

V-29

間接引張試験による水工用アスファルト混合物の低温時力学性状

—アスファルト表面遮水壁の合理的設計に向けてのアプローチ—

北海道電力(株) ○正会員 楠原 和典

北海道電力(株) 正会員 高野 準

1. はじめに

北海道電力(株)は、虻田郡京極町に道内初で水力としては最大規模となる純揚水式の京極発電所(最大使用水量 190.5m³/sec, 有効落差 369m, 最大出力 60 万 kW)の建設を計画している。

京極発電所の上部調整池は、京極町の北部に位置する本倶登山の東側に広がる標高約 900m の台地状の山地を掘り込み、掘削土の一部を堤体材料として盛り立てて構築する計画である。調整池の遮水方式はその構造・地質特性と、国内におけるロックフィルダムでの実績などを勘案し、調整池の内側全面をアスファルト混合物で覆う計画としている。上部調整池の諸元、平面図、断面図をそれぞれ表-1、図-1、図-2に示す。

上部調整池計画地点は、冬季の気温が-20℃以下となり、積雪深も 5mを超える道内でも有数の積雪寒冷地域であり、世界にもあまり例を見ない立地環境下にある。アスファルト表面遮水工には、このような厳しい気候に耐えて遮水性を確保し、堤体の変形に追従するという厳しい品質が要求されている。

アスファルト表面遮水工の設計については、アスファルト混合物が温度とひずみ速度に依存して力学性状が変化し、いわゆる粘弾性体としての挙動を呈すること、またダム本体に比べてその構造が薄膜であることから一般的な許容応力度法のような設計手法は適用が困難であり、堤体の変形への追従性をひずみで評価する設計手法がとられている。

本研究は、上部調整池の設計に当たり、堤体の変形、地震時の挙動および遮水壁に発生する温度応力について検討を進めるための基礎資料として、アスファルト混合物の力学性状を把握する必要があることから、アメ

表-1 上部調整池の諸元

項目	上部調整池
ダム型式	アスファルト表面遮水壁型 ロックフィルダム
ダム高さ(m)	22.20
堤頂長(m)	ダム部 1,039.83 全 周 1,450.00
堤頂幅(m)	15.00
法面勾配	上流面 1:2.5 下流面 1:2.5
堤体積(×10 ³ m ³)	1,244
遮水面積(m ²)	斜面:切土部 92,300 盛土部 62,465 底面:切土部 20,835
満水位 EL(m)	890.0
利用水深(m)	45.0
総貯水量(×10 ³ m ³)	4,400
有効貯水量(×10 ³ m ³)	4,120
湛水面積(km ²)	0.16
舗設期間(計画)	平成15年6月 ～平成17年10月

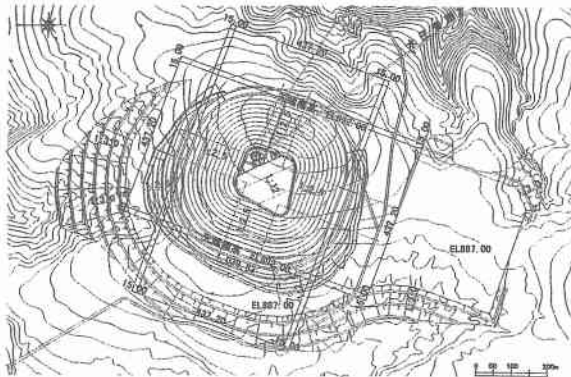


図-1 上部調整池平面図

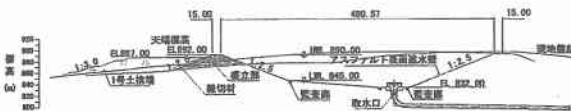


図-2 上部調整池断面図

An Application of the Indirect Tensile Test for the Evaluation of the Low Temperature Properties of Asphalt Mixtures for Water Works

by Kazunori KUSUHARA, Jun TAKANO

リカにおける SHRP (Strategic Highway Research Program) によって開発された間接引張試験を導入して、低温時におけるアスファルト混合物の力学性状の把握に努めたため、その研究成果を報告する。

