HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	アスファルト混合物の流動を伴う領域の曲げの破壊包絡線に関する研究
Author(s)	森吉，昭博；菅原，照雄
Citation	土木学会論文報告集，251，107-112
Issue Date	1976-07
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/40181
Type	journal article
File Information	moriyoshi_PJSCE251.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

土木学会論文報告集
第251号・1976年7月

アスファルト混合物の流動を伴う領域の曲げの破壊包絡線に関する研究

FAILURE ENVELOPE OF BITUMINOUS MIXTURES

森吉昭博*・菅原照雄**
By Akihiro MORIYOSHI and Teruo SUGAWARA

1. 本研究の意義

本論文は舗装用アスファルト混合物の曲げの破壊性状のうち，特に破壊強度と破壊時のひずみとの関係を種々の実験結果から論じたものである．

アスファルト混合物の破壊時の性状を研究した例は比較的少なく，研究の大部分は破壊強度に関するものであり[1),2)]，一方破壊時のひずみに関する研究は筆者らのほかに Heukelom[3)], Monismith[4)] らの研究などごくわずかしかない．

筆者らは最近の研究[5),6)]から，破壊強度（または破壊時のひずみ）と温度との関係を示す曲線はひずみ速度が変化してもその形状は変化しないこと，また一定ひずみ速度の破壊強度と破壊時のひずみとの関係は，クリープ試験から得られたそれと非常によく似ていることを明らかにし[7)~9)]，脆性破壊領域から流動を伴う破壊領域のすべてにわたり破壊強度と破壊時のひずみとが一定の関係にある，すなわち破壊包絡線が存在することを示唆してきた[10),11)]．

アスファルト混合物の破壊包絡線は混合物の配合設計を行うときや破壊現象を解析する場合に，きわめて重要な意味を持つと考えられる．特に水理構造物にアスファルト混合物を使用するときは，その混合物の持つ限界のひずみ量により，その構造が決定されるといっても過言ではない．一方，世界的にも問題になっているアスファルト舗装の低温き裂現象も使用混合物の強度および破壊時のひずみ量と関係があるといわれていることは暗にアスファルト混合物の破壊包絡線の形状およびその位置がこの破壊現象と密接な関係にあることを示している．また，通常の舗装にあっても基盤の大変形への追従において，大きな意味をもっている．このようにアスファルト混合物の破壊包絡線の位置やその形状がきわめて重要であるとされながら，これらが混合物の配合やバインダー性状により，いかに変化するかはいまだ明確に論じられていない．

筆者らのさきに述べた[6),12)~14)]アスファルト混合物の破壊に関する研究は，いずれも温度やひずみ速度がパラメーターとなっているため，混合物自身のもつ破壊性状をこれらのパラメーターを介さずに論じようとすると若干無理な点があった．

本研究では以上の点を考慮し，種々のアスファルト混合物の破壊包絡線の形状およびその位置が流動を伴う領域で次のような各種の因子によりいかに変化するかについて論ずることを試みた．

1. 応力履歴
2. 混合物の配合（バインダー量）
3. バインダーの性状
4. 混合物の空隙率

アスファルト混合物の破壊包絡線は脆性破壊領域から流動を伴う破壊領域のすべてにわたり存在するが，前者の領域では破壊強度や破壊時のひずみの変動係数が後者の領域よりも著しく大きいため[6)]，本論文では比較的精度の良い後者の領域でその形状や位置について検討した．

2. 実験，解析の方法ならびに試料

本研究では以下のような実験を行った．

曲げ試験：供試体寸法（cm）　2.5×2.5×25
変位速度（mm/min）　10~8 000
供試体下縁のひずみ速度（1/sec）
6.3×10^{-4}~5.0×10^{-1}
試験温度（°C）　−15~25

a. 一定ひずみ速度試験

* 正会員　工博　北海道大学助教授　工学部土木工学科
** 正会員　工博　北海道大学教授　工学部土木工学科

b. 一定ひずみ速度で実験中，急激にひずみ速度を増加させる試験（以下一段加速ひずみ速度試験と称す）

c. 一定ひずみ速度で実験中，急激にひずみ速度を減少させる試験（以下一段減速ひずみ速度試験と称す）

d. クリープ試験

なお以上の試験のほかに一定ひずみ速度の引張試験，圧縮試験，繰り返し曲げおよび圧縮試験，応力緩和試験中にある応力レベルに達したとき応力緩和試験を繰り返し何回も行う，いわゆる繰り返し応力緩和の曲げおよび圧縮試験なども行ってみた．

