

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06162

研究課題名(和文) インフラ更新時代の道路整備に必要な改質アスコンのリユースシステムの開発

研究課題名(英文) Development of recycling system for modified asphalt wastes on road improvements in the infrastructure renewal era

研究代表者

高橋 修 (TAKAHASHI, Osamu)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：60236263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：我が国におけるアスコンリサイクルの課題は、改質アスファルトを使用した改質アスコンの廃材を有効にリサイクルするための仕組みや要領等を開発することである。本研究では、ストレートアスファルト使用の通常アスコン廃材と改質アスコン廃材の物理的差異を明確にするとともに、通常アスコン廃材を再生骨材として運用している現状に改質アスコン廃材も組み入れる方法を模索した。その結果、現状では通常アスコン廃材と改質アスコン廃材を分別できないため、再生骨材の物性を把握した上で、その混入率と新規添加アスファルトのグレードを調整することによって、改質アスコンをリサイクルしていくことが効果的かつ経済的であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：One of important problems for asphalt waste recycling in Japan is to develop a new system and a new protocol for effective recycling procedures of asphalt waste materials mixed with a modified asphalt binder. The present study clarified the difference of physical properties between usual asphalt wastes mixed with a straight asphalt and the modified asphalt wastes. It was also investigated how to use modified asphalt wastes for recycled hot mix asphalt mixtures in the same way as usual asphalt wastes.

As a result, it was confirmed that adjusting the adding ratio of recycled aggregate and the grade of newly added asphalt was effective and economical for the modified asphalt wastes. Prior to that, physical properties of the asphalt wastes have to be evaluated correctly. Because it is difficult to distinguish the modified asphalt wastes from usual asphalt wastes.

研究分野：工学

キーワード：アスコン廃材 リサイクル 旧アスファルト 改質アスファルト フォース・ダクティリティ試験 半円形供試体曲げ試験 ひび割れ抵抗性

1. 研究開始当初の背景

道路や空港のアスファルト舗装は、他のインフラ構造物に比べて寿命が短く、10年程度で改修工事が行われている。通常のアスファルト混合物にはストレートアスファルト(ストアス)が使用されてきたが、長寿命化の有効な方法として、高分子材料で補強した改質アスファルトが表層用アスファルト混合物に運用されるようになった。その結果、アスファルト舗装の補修や改築に伴って発生するアスファルトコンクリート(アスコン)廃材に改質アスコンの占める比率が徐々に高くなってきている。

我が国のアスコンリサイクルは昭和50年代から本格的に開始され、現在では、ストアス使用の通常アスコン廃材の混入率を高くした再生アスファルト混合物が、恒常的に専用プラントから出荷されている。これに対して、年々発生比率が高くなってきている改質アスコン廃材のリサイクルについては、その品質が改質剤やその添加割合によって大きく異なることから、有効な評価方法や評価基準が未だに定められていない。そのため、現時点では、改質アスコン廃材は元来の用途と異なる路床材や埋戻し材の補充材としてリサイクルされることもある。すなわち、本来の性能が高い改質アスコン廃材は性能が低い通常アスコンよりも低品質な材料として利用されている。

今後ますますアスコン廃材における改質アスコンの比率が高くなっていくことから、効率よく、かつ適正に改質アスコン廃材をリサイクルしていくためには技術開発が必要で、併せてその技術を積極的に活用していくためのシステムの構築が求められている。アスコン廃材のリサイクル技術は、先進国のなかでも我が国が最も進んでおり、改質アスファルトを多用している我が国がいち早く改質アスコン廃材のリユース技術を開発することは、アスファルト技術に対する我が国のプレゼンスを広く示すことに繋がる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、アスファルト舗装の補修において大量に発生するアスコン廃材を再度アスコン資材として利用するリサイクル技術を高度化し、効率よく適正にリユースするためのシステムを構築することである。一般的に運用されてきた通常アスコンについては、リユース方法が既に標準化されているので、本研究では近年発生が多くなってきている改質アスコン廃材のリユースについて検討した。

