

水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤層の疲労破壊を考慮したアスファルト舗装の構造設計法について

神戸大学大学院工学研究科 学生員 古谷 卓也
 神戸大学大学院工学研究科 学生員 ○田中 大樹
 神戸大学都市安全研究センター 正会員 吉田 信之

1. はじめに

著者らは、これまで水硬性粒度調整鉄鋼スラグ（以降、HMS と称す）路盤を有するアスファルト舗装の実路調査や模型実験等の結果から、アスファルト混合物層下面のみならず HMS 路盤層下面にも比較的大きな引張りひずみが生じることを確認し、HMS 路盤層の疲労破壊の可能性も検討する必要があることを指摘してきた¹⁾²⁾。また、梁供試体を用いた繰返し曲げ疲労試験の結果に基づいて、HMS 路盤材の疲労破壊基準式を提案した³⁾。本報では、養生期間を考慮した HMS 路盤材の疲労破壊基準式について概述した後、HMS 路盤層の疲労破壊を考慮したアスファルト舗装の理論的構造設計フローの修正案を提示するとともに、その設計フローに従って HMS 路盤系アスファルト舗装の構造設計の例題解析を試みた。具体的には、3 種類の設計 CBR に対して T_A 法で求まる舗装断面と修正設計フローに従って求まる舗装断面を比較検討した。

2. HMS 路盤材の疲労破壊基準式⁴⁾

著者らは梁供試体を用いた疲労試験を行ってきた。ここでは、既報³⁾の複合スラグについて概述する。梁供試体は、大学敷地内にモールド付き型枠を用いて実地盤内に作製し、所定期間養生した後、供試体を取り出して端面整形してから試験に供した。供試体の寸法は、奥行き 100mm、高さ 100mm、長さ 400mm である。

繰返し曲げ疲労試験は、通常の 3 等分点載荷による繰返し載荷で行った。載荷に際しては本来休止時間を伴うハーバーサイン波を作用させる方が現実的ではあるが、装置の性能上できなかったため、ここでは載荷時間 0.2 秒、休止時間なしで残荷重 40N のサイン波で行った。繰返し載荷荷重の大きさは、疲労試験に先立って行った静的曲げ試験から得られた曲げ強度を参考に設定した。

図-1 に各養生期間における応力比（曲げ載荷応力／静的曲げ強度：SR）と破断回数（N_f）の関係を回帰曲線とともに示す。ここで破断回数とは、供試体が完全に破断する直前の載荷回数のことである。一般的に疲労破壊基準式は応力比と載荷回数で表現でき、図のように片対数紙上で直線関係になる。図より、疲労破壊基準線は、養生期間が長くなるにつれてその直線の勾配（1/β）は緩やかになり縦軸切片（α/β）は小さくなる傾向があり、最終的に疲労限界線に漸近すると推察できる。実際、（1/β）は $0.124 \cdot e^{-0.00279t}$ で、（α/β）は $0.891 \cdot e^{-0.00456t} + 0.454$ で表される⁵⁾。また、疲労限界応力比は載荷回数の上限を超えても未破断であった供試体の応力比の平均値（0.454）と仮定した。これらのことから、次式のような養生期間項を導入した疲労破壊基準式が誘導できる。

$$\log N_f = \frac{(0.891 \cdot e^{-0.00456t} + 0.454) - \sigma_t / S_b}{0.124 \cdot e^{-0.00279t}}, \quad S_b = \frac{t}{34.781 + 0.653 \cdot t}$$

ここで、σ_t は HMS 層下面に生じる最大引張応力（MPa）、S_b は養生期間 t（日）の曲げ強度（MPa）である。曲げ強度は、水硬性発現により増加するため、過去の実験で得られた一軸圧縮強度の増加傾向も考慮して上記のような養生期間の関数にしている⁴⁾。

3. 理論的構造設計

(1) 解析条件

図-2 に現行の理論的設計フロー⁶⁾に HMS 路盤の疲労破壊の可能性を評価するブロックを追加し修正した理論的設計フローを示す。図中赤枠点線内が修正箇所である。次に、図-3 に示すような表層（密粒度アスファルト混