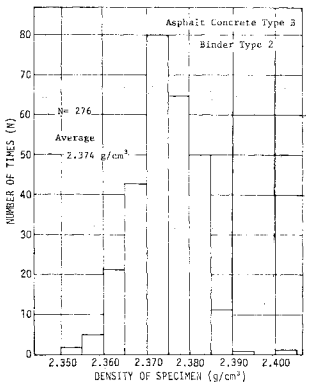
一定ひずみ速度の引張試験は，アスファルト混合物のひずみ量の測定が難しく，破壊包絡線を得ることが困難であり，現在の段階においてまとまった結論を得るに至っていない．圧縮の破壊包絡線については機会を得て発表したいと考えている．あとの種々の繰り返し試験における結果は興味深いものであったが，これも現在のところまとめの段階にまでは至っていない．これらに関してはさらに実験研究を進める必要があろう．

なお本実験に用いた載荷装置はさきに[6),13)]明らかにしたものとまったく同一なのでここでは省略するが，本研究のように温度，ひずみ速度をともに広範囲に変化させた例は他に類をみない．

実験結果の解析はいずれも弾性解を用いた．このため，高温かつ低ひずみ速度で行った結果の計算値には当然多少の誤差が見込まれる．

各試験における破壊は次のように定義した．すなわち，一定ひずみ速度試験（一段加，減速ひずみ速度試験も含む）の破壊は最大荷重点，またクリープ試験でのそれは第2期クリープからはずれる点とした．

使用供試体の作製法は実験の再現性や精度に影響を及ぼすと思われるので，できるかぎり均一なものが得られるよう努力し，特に密度管理は厳重に行った．曲げ試験に用いた供試体の一部（276本）の密度のヒストグラムを図—1に示す．



図—1 供試体の密度のヒストグラム

実験はすべて Hooke の恒温水槽（KT-33 型，設定温度 100～−30°C，0°C における精度 0.05°C）の中で行った．

使用バインダーの主な性状は付表—1に，また使用混合物の配合は付表—2に示す．

3. 破壊包絡線の形状の確認

筆者らは曲げ試験における破壊包絡線の形状について検討するために次のような実験をアスファルトコンクリートタイプBの混合物について行った．

a. 一定ひずみ速度試験
- 変位速度（mm/min） 5, 50, 100, 300, 500
- 供試体下縁のひずみ速度（1/sec） 3.1×10^{-4}, 3.1×10^{-3}, 6.3×10^{-3}, 1.9×10^{-2}, 3.1×10^{-2}
- 試験温度（°C） 5, 7.5, 10, 11, 12, 13, 15, 20, 25

b. クリープ試験
- 設定応力までの変位速度（mm/min） 5
- 設定応力までのひずみ速度（1/sec） 3.1×10^{-4}
- 設定応力 一定ひずみ速度試験における破壊強度の 0.5 および 0.7 倍
- 試験温度（°C） −3, 2, 5, 7, 10

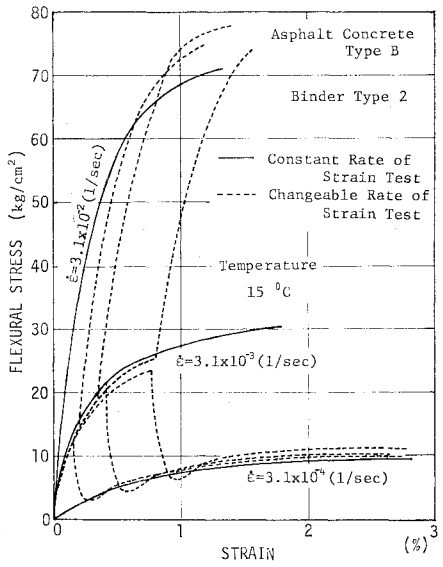
c. 一段加速ひずみ速度試験
- 初期変位速度（mm/min） 5, 50
- 初期ひずみ速度（1/sec） 3.1×10^{-3}, 3.1×10^{-4}
- 最終変位速度（mm/min） 50, 100, 500
- 最終ひずみ速度（1/sec） 3.1×10^{-3}, 6.3×10^{-3}, 3.1×10^{-2}
- ひずみ速度変換点 一定ひずみ速度試験における破壊強度の 0.3, 0.5 および 0.7 倍
- 試験温度（°C） 5, 10, 15, 20, 25

