

アスファルト混合物の低温度 (0°C) における 繰返し曲げ試験に関する実験的研究

齊 藤 総一郎*

Experimental Study on Repeated Bending Tests for Various Asphalt Mixtures at Low Temperature (0°C)

By Soichiro Saito*

Synopsis: The relationship between deflection and fatigue life is measured on the repeated bending tests; the concentrated load applies repeatedly on the center of the samples ($5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 30\text{ cm}$), for various asphalt mixtures.

This report contains (1) the empirical formulas of the relationships between the frequency and the radius of the curvature at the center of the samples and (2) an argument on the supportability of the subgrade and the flexibility of asphalt pavements, comparing the above mentioned radius of the curvature in the breakdown with the radius of the curvature caused by the elastic subsidence of the subgrade.

要旨: アスファルト混合物試験片 ($5\text{ cm} \times 5\text{ cm} \times 30\text{ cm}$) の中央の一点に、一定のたわみを与えるように繰返し載荷し破壊に至るまでの、繰返し回数とたわみ量の関係を求めた。本実験より各種アスファルト混合物の破壊に至る繰返し回数と破壊時の曲率半径との関係を得た。さらにこの曲率半径と路盤の弾性沈下によって生ずる路面の曲率半径と比較して路盤の支持力とアスファルト舗装のたわみ性について論じた。

1. ま え が き

道路舗装に使用されている表層のアスファルト混合物は、冬期の気温降下により舗装表面の温度が 0°C 以下になることもある。この時期にアスファルト混合物は硬化し、自動車の輪荷重により表面に亀裂が入る。このような現象は冬期の気温が極端に低下する東北地方および北海道地方などで発生し、道路の維持管理上で問題となっている。

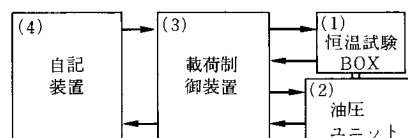
しかし、低温時の輪荷重による表層アスファルトの亀裂の現象については、従来系統的な研究が行われていない。そこで本研究は多種のアスファルト混合物を用いて、 $0^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ という低温時において、断面 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 、長さ 30 cm の供試体の中央部に繰返し載荷した。そのときの中央部のたわみ量から曲率半径を求め、この曲率半径と破壊に至る載荷回数との関係を実験的に求めた。さ

らに弾性沈下論を用いて、路盤の弾性沈下面における曲率半径と路盤支持力係数との関係を求め、これらの関係から必要な路盤支持力係数を算定できる。したがって路面の弾性沈下量をベンケルマン試験機などにより実測すれば、本研究に示した関係式によりアスファルト舗装の安全性の検討が可能となる。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験に使用した試験機は供試体の温度を -20°C から 40°C の範囲で、温度誤差は $\pm 1^{\circ}\text{C}$ で一定に保つことができ、載荷変位および載荷周期等を任意に変更させることができる特徴をもっている。本機は次の主要部より構成されている。



* 土木工学科 教授
Professor, Civil Engineering Division

次に各ユニットの概要を示す。

(1) 供試体の温度を一定に保つ装置($-20^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$, 温度誤差 $\pm 1^{\circ}\text{C}$)であり, 最大スパン 35 cm の供試体の支持装置 (二等分単純梁曲げ方式) が内蔵されている。

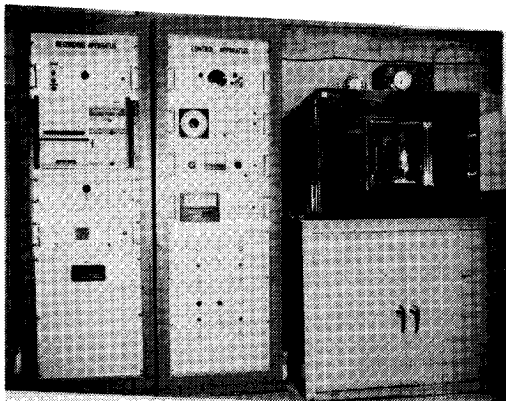


写真1 全 景

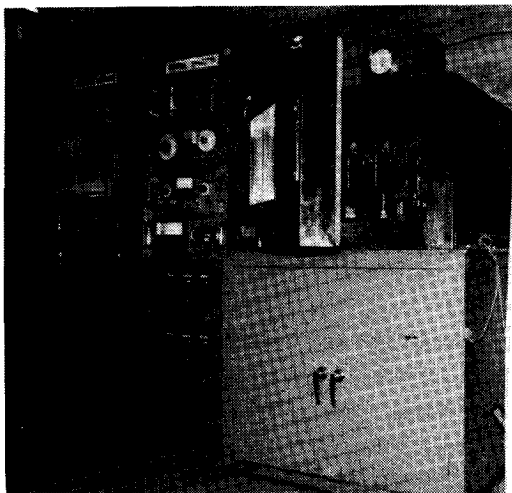


写真2 恒温試験 Box (戸を開く)

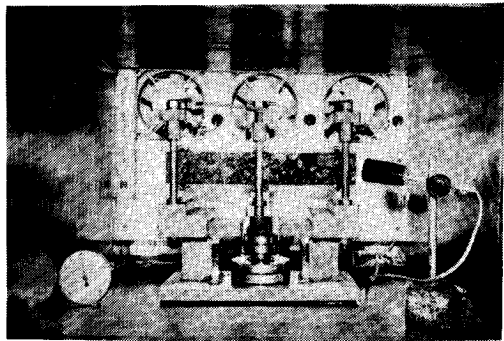


写真3 恒温試験 Box (供試体セット状況)

(2) 載荷用ピストン装置, モータ, 油圧ポンプ, 制御弁, アキュムレータ等が内蔵されている。(載荷能力, $\pm 500\text{ kg}$)

(3) 動的制御, 信号発振器, 静的制御発振器, コントロール温度制御, 発振波形切換装置及び本機全体の電源部が下部に装置されている。

(4) 荷重アンプユニット, 変位アンプユニット, 波形記録及び繰り返し数カウントユニット等の自記装置である。

尚附属の設備として供試体を長期保管する恒温室と, 実験前あらかじめ定温にするため低温型の恒温 Box を用いた。

2.2 アスファルト混合物の配合と材料

アスファルト混合物の配合は日本道路協会「アスファルト舗装要綱」(昭和42~53年度版, 各版)¹⁾に準拠してマーシャル試験により設計アスファルト量を設定し, それぞれ一般の舗装工事に実際に使用されるアスファルト混合物を主体に配合設定をした。アスファルトの針入度は60~80のストレートアスファルトで針入度70程度のもを用いた。更にゴム液やエポキシなどを添加した混合物, 表1より表3までに示す通り15種類の混合物とアスファルトのみの供試体の他, アスファルトと石粉を1:1 (重量比)に混合したフィラーアスファルトの混合物も作成した。その使用材料の性状なども前記表に示す通りであり, いづれも規格に適合する材料である。これ等の配合を選定した目的は表4に示す通りである。

2.3 供試作の作成

図1に示す供試体作成年型枠は(5 cm×5 cm×30 cm)用と(4 cm×4 cm×16 cm)用と2種類である。供試体作成手順は次の通りである。

(1) 型枠の加熱温度は 110°C 以上 150°C までとした。

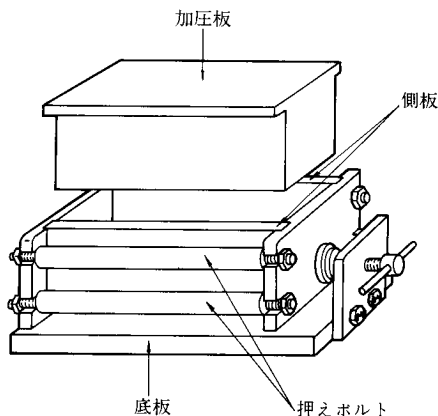


図1 供試体作成年型枠

表1 アスファルト混合物配合表

供試体記号		① ①'	② ②'	③ ③'	④ ④'	⑤ ⑤'	⑥ ⑥'	⑦	⑧
混合物の種類		S50 アスファルトモルタル	S50 修正トペカ	S50 密粒度アスコン	S51 アスファルトモルタル	S51 修正トペカ	S51 密粒度アスコン	S52 密粒度アスコン	S52 密粒度アスコン（ゴム入）
最大粒径 (mm)		2.5	13	13	2.5	13	13	20	20
通過重量百分率 (%)	25 mm	—	—	—	—	—	—	100	100
	20	—	100	100	—	100	100	99	99
	13	—	99	99	—	99	99	82	82
	5	100	72	66	100	74	68	56	56
	2.5	99	54	40	99	57	43	41	41
	0.6	91	34	26	91	34	25	22	22
	0.3	51	—	15	51	21	16	17	17
	0.15	13	13	9	13	13	10	10	10
	0.074	8	7	5	8	8	7	6	6
アスファルト量(%)		12.0	7.0	6.0	12.0	6.7	5.8	5.5	5.5
石 粉(%)		9.0	7.0	6.0	9.0	6.0	5.0	7.0	7.0
ゴム混入量(%)		—	—	—	—	—	—	—	4.0

