(夏、秋、冬)について熱伝対測定器を用いて測定する。測定環境は地面を掘り、砂利、砂を敷きその上に各平板を設置した。

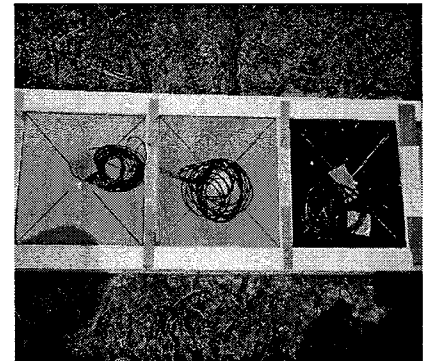


写真-1 平板設置の様子

3. 基礎事項

研究に使用した人造石供試体はそれぞれの配合によってサバ土、消石灰(たたきの素)、水、その他添加物を練混ぜ加压し(約100N/cm²)円柱型(φ=500、h=600[単位mm]、230g)に形成したものの。平板は3000×3000×600[単位mm]、(10160g)のものを使用した。結合剤である消石灰(たたきの素)は研究初期に使用していたものと、それに改良を加えた結合剤(新たたきの素)の二つを使用した。サバ土は花崗岩が風化したもので、マサ土の俗称。愛知県や岐阜県に広く分布している。保水力や栄養分に乏しく、長石、石英が主成分である。また、雲母、カオリンなども含む。PHは中性に近い6.57であり、含まれている物質には酸化カルシウム(CaO)、酸化マグネシウム(MgO)などである。たたきの素は石灰にある種の添加物を加えたもので、矢橋工業株式会社が開発したものである。石灰自体が白色で景観上好ましくないため、より自然な土色に近づけるために特殊な粘土を混ぜている。研究に使用したクリンカーアッシュは、石炭火力発電所のボイラー内の燃焼によって生じた石炭灰の粒子が相互に凝集し、多孔質な塊となって堆積したものを碎破機で碎破し、砂のような粒子にした産業副産物である。化学的に安定しており、一見、有害のように感じられるが主成分はシリカとアルミナで有害性はない。pHは7.4~8.5である。珪藻頁岩は、植物性プランクトンの死骸が堆積し化石化した珪藻土が、地圧と熱による地質的変位を岩石化したページ状岩石のことである。珪藻土に比べ、珪藻が変質した数

ミクの微細の微細な細孔が集合した球状の微粒で構成されている。炭のような無数の穴を持つ多孔質構造なので、吸湿・保湿性・吸着性などの機能を発揮する特性をもつ。

4. 結果

図-1 は材齢による一軸圧縮強度を示したものである。No.1 とNo.2 は旧たたきの素、No.3 は新たたきの素を使用した供試体のデータである。理論上では材齢が増すに従って強度も増加するはずであったが、測定によって強度が低下する場面も見られた。長いスパンでみると、No.1 で材齢 84 日強度は 10.90N/mm^2 と、材齢 7 日強度の 8.31N/mm^2 から 31% 強度増加した。No.2 では 7 日強度から 70 日強度にかけて 26% の強度増加。No.3 についても 7 日強度から 70 日強度にかけて 26% の強度増加がみられる。曲げ強度は舗装用平板(旧たたきの素を使用したもの)を用いて測定した。人造石の曲げ強は 2.3N/mm^2 であった。一般のコンクリート平板の曲げ強度はおよそ 4.0N/mm^2 である。図-2 は養生条件による強度発現の変化を表す。散水養生が最も強度が出た。たたきの化学反応には適度な水分が必要とされるため、このような結果になったと判断できる。変水位透水試験では人造石の透水係数 $K=4.62 \times 10^{-6}(\text{cm/sec})$ が求められた。一般的なコンクリートの透水係数はおよそ $K=1.0 \times 10^{-7}(\text{cm/sec})$ である。コンクリートと比較しても透水係数は高い。

