サンドマスチックの温度および載荷速度に 対する強度特性試験

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND SHEARING SPEED ON STRENGTH CHARACTERISTIC OF SAND MASTIC

山崎智弘¹・澤田豊²・横井敦³

Tomohiro YAMASAKI, Yutaka SAWADA and Atsushi YOKOI

¹正会員 博(環境) 東洋建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0003 名古屋市中区錦1-17-13)

²正会員 博(農) 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

³東洋建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0003 名古屋市中区錦1-17-13)

Sand mastics are often used as impermeable materials for a waste repository. For the evaluation of the quality, compression and bending tests are carried out under a particular temperature and shearing-speed. However, in a previous study, it has been revealed that the strength characteristic of sand mastics is considerably dependent on the temperature or shearing-speed. In this study, triaxial compression tests for sand mastics were conducted in order to evaluate the strengths under various temperature or shearing-speed. From the test results, the internal friction angle was evaluated as almost zero. In addition, it was indicated that the cohesion became small with the increase of temperature or the decrease of shearing-speed. Namely, it is essential for the design to determine the strength of sand mastics according to the environmental conditions.

Key Words : Sand mastic, Strength characteristic, Temperature, Shearing speed

1. はじめに

瀝青材料(アスファルト混合物)のひとつであるサンドマスチックの材料配合は、重量比でストレートアスファルト:石灰石粉:砂=16~20:18~25:55~66¹⁾であり、遮水用としては同20:30:50²⁾が推奨されている。サンドマスチックの大きな特徴は、遮水性に優れており、また自重により下部に発生した隙間などに充填していく性質をもつことである。そのため、管理型処分場などにおける異質材料間の接合部や目地部での変形追従性遮水材として利用されている。

しかし、サンドマスチックを護岸底面の遮水材として、特に滑動などの安定解析上、土質材料としての強度評価が必要な箇所に用いる場合は、適切に強度設定をして設計することが望まれる。サンドマスチックの品質については、配合設計における試験練りや、施工時の抜き取り試験などで確認されている。これらのうち強度に関する品質試験は、曲げ試験、圧縮試験であり、温度10℃、載荷速度20mm/minの試験条件において、それぞれ1,000 kN/m²以上であることが品質管理上の必要条件となっている^{1), 2)}。

ここに、サンドマスチックは高温で流動化し、また自重や上載荷重によりゆっくりと変形する特性を

有する材料であるため、現場に打設したサンドマスチックの周囲温度が試験温度以上となる場合や、試験載荷速度よりゆっくりと変形している際の強度は、品質試験で得られた強度より弱くなることが懸念される。著者らはこのような場合の材料強度についての各種試験を実施し、温度を20℃、載荷速度を1mm/minとした三軸圧縮試験の結果では、サンドマスチックの強度は品質試験における必要強度の1/10以下に低下することや、打設層厚によっては含有砂の沈降による材料分離が発生し、砂含有率が小さい表層ではさらに強度低下するなどの知見³⁾を示した。

本研究では、さらにサンドマスチックの強度特性に関する知見を上積みするべく、温度と載荷速度がサンドマスチックの強度に与える影響について、系統的に三軸圧縮試験を実施し評価した。

2. 方法

サンドマスチックの温度および載荷速度に対する強度特性を調べるために三軸圧縮試験(JGS 0521に準拠)を実施した。試験にはストレートアスファルトの配合が17%および20%(以降、As17%, As20%と表記)の供試体を用いた。供試体の配合条件を表-1に

示す．ここに，サンドマスチックにおけるストレートアスファルトの配合率は16～20％であるが，As17は土質材料として適用を念頭に施工における材料のバラツキなどを考慮して下限値16%より1%大きな配合とした．またAs20%は遮水用の配合として選定した．

供試体は，アスファルト合材工場にて110℃で十分混練したものを採取し，サミット缶(φ5×H10cm)に投入し作成した(写真-1参照)．三軸圧縮試験は恒温室内にて実施した．供試体温度を室温各20，23，26，31℃に馴染ませ，セル内の側圧は空気圧にて約50，150，250 kN/m²に加圧し，荷重速度は0.5，1.0，2.0 mm/minとした．試験中には，セル内の温度を温度計にて測定しながら，設定温度条件下で試験が実施できていることを確認した．試験条件を表-2に，試験状況を写真-2に示す．