供試体記号		⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑯
混合物の種類		S53 密粒度アスコン (As=6.0%)	S53 密粒度アスコン (石綿無)	S53 密粒度アスコン (As=5.0%)	S53 密粒度アスコン (エポキシ入)	S53 密粒度アスコン (石綿入)	S54 AC-140 アスコン	S55 密粒度アスコン (ブローン)
最大粒径 (mm)		20	13	20	13	13	13	13
通過重量百分率 (%)	25 mm	100	—	100	—	—	—	—
	20	98	100	98	100	100	100	100
	13	83	100	83	98	100	98	98
	5	57	85	57	67	85	64	64
	2.5	42	73	42	40	73	44	44
	0.6	26	50	26	25	50	26	26
	0.3	16	33	16	16	33	18	18
	0.15	9	22	9	9	21	8	8
	0.074	6	14	6	6	13	6	6
アスファルト量(%)		6.0	5.9	5.0	5.8	6.7	5.8	6.0
石 粉(%)		5.2	13	5.2	5.0	10.0	5.0	5.0
石 綿		—	—	—	—	3	—	—

表2 使用アスファルト材料表

供試体記号	①①', ②②', ③③	④④', ⑤⑤', ⑥⑥'	⑦, ⑧
アスファルトの種類	ストレートアスファルト 60/80	ストレートアスファルト 60/80	ストレートアスファルト 60/80
比重 (25/25℃)	1.024	1.031	1.036
軟化点 (R & B) (°C)	48.0	48.0	47.5
針入度 (25℃)	69.0	74.0	71.0
伸度 (cm 15℃)	100.0	100.0	100.0
蒸発減量 (%wt)	0.02	0.02	0.01
引火点 (°C)	318	318	352
四塩化炭素溶分 (%wt)	99.8	99.8	99.7
針入度指数	-0.9	-0.8	—

供試体記号	⑨, ⑩, ⑪, ⑫, ⑬, ⑨'	⑭	⑮, ⑦', ⑧'
アスファルトの種類	ストレートアスファルト 60/80	日本石油・AC-140	ブローンアスファルト 20/30
比重 (25/25℃)	1.024	1.028	1.019
軟化点 (R & B) (°C)	47.5	60.0	83.0
針入度 (25℃)	73.0	44.0	26.0
伸度 (cm15℃)	100.0	—	5.0
蒸発減量 (%wt)	0.01	—	0.02
引火点 (°C)	320	308	336
四塩化炭素溶分 (%wt)	99.8	—	—
針入度指数	-0.9	—	—
粘度 (60℃ポアーズ)	—	11.400	—

- 注：1) 供試体記号⑥に使用した“ゴム”は、アスファルト混合物の混合中に日本合成ゴム(株)製品 JSR ローデックスゴム濃度50%液をアスファルト量に対して8%混合したものでゴム量としては4%添加したものの。
- 2) 供試体記号⑩に使用した“石綿”は自動車のクラッチ板・プレーキライニングの粉末(産業廃棄物)で、その化学成分は、石綿50%、バリウム・金属アルミ・銅粉30%合成樹脂・セノール・ヤシオイル20%のもの。
- 3) 供試体記号⑬に使用した“エポキシ”はシェル石油(株)製品樹脂でA液・B液と2液である。これをA:B=9.1:48.9の割合で混合し ストレートアスファルトに添加した。その割合は、アスファルト3.48%、エポキシ2.32%、計5.8%である。

表3 使用骨材一覧表

比重の単位：g/cm³

材料の 種 類	供試体①①′，②②′，③③′			比重	供試体④④′，⑤⑤′，⑥⑥′			
	材 質	産 地	会社名		材 質	産 地	会社名	比重
S-13	硬質石灰岩	青梅市成木8丁目	瑞穂建 材	2.702	硬質石灰岩	栃木県田沼町大字戸室	三好 鉱 業	2.693
S-5	〃	埼玉県花園村(荒川系)	第一石産	2.699	〃	〃	〃	2.690
粗 砂	川 砂	栃木県二ノ宮(鬼怒川)	青 木 商店	2.671	川 砂	栃木県二ノ宮(鬼怒川)	青 木 商店	2.670
F-2.5	砕 石	茨城県江戸崎町古渡 (霞ヶ浦)	青 木 商店	2.676	砕 石	栃木県田沼町	日鉄 鉱 業	2.687
細 砂	川 砂				川 砂	茨城県江戸崎町古渡 (霞ヶ浦)	青 木 商店	2.666
石 粉	タンカル				タンカル	埼玉県秩父郡横瀬村	秩父石灰 ㈱	2.710

材料の 種 類	供試体 ⑦，⑧				供試体 ⑨，⑩，⑪			
	材 質	産 地	会社名	比重	材 質	産 地	会社名	比重
S-20	硬質石灰岩	栃木県田沼町大字戸室	三好 鉱 業	2.707	硬質石灰岩	栃木県安蘇郡田沼町	三好 鉱 業	2.705
S-13	〃	〃	〃	2.701	〃	〃	〃	2.700
S-5	〃	〃	〃	2.695	〃	〃	〃	2.693
粗 砂	川 砂	栃木県二ノ宮(鬼怒川)	青 木 商店	2.678	川 砂	茨城県下館市下川島町 (鬼怒川系)	大成工 業	2.671
F-2.5	砕 石	栃木県葛生町	関 忠 商 事	2.687	砕 石	栃木県安蘇郡葛生町	関 忠 商 事	2.682
細 砂	川 砂	栃木県江戸崎町古渡 (霞ヶ浦)	青 木 商店	2.675	川 砂	茨城県下館市川島町 (鬼怒川系)	大成工 業	2.672
石 粉	タンカル	埼玉県秩父郡横瀬村	秩父石灰 ㈱	2.710	タンカル	埼玉県秩父郡横瀬村	秩父石灰 ㈱	2.710

材料の 種 類	供試体 ⑫，⑬				供試体 ⑭			
	材 質	産 地	会社名	比重	材 質	産 地	会社名	比重
S-13	硬質石灰岩	栃木県安蘇郡田沼町	三好 鉱 業	2.700	硬質石灰岩	栃木県安蘇郡葛生町	関 忠 商 事	2.742
S-5	〃	〃	〃	2.693	〃	〃	〃	2.757
粗 砂	川 砂	茨城県下館市下川島町 (鬼怒川系)	大成工 業	2.671	川 砂	栃木県佐野市出流原町	馬 上	2.661
F-2.5	硬質石灰岩	栃木県安蘇郡葛生町	関 忠 商 事	2.682	砕 石	埼玉県秩父郡両神村	両上工 業	2.698
細 砂	川 砂	茨城県下館市下川島町 (鬼怒川系)	大成工 業	2.672	川 砂	埼玉県稲敷郡戸崎町	馬 上	2.686
石 粉	タンカル	埼玉県秩父郡横瀬村	秩父石灰 ㈱	2.710	タンカル	埼玉県秩父郡横瀬村	秩父石灰 ㈱	2.710

材料の 種 類	供試体 ⑮			
	材 質	産 地	会社名	比重
S-13	硬質石灰岩	栃木県安蘇郡田沼町	三好 鉱 業	2.742
S-5	〃	〃	〃	2.757
粗 砂	川 砂	栃木県佐野市出流原町	馬 上	2.661
F-2.5	硬質石灰岩	栃木県安蘇郡田沼町	三好 鉱 業	2.698
細 砂	川 砂	茨城県稲敷郡江崎町古渡	馬 上	2.686
石 粉	タンカル	埼玉県秩父郡横瀬村	秩父石灰 ㈱	2.710