2. 間接引張試験 (SHRP—Indirect Tensile Test) の概要

(1) SUPERPAVE, SHRP 規格, AASHTO 規格

SUPERPAVE は、1987 年から 1993 年にかけて米国の SHRP 研究によって開発された、アスファルト舗装の総合的な評価・解析システムの総称である。その中でアスファルト材料に関しては、SHRP 規格の名で呼ばれる供用性に基づいたアスファルトおよびアスファルト混合物に関する数多くの試験方法が開発されている。AASHTO 規格とは、SHRP で提案された規格を実用化に向けて具体化した暫定規格であり、規格や評価方法の見直しが現在も継続的に行われている。

本研究では、1997 年版の AASHTO 暫定規格¹⁾に準拠して試験を行なうこととした。

(2) 間接引張試験の採用

遮水壁の設計に当たっては、マーシャル安定度試験等の道路用に用いられる従来の試験法では、水工用アスファルトの要求機能（各種応力状態下での引張り・圧縮・せん断性状、遮水性、変形追従性、斜面での安定性、凍結融解・水浸剥離抵抗性、温度応力抵抗性、耐候・耐摩耗性等）を力学的に評価することが困難と考えられる。

アスファルト混合物の破壊現象を再現するには、直接引張試験が望ましいと考えられ、SHRP でも提案されているが、現段階では実験が極めて困難であるため実用には至っていない。

SHRP 試験法では、供用性に基づいた低温ひび割れを評価する方法の 1 つとして、間接引張試験機によるクリープ試験と破壊試験を提唱している。間接引張試験は、単に強度やひずみだけではなく、クリープコンプライアンス、変形係数やポアソン比も同時に求めることができること等の利点がある。このため本研究では、設計上必要となる力学性状を幅広く把握することが可能である、SHRP 試験法に準拠した間接引張試験を採用することとした。

なお、SHRP 試験法では、ひずみに関しては規定されておらず、供試体中心部に働く引張応力で評価を行っている。本研究では、ひずみが設計上の重要な指標となることから、ひずみの測定・評価を行なうこととした。また、SHRP 試験法はあくまで道路用規格であり、そのまま水工用の材料の試験には適用することができないため、試験方法に独自の改良を加えることとした。

(3) 間接引張試験装置の概要

間接引張試験は、インストロン万能試験機を載荷装置として使用し、 $-30\sim+100^{\circ}\text{C}$ までの温度環境を再現できる空気槽の内部で、円盤供試体（厚み 50mm、直径 150mm）の直径方向に幅 19mm の円弧状の載荷板を介して載荷し、鉛直・水平方向に発生する応力およびひずみを測定する試験である。試験装置の全景を写真-1に示す。

載荷装置としてインストロン万能試験機を採用した理由は、①地震時を想定した速いひずみ速度から、湛水時の堤体の変形や温度変化を想定した遅いひずみ速度まで幅広い範囲で試験が可能であること、②豊富な載荷パターンを制御できるソフトウェアが充実していること、③恒温装置として空気槽および水槽を併設し

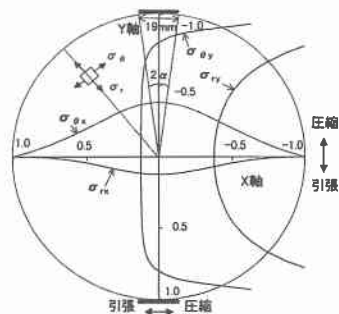


写真-1 間接引張試験装置の全景

ていることから、精度の高い試験が可能であることが挙げられる。

一般のコンクリート等に用いられる圧裂試験は引張強度のみを測定するのに対して、間接引張試験は供試体中心部のひずみを非接触型変位計（LVDT）を用いて、鉛直・水平の2方向について精度良く測定できることが主な相違点である。