通常アスコン廃材と改質アスコン廃材の違いは、骨材に付着している旧アスファルトの物性の差異で、現状では溶剤を用いて旧アスファルトを抽出、回収して、その物性を評価している。本研究では、アスコン廃材の物性を旧アスファルトの回収を行わずに評価する方法についても検討した。

3. 研究の方法

研究代表者の機関に近い位置に所在するアスコンのリサイクルプラントから複数のアスコン廃材を入手し、そのアスコン廃材から旧アスファルトを回収して、針入度試験と軟化点試験を実施した。これらの試験結果からそのアスコン廃材が通常のアスコンのものか、改質アスコンのものか判定できる。このようにして、いくつかの改質アスコン廃材を入手し、旧アスファルトを抽出、回収してその物性を評価した。旧アスファルトの性状評価には、上記の針入度試験と軟化点試験に加え、フォース・ダクティリティ試験(FD試験)も実施して、ストアスとの差異を明確にした。

当初の研究計画では、我が国における再生用添加剤の種類や型式について整理、分類するつもりであったが、研究に着手して実状を調査したところ、多くの製造企業が種々の製品を開発している割に使用実績が少ないこと、及びそれぞれの製品に対する供用性の実データがあまりにも少ないことがわかった。現時点でも、再生用添加剤の新規開発が積極的に行われていることから、本研究では代表的な再生用添加剤を使用した際の効果について、旧アスファルトがストアスの場合と改質アスファルトの場合で比較し、それ以上の検討は実施しなかった。

再生骨材を使用して製造した再生アスコンを新規アスコンと比べた場合に、最も懸念される物性はひび割れ抵抗性であることが、検討のプロセスで判明した。通常アスコン廃材と改質アスコン廃材の違いは、旧アスファルトの性状であることから、再生骨材として旧アスファルトに求められる性能は、粘結力に関係する引張破壊の抵抗性、すなわち引張作用を与えた場合に、引張応力が大きく、かつ応力ピーク時の引張ひずみ値も十分に大きいことである。したがって、再生骨材の評価法としては、引張作用に対する応力とひずみの関係が得られる比較的容易に実施できる試験方法を検討した。

改質アスコン再生骨材に再生用添加剤を使用して再生アスファルト混合物を製造する取り組みは、積極的に行われている。しかし、再生用添加剤の種類やグレード等によって、その再生アスコンの供用性と経済性がかなり異なるため、現時点で方向性を示すことは時期尚早と判断した。そこで研究代表者は、再生用添加剤に頼ることなく、改質アスファルトが混合していても、再生骨材の混入率を調整することにより、負の影響を抑制することを考えた。

その知見を得るため、本研究では再生アスコンの供試体に対して修正ロットマン試験、直接引張試験、及び曲げ疲労試験を実施し、改質アスコン再生骨材を混入した場合の剝離抵抗性、変形抵抗性、疲労抵抗性について調査した。再生骨材の混入率をいくつか変化させた再生アスコンの供試体を作製し、再生

骨材の混入率とこれらの性能との関係について考察した。

4. 研究成果

(1) 劣化した改質アスファルトの性状

新潟県長岡市近郊のリサイクルプラントから改質アスコン廃材を入手し、旧アスファルトを回収して性状を調査した。通常のアスコン塊は表・基層及びアスファルト安定処理路盤が一体となっており、それをクラッシングして再生骨材にするため、表層の改質アスコン部のみを分別することが不可能である。そのため、入手した改質アスコン廃材はいずれも表層部の切削材であった。合計、3種類の改質アスコン切削廃材について、旧アスファルトの性状を調査したところ、かなりのばらつきがあって、定性的な評価が難しかった。

そのため、新規の改質アスファルト及びストアスに促進劣化を施して、劣化の程度と性状の変化について比較した。促進劣化は、バイндаをマントルヒータで 180 に保持しながらプロペラ回転で攪拌する方法とした。この操作を 144 時間継続し、途中の時間でも資料をサンプリングして、それぞれの劣化時間における性状を評価した。ここでの改質アスファルトは、使用実績が最も多いポリマー改質アスファルト型(改質型)とした。