表 4 アスファルト混合物の選定目的

混合物の種類	研 究 目 的
① ② ③	基本的混合物の 0℃ のたわみ性の比較。
④ ⑤ ⑥	上記混合物の 10℃ に温度変化した場合のたわみ性の変化。
⑦ ⑧	密粒度アスコン (20 mm \sim) のたわみ性とゴム液添加による 0℃ の変化。
⑦ ⑨ ⑪	密粒度アスコン (20 mm \sim) のアスファルト量の変化による 0℃ のたわみ性の比較
⑩ ⑬	密粒度 (13 mm \sim) アスコンに石綿 (特種) の添加による 0℃ のたわみ性の増加量の測定
⑫	③ の混合物にエポキシを添加した場合の 0℃ のたわみ性の減少の測定
⑭ ⑮	軟化点の 60℃ 以上のアスファルト AC 140 とブローンアスファルト混合物の比較。
①' ②' ③'	① ② ③ の予備実験 (0℃)
④' ⑤' ⑥'	④ ⑤ ⑥ の予備実験 (10℃)
⑦' ⑧'	ブローンアスファルトのみと石粉が添加された場合のたわみ性の比較。
⑨'	ストレートアスファルトに石粉が混合されたときのたわみ性について (-2℃)
摘 要	③ と ⑩ と比較して骨材配合率は ⑩ が細粒分が多い。

(2) 試料を型枠に入れる。この場合、所定の厚さと密度が得られるよう試めし詰めを行って重量を決定した。(この時の合材の温度 140° \sim 150℃)

(3) 加圧板をセットして加圧する。均等に合材を型枠に入れて加圧板をセットし、耐圧試験機で 230 \sim 250 kg/cm² の圧力で加圧し基準密度以上にする。耐圧中の温度は試験表よりマーシャル締固の温度とする。

(4) 一時間以上放置し加圧板を取除いて脱型する。

(5) 供試体の寸法測定方法は、供試体の両端より 2 cm 及び中心部 3 ケ所をノギスで測定した。寸法が ± 1 mm 以内のものを供試体とした。

(6) 供試体密度は基準密度の 97% 以上のものを実験に使用した。

(7) 供試体の保管は平らなガラス厚板上に置き、高温により変型しないように注意し、最低 3 ヶ月以上 $\pm 20^\circ\text{C}$ の恒温室に保管した。

但し ⑩ と ⑬ の供試体はホイルトランキング試験機の載荷装置により、30.5 cm \times 30.5 cm \times 5.1 cm の型枠にマーシャル締固め温度の合材を入れて 60℃ 中で、接地圧 5.5 kg/

cm² で繰り返し転圧し前述と同じ密度が得られるようにし、冷却後脱型してからカッターで切断し、所定の寸法に適合するように作成した。

2.4 実験方法

実験方法を簡条書きにし、次に示す。

(1) 恒温室に保管された供試体は曲げ試験前に 0℃ (または 10℃) の低温型の恒温 Box に 1 時間以上入れ一定温度にする。

(2) 一定温度に達した供試体を前述の疲労試験機の (1) の恒温試験 Box に入れて曲げ試験のセットを行う。この場合 (1) の Box はあらかじめ 0℃ (または 10℃) の所定の温度にしておく。

(3) 供試体をセット中に温度上昇があるので、Box 内が一定温度になるまでしばらく載荷を待った。供試体は単純梁支持としスパン $l = 25.5$ cm (予備試験は $l = 15$ cm) にとった。

(4) 載荷は 1 回/秒の割合で供試体の水平より下方に変位を繰り返し与えるように疲労試験機 (3) の載荷制御装置で調整した。また載荷変位は正弦波形とした。

(5) 疲労試験機 (4) の自記装置に示される繰り返し回数を読みとり、また予備に取付けた別の繰り返し回数計を読み両方から回数を求めた。

(6) 疲労試験機 (3) (4) より供試体が一定の沈下量になるように操作し、また (1) の装置の中に別にダイヤルゲージを取付けて供試体中央点のたわみ量をチェックした。

(7) 供試体の下部中央点付近から亀裂が入るため、肉眼で判断して、この亀裂が中立軸に達したと思われる時点で実験を終了した。この場合、(4) の自記装置は自動的に繰り返し回数のカウントが停止する。

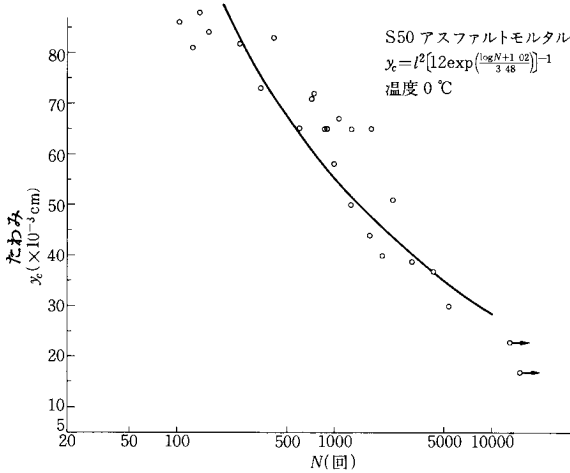
(8) 以上の操作により供試体の一定たわみ量と破壊時の繰り返し回数との関係を求めた。

3. 実験結果と考察

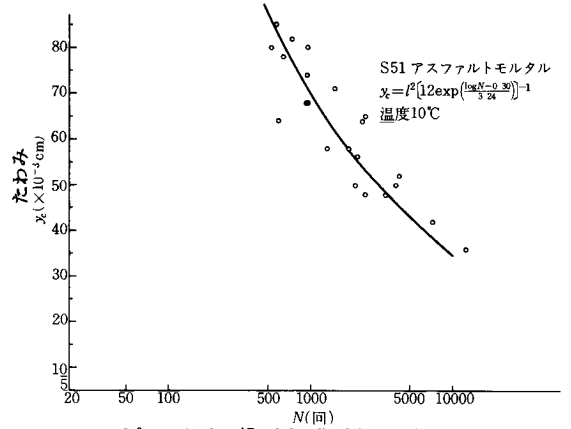
3.1 たわみ量と繰り返し疲労破壊に要する荷重回数

アスファルト混合物 15 種類について繰り返し曲げ疲労破壊に要する載荷回数 (N) とたわみ量 (y_c) との関係について実験を行なった。これらの関係を図 2 から図 16 に示す。

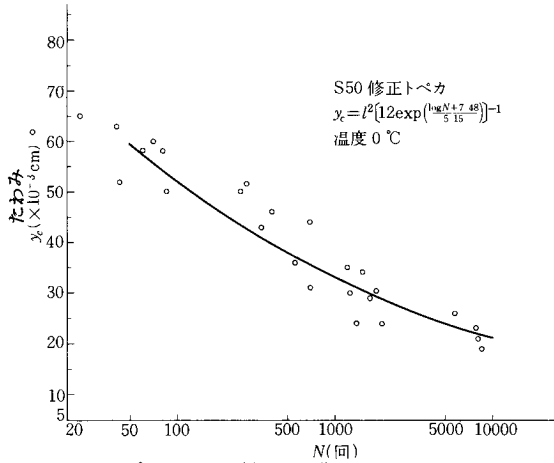
また予備試験として行った (N) と (y_c) との関係を図 17 から図 25 に示す。これらの図に見られるように (y_c) は (N) が多くなるほど小さくなる。またアスファルト量が多い混合物は、少ない混合物に比べて (N) が小さいとき (y_c) は大きい値を示すに対して、 $N = 10,000$ 回ではアスファルト量による (y_c) の差異は減少する傾向を示すことがわかる。



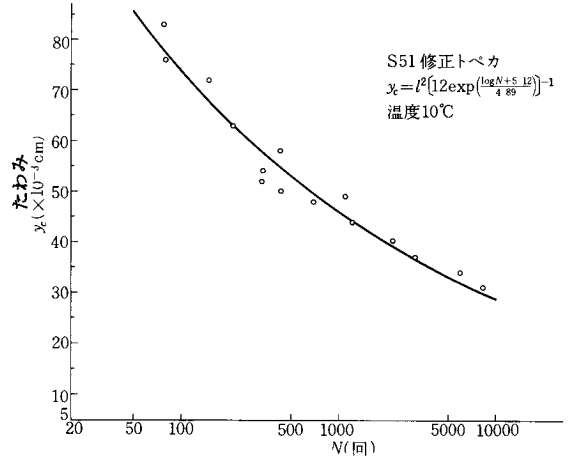
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
 図2 S50 アスファルトモルタル y_c - N 曲線