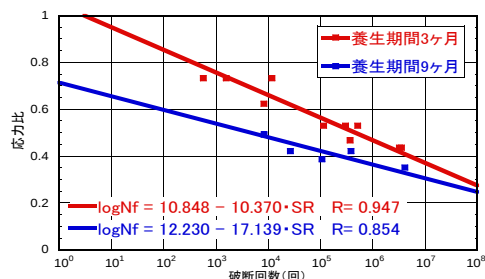


図-1 応力比と破断回数の関係

キーワード 水硬性粒度調整鉄鋼スラグ 疲労破壊基準式 理論的設計法

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学 都市安全研究センター TEL 078-803-6437

合物), 路盤 (HMS), 路床 (まさ土) の HMS 路盤系アスファルト舗装について例題解析を行う. 設計期間 10 年, 交通条件 N_T とし, 路床の設計 CBR については 3%, 8%, 20% の 3 種類を仮定した. T_A 法で構造設計すると, 表-1 に示すように設計 CBR3% の舗装断面 (A_0) はアスファルト混合物層が 200mm, HMS 層が 450mm となり, 設計 CBR8% の断面 (B_0) は 150mm, 350mm, 設計 CBR20% での断面 (C_0) は 100mm, 300mm となる.

次に, 理論的構造設計である. ここでは, T_A 法による舗装断面を初期断面と仮定し, HMS 路盤層厚を変化させて最適厚さを求めることにした. まず, 多層弾性解析による舗装の応答解析を行う. そこで, 材料条件であるアスファルト混合物層のスティフネスは温度依存性があることから, 1 年を 4 季節に区分し, 舗装設計便覧⁶⁾を参考に設定した⁴⁾. HMS 路盤層のレジリエントモジュラスは過去の試験結果を参考に設定した⁴⁾. 路床の弾性係数, ポアソン比は舗装設計便覧⁶⁾を参考に設定した. なお, ここでは路床の良し悪し (異なる設計 CBR) の影響を排除するため, 解析の E, ν は全て同じ値を用いた. 次に, 荷重条件については図-3 に示すように軸重 98kN で複輪の大型車両を想定した⁴⁾.

解析手順は, まず初期断面について多層弾性解析を行う. 本研究では Kenlayer コードを用いて解析を行った⁷⁾. 次に, 得られたアスファルト混合物層の最大水平引張ひずみ, HMS 路盤の最大水平引張応力をそれぞれの疲労破壊基準式に代入して破壊回数を算出し, マイナー則から疲労寿命を算定する. なお, 解析結果からアスファルト混合物層の最大水平引張ひずみはいずれの断面においても層内部で発生し, 水平方向の位置は片輪荷重中心直下, 鉛直方向の位置は A 断面, B 断面, C 断面のそれぞれ $z=90\text{mm}, 80\text{mm}, 60\text{mm}$ である. いずれの解析断面でも最大引張ひずみの発生位置は同じであった. 今回はその値を舗装設計便覧⁶⁾の疲労破壊基準式に代入し破壊回数を計算している. また, HMS 路盤の最大水平引張応力は複輪中心直下の層下面で生じており, その値を前述の疲労破壊基準式に代入している.

(2) 結果と考察

表-1 に各断面について HMS 路盤層の層厚を変化させた疲労寿命を, 図-4 に, 一例として設計 CBR3% (A 断面) の場合の疲労寿命の推移図を示す. 図表より, A 断面については設計フローの力学的評価ブロックの大小関係を満たす断面は $A_0 \sim A_4$ であり, A_4 断面でもなお十分な疲労寿命を持つことがわかる. また, T_A 設計断面 (A_0) と比較して HMS 路盤層を 217mm も薄くできることがわかる.

同様に設計 CBR8% (B 断面), 設計 CBR20% (C 断面) の場合も, それぞれの最適断面は B_3, C_2 となり, 初期断面 (B_0, C_0) と比較してそれぞれ 90mm, 10mm 薄くできる. 以上より設計 CBR の値に関わらず, 提案した設計フローに従うと, 薄くできる層厚の値は異なるものの初期断面に比べて経済的な断面設計が出来るものと考えられる.