ここでは、バイнда性状として FD 試験の結果のみを示す。FD 試験は引張速度が 50 mm/秒、試験温度が 15 であった。各促進劣化時間における改質型及びストアスの FD 試験の結果を図-1、図-2 にそれぞれ示す。引張変位の増加とともに荷重が上昇してピークを迎え、その後荷重は低下している。ピークを迎えてからの荷重低下の仕方が、改質型とストアスでは大きく異なっている。改質

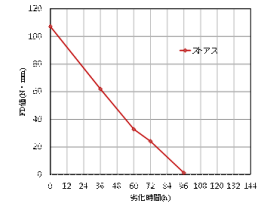
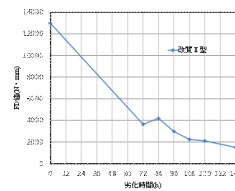


図-3 改質型のFD値 図-4 ストアスのFD値

型は、変位がさらに増加しても荷重低下が少なくなり、劣化程度の低いものは逆に再度荷重が徐々に大きくなっている。その結果、荷重-変位曲線は後半に膨らみが見られる形状になっている。この膨らみ部分の面積がタフネス・テナシティ試験のテナシティ(粘結力)に相当するもので、FD値と称している。改質型はこのFD値が大きく、ストアスはかなり小さい。そして、劣化の程度が高いほどFD値は小さくなっている。図-3、図-4に改質型及びストアスのFD値と劣化時間の関係を示す。FD値が大きいほど骨材を繋ぎ止めるバイндаとしての性能が高い。

荷重ピーク値については、改質型、ストアスとも劣化の進行に伴って大きくなっている。そして、ストアスは劣化に対する荷重ピーク値の増加程度が大きい。FD値の結果についても考慮すると、劣化に伴ってバイндаが硬く、脆くなっていること、ストアスよりも改質型のほうが、その程度は低いこと、劣化がさらに進行すると改質型とストアスの差が少なくなることが考察される。

(2) 再生アスコンのひび割れ抵抗性の評価

改質アスコン廃材や再生を繰り返した通常アスコン廃材の再生骨材は、現行の運用基準を満足できないものが多い。ここでは、このような再生骨材を「規格外再生骨材」と称し、規格外再生骨材を敢えて混入した場合の再生アスコンのひび割れ抵抗性を評価した結果を示す。

1) 再生アスファルト混合物の配合

本研究では、中央粒度を目標とした最大骨材粒径 13 mm の密粒度アスファルト混合物(密粒 13)を検討用の配合とした。新規アスファルトバイндаとしてストアス 60/80 を使用し、配合設計結果に基づいた設計アスファルト量で供試体を作製した。新規アスファルト混合物の設計アスファルト量が 5.4% であったことから、新規ストアスの配合量は再生骨材に含まれる旧アスファルト量を考慮して、各配合の総アスファルト量が同じになるように設定した。

規格内及び規格外の再生骨材の混入率を 0~30% の範囲で 10% 毎に変化させ、新規のものとは別にそれぞれ 3 種類の再生アスファルト混合物を配合した。使用した再生骨材の物性、及びその旧アスファルトの性状を表-1 に示す。また、各アスファルト混合物の合成粒度、及び再生骨材の粒度を表-2 に示す。再生骨材は細粒分が多いため、混入率の増加とと