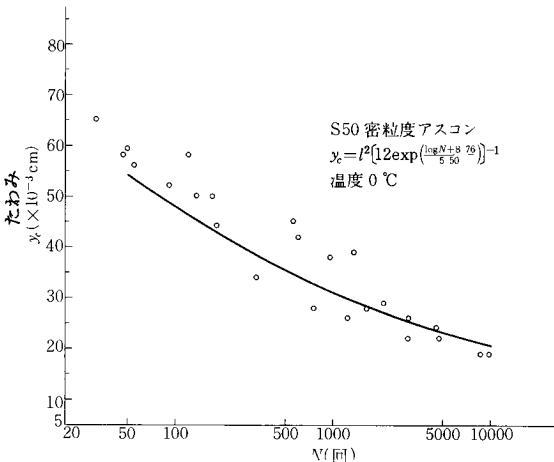
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
 図5 S51 アスファルトモルタル y_c - N 曲線



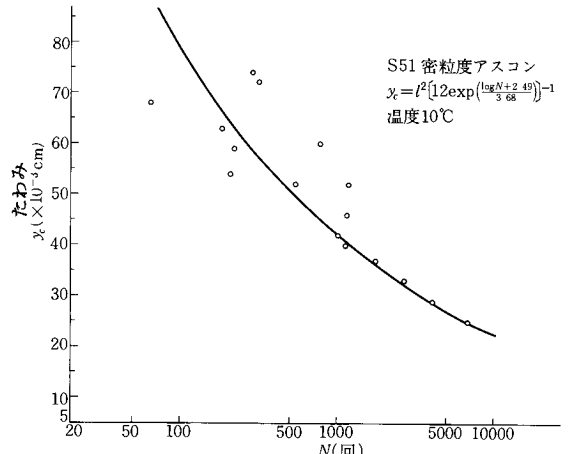
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
 図3 S50 修正トベカ y_c - N 曲線



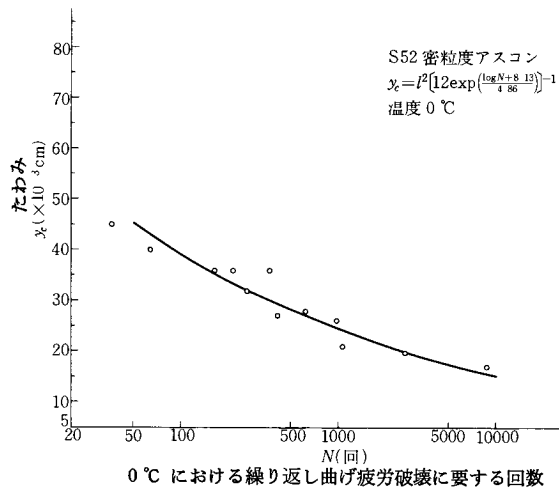
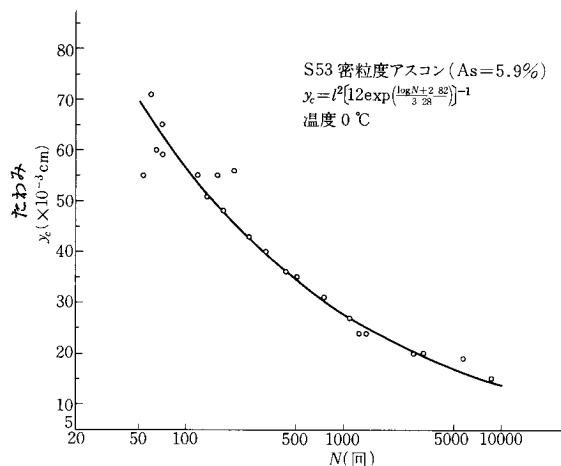
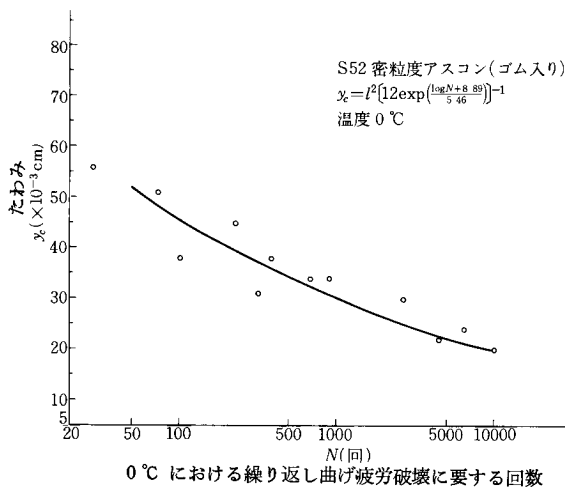
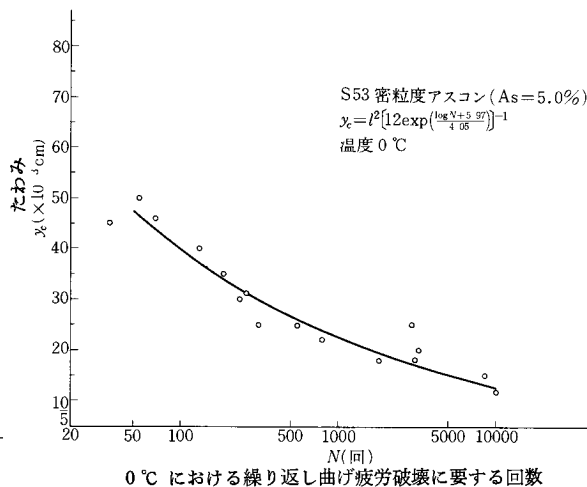
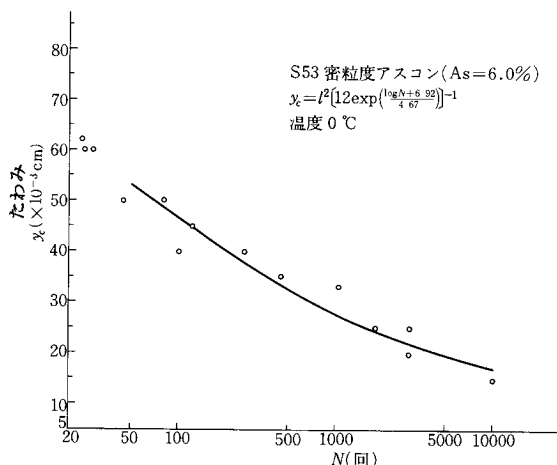
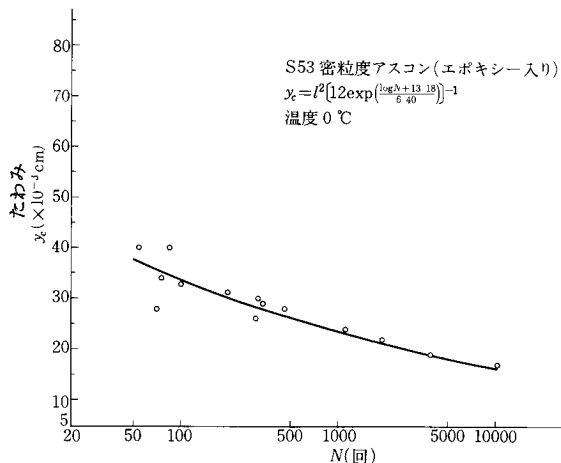
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
 図6 S51 修正トベカ y_c - N 曲線

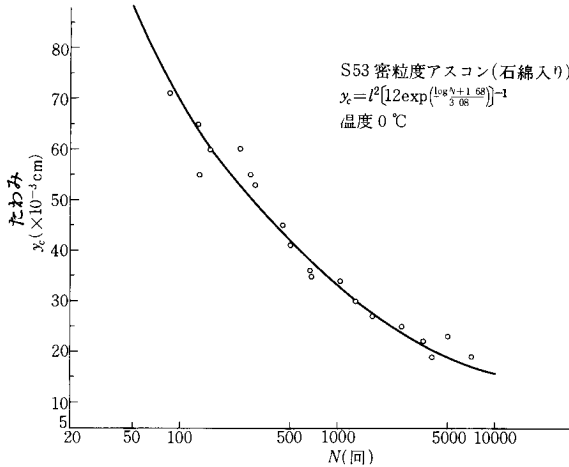


0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
 図4 S50 密粒度アスコン y_c - N 曲線