19mm 載荷板を用いた場合の、供試体の鉛直・水平軸に発生する応力（ひずみ）を解析した結果を図－3に示す。



図－3 水平・鉛直軸上の応力分布²⁾

3. クリープ試験

(1) 使用材料

クリープ試験に使用したアスファルト混合物の配合を表－2、使用したバインダーの基本性状を表－3に示す。

アスファルト混合物は、表層用密粒度アスファルト混合物を対象として配合設計を行なっている。SHRP 試験機を用いたバインダーの性状試験も実施しているが、機会を改めて別途報告をする予定である。

表－2 アスファルト混合物の配合

As量(%)	合成粒度(通過重量百分率%)									
	19mm	13.2	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
8.2	100.0	99.9	80.6	64.7	52.4	44.0	25.3	16.7	13.9	

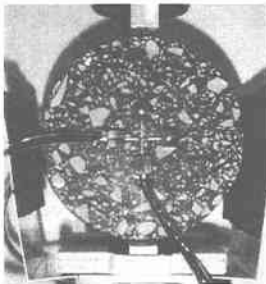
表－3 バインダーの基本性状

	単位	St.Aas80 100	St.As100/120	改質(ゼ7D-ン)	改質(SBS系)
針入度	℃	86	109	64	124
軟化点	℃	46.0	44.0	59.5	80.5

(2) 試験方法

低温時の載荷時間依存性を考慮した変形係数を求めるためにクリープ試験を実施した。クリープ試験の試験条件を表－4に示す。クリープ試験では、写真－2に示すとおり、供試体の鉛直・水平方向に LVDT を設置してひずみの測定を行った。

クリープ荷重と載荷時間は SHRP に準拠したが、試験温度は－10、－20、－30℃の3ケースとし、各試験温度における測定データは、載荷時間により変化するため 500 秒時のデータを報告する。



写真－2 クリープ試験時のひずみ測定方法

表－4 クリープ試験の条件

	SHRP試験法	本研究	備考
供試体サイズ(mm)	φ150mm±9mm, H 50mm		
試験温度(℃)	0、-10、-20	-10、-20、-30	試験誤差: ±0.2℃以内
載荷時間(sec)	100±2.0、1,000±20.5	1,000	
載荷荷重(N, kgf)	LVD(水平方向)の変形量が、0.00125～0.0190mmに納まるような荷重	周左の条件より、2～25kN	
ロードセル(tf)	10	20	測定精度: 0.5kgf
ひずみ測定方法	LVDT(非接触型変位計)		性能: 0.000125～0.25mm
ひずみ測定幅(mm)	38		
ひずみ測定方向	水平・鉛直		
使用供試体数(個)	3		

4. 破壊試験

(1) 使用材料

破壊試験の使用材料は、クリープ試験と同様である。

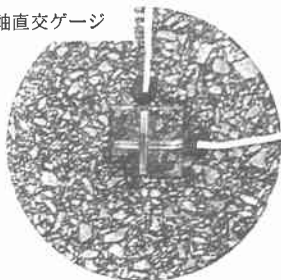
(2) 試験方法

設計にあたり低温時の伸び性状を把握する必要があるため、破壊試験を行い降伏ひずみを求めた。破壊試験の試験条件を表－5に示す。破壊試験では、当初 SHRP 試験法に従って LVDT を使用して、ひずみの測定を行っていたが、－20℃以下での試験では、供試体の破壊に伴ない LVDT 自体も衝撃で破損してしまうため、写真－3に示すとおり、目的に応じて2種類のひずみゲージを用いている。