表-1 サンドマスチックの配合

材料	比重	サンドマスチック (重量比%)	
ストレートアスファルト(針入度60/80)	1.03 (at 15℃)	17	20
石灰石粉(0.074mm未満)	2.71	23	30
砂(0.074～2.5mm)	2.66	60	50

写真-1 供試体作成(サミット缶φ5cm，H=10cm)

表-2 試験条件

As配合率 (%)	荷重速度 (mm/min)	温度(℃)			
		20	23	26	31
17	0.5	○	—	○	—
	1.0	○	—	○	—
	2.0	○	—	○	—
20	0.5	○	○	○	○
	1.0	○	○	○	○
	2.0	○	○	○	○

○：試験実施(側圧 50，150，250kN/m²) —：試験未実施

(a) 試験状況 (b) 試験中の供試体
写真-2 三軸圧縮試験状況

3. 結果

各試験における軸差応力-軸ひずみ曲線を図-1(a)(b)(c)(d)(e)(f)に示す．As17で荷重速度2.0mm/minにおける温度20℃側圧150 kN/m²(図-1(c)参照)，およびAs20%で荷重速度2.0mm/minにおける温度23℃側圧150 kN/m²(図-1(f)参照)は欠測である．いずれの結果においても，ひずみ15%までの範囲において，応力はピーク値をとらず，強度増加していた．

図-1(a) 応力-ひずみ曲線 (As17%, 荷重速度0.5mm/min)

図-1(b) 応力-ひずみ曲線 (As17%, 荷重速度1.0mm/min)

図-1(c) 応力-ひずみ曲線 (As17%, 荷重速度2.0mm/min)

図-1(d) 応力-ひずみ曲線 (As20%, 載荷速度0.5mm/min)

図-1(e) 応力-ひずみ曲線 (As20%, 載荷速度1.0mm/min)

図-1(f) 応力-ひずみ曲線 (As20%, 載荷速度2.0mm/min)

温度および載荷速度が同じであれば、側圧を大きくしても同じひずみにおける応力は同程度の値、もしくは僅かな上昇であった。また温度が高くなると強度は低下する傾向に、載荷速度が速くなると強度増加する傾向が確認できた。さらにAs17%はAs20%より高強度であった。

各試験において、ひずみ5, 10, 15%における応力を抽出し、温度および載荷速度ごとの内部摩擦角 ϕ および粘着力Cを算定した。算定結果を表-3(a)(b)に示す。内部摩擦角 ϕ は一部のケースで負値となるような、極めて 0° に近い値であり、土質的には ϕ 材

表-3(a) 内部摩擦角 ϕ および粘着力C (As17%)

ひずみ(%)	温度($^\circ\text{C}$)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)			粘着力C (kN/m^2)		
		載荷速度(mm/min)			載荷速度(mm/min)		
		0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
5	20.1	-0.60	0.13	2.93	27.6	36.0	54.3
	25.8	0.03	0.23	0.68	12.5	13.8	26.3
10	20.1	-0.59	0.02	4.89	48.6	65.1	91.3
	25.8	-0.02	0.59	1.62	22.6	24.4	43.1
15	20.1	0.93	0.71	7.36	65.2	86.2	113.5
	25.8	0.26	1.21	2.35	29.8	32.6	57.0

表-3(b) 内部摩擦角 ϕ および粘着力C (As20%)

ひずみ(%)	温度($^\circ\text{C}$)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)			粘着力C (kN/m^2)		
		載荷速度(mm/min)			載荷速度(mm/min)		
		0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
5	20.1	0.33	0.36	1.37	5.5	10.3	16.3
	23.0	0.28	0.32	0.34	3.2	7.7	11.5
	25.9	0.39	0.47	0.27	1.0	1.8	5.1
	31.0	-0.06	-0.20	-0.52	1.1	2.5	4.7
10	20.1	0.24	0.67	2.29	9.2	14.6	21.9
	23.0	0.39	0.29	0.61	4.8	11.6	16.6
	25.9	0.43	0.44	0.21	1.7	3.5	8.8
	31.0	-0.16	-0.39	-0.82	2.0	3.9	7.1
15	20.1	-0.16	1.05	2.74	13.7	18.3	27.4
	23.0	0.38	0.43	0.48	6.5	14.2	21.7
	25.9	0.27	0.52	0.08	3.0	4.7	11.7
	31.0	-0.20	-0.58	-1.14	2.5	5.1	9.1