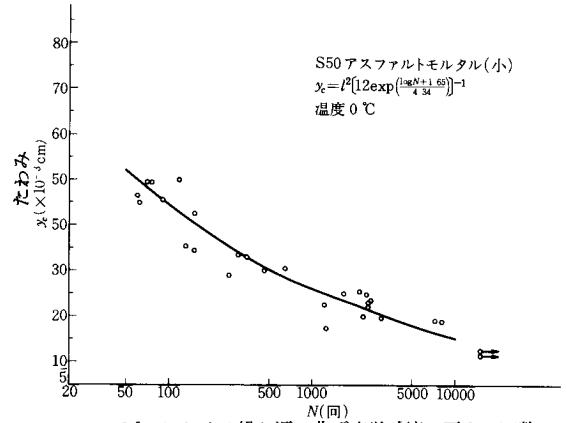


0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
 図7 S51 密粒度アスコン y_c - N 曲線

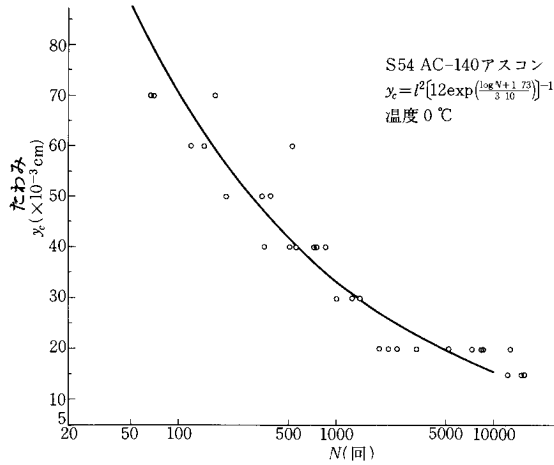
図8 S52 密粒度アスコン y_c - N 曲線図11 S53 密粒度アスコン (As=5.9%) y_c - N 曲線図9 S52 密粒度アスコン (ゴム入) y_c - N 曲線図12 S53 密粒度アスコン (As=5.0%) y_c - N 曲線図10 S53 密粒度アスコン (As=6.0%) y_c - N 曲線図13 S53 密粒度アスコン (エポキシ入) y_c - N 曲線



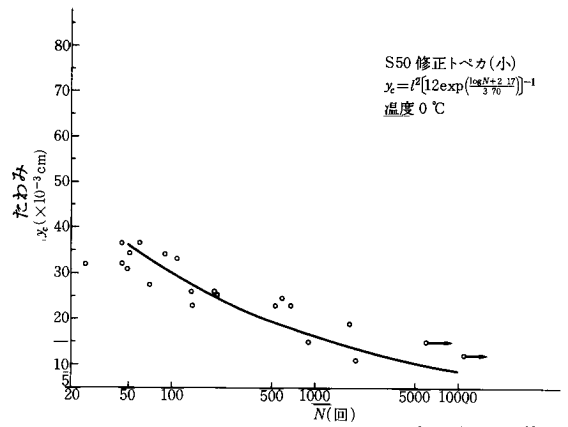
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
図14 S53 密粒度アスコン (石綿入) y_c - N 曲線



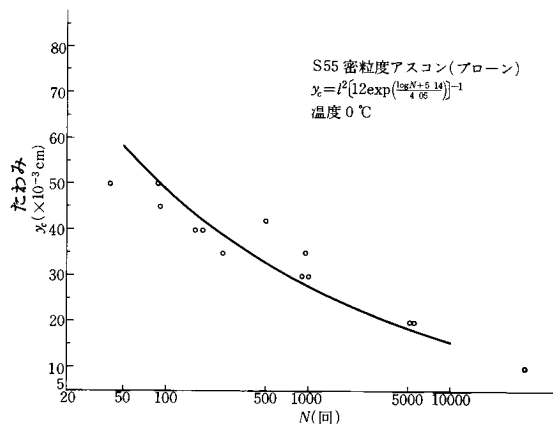
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
図17 S50 アスファルトモルタル (小) y_c - N 曲線



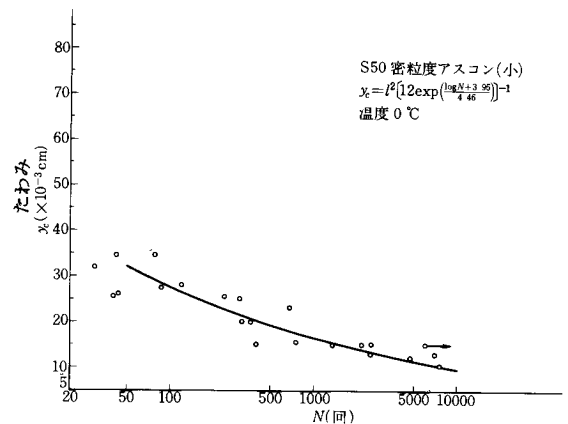
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
図15 S54 AC-140 アスコン y_c - N 曲線



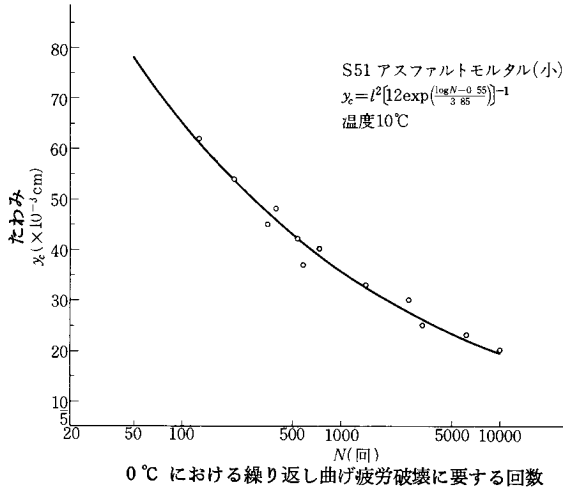
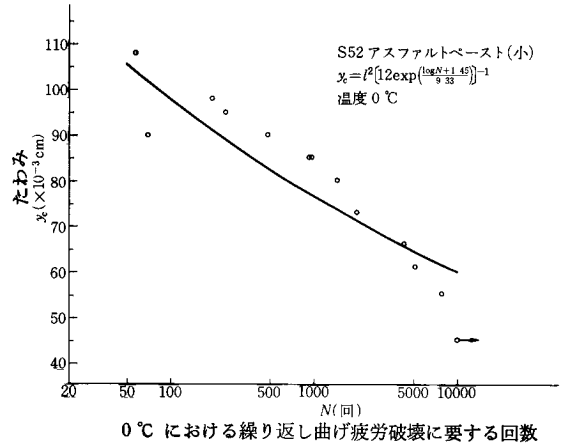
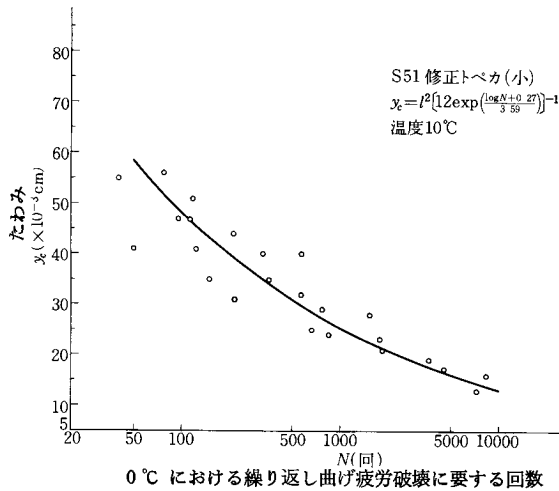
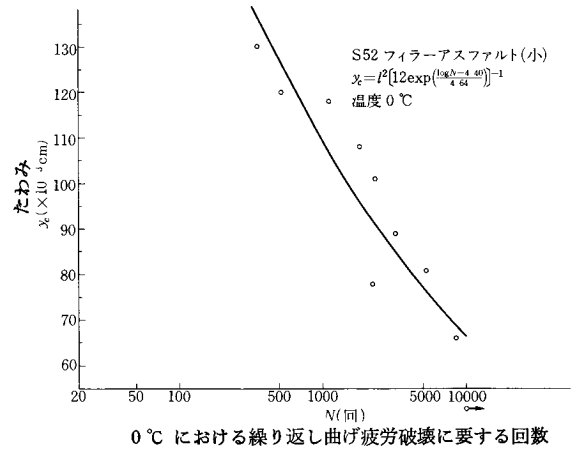
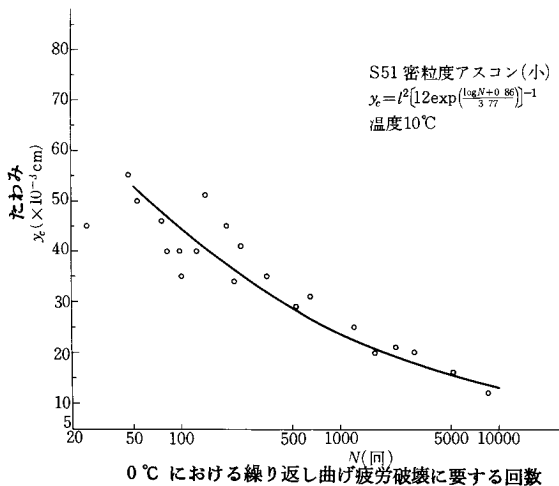
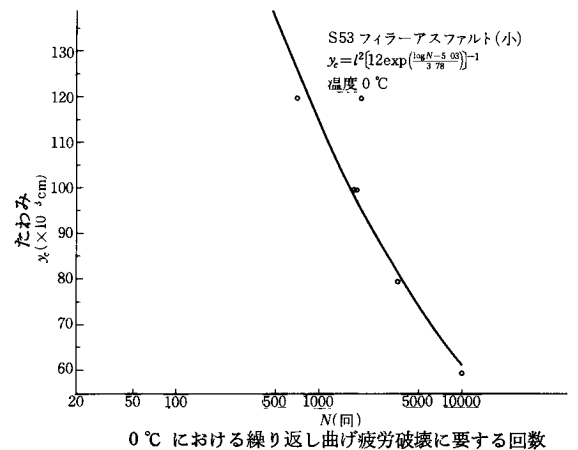
0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
図18 S50 修正トベカ (小) y_c - N 曲線