図-3 はクリンカーアッシュ配合による強度変化を示したもの、図-4 は珪藻頁岩配合による強度変化を示したものである。これらの試験に使用した供試体の結合剤は新たたきの素を使用した。クリンカーアッシュは母材との置換率が低ければ強度低下には大きく影響はしない。珪藻頁岩を配合した場合も置換率が低ければ旧たたきの素を使用して作成した供試体と同等の強度が得られることが判明した(図-1 より)。結合剤が改良されたことによって添加物が利用できるようになったといえる。

舗装用平板として使用する際の快適性の評価での GB 試験では人造石の GB 係数は 65% であった。コンクリート平板は 73%、アスファルト平板は 71% であった。この値から、アスファルトやコンクリートに比べて歩道などに使用した場合に足への負担が軽減されるといえる。安全性である滑り抵抗の BPN 値は乾燥時で人造石 79.6、コンクリート 71.6、アスファルト 83.7 であった。一般に BPN 値が 55 以下であると滑りやすいと評価される。3 つの材料とも乾燥時にはすべて 55 以上であった。しかし、

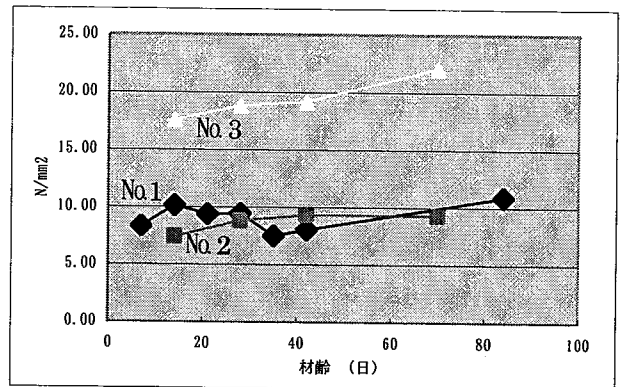


図-1 材齢による強度変化

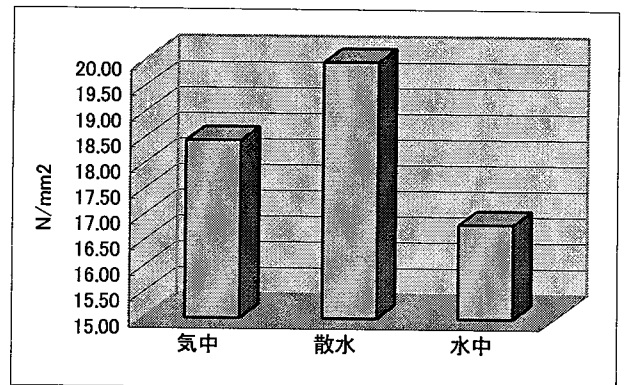


図-2 養生条件による強度変化

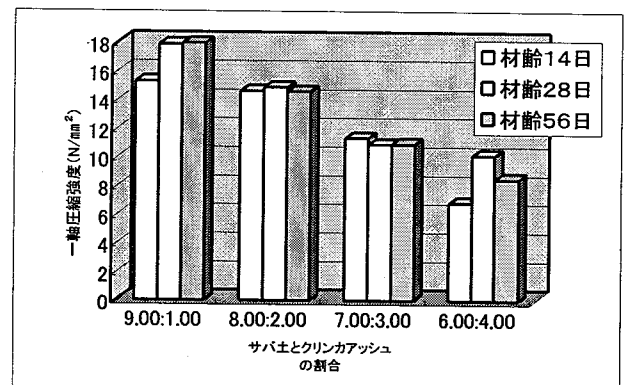


図-3 クリンカーアッシュ配合による強度変化

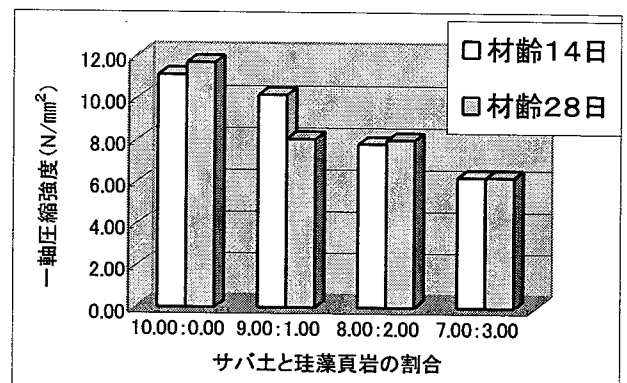


図-4 珪藻頁岩配合による強度変化

湿潤時の値は人造石 70.4, コンクリート 46.6, アスファルト 48.8 であった。雨天時などには人造石が他の 2 つに比べて滑り抵抗が非常に大きいことがわかった。