図-2(a) 粘着力C (As17%)

図-2(b) 粘着力C (As20%)

としては評価しにくい。

さらに、粘着力Cについて結果を整理した。結果の整理において、内部摩擦角 ϕ が負値となるケースについては、 $\phi=0$ としてCを再算出した。温度および載荷速度ごとの粘着力Cを図-2(a)(b)に示す。温度が高くなるほど、また載荷速度が遅くなるほど、さらにひずみが小さいほど、粘着力Cは小さくなる傾向があった。As20%における温度26°Cと31°Cの粘

着力Cを比較すると、ひずみが小さく、載荷速度が遅い条件においては、同程度の強度であった（図-2(b)参照）。

4. 考察

サンドマスチックの品質試験における圧縮強度の基準値 q_u は $1,000 \text{ kN/m}^2$ 以上（温度 10°C 、載荷速度 20mm/min ）であるが、本試験条件ではAs17%の圧縮強度 q_u （ $=2 \times C$ ）は、 $20 \sim 240 \text{ kN/m}^2$ と基準値の約1/4以下であり、As20%の圧縮強度 q_u は $2 \sim 60 \text{ kN/m}^2$ と同約1/15以下であった。また温度が高く、載荷速度が遅い場合、強度低下することが明らかとなった。

図-1および表-3に示すとおり、サンドマスチックは側圧の増加に伴う強度増加が僅かなことから、土質強度として設定する場合は、 ϕ 材ではなく、粘性材料として粘着力Cで評価することが適当と考えられる。サンドマスチックの粘着力Cを設定する場合には、サンドマスチック設置場所の環境温度最大値や、許容できるひずみ量を考慮する必要がある。サンドマスチックを陸上に設置する場合は、夏期の気温が 30°C 以上に達する場合があります、水中に設置する場合においても水温が 25°C を超える場合がある。温度環境を 26°C と想定した場合、許容ひずみを5%とする場合、図-2(a)(b)の試験結果より、粘着力CはAs17%で約 10 kN/m^2 、As20%で約 1 kN/m^2 と設定することが示唆できる。As17%の方が高強度となる理由は、配合されたストレートアスファルトの体積が少なく、砂含有量が大きく、サンドマスチック内部において砂同士のせん断抵抗が大きくなることが挙げられる。

以上より、遮水性を確保する場合は砂含有量の相対的に少なく、遮水材としての既往知見^{4), 5), 6), 7)}が豊富なAs20%が変形しやすく適切な配合と考えられる。しかしながら材料に強度が要求される場合については砂含有量の多いAs17%が施工時の材料分離の傾向も小さく³⁾、適切な配合と考えられる。

次に、品質試験の実施において、温度とは別に配合の違いによる強度影響を明らかにすることを目的とし、 20°C および 26°C における粘着力CのAs20%に対するAs17%の比を図-3に示す。 20°C における粘着力比は、約3～5であるが、 26°C では約5～13であった。高温ほどまた載荷速度が遅いほど配合による粘着力Cの比が大きい傾向であった。逆に、低温になると配合や載荷速度の違いによる差は小さくなる傾向にある。品質試験時の温度は 10°C かつ載荷速度 20 mm/min と比較的低温であり、載荷速度が速いため、配合が規定の範囲内で異なっているにもかかわらず、一律の基準値で管理できると考えられる。

さらにアスファルト合材工場にて日あたり約100t前後のサンドマスチック（配合は表-1と同じ）を製造した際に、その品質確認として抜き取った延45日間の供試体について公的機関で実施した密度および

図-3 粘着力強度比 (As17%/As20%)