0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
図16 S55 ブローンアスコン y_c - N 曲線



0℃における繰返し曲げ疲労破壊に要する回数
図19 S50 密粒度アスコン (小) y_c - N 曲線

図20 S51 アスファルトモルタル (小) y_c - N 曲線図23 S52 アスファルトペースト (小) y_c - N 曲線図21 S51 修正トペカ (小) y_c - N 曲線図24 S52 フィラーアスファルト (小) y_c - N 曲線図22 S51 密粒度アスコン (小) y_c - N 曲線図25 S53 フィラーアスファルト (小) y_c - N 曲線

3.2 曲率半径の算定式

供試体の破壊時の曲率半径（ ρ ）は次の式より求めた。

$$1/\rho = \pm d^2y/dx^2 \{1 + (dy/dx)^2\}^{-3/2} \quad (1)$$

上式中で x 軸に対してたわみ量 y は微小と考えられるので

$$1/\rho \approx \pm d^2y/dx^2 \quad (2)$$

とした。

単純支持梁の場合、たわみ量 y または y_c は次の式となる。

$$y = P/EI \cdot l^3/16 (x-4/3 \cdot x^3/l^2) \quad (3)$$

$$y_c = P/EI \cdot l^3/48 \quad (4)$$

P : 集中荷重, E ; ヤング係数, I ; 断面二次モーメント
 l ; スパン長

(3)式より

$$\frac{d^2y}{dx^2} = P/EI \cdot l^3/16 \left(-\frac{8x}{l^3}\right) \quad (5)$$

(5)式に $x = l/2$ を代入して

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -P/EI \cdot \frac{l}{4} \quad (6)$$

(2)式と(6)式から

$$1/\rho = P/EI \cdot l/4 \quad (7)$$

となる。ただし曲率は絶対値をとった。(7)式と(4)式より

$$\rho = l^2/12 y_c \quad (8)$$

(8)式に y_c と l を代入して ρ を算出できる。

3.3 曲率半径と繰返し曲げ疲労破壊に要する回数

中央点のたわみ量 y_c から(8)式を用いて、曲率半径 ρ を

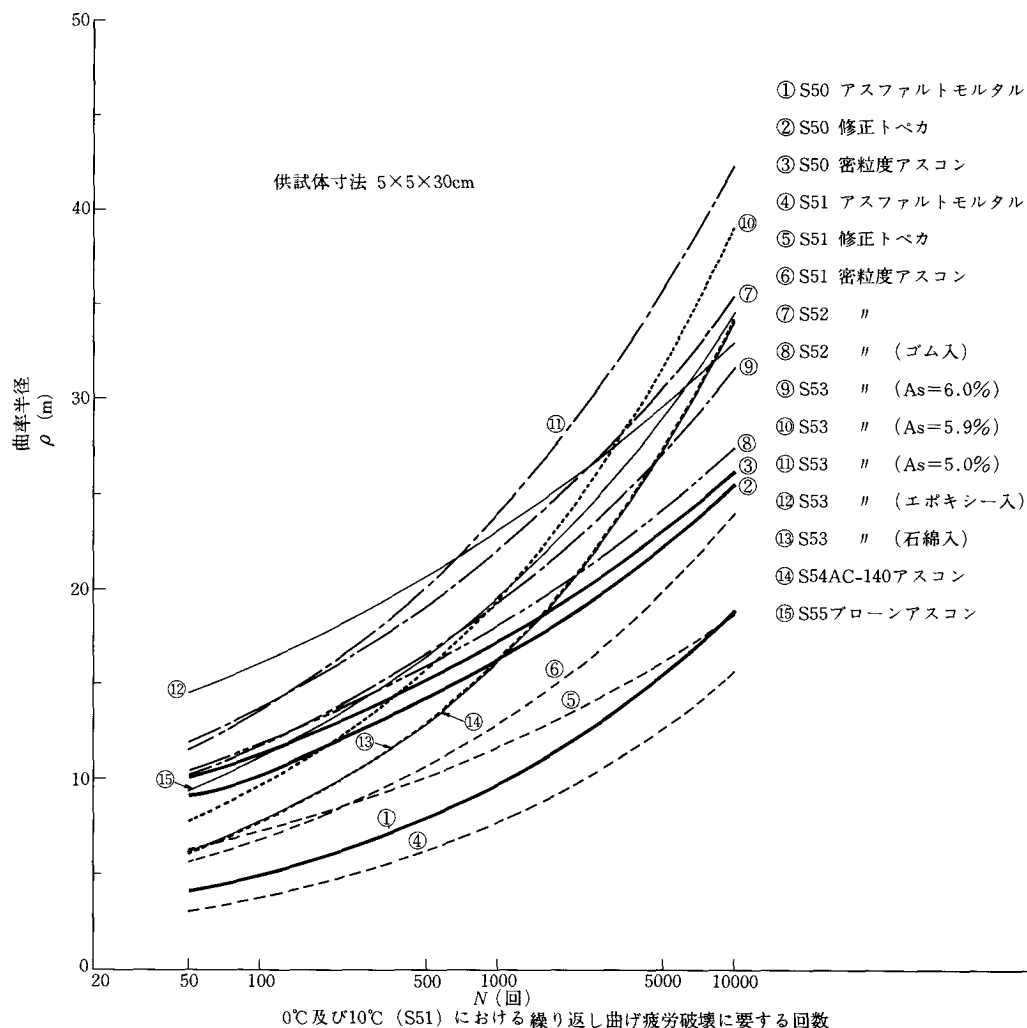


図26 各種アスファルト混合物（大） ρ - N 曲線

算定し、この ρ と曲げ疲労破壊に要する回数 N との関係を図26に示した。また予備試験9種のアスファルト混合物についても同様に図27に示した。この ρ と N との