d. 一段減速ひずみ速度試験
- 初期変位速度（mm/min） 50
- 初期ひずみ速度（1/sec） 3.1×10^{-3}
- 最終変位速度（mm/min） 5
- 最終ひずみ速度（1/sec） 3.1×10^{-4}
- ひずみ速度変換点 一定ひずみ速度試験における破壊強度の 0.3, 0.5 および 0.7 倍
- 試験温度（°C） 10, 15

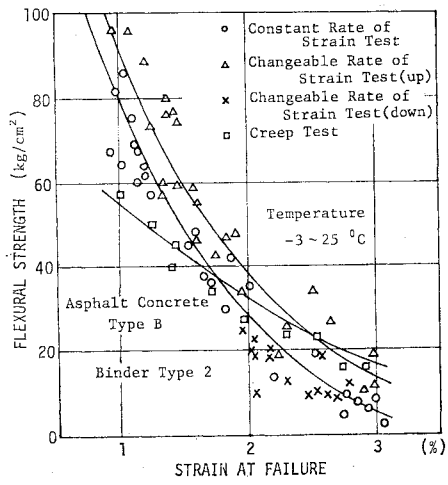
なおクリープ試験ならびに一段加，減速ひずみ速度試験における設定応力およびひずみ速度変換点は一定ひずみ速度試験における破壊包絡線の位置から決定した．

一段加速および減速ひずみ速度試験において，ひずみ速度の変換点における応力レベルがこれらの応力・ひずみ曲線に与える影響について検討した結果は図—2に示す．いずれの試験も破壊時の強度およびひずみは一定ひずみ速度の試験結果とほぼ同一であると考えられる．一方，一段加速ひずみ速度試験の応力・ひずみ曲線は一定ひずみ速度試験におけるそれにすりつくまでにかなり時間を要するが，これに反し，一段減速ひずみ速度試験におけるこのすりつきは短時間のうちに終了する．

これらの試験結果と一定ひずみ速度試験の結果を破壊強度，σ_b と破壊時のひずみ，ε_b で整理すると図—3が得られた．ここに示した曲線は σ_b と ε_b が，ともに誤差を有し両者の重みが等しく，かつ両者の関係が2次曲線で表現できると仮定して整理し得られたものである．



図—2　応力履歴が応力-ひずみ曲線に及ぼす影響



図—3　種々の載荷条件下における破壊包絡線の形状

図中に一段減速ひずみ速度試験の結果が示されていないのは実験条件の範囲が狭いため，この整理を行わなかったためである．ここで仮定した事項ならびに2次曲線の定数などについてはさらに多くの実験を積重ねることが必要となろう．

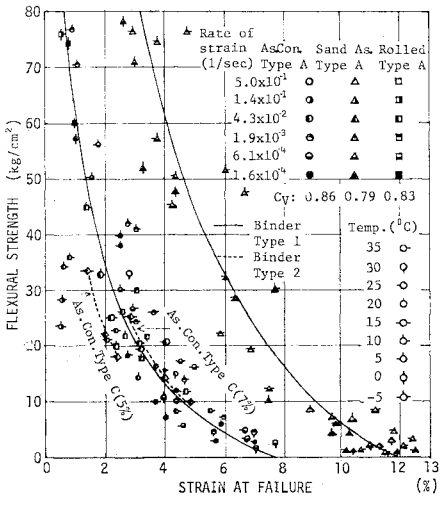
以上の条件のもとではクリープ試験から得られた結果のみが他の試験法から得られた結果とは少し異なっているように見うけられるので，さらに高応力，小ひずみ領域で詳細に検討する必要があると思われるが，工学的には種々の実験から得られた破壊包絡線の形状は流動を伴う領域では応力の履歴に依存せず，いずれもほぼ同一と考えてもよいと思われる．