図-4 サンドマスチック密度と圧縮強度

圧縮試験（温度 10°C 、載荷速度 20mm/min 、舗装調査・試験法便覧⁸⁾）の結果を図-4に示す。密度はAs20%よりAs17%の方が大きかった。これは比重の大きな石灰石粉と砂の含有量が多いためである。密度はAs17%およびAs20%とも要求品質規格値である 1.95 g/cm^3 ¹⁾を上回っており、また配合ごとの標準偏差は約 0.01 g/cm^3 であり、実施工においてバラツキの少ないサンドマスチックがアスファルト合材工場より供給されたことが確認できた。一方で、圧縮強度については定性的には砂含有量が多いほど、つまり密度が大きいほど圧縮強度は大きくなると考えられるが、図-4の結果はその限りではない。圧縮強度の標準偏差はAs17%で約 600 kN/m^2 であるのに対し、As20%では約 $1,200 \text{ kN/m}^2$ であり、As20%の方がバラツキは大きい。図中には夏季（7-9月）と冬季（12-2月）とそれ以外の期間に分けて圧縮強度を示している。相対的に夏季の強度が弱く冬季が強い傾向が確認できる。これは試験手順に起因することが考えられる。つまり、試験温度が 10°C と規定されているため、試験に用いる供試体は恒温庫や水浴により 10°C 環境下に馴染ませた後、すみやかに室内の試験機にかけられる。ここに、試験機のある室内の温度を 10°C とすることが困難な場合、供試体温度は試験終了までの経過時間とともに上昇することが考えられ、この場合、圧縮強度は 10°C 想定時より軟弱になることが懸念される。この影響がAs20%の方が大

きかったものと考えられる。いずれの試験結果においても圧縮強度の要求品質規格値である1,000 kN/m²を上回っているため、品質管理上の問題は生じない。しかし、本論文にてサンドマスチックの強度が温度の影響を受けることを明らかにした。よって意義のある品質試験を実施するためには、試験前の供試体温度のみならず、試験中の供試体温度についても把握し評価することや、サンドマスチックの比熱を考慮して一定の短時間内に試験を実施するなどの試験時の規定を設けることが必要と考える。さらに一歩踏み込むならば、試験時の温度環境が10℃に維持できない場合を鑑み、試験温度を20℃とする強度基準値を設定することや、20℃と10℃の強度換算係数を配合ごとに設定することが必要と思われる。加えて、載荷速度20mm/minについても、荷重制御式の試験に代替するなど、再考の必要性が示唆できる。

なお、As17%およびAs20%の供試体を用いた透水試験（150kPaにて24時間加圧後10分間計測、舗装調査・試験法便覧⁸⁾）を実施した結果、いずれも透水しなかった。したがって、As17%においても遮水性を確保した材料であることが確認できた（写真-3参照）。

写真-3 As17%における透水試験状況

5. 結論

陸上や水中における環境温度のうち比較的高温域でのサンドマスチックの強度について定量的な評価

を行うことを目的に、三軸圧縮試験を実施した。品質試験条件下での基準値と比較して、温度が高いほど、また載荷速度が遅いほど強度は小さくなる傾向があることが確認できた。したがって、サンドマスチックを強度材料として設計・施工する場合は、品質試験条件下での強度試験値ではなく、施工する環境条件に応じた強度設定を行う必要がある。

課題としては、品質確認試験条件や評価方法について見直しすることに加え、As17%における変形追隨機能としての品質について知見を蓄積することが挙げられる。

謝辞：本試験の実施にあたり、供試体の作成および品質確認試験の準備には前田道路(株)衣浦合材工場および(株)NIPPO知多合材工場の御協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修、(社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、pp. 451-456, 2007. 7.
- 2) 海洋アスファルト工法研究会：アスファルトマスチック技術マニュアル、p. 19, 2010.
- 3) 山崎智弘、横井敦、澤田豊：アスファルト混合物の温度および変位速度に対する強度特性試験、海洋開発論文集、26, pp. 1029-1034, 2010.
- 4) 上杉忠男、中川純一、鶴飼亮行、石本健治、土屋美和、中野浩：異種材料を組み合わせた廃棄物埋立護岸の遮水構造の実験的検討、海洋開発論文集、21, pp. 837-842, 2005.
- 5) 中野浩、伊坂健二、伊藤隆彦、和木多克、野々田充：軟弱な捨石マウンド上に水中打設されたアスファルトマスチック層の変形追従・遮水性に関する実験的検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第7部、58, pp. 289-290, 2003.
- 6) 星野太、和木多克、中野浩、伊藤隆彦、野々田充：アスファルトマスチックの変形追従性の実験的検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第7部、58, pp. 313-314, 2003.
- 7) 伊藤隆彦、伊坂健二、野々田充、中野浩、和木多克：水中打設したアスファルトマスチックと各種接合部の透水性に関する実験的検討、土木学会年次学術講演会講演概要集第7部、58, pp. 317-318, 2003.
- 8) (社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧、H19. 6.