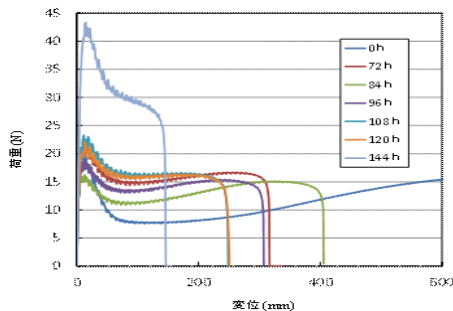


図-1 改質型のFD試験の結果

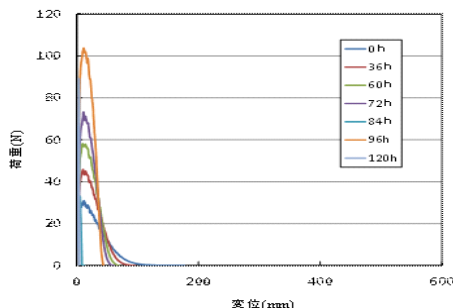


図-2 ストアスのFD試験の結果

表-1 再生骨材の物性及び旧アスファルトの性状

項目		規格内	規格外
旧アスファルトの含入率 %		5.75	
旧アスファルトの性状	針入度 1/10 mm	15	14
	圧裂係数 MPa/mm	1.41	2.36
	軟化点	65.5	73.5
骨材の微粒分量 %		3.8	

表-2 再生アスコンの合成粒度と再生骨材の粒度

寸法 mm	配合	再生骨材の混入率 %				再生骨材
		0	10	20	30	
通過質量百分率 %	19.0	100	100	100	100	100
	13.2	99.5	99.6	99.5	99.5	99.5
	4.75	61.5	63.5	62.6	63.2	75.5
	2.36	42.5	41.4	41.0	42.7	62.2
	0.6	24.3	25.3	25.7	26.6	44.6
	0.3	14.2	15.2	15.8	15.9	27.4
	0.15	8.5	9.2	9.2	8.4	12.9
	0.075	6.0	6.8	6.7	5.6	8.8

もに 0.6 mm 以下の通過量が多くなっている。
2) 試験の実施要領

アスコンのひび割れ抵抗性とは、変形を生じた場合に柔軟に追従できることである。本研究では、力学的に最もシンプルな直接引張試験、及び耐久性に直結した曲げ疲労試験によって各再生アスコンのひび割れ抵抗性を評価したが、ここでは前者の結果を示す。

直接引張試験は、供試体の長軸方向に強制的に引張変位を与え、その際の荷重をモニタする評価法である。試験要領は単純であるが、標準化されている試験法ではない。しかしながら、研究レベルでは多くの実績があり、評価試験としての信頼性は問題ない。

試験用の供試体は、ホイールトラッキング試験の供試体を作製する要領で 300 × 300 × 40 mm のアスコンブロックを作製し、それから 240 × 40 × 40 mm のプリズム状供試体を 6 本切り出した。なお、母体アスコンブロックのローラコンパクトでの締固めは、再生骨材混入率 0% の配合で基準密度が得られる締固め条件とし、全ての供試体で同一とした。

240 × 40 × 40 mm の供試体の両端面に引張用治具をエポキシ樹脂系接着剤で貼り付け、恒温槽内に試験温度 20 で 5 時間以上養生した。その後、一定の変位速度 1.0 mm/分 で供試体を軸方向に引き伸ばした。試験データは、アウトプットである荷重値がピークとなる状態を破断と定義し、破断時の応力とひずみの値をそれぞれ直接引張強度、破断時ひずみ