次にヒートアイランド抑制能力の評価について以下に述べる。保水力を測定する pF 試験の結果を図 - 5 に示す。サバ土 100%の人造石に比べ、クリンカーアッシュ・珪藻頁岩を一部置換した人造石のほうが倍近くの保水率を有していることが分かる。また、pF 値が大きくなると、珪藻頁岩を一部置換した人造石のほうが、クリンカーアッシュを一部置換した人造石よりも保水率が高くなった。自己給水力の測定結果は図 - 6 に示す。クリンカーアッシュの試料そのものには、吸水性がまったくないということが分かる。それに比べ、珪藻頁岩の試料そのものは、その日の温度や湿度により吸水量は変化しており、また、その絶対吸水量も大きいことから、吸水性、保水性を有していると思われる。珪藻頁岩は保水材料として大きな効果ができる材料であることが分かる。以上のことから、クリンカーアッシュ配合では自己給水力の向上は望めないが降水によって水が与えられた場合には保水能力によって環境負荷が大きく低減させられると判断できる。珪藻頁岩は自己給水力、さらに保水力の両者に長けている。しかし、経済的面を考えると珪藻頁岩はコスト的に高くなるといった問題ものこる。

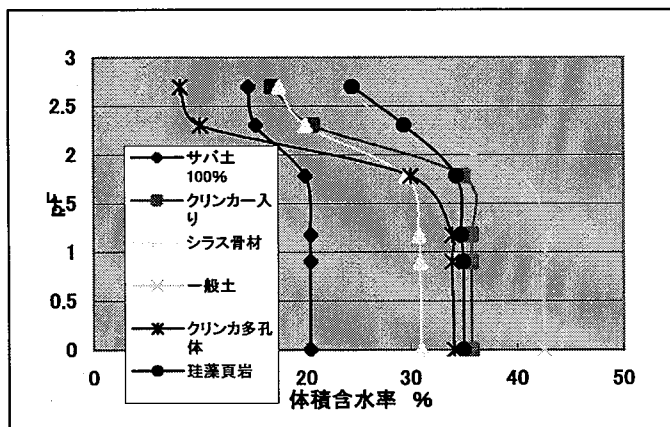


図-5 pF 試験測定結果

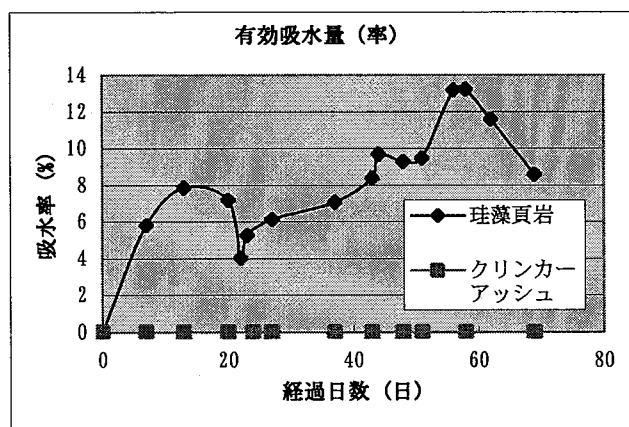


図-6 自己給水力測定結果

では実際にたたきを舗装用平板として使用した場合の温度変化はどうなったであろうか。図-7 は夏の日の測定結果である。前日、当日ともに天候は晴れである。試験体の色（明度）については、明度の高い順に示すと、コンクリート、たたき、アスファルトの順になるのでアルベドも同順序となり、最初の温度が高い順はアスファルト、たたき、コンクリートの順となるが、日照が続くと熱伝導率やサクシオン（毛管現象と気孔率）の違いで、アスファルト、コンクリート、たたきの順となり、結果として、たたきの温度の変化が 3 種類の中で最も小さくなる。前半ではたたきが最高温度を示している時間もあるが、後半では温度は降下して、敷き砂や、路盤などと同じ温度で推移している。前半、アスファルト表面よりたたき表面の温度の方が高くなっているのは、たたきの方が明度が高く、アルベドが大きいためだと思われる。図-8 は積算温度のグラフで、温度