曲げの破壊包絡線は流動を伴う破壊領域において，破壊強度の減少とともに破壊時のひずみ量は増加するが，破壊時のひずみにも限界値が存在するように思われる．このためこのひずみを限界ひずみと定義する．

4．曲げ試験における破壊包絡線

（1）　配合の影響

図—4はサンドアスファルト混合物ならびに一般舗装用混合物について，アスファルト混合物の配合が破壊包絡線に及ぼす影響について検討したものである．一般舗装用混合物として連続的骨材粒度組成をもつアスファルトコンクリートタイプAの混合物と不連続な骨材粒度組成をもつロールドアスファルトタイプAの混合物を採用した．両者の混合物は粒度組成，バインダー量がともに異なるが，いずれもマーシャル試験から決定した最適アスファルト量を含むものである．2種の混合物はこのように配合が著しく異なるにもかかわらず破壊包絡線は一



図—4　配合が破壊包絡線に及ぼす影響

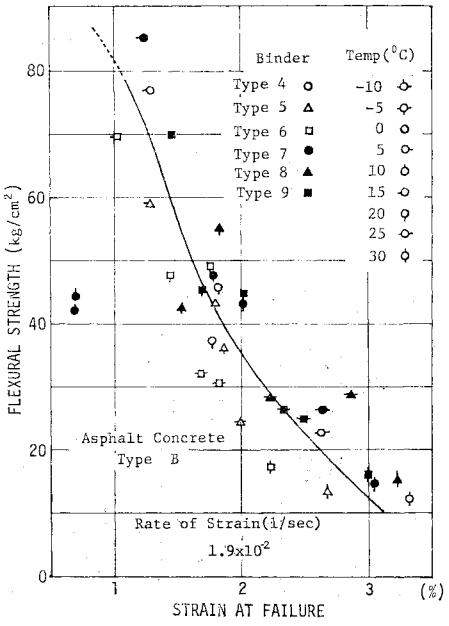
本の曲線として表現されるとしてもさしつかえないという注目すべき結果が得られた．

一般舗装用混合物とサンドアスファルトタイプAの混合物の破壊包絡線を比較すると後者の位置は前者のそれより破壊強度ならびに破壊時のひずみがともに大きい側にずれている．この結果，高応力部での破壊時のひずみ量はサンドアスファルトタイプAの混合物では前者の約4倍，低応力部では約1.5倍となった．混合物中の骨材の絶対容積を表現している骨材体積率，C_V，を両者で比較すると図—4より約0.1の差しかないが，このように破壊包絡線の形状が2種の混合物で異なる原因は骨材最大粒径の相違やバインダー量の変化により応力の集中や伝達の状態が著しく変化するためと考えられる．

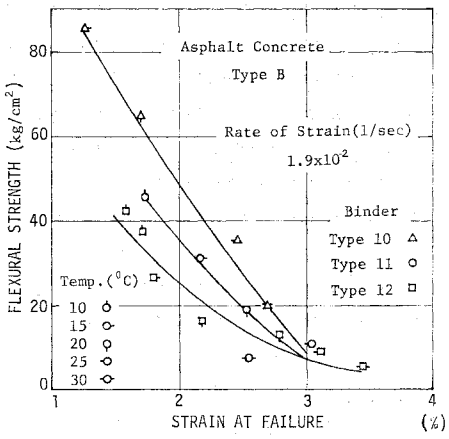
バインダー量を変化させたときの破壊包絡線は図中に点線で示されているごとく，バインダー量の増加に伴い破壊包絡線の位置は破壊強度ならびに破壊時のひずみがともに大きい側にずれる．

（2） バインダーの性状の影響

図—5は6種のバインダーを用いたアスファルトコンクリートタイプBの混合物について行った曲げ試験の結果を示す．いずれのバインダーも針入度が80/100級であり，軟化点も46.0～46.5°Cとほぼ同一で，原油製法が異なったものである．なおこれらのバインダーは現在日本で舗装用として使用されている代表的なものである．バインダータイプ6を使用した混合物の破壊包絡線の位置はわずか異なっているらしく思われるが，明確で