単軸ゲージ



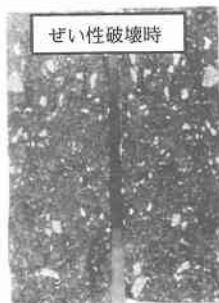
2 軸直交ゲージ



写真－3 破壊試験時のひずみ測定方法

表－5 破壊試験の条件

	SHRP試験法	本研究	備考
供試体サイズ(mm)	Φ150mm±9mm、H 50mm		
試験温度(℃)	0、-10、-20	-10、-20、-30	試験誤差: ±0.2℃以内
載荷速度(mm/min)	50	12.5、250、400、500	
ロードセル(gf)	10	20	測定精度: 0.5kgf
ひずみ測定方法	LVDT	ひずみゲージ	ゲージ測定範囲 1～10,000 μ
ひずみ測定幅(mm)	38	30	
ひずみ測定方向	水平・鉛直	水平、水平・鉛直	
使用供試体数(個)	3		
評価方法	破壊応力	両伏ひずみ	



ぜい性破壊時



延性破壊時

写真－4 破壊試験時の破断面

写真－4に、St.As80/100 を 12.5mm/min の載荷速度で、試験温度－30℃および－10℃で破壊試験を行なった際の破断面を示す。試験温度が－30℃では、骨材自体が破断しており、－10℃では、骨材とアスファルトが剥離して破断しているのがわかる。このことはそれぞれぜい性破壊と流動を伴う破壊（以降、延性破壊と呼ぶ）を示していると考えられる。

また、供試体中心部の水平方向のひずみ速度については、クリープ試験で求めた変形係数から、表－6に示す換算表（引用文献1））を用いてポアソン比を求め、間接引張試験の弾性理論（図－3）に基づいて、載荷速度から求めている（計算式は紙面の都合上省略する）。

表－6 変形係数とポアソン比の換算表

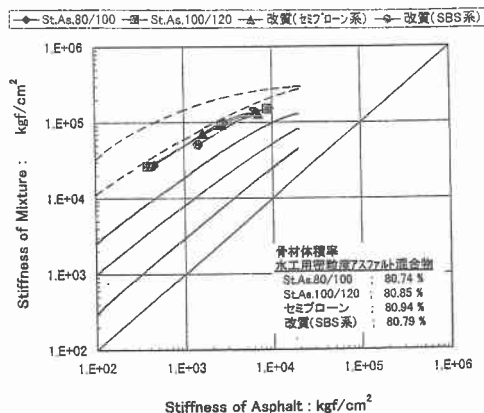
変形係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
200,000 以上	0.15
150,000 ～ 200,000	0.20
80,000 ～ 150,000	0.25
40,000 ～ 80,000	0.35
10,000 ～ 40,000	0.45
10,000 以下	0.50

5. 試験結果および考察

(1) クリープ試験

別途実施している BBR 試験（Bending Beam Rheometer）から求めたバインダーのスティフネス（S 値）と、クリープ試験から求めた混合物の変形係数との関係を図－4に示す。

これによると、バインダーの S 値と混合物中の骨材体積率を知ることにより、バインダー種類や温度に関わらず混合物の変形係数を概ね推定できると考えられる。なお、各温度における 1000 秒クリープ時の水平方向ひずみの変動係数は、どのバインダーでも 10% 前後であり、比較的精度の高い試験であるといえる。



図－4 S 値と変形係数

引用文献2)の図に加筆して作成

(2) 破壊試験

a. ひずみ速度と変形係数との関係

ひずみ速度と変形係数との関係を、図-5に示す。これによると、 -30°C ではアスファルトの種類に係わらず変形係数はほぼ等しいが、 -10°C ではひずみ速度によって値が変化している