を平均して、それに時間を乗じた値である。なお、たたき、アスファルト、コンクリートの各平板は表面、中の積算温度を合計して平均をとった。表面や中と分けて考えるの

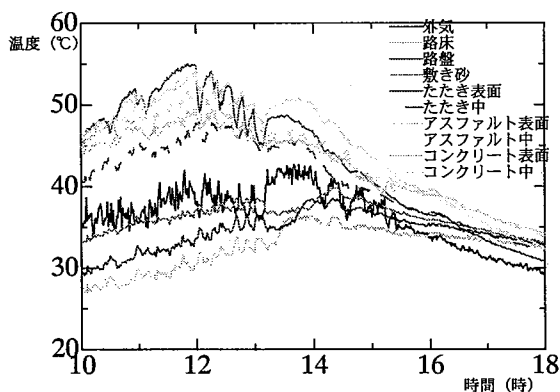


図-7 夏(前日晴)の温度変化

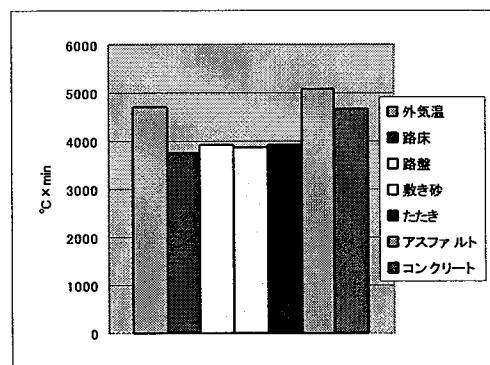


図-8 夏(前日晴)の積算温

ではなく、一つの試験体としてはどうなのかという視点で考える。この日は水を散水しておらず、試験体は水分を含んでいないので、たたき以外の二つの平板とそれほど変わらない積算温度を表すのかというと、そうではないことが分かる。たたき表面は日中前半で高い温度を示したが、中は低い温度を保っている。よって、空気中の微量な水分を吸収して、含んでいたと考えられる。

次に前日雨天だった夏の日の温度測定結果を図-9に示す。この日のアスファルトとたたきの最高温度差は7.3℃である。昼間はアルベドの低いアスファルトが最も高い温度を示している。ここで注目したいのが、たたきの温度である。前日散水していない、晴れの日の結果(図-7)よりも明らかに低く推移していることがわかる。日照が続くにつれてアスファルトやコンクリートとたたきとの温度差が大きくなっている。日沈後もこの二つは外気温より高いのに対し、たたき表面は路床、路盤、敷き砂とほぼ同じ様に低い温度で推移している。このことから、たたきは日没後も熱環境改善に効果的であるといえる。日が沈むにつれ、アスファルトとコンクリートは温度が逆転してコンクリート表面温度の方が高くなっている。これはアスファルトは日射の影響を受けやすいためである。蓄熱に関して言えば、熱伝導率はアスファルトの方が若干小さいが、本実験に関して言えば、アスファルトの厚さがが他より1cm薄く、5cmだったことも原因として考えられる。図-10の積算温度のグラフを見てみると、やはりたたきが平板の中で一番小さい値を示している。日中の前半はいくら水分を含んでいるとはいえ、明度が低い分、コンクリートより高い温度だが、こうして積算温度にしてみると、たたきの方が明らかに低い。

