Burger's モデルによるアスファルト混合物の引張応力の計算

JIP テクノサイエンス(株)　正会員　○戸田　圭彦　正会員　田中　克弘
阪神高速技術(株)　正会員　久利　良夫　正会員　佐藤　知明
鹿島道路(株)　正会員　鎌田　修　正会員　横田　慎也　正会員　好見　一馬

１．はじめに

鋼床版舗装の損傷発生メカニズムは不明な点が多く，輪荷重によるひずみおよび応力の繰り返し作用，アスファルト混合物の温度，および供用期間中の材料劣化，などその発生要因は多岐に渡ると考えられている．既往の研究 [1)]では, 鋼床版の部分モデルを用いた線形粘弾性解析を実施し，ひび割れが多発する原因として縦リブ位置における引張ひずみの発生を指摘した.

ところが，平戸らの研究 [2)]において，表面ひび割れは必ずしも引張ひずみが卓越する輪荷重側面のみで発生しておらず，圧縮ひずみが卓越する輪荷重直下においても発生していることが報告されている．また，内田らの研究 [3)]ではアスファルト舗装の粘弾性体的特徴によって圧縮ひずみ下にあっても引張応力が発生する可能性について指摘されている．しかし，鋼床版縦リブ間における引張応力の発生を解析的に示した例はない．また，アスファルト混合物の圧縮ひずみ下の引張応力の発生は，既往の研究において，実験 [2)]あるいは Kervin モデル [3)]によって確認されているが，Burger's モデルによる計算事例は見当たらない.

そこで，本稿では鋼床版舗装の解析に先立ち，Burger's モデルの応力-ひずみ関係を計算した結果を示す．また，10℃～60℃の各温度における粘弾性パラメータの特徴，および載荷速度の影響について調査した.

２．Burger's モデル粘弾性構成則

アスファルト混合物の力学的特性は Burger's モデル粘弾性によって表現できると言われている [4)]. Burger's モデルは，**図-1** に示すような Maxwell モデルと Voigt モデルを組み合わせた模型で表現される粘弾性構成則である．Burger's モデルの構成式は次式で表される.

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \int_0^t J(t-\tau)\overline{\boldsymbol{C}}\dot{\boldsymbol{\sigma}}d\tau \tag{1}$$

$$J(t) = \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2}\left(1 - \exp\left(-t\frac{E_2}{\eta_2}\right)\right) \tag{2}$$

ここに，E_1, η_1 : Maxwell 要素のパラメータ，E_2, η_2 : Voigt 要素のパラメータ, $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$: 時刻 t におけるひずみテンソル, $\dot{\boldsymbol{\sigma}}$: 応力テンソルの時間微分（$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \partial\boldsymbol{\sigma}/\partial\tau$），$\overline{\boldsymbol{C}}$は弾性コンプライアンスのポアソン比を考慮するテンソルである．さらに，時間領域の有限要素法へ適用するために de Borst らの方法 [5)]による増分形式の構成式を用いる.

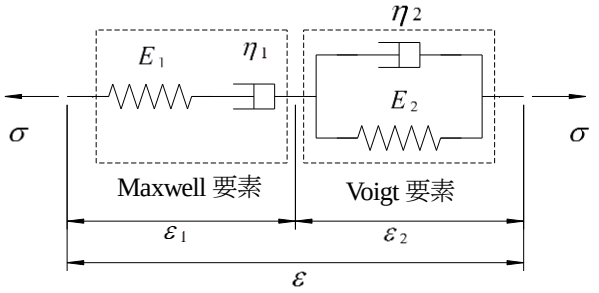

図-1　Burger's モデル

表-1　改質密粒アスファルト混合物のパラメータ

定数	10℃	20℃	30℃	40℃	60℃
η_1 (N/mm^2・s)	54,975	65,239	36,994	15,751	4,589
η_2 (N/mm^2・s)	2,932	816	182	50	52
E_1 (N/mm^2)	9,495	8,422	3,097	1,129	295
E_2 (N/mm^2)	2,426	1,026	240	272	169

$$\Delta\boldsymbol{\sigma} = E(t^*)\overline{\boldsymbol{C}}^{-1}\Delta\boldsymbol{\varepsilon} + \tilde{\boldsymbol{\sigma}}(t) \tag{5}$$

$$\frac{1}{E(t^*)} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t} J(t+\Delta t-\tau)d\tau \tag{6}$$

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}(t) = E(t^*)\int_0^t \{J(t+\Delta t-\tau) - J(t-\tau)\}\dot{\boldsymbol{\sigma}}d\tau \tag{7}$$

ここに，t^*は$t \le t^* \le t + \Delta t$であり，時間増分$\Delta t$において応力は線形に変化すると仮定している.

表-1 にポリマー改質アスファルト II 型を用いた密粒度アスファルト混合物(以下, 改質密粒アスファルト混合物)の粘弾性パラメータを示す．粘弾性パラメータは別途クリープ試験によって算定した．Burger's モデル粘弾性パラメータの同定方法は文献 [4)]に詳しく記述されている.

３．圧縮片振りひずみ波形を与えた際の応力-ひずみ関係

改質