4. おわりに

本報では, HMS の疲労破壊基準式と理論的構造設計フローの修正案を提案するとともに, 例題解析により設計フローの妥当性を検討した. その結果, 設計 CBR の値に関わらず, 十分な疲労寿命を有しながら T_A 設計法よりも HMS 路盤層を薄くできることを示した. 今後は実舗装設計に適用できる信頼性の高い疲労破壊基準式の確立とわだち掘れの検討ブロックの修正について検討していく予定である.

参考文献: 1) 古谷・吉田: 実路走行試験調査による HMS 路盤系アスファルト舗装の動的挙動と理論的構造設計法について, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集 CD, V-058, pp. 113-114, 2009. 2) 吉田他: 水硬性発現が HMS 路盤系アスファルト舗装の動的挙動に及ぼす影響について, 第 44 回地盤工学研究発表会平成 21 年度発表講演集 DVD, H-06, pp. 873-874, 2009. 3) 田中他: 水硬性粒度調整鉄鋼スラグ路盤材の疲労破壊基準式の提案, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 講演概要集 CD, V-108, pp. 215-216, 2010. 4) 古谷他: 鉄鋼スラグ路盤層の疲労破壊を考慮したアスファルト舗装の構造設計に関する一考察, 平成 23 年度地盤工学研究発表会, 投稿中, 2011. 5) 古谷他: HMS 路盤材の疲労破壊基準式に及ぼす養生期間及び荷重条件の影響について, 平成 23 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 投稿中, 2011. 6) 日本道路協会: 舗装設計便覧, 日本道路協会, 3 章, 2006. 7) Y. H. Huang: Pavement Analysis and Design, CHAPTER3, KENLAYER Computer Program

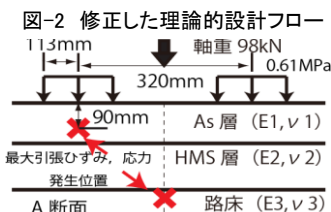
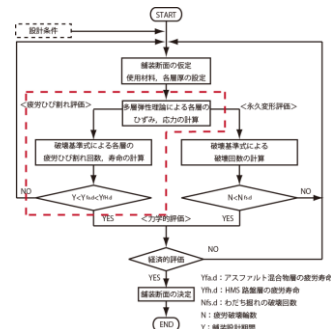


図-3 舗装断面図

表-1 例題解析結果

断面	層厚(mm)		疲労寿命	
	As層	HMS層	As層	HMS層
A ₀	200	450	23.3	1.3E+14
A ₁	200	350	30.2	2.9E+10
A ₂	200	250	49.7	12111.7
A ₃	200	235	55.7	201.0
A ₄	200	233	56.5	70.6
A ₅	200	232	57.0	27.5

断面	層厚 (mm)		疲労寿命	
	AS層	HMS層	AS層	HMS層
B ₀	150	350	33.4	1.8E+09
B ₁	150	300	42.2	1.4E+06
B ₂	150	275	49.2	12215.9
B ₃	150	260	54.9	86.2
B ₄	150	259	55.6	18.8

断面	層厚(mm)		疲労寿命	
	As層	HMS層	As層	HMS層
C ₀	100	300	187.2	19299.4
C ₁	100	290	207.4	1367.5
C ₂	100	287	214.2	359.2
C ₃	100	286	216.6	177.1
C ₄	100	285	219.1	43.7

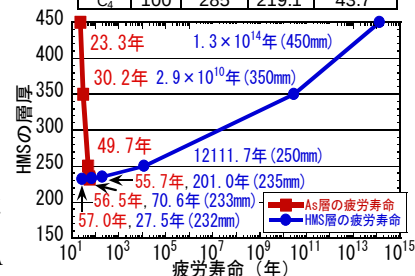


図-4 疲労寿命の推移図 (A断面)