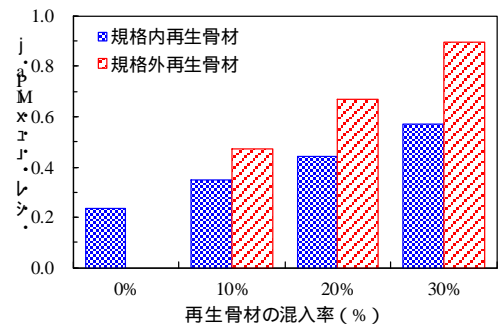


図-5 再生骨材の混入率と直接引張強度の関係

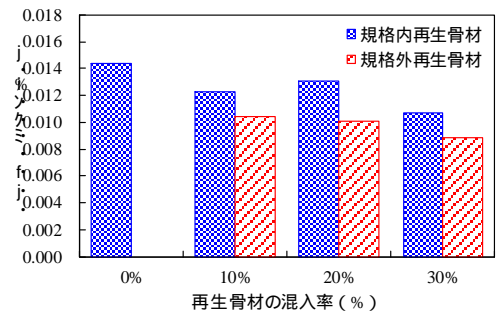


図-6 再生骨材の混入率と破断時ひずみの関係

として整理した。

3) 試験結果及び考察

直接引張試験より得られた各アスコン供試体の直接引張強度、破断時ひずみの結果を図-5、図-6 にそれぞれ示す。直接引張強度については、前章の間接引張試験の結果と同様の傾向で、規格外再生骨材を用いた再生アスコンのほうがすべての混入率において規格内再生骨材を用いたものよりも大きい値である。また、規格内と規格外のどちらの再生骨材を用いた再生アスコンとも、再生骨材の混入率が高いほど直接引張強度は大きい。前章での考察と同様に、再生骨材の旧アスファルトの量と質が影響して、このような結果になったものと考えられる。

直接引張試験では引張応力を実載荷の縦方向で、間接引張試験では横方向で測定している。また、供試体の形状寸法も大きく異なる。これらの違いはあるものの、直接引張強度のほうが間接引張強度よりも再生骨材の違いによる結果の差異が明確に表れているのは、直接引張試験のほうはひずみ速度がかなり遅いためと考察される。

破断時ひずみの結果は、直接引張強度の結果とは逆の傾向で、規格外再生骨材を用いた再生アスコンのほうが、すべての混入率において規格内再生骨材を用いたものよりも値が小さい。また、再生骨材の混入率が高いものほど、破断時ひずみは低下する傾向が認められる。ただし、規格内再生骨材を 20% 混入した再生アスコンの結果は、新規アスコンの場合と大きな差はなく、規格内再生骨材を 30% 混入したもののとの差は有意と捉えられる。前章での間接引張強度の結果も加味して、直接引張試験の結果を総括すると、以下のよう

表-3 本研究での SCB 試験の仕様

項目	設定値	参考基準
直径・厚(mm)	150.0・50.0	CEN
ノッチ寸法(mm)	1.5・15.0(幅・深さ)	AASHTO
速度(mm/分)	5.0(50.0)	CEN
試験温度()	-10, 0, 5, 10, 15, 20	(CEN)
支間長(mm)	120.0	C・A 共通

に考察される。再生骨材の混入は、旧アスファルトや粒度の影響によってアスコンが硬く締め固まる効果を有しているものの、変形作用に対しては変形し難く、脆くなる効果もある。そのため、再生骨材の混入率の増加、及び老化の進行した再生骨材の混入は、再生アスコンの変形追従性の低下につながるものと評価される。

例えば北陸地方では、表・基層用再生アスコンへの規格内再生骨材の混入は 30%まで許容されている。この実態を鑑みると、引張作用に対する変形追従性(破断時ひずみ)に基づいて、ここで使用した規格外再生骨材であっても、より少量(10~20%)であれば、同程度の性能を期待することが可能で、表・基層用の再生アスコンとしても活用できると考えられる。

(3) アスコン再生骨材の簡易的評価法

我が国ではストアスのグレーディングを針入度の値で行っていることから、再生骨材の評価は旧アスファルトの針入度のみで行っていた。その後、再生骨材のみで作製した供試体の圧裂係数に対する評価基準が平成22年度から加えられた。針入度が評価指標として不適切な改質アスコンの再生骨材は、主に圧裂係数で評価されることになっている。圧裂係数を求める圧裂試験は、比較的簡便であるが、再生骨材で重要な変形性能について評価が不明であるといった欠点が指摘されている。変形性能を評価できる試験法について調査したところ、諸外国では半円形供試体の曲げ試験(Semi-Circular Bending test, SCB試験)が運用されており、圧裂試験の欠点を補う手法と考えることができる。

本研究では、我が国で一般的な試験機器を用いた簡便な SCB 試験の仕様・要領について検討した。そして、この場合のひび割れ抵抗性評価法としての妥当性や適用性について基本的な知見を得た。