-30°C での変形係数は、バインダー種類やひずみ速度に関わらず、破壊試験、クリープ試験ともに顕著なひずみ速度依存性がないと考えられる。

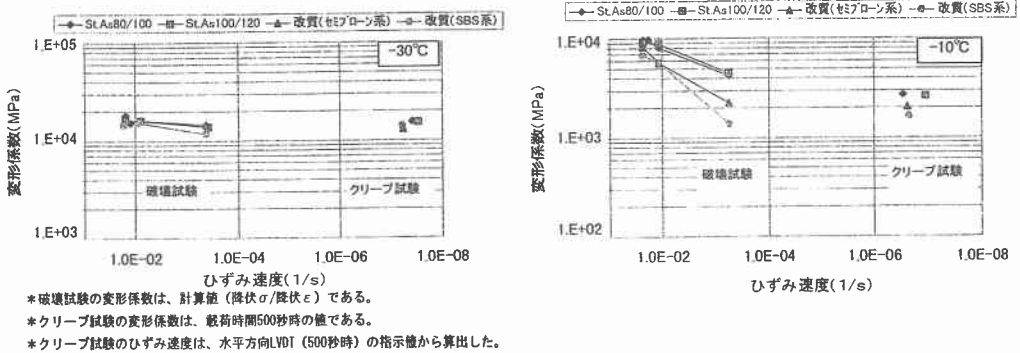


図-5 ひずみ速度と変形係数の関係(破壊試験, クリープ試験)

b. ひずみ速度と降伏ひずみの関係

ひずみ速度と降伏ひずみの関係を、図-6に示す。これによると、 -30°C ではバインダー種類によって降伏ひずみに顕著な差は見られないが、 -10°C では改質アスファルトの降伏ひずみが大きくなる。

なお、今回のひずみ速度と試験温度での降伏ひずみの変動係数は、8.0%前後であり、従来の曲げ試験の変動係数³⁾と比較すると極めて精度が高い試験と考えられる(St.As80/100の場合)。

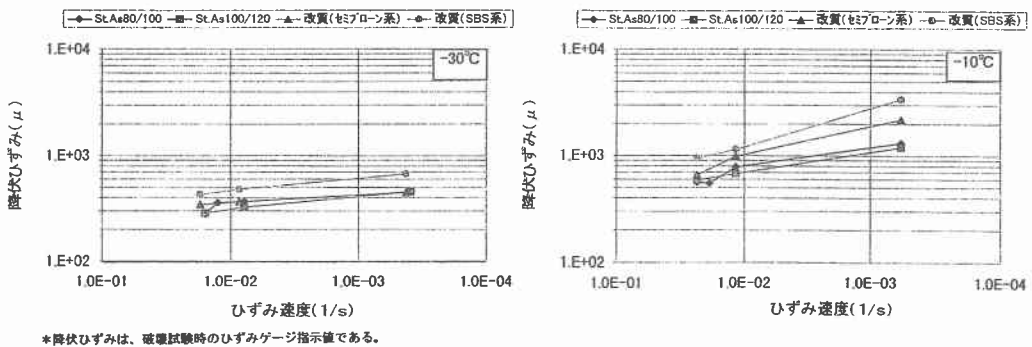


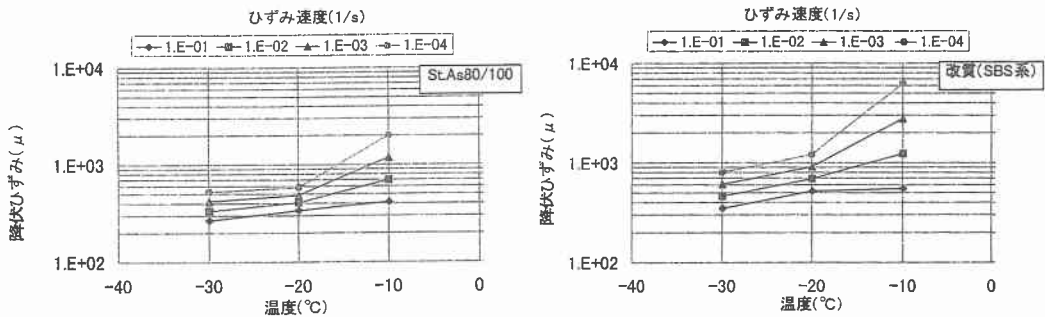
図-6 ひずみ速度と降伏ひずみの関係

c. 温度と降伏ひずみの関係

図-6の降伏ひずみを回帰して、各ひずみ速度ごとに整理すると図-7が得られる。ただしひずみ速度 $1.0\text{E}-01$ (1/s) と $1.0\text{E}-04$ (1/s) は外そう値である。