秋(春)の温度測定結果を図-11に示す。前日試験体に予めバケツ半分(およそ2l)の水を散水してある。アスファルトとたたきの表面の最高温度差は、7.3度で夏と同じ値が得られた。夏との違いは日照後で、全平板試験体とも気温より高く推移しているが、その差は小さくなっている。たたきはコンクリートより明度が低く、アルベドが小さいため内部に水分を保持していても日照中の表面温度上昇をあまり抑えることができないので、測定初期から日照強度の強い間では表面と内部との温度差は大きく推移している。コンクリートは、緻密構造であるがゆえに毛管作用による路盤などからの水分移動が小さく、日照後も内部温度はそれほど下がらないと考えられる。アスファルトも同様に緻密構造であるが、アルベドが小さい分だけ、日照後の温度低下が大きく、表面と内部の温度差は小さくなっている。図-12の積算温度をみてみ

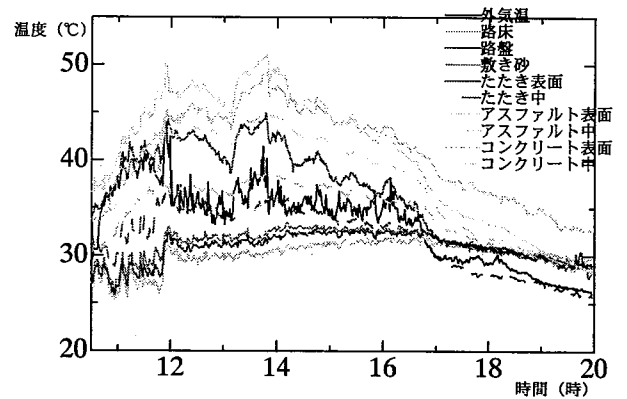


図-9 夏(前日雨)の温度変化

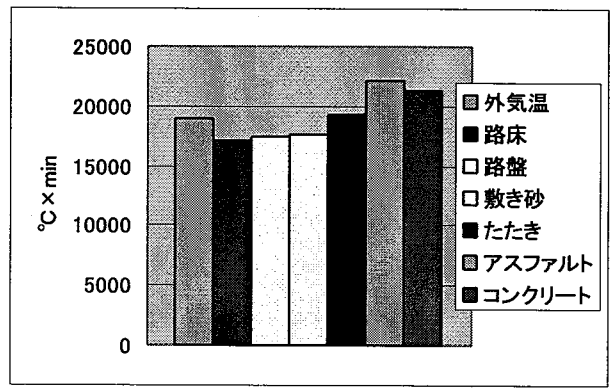


図-10 夏(前日雨)の積算温度

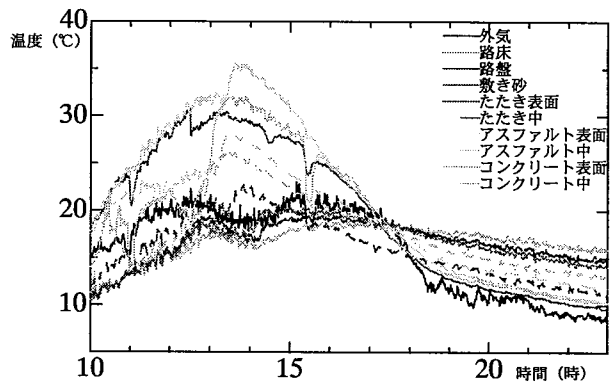


図-11 秋(春)の温度変化

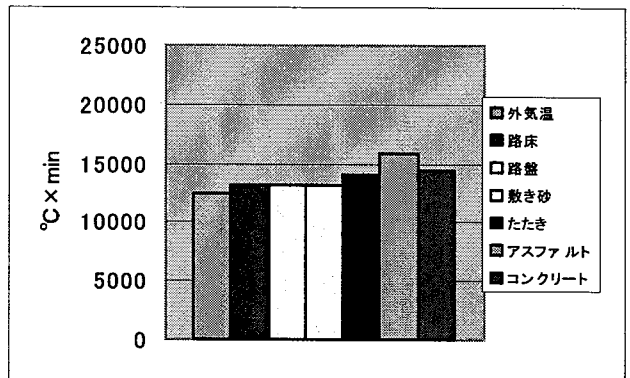


図-12 秋(春)の積算温度

ると、たたきとコンクリートはほぼ同じ値である。これは日中の前半が大きく関係していると考えられる。コンクリートは、前半はとても低い温度で推移している。それに対して、たたきは表面と中の温度差が大きく、この原因として考えられるのはやはり水分を含んでいるからであろう。