1) SCB 試験の実施要領及び評価指標

本研究では、ひび割れ抵抗性が明らかに異なり、その性能の違いが既知の3種類のアスコンを用いて SCB 試験を実施し、その評価結果が既往の知見と同様になるような評価指標と試験条件を模索していく要領で検討を行った。3種類の試験用アスコンは最大骨材粒径が5mmの密粒度系骨材粒度とし、バインダにそれぞれストアス 60/80、改質 II 型、

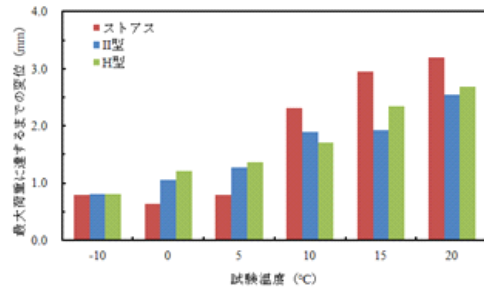


図-7 最大変位に達するまでの変位の比較

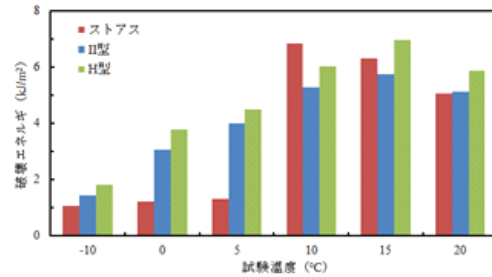


図-8 破壊エネルギーの比較

改質 H 型を使用した。そして、各素材の配合割合は同一とした。これまでの経験により、改質 H 型、改質 II 型、ストアスを使用したアスコンの順にひび割れ抵抗性が高いことが知られている。

実施した SCB 試験は、CEN 及び AASHTO の試験法を参考に仕様を選定し、表-3 に示すとおりとした。評価指標については、我が国の静的曲げ試験での評価値、及び CEN 仕様と AASHTO 仕様での評価パラメータを参考にして選定した。ひび割れ発生に耐えようとする性能である変形追従性として、最大荷重に達するまでの変位を評価指標の一つとした。また、ひび割れが発生して徐々に進展し、アスコン供試体が破断するまでに要する仕事量として、AASHTO の仕様で採用されている破壊エネルギーの値も評価指標に加えた。破壊エネルギーは、載荷過程で得られる荷重・変位曲線の積分値を破断部の断面積で除した値である。

2) 試験結果及び考察

SCB 試験の結果として、各アスコン供試体に対する最大荷重に達するまでの変位を図-7 に示す。改質アスファルトを使用したアスコンは、試験温度が高くなるに従って変位の値は大きくなっており、ストアスを使用したアスコンは脆化点を越えた温度でこの傾向が顕著に表れている。5 以下の温度条件では、改質 H 型、改質 II 型、ストアスの順に最大荷重に達するまでの変位が大きくなっており、既往の知見と一致する結果となっている。しかしながら、10 を超える温度条件では、ストアス使用のアスコンが最もこの変位が大きい。

図-8 に破壊エネルギーの結果を示す。上記の最大荷重に達するまでの変位の結果と同様に、5 以下では改質 H 型、改質 II 型、ストアスの順に破壊エネルギーが大きく、既往の知

見と同じ評価結果となっているが、10 以上では異なる結果となっている。最大荷重に達するまでの変位の結果との相違点は、破壊エネルギーのほうが 5 以下での性能差の傾向はより顕著であり、10 以上ではバインダ種による違いが明確に表れていない。

10 を超える温度条件で上記のような結果が得られた要因として、荷重 - 変位曲線の形から以下のことが考察される。ストアスは温度が高くなると粘性が低下して応力緩和が大きくなり、強制変位に順応する形態で応力が変化するため、荷重 - 変位曲線が低く横に長い形状となって、その結果として最大荷重に達するまでの変位も破壊エネルギーも値が大きくなってしまった。