図—5 バインダーの性状が破壊包絡線に及ぼす影響



図—6 バインダーの性状が破壊包絡線に及ぼす影響

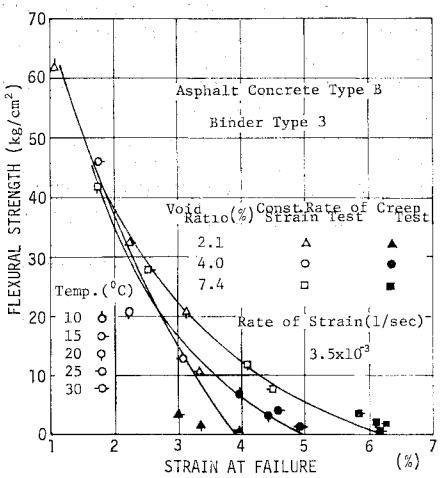
はなくむしろ6種のバインダーを使用した混合物のこれらの曲線はほぼ同一であると考えてさしつかえないと思われる．

バインダーの性状で軟化点がほぼ同一で針入度が異なる3種のバインダーを用いたアスファルト混合物の曲げ試験の結果は図—6に示す．針入度指数の小さい（針入度が小さい）バインダーを使用した混合物の破壊包絡線の勾配は針入度指数の大きい（針入度が大きい）ものを使用した破壊包絡線の勾配よりも大きい．またその位置は高応力部では前者が後者より高応力，大ひずみ領域に位置しているが，低応力部での両者の関係は逆になることが予想される．このような関係は筆者らがすでに述べた[14]ように流動を伴う破壊領域では軟化点が同一の場合針入度指数の大きなバインダーを使用した混合物ほど破壊強度・温度曲線ならびに破壊時のひずみ・温度曲線の勾配が緩やかとなり，破壊時のひずみの上限値は増加するという関係と対応している．

したがってここではバインダーの性状は破壊包絡線の形状ならびにその位置に無視できない影響を与えていると結論される．

（3） 空隙率の影響

同一の配合でローラコンパクタでの転圧回数を変え，空隙率が2.1%，4.0%および7.4%である混合物について空隙率が破壊包絡線の形状に及ぼす影響を検討し図—7に示すような結果を得た．混合物中の空隙率が大きくなるに伴い，限界ひずみ量も大きくなる傾向が見られ，クリープ試験から得られた破壊包絡線と一定ひずみ速度のそれとはほぼ同一で，その位置は空隙率の大きさに依存している．このように空隙率の増大に伴い限界ひずみ量が増加するのは破壊時のき裂伝播速度が空隙率の値により異なるためであると考えられる．



図—7　空隙率が破壊包絡線に及ぼす影響

5. 結　　論

曲げ試験の結果から，種々のアスファルト混合物の流動を伴う領域の破壊包絡線の形状とその位置について，種々の実験より考察を試みた．ここで得られた主な結論を要約すると以下の通りである．

（1）　アスファルト混合物の破壊包絡線の形状とその位置はひずみ速度，温度および応力履歴に依存せず，混合物の配合および空隙率に依存する．

（2）　破壊包絡線の位置はバインダー量の増加，軟化点が同一の場合バインダーの針入度指数の減少，空隙率の増加に伴い，その形状は少し変化しながらも一般に破壊強度ならびに破壊時のひずみが大きくなる方向に移動する．

（3）　破壊包絡線の流動を伴う領域の勾配はバインダー量の増加，軟化点が同一の場合バインダーの針入度指数の増加，および空隙率の増加に伴い小さくなる．

付表—1　バインダーの主な性状

性状 / タイプ	針入度 (25°C, 100 g, 5 sec)	軟化点 (°C)	針入度指数 P.I.
タイプ 1	81	47.3	−0.7
タイプ 2	96	47.0	−0.3
タイプ 3	95	46.5	−0.5
タイプ 4	96	46.5	−0.5
タイプ 5	97	46.5	−0.4
タイプ 6	94	46.5	−0.5
タイプ 7	95	46.0	−0.6
タイプ 8	91	46.0	−0.8
タイプ 9	95	46.0	−0.6
タイプ 10	50	51.0	−1.0
タイプ 11	120	50.5	1.5
タイプ 12	147	50.0	2.1