これによると、内そう値および弾性領域 (-30°C , $1.0\text{E}-01$ (1/s)) 内のひずみ速度1ケタの差は、 $7 \pm 4^{\circ}\text{C}$ の差に相当するが、アスファルトの種類によって若干の差があり、ストレートアスファルトよりも延性傾向の大きい改質アスファルトの場合は、 $7 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内に納まる結果となった。また紙面の都合上省略するが、変形係数についても、同様の結果が得られている。

従って、概ね温度-時間換算則が成り立つことが予想されるが、今後さらに詳細な検討が必要である。



*降伏ひずみは破壊試験時のゲージ指示値を、線形近似式を用いて回帰したものである。

図-7 温度と降伏ひずみの関係

6. まとめ

本試験により得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- ・ 間接引張破壊試験を行なうことにより、低温環境下で地震時のような速いひずみ速度領域、すなわちデータのバラツキの大きいせい性領域においても、従来の試験方法に比べて高い精度で、アスファルト混合物の性状を求めることができた。また、これらの試験結果から温度-時間換算則の適用が可能であると考えられる。
- ・ 間接引張クリープ試験によって、得られる混合物の変形係数とバインダーの S 値には密接な関係があり、アスファルト混合物中の骨材体積率を知ることにより、バインダーの S 値から混合物の変形係数を推定することが可能である。
- ・ 低温時における遮水壁の動的・静的解析のために必要とされる物性値を、広範囲にわたって求めることができた。

7. おわりに

以上から、間接引張試験により水工用アスファルト混合物の低温時の力学性状を把握でき、遮水壁の設計に有用な資料を得られたと考えられる。今後は間接引張試験と温度応力破壊や直接引張試験との相関についても検討を進め、合理的な遮水壁の設計に向けてさらなるデータの蓄積に努める予定である。

最後に本試験を纏めるにあたり、ご指導・ご協力を頂いた北海道大学菅原照雄名誉教授、北海道工業大学笠原篤教授、アスファルト試験を実施している北電興業(株)他の関係者各位に深く感謝の意を表します。

引用文献

- 1) 菅原 照雄：アスファルト混合物の変形係数の簡易測定法の開発に関する研究，昭和59年度科学研究費補助金研究成果報告書，1985
- 2) F.Bonnaure, G.Gest, A.Gravois, P.Uge: A new method of predicting the stiffness of asphalt paving mixtures, 1977

参考文献

- 1) AASHTO: AASHTO Provisional Standards—June 1997 Interim Edition, June 1997
- 2) Texas Univ at Austin Center for Highway Research: Fatigue and Resilient Characteristics of Asphalt Mixtures by Repeated—Load Indirect Tensile Test, 1975
- 3) 菅原 照雄, 上島 壮, 森吉 昭博: アスファルト混合物の低温領域における破壊時のレオロジー挙動について, 土木学会論文報告集第234号, 1975
- 4) 片脇, 新田, 佐々木, 中村, 久保: 舗装用アスファルトの新しい試験法—SHRPで提案されている品質規格—, 土木技術資料35-9, 1993
- 5) 建設省土木研究所 材料施工部科学研究室, 道路部舗装研究室: SHRPアスファルト試験操作の手引き, 1994
- 6) 池田 拓哉: 講座SHRPで提案された新しい配合設計方法, 舗装32-11, 1997