そこで、温度 15 の条件に対して、載荷速度を 10 倍の 50.0 mm/分に変更して SCB 試験を実施した。図-9、図-10 に最大荷重に達するまでの変位と破壊エネルギーの結果をそれぞれ示す。最大荷重に達するまでの変位は、ストアスと改質アスファルトの違いは確認できるが、改質 II 型と改質 H 型の差異は明確ではない。これに対して破壊エネルギーの結果は、既往の知見と同じに評価することができる。最大荷重に達するまでの変位は、ひび割れが発生するまでの抵抗性のみを表す指標であり、破壊エネルギーはひび割れが生じて破断に至るまでのひび割れ進展の抵抗性も含めた指標である。そのため、このような評価結果に差異が表れたものと考えられる。

(4) 研究成果のまとめ

以上に記述した研究成果、及び紙面の制約で記載できなかった成果についてまとめると、以下のとおりである。

- 1) 劣化が極度に進展していない改質アスファルトは、ストアスよりも粘結力が大きく、ひび割れ抵抗性が優れている。標準化されている針入度試験や圧裂試験からはその違いを評価することができない。その代替として SCB 試験が有望である。
- 2) 基準を満足しない再生骨材を混入した再生アスコンは、混入率を問わず剥離抵抗性、塑性流動抵抗性については問題ない。再生骨材の混入率が高いほど、直接引張試験での破断時ひずみは低下する傾向があり、この傾向は規格外再生骨材を用いた再生アスコンのほうが顕著であった。現行の規格内再生骨材の運用実績に基づいて、許容できる破断時ひずみの値を設定すれば、規格外

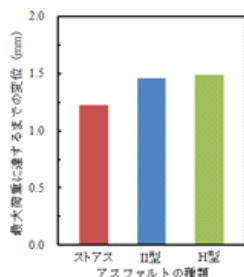


図-9 高速度の変位

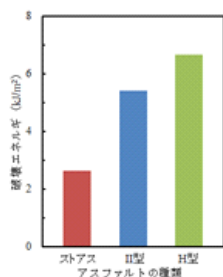


図-10 高速度のエネルギー

再生骨材の適正な混入量を規定することができる。

- 3) アスコンリサイクルプラントの現状では、改質アスコン廃材と通常アスコン廃材を分別することが不可能である。再生の繰返しにより改質アスファルトの粘結力は低下すること、さらなるコスト削減のニーズがあること等も考慮すると、今後における研究の方向性としては、アスコン廃材を分別することなく、再生骨材を評価して製造後の再生アスコンの物性を規定するリサイクルシステムの構築が必要とされる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Tran Thanh Nhat, Osamu Takahashi : Investigation on Indices of Workability and Rutting Resistance for Wearing Course Mixtures, The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 査読あり, vol.12, no.1, 2017, pp.30-37

Nhat Thanh Tran, Osamu Takahashi : Effect of Aggregate Gradation on the cracking Performance of Wearing Course Mixtures, Construction and Building Materials, 査読あり, 152, 2017, pp.520-528

〔学会発表〕(計 5 件)

佐藤千鶴, 高橋 修 : 高速道路の切削廃材を使用したアスファルト安定処理路盤材の物性評価, 第 13 回北陸道路舗装会議, 2015 年 6 月 4 日, ANA クラウンホテルプラザ新潟

高橋 修, 畑山 惇 : 瀝青安定処理路盤のひび割れ抵抗性とその改善に関する研究, 土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会, 2015 年 9 月 16 日, 岡山大学

小柳佳範, 高橋 修 : 瀝青安定処理路盤材の耐久性向上に関する検討, 第 31 回日本道路会議, 2015 年 10 月 27 日, 都市センターホテル

小林龍平, 高橋 修 : 応力緩和を考慮した直接引張試験によるアスコンのひび割れ抵抗性評価に関する検討, 土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016 年 9 月 7 日, 東北大学

Tran Thanh Nhat, Osamu Takahashi : Improvement on Aggregate Gradation Design and Evaluation of Rutting performance of Vietnamese Wearing Course Mixtures, MAIREPAV8, 2016, June 27th, Singapore

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 修 (TAKAHASHI OSAMU)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号 : 60236263