関係は両対数グラフではほぼ直線で表わされることから、次の式で近似的に表わすことができる。

$$\ln N = A \ln \rho + B \quad (9)$$

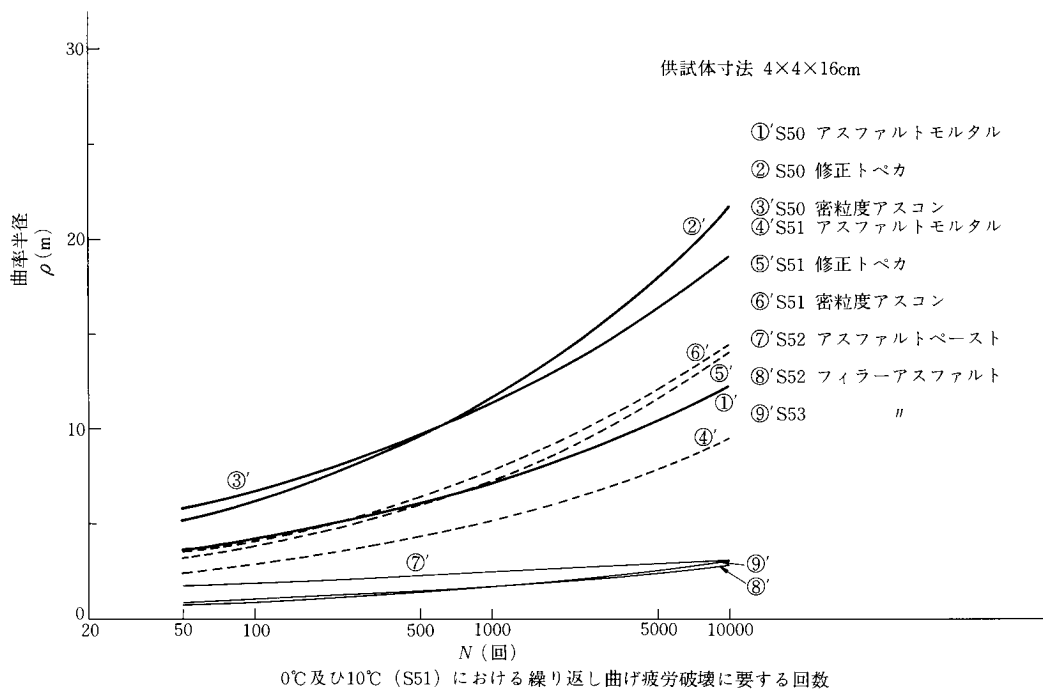


図27 各種アスファルト混合物 (小) ρ - N 曲線

表 5 A, B の係数表

供試体 寸 法	5 cm×5 cm×30 cm					供試体 寸 法	4 cm×4 cm×16 cm				
	供試体 数	A	B	ΔA	ΔB		No.	供試体 数	A	B	ΔA
①	26	3.48	-1.02	0.77	4.56	①'	26	4.34	-1.65	0.59	1.10
②	25	5.15	-7.48	0.54	1.42	②'	21	4.35	-3.36	0.62	1.29
③	25	5.50	-8.76	0.57	3.13	③'	21	4.46	-3.95	0.61	1.37
④	22	3.24	+0.30	1.44	8.43	④'	12	3.85	+0.55	0.86	1.44
⑤	15	4.89	-5.12	0.92	2.19	⑤'	24	3.59	-0.27	0.51	0.97
⑥	16	3.68	-2.49	1.11	6.22	⑥'	21	3.77	-0.86	0.54	0.93
⑦	12	4.86	-8.13	1.00	2.94	⑦'	13	9.33	-1.45	1.36	1.14
⑧	12	5.46	-8.89	1.11	5.76	⑧'	10	4.64	+4.40	1.36	0.90
⑨	14	4.67	-6.92	0.77	4.28	⑨'	8	3.78	+5.03	1.30	0.85
⑩	22	3.28	-2.82	0.61	3.35						
⑪	16	4.05	-5.97	0.75	3.89						
⑫	14	6.40	-13.18	1.10	3.28						
⑬	19	3.08	-1.68	0.72	3.94						
⑭	31	3.10	-1.73	0.35	1.01						
⑮	13	4.05	-5.14	0.63	1.81						

(ΔA , ΔB は A, B の実験誤差を示す)

または

$$N = e^B \cdot \rho^A \quad (10)$$

各アスファルト混合物について、(9)式または(10)式で近似的に、最小二乗法により係数 A および B を求め表 5 に示した。

4. 路盤支持力と繰返し曲げ疲労破壊回数

4.1 弾性沈下論による路面の曲率半径

路面の弾性沈下理論は多いが、本研究では星埜氏の理論に従って、曲率半径 (ρ') の算定式を誘導した²⁾。すなわち円形の等分布荷重で、円形の接地半径 (a) と輪荷重の接地圧 (q) の場合、弾性地盤の沈下量 (ω) は次の式で示される。

$$\omega = \eta \frac{2(1-\nu^2)}{E} \cdot q \cdot a \quad (11)$$

E ; 地盤の弾性係数, ν ; 地盤のポアソン比

$a \geq r \geq 0$ の場合

$$\eta = 2/\pi \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-r^2/a^2 \sin^2 \phi} \cdot d\phi \quad (12)$$

r は等分布荷重の中心から接地半径 a までの水平軸を示す。即ち $\omega = f(r)$ で(11)式は示される。

ϕ ; 弾性地盤に作用する応力分布角 θ より算出する角
(12)式を積分すると

$$\eta = 1 - (1/2)^2 \cdot \frac{r^2}{a^2} - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \cdot \frac{r^4}{3a^4} \dots \dots \quad (13)$$

となる。(11)式で $2(1-\nu^2) \cdot E^{-1} \cdot q \cdot a = k$ (常数) とおけば

$$\omega = k \cdot \eta \quad (14)$$

となり、 r について(14)式を 2 回微分して ω'' を求めると

$$\omega'' = k \left\{ - (1/2)^2 \cdot \frac{2}{a^2} - \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \cdot \frac{4 \cdot 3}{3a^4} \cdot r^2 - \dots \dots \right\} \quad (15)$$

となる。ここで $\omega'' \div 1/\rho'$ と考えられるので ρ' は弾性地盤の沈下曲面の曲率半径を近似的に表わす。

(ρ') の最小値を求めるために(15)式を更に微分すると、 $r = 0$ のとき(ρ') は最小値を示す結果を得た。即ち円形等分布荷重の中心下において曲率半径 (ρ') が最小となる。しかがって(15)式に $r = 0$ を代入すると (ρ') が得られる。すなわち、

$$1/\rho' = - \frac{1}{2a^2} \cdot \frac{2(1-\nu^2)}{E} \cdot q \cdot a \quad (16)$$

したがって

$$\rho' = - \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{a}{q} \quad (17)$$

となる。ここで曲率は負となるが、絶対値をとり曲率半径と見做すことができるので

$$\rho' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{a}{q} \quad (18)$$

となる。

次に円形等分布荷重の場合でも、円形が載荷剛性板になると(11)式で $\eta = \pi/4$ として与えることができる (但し $a \geq r \geq 0$ の場合)²⁾。したがって剛性載荷板による沈下量 ω は次の式となる。

$$\omega = \pi/4 \cdot 2(1-\nu^2)E^{-1} \cdot q \cdot a \quad (19)$$

この場合 $2a$ は載荷板直径 (D) となる。また q/ω は路盤の支持力係数 K 値で表わされるから、路盤の弾性常数は次の通りとなる。

$$\frac{E}{(1-\nu^2)} = \pi/4 \cdot D \cdot K \quad (20)$$

(20)式を(18)式に代入して

$$\rho' = \pi/4 \cdot D \cdot K \cdot a/q \quad (21)$$

となる。

一般に $D = 30$ cm が用いられ、このときの路盤支持力係数は (K_{30}) で示されるから、路面の曲率半径 (ρ') は次の式で示される。

$$\rho' = 7.5\pi \cdot K_{30} \cdot a/q \quad (22)$$

$a \cdot q$ はそれぞれの輪荷重によって設定すれば、(ρ') は

$$\rho'(m) = 1/c \cdot K_{30} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (23)$$

$$\text{但し } 1/c = 7.5\pi \cdot \frac{a \text{ (cm)}}{q \text{ (kg/cm}^2\text{)}} \cdot \frac{1}{100}$$

となる。

4.2 路盤支持力と繰返し曲げ疲労破壊回数との関係

(9)式を変形して (ρ) を求めると

$$A \ln \rho = \ln N - B$$

$$\rho = \exp \left[\frac{\ln N - B}{A} \right]$$

または

$$\rho = \exp \left[- \frac{B}{A} \right] N^{\frac{1}{A}} \quad (24)$$

となる。 $\rho = \rho'$ として(24)式と(23)式より次の式を得る。

$$K_{30} = C \cdot N^{\frac{1}{A}} \cdot \exp \left[- \frac{B}{A} \right] \quad (25)$$