付表—2　混合物の配合表（%）

混合物のタイプ / ふるい目の開き(mm)	アスファルトコンクリートタイプA	アスファルトコンクリートタイプB	サンドアスファルトタイプA	ロールドアスファルトタイプA	アスファルトコンクリートタイプC
20	—	—	—	—	100
15	100	—	—	100	90
13	—	100	—	—	—
10	84	92	—	70	70
7	74	75	—	57	57
5	65	68	—	57	45
2.5	48	47	100	57	30
1.2	36	36	90	57	20
0.6	25	25	80	57	15
0.3	17	14	59	38	15
0.15	12	7	15	20	8
0.074	7	6	11	11	6
バインダー量 (%)	5.7	6.0	8.5	7.2	5.0 7.0

以上で述べた本研究の結論はさらに拡張すると強さ・ひずみ・時間で表現される3次元破壊包絡面の設定が可能であるばかりか，この面からクリープおよび応力緩和の各性状ならびにこれらと破壊との関係についても論ずることが可能であると思われるので現在この点についても検討中である．また圧縮の破壊包絡線に関しては上島[15]らが種々の混合物について検討中であるので，いずれ機会を得て発表したいと考えている．

参考文献

1) Poel C. van der : A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumens and its Relation to Routine Test Data, Journal of Applied Chemistry, Vol. 4, Part 5, pp. 221～36, May, 1954.
2) Tons, E. and Krokosky, E.M. : Tensile Properties of Dense, Graded Bituminous Concrete, Proc. Assn. Asphalt Paving Tech. Vol. 32, pp. 497～529, 1963.
3) Heukelom, W. and Klomp, A.J.G. : Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction, Proc. Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, pp. 667～679, 1962.
4) Monismith, C.L., Secor, G.A. and Secor, K.E. : Temperature Induced Stresses and Deformations in Asphalt Concrete, Proc. Assn. Asphalt Paving Tech. Vol. 34, pp. 248～285, 1965.
5) Teruo Sugawara : Mechanical Response of Bituminous Mixture under Various Loading Conditions, Proc. 3rd Internat. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 1, pp. 343～353, Sept. 1973.
6) 森吉昭博・上島　壮・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊強度に関する研究，土木学会論文報告集，第210号，pp. 57～64, 1973. 2.
7) 工藤忠夫・菅原照雄：水工用アスファルト混合物のクリープ挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第201号，pp. 113～122, 1972. 5.
8) 森吉昭博・吉川　博・菅原照雄：アスファルト混合物の空隙率と力学特性，土木学会第29回年次学術講演概要集，pp. 252～253, 1974. 10.
9) 森吉昭博・菅原照雄：種々の載荷条件におけるアスファルト混合物の曲げ破壊に関する研究，土木学会北海道支部論文報告集，pp. 241～244, 1974. 2.

10) 森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の曲げ特性に関する研究，第7回複合材料シンポジウム発表報文集，pp. 145～148，1974. 10.
11) 森吉昭博・堀尾哲一郎・堀　秀松：アスファルト混合物の力学性状におけるバインダーの影響，土木学会第28回年次学術講演会講演概要集，pp. 233～234，1973. 10.
12) Teruo Sugawara, Akihiro Moriyoshi, Tsuyoshi Kamijima and Atsushi Kasahara : Failure Behavior of Bituminous Mixtures, Bulletin of the Japan Petroleum Institute, Vol. 17, No. 1, pp. 35～42, April 1975.
13) 上島　壮・森吉昭博・菅原照雄：アスファルト混合物の破壊時のひずみに関する研究，土木学会論文報告集，第221号，pp. 73～80，1974. 1.
14) 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，土木学会論文報告集，第234号，pp. 131～141，1975. 2.
15) 上島　壮・沖垣　孝・戸嶋慎一：アスファルトコンクリートの一軸圧縮特性について（第2報），土木学会第29回年次学術講演会講演概要集，pp. 256～258，1974. 10.

（1975.10.16・受付）