冬は、日照強度が小さいので全体的に夏季ほど大きな温度差を生じていない。そのため、Y軸のスペンを短くして変化が見やすいようにして図-13に示す。また、コンクリート中の値はふらつきが大きく、何か測定に不備があったと思われるため、グラフからは削除した。アスファルトとたたきの最高温度差は4.4度ある。日中は季節を問わずアスファルト、コンクリート、たたきの順に高いことが分かる。日没後はたたきの表面温度が一番低く推移している。図-14の積算温度のグラフでは、たたきと路床、路盤、敷き砂の値がほぼ同じである。日光の全く当たっていない地面とほぼ同じということは、やはりたたき内部にたまった水分が温度の上昇を抑えていると考えられる。冬季は歩道を歩くのに暖かい方が良いという考え方もあるが、地球全体でみると、冬でも都市部のヒートアイランド現象は記録されているので、季節を問わずたたきは有効的であると言えるだろう。

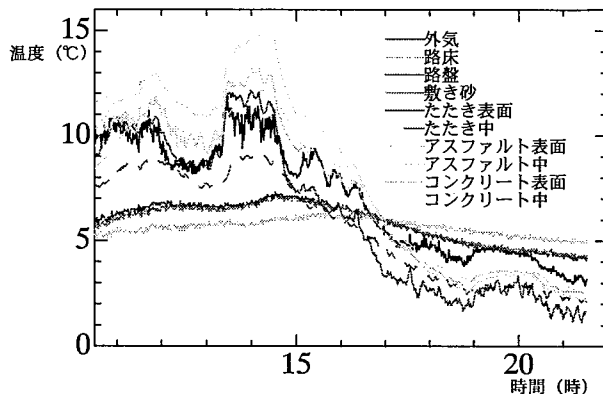


図-13 冬の温度変化

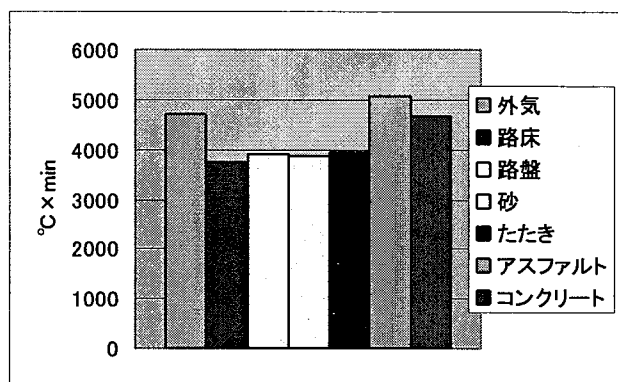


図-14 冬の積算温度

6. まとめ

「たたき」の特徴などはある程度、確立したデータは整ってきたといえる。特にヒートアイランドの抑制には大きな効果が得られるという手ごたえを感じた。しかし、たたきを舗装用平板としての製品化を図るには、いまだに研究が足りないと思う。JIS 企画で定められる舗装用平板と比較してみると、強度的に劣っている。JIS 規格に定められている歩道用平板の強度は、車の乗り入れなどを考慮し値が決められている。人が通るだけの散歩道や、公園の道などにももの JIS 規格を満たす舗装用平板を用いているのが現状である。

本研究のような、あらたな材料を開発していくには数多くのデータが必要となる。たたき平板を用いた公共事業の実例が少なく、国や県・市町村の関係者もこの材料の使用に決断が出せない。この研究は繰り返し行い、データの数を増やしていく事が必要不可欠であり、今後の課題とも言える。

参考文献

- | | |
|-----------------|--------------------------|
| 1) 都市における熱環境と舗装 | 姫野 賢治 (中央大学 理工学部 土木学科教授) |
| 2) 新編 土質力学 | 河上 芳義 (大森出版 1996年) |
| 3) 土の試験実習書 | 石原 研而 (社団法人 地盤工学会) |