(25)式より低温度 0℃ における重交通車両の交通量を調査すれば、その地方で舗装する場合、道路の必要な路盤支持力係数 (K_{30}) 値が推定される。次に計算例を示す。

例えば $a = 25$ cm, $q = 8$ kg/cm² と想定すれば

$$\rho' = 0.736 K_{30} \quad (26)$$

$N = 5,000$ 台、表層アスコン (20 mm) を用いる場合、表 5 より $A = 4.67$, $B = -6.92$ で示されるから(25)式に代入して

$$K_{30} = 1.358 \times 5,000^{4.67-1} \times \exp \left[-\frac{6.92}{4.67} \right] \\ \doteq 37.0 \text{ kg/cm}^2$$

となる。

($a = 25 \text{ cm}$ は重車両の後輪ダブルタイヤの接地幅を 50 cm と仮定し、またタイヤの空気圧から $q = 8 \text{ kg/cm}^2$ を想定した。)

5. ま と め

本研究により 0°C における各種アスファルト混合物のたわみ特性、即ち破壊時の曲率半径 (ρ) とその繰返し回数 (N) との関係が得られた。この関係は (9) 式に示す通りである。この式より (N) を 0°C における重交通量とし、路面の沈下量から最小曲率を実測すれば、表層アスファルト舗装の必要なたわみ特性を推定出来る。また弾性沈下論より路面の沈下曲率半径 (ρ') を $\rho' = \rho$ とした場合、(N) と路面の支持力値 (K_{30}) との関係すなわち (4) 式を得た、(4) 式より (N) の値が設定されるならば路面の支持力係数 (K_{30}) は如何にあるべきか推定出来る。

この他、本実験結果より明らかになった点を列挙すると次の通りである。

(1) アスファルト混合物①②③の場合 0°C の $N = 50$ 回のとき $\rho \doteq 4 \sim 10 \text{ m}$ で、 $N = 10,000$ 回になると $\rho \doteq 19 \sim 26 \text{ m}$ である。

①②③の順にアスファルト量が少ない混合物程 ρ が大きくなる。

(2) アスファルト混合物①②③を 10°C に温度上昇させると $N = 50$ 回のとき $\rho \doteq 3 \sim 6 \text{ m}$ 、 $N = 10,000$ 回は $\rho \doteq 15 \sim 24 \text{ m}$ と 0°C に比較して ρ は小さくなる。即ちたわみ性が良くなることを示している。

(3) アスファルト混合物⑦⑧を比較すると、ゴムが混合物に添加されると (ρ) は小さくなり、 $N = 10,000$ 回で $\rho \doteq 8 \text{ m}$ の差を示している。

(4) アスファルト混合物⑦⑧⑨は同じ骨材粒度 (最大寸法 20 mm) であるが、アスファルト量が 6% 、 5.5% 、 5% と異なる。この場合 $N = 50$ 回で $\rho \doteq 10 \sim 12 \text{ m}$ で $N = 10,000$ 回では $\rho \doteq 31 \sim 42 \text{ m}$ とアスファルト量が小さい配合ほど ρ は大きくなる。

(5) アスファルト混合物⑩⑪は同じ骨材粒度であるが、⑩に石綿が添加されているためにアスファルト量が 0.8% 多い。その原因と石綿の特性が加味されてか、石綿の入った方がたわみ性が良い結果を示した。この2種類の混合物は他の混合物に比較して、 $N = 50$ 回のとき $\rho \doteq 8 \sim 6 \text{ m}$ でたわみ性が大きい、 $N = 10,000$ 回になると $\rho \doteq 30 \sim 34 \text{ m}$ とたわみ性が小さくなる。

(6) アスファルト混合物⑬にエポキシ樹脂を入れると、 $N = 50$ 回で $\rho \doteq 14 \text{ m}$ および $N = 10,000$ 回で $\rho \doteq 38 \text{ m}$ とたわみ性は小さくなる。

(7) アスファルト混合物⑭⑮即ち軟化点の高い 60°C 以上の高温度に対する安定性を考慮した AC-140 のアスファルト混合物とブローンアスファルト混合物を比較した結果は、 $N = 50$ 回で ρ が⑭は 4.8 m で⑮は 9 m と⑭の方が小さいが、 $N = 10,000$ 回では両方とも $\rho \doteq 34 \text{ m}$ を示した。

(8) アスファルト混合物③と⑥を比較すると、骨材の最大寸法が大きい方が、 $N = 10,000$ 回で ρ が大きいことを示している。即ちたわみ性は骨材の最大寸法の大きいほど良くない結果を示している。

(9) アスファルト混合物③と⑥を比較すると、骨材の最大寸法とアスファルト量がほぼ同じであるが、骨材粒度は⑥の方が細粒分が多いので $N = 10,000$ 回では⑥は ρ が③より大きい値を示したものと推定される。この原因は骨材を被覆するアスファルト被膜厚さが⑥の方が薄いことによるものと考えられる。

(10) 予備試験に用いたアスファルト混合物 ①'～⑥' は ①～⑥と同じ混合物で同じ条件で実験を行ったが、供試体の寸法が小型であったために断面二次モーメント及びスパン l が小さいので、弾性係数 E と曲げ応力が等しいとして、(7)式により求めると、①'～⑥'の曲率半径の 87% となるはずであるが実験誤差などで $60 \sim 70\%$ の結果を示した。

(11) ブローンアスファルトとそのアスファルトに石粉を入れた場合のたわみ性について ⑦' と ⑧' を比較した結果、石粉を入れた方がたわみ性が大きくなる結果を得た。

(12) ストレートアスファルト ($60 \sim 80$) のみの 0°C における曲げ試験は、供試体の支点部分が載荷中に軟化して測定出来なかった。よって石粉を同比率 (重量比) で混合して更に実験を行ったが、同じように軟化したため、 -2°C に温度を低下して実験を行った。その結果は ⑨' に示す通りでブローンアスファルト 0°C とほぼ同じ値を示した。

(13) 本実験結果より総合的に見て、現在一般に使用されているアスファルト混合物の 0°C における曲率半径は、 $N = 50$ 回では約 10 m 、 $N = 10,000$ 回では約 $26 \sim 42 \text{ m}$ で破壊する結果を示した。

(14) $N = 10,000 \sim N = 50,000$ までの曲率半径については、現在実験中であるが、 N の増加に対して $N = 10,000$ 回の値とほぼ同じであるが、多少曲率半径は大きくなると推定される。しかしその変化量は小さい結果を

示している。

6. む す び

アスファルト混合物は使用する材料と混合割合などによって、それぞれ違った μ_c-N の関係が生ずるものであると判断される。現行のアスファルト混合物の試験方法としてこのような試験は殆んど行われていないのが、現状である。しかしアスファルト舗装がたわみ性舗装と云われるからには、このような曲げ試験方法によるたわみ性が当然検討されるべき問題であることを提案する。

謝辞 本研究は本学土木工学科の学生諸君が道路工学の卒業論文の研究課題として実施したものであり、従事した学生諸君は次の通りである。

昭和50年度 鶴野伸也、昭和51年度 鍵谷浩平、佐藤文雄。昭和52年度 加地高典、宮川裕章。昭和53年度 千葉雅彦、阪上定信。昭和54年度 富樫寛樹。昭和55年度 渡辺英人、千田雅彦、篠沢祐悦。

またアスファルト混合物の供試体の作成は最も困難な

作業であったが、浦和土建工業株式会社並びに佐藤道路株式会社御協力により、所要の供試体が得られましたことに厚くお礼申し上げます。特に本論文の作成と学生実験の指導には本学技術職員太郎良菊憲技手補の助力によること多大でありました。各位に謝意を表します。尚本研究に使用した試験機「電気系油圧サーボ載荷方式アスファルト繰返し曲げ疲労試験機」は昭和48年度、文部省大学設備助成金により購入したものである。

（原稿受付 昭和55年9月20日）

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：「アスファルト舗装要綱」，昭和42～53年度版
- 2) 星 埜 和：「基礎の支持力論」，コロナ，昭和27年
- 3) 菅原，工藤，有福：「土木材料 Ⅲ・アスファルト編」，共立，昭和49年
- 4) 斉藤総一郎：「アスファルト混合材の曲げ試験について」，日本舗道研究所報，第3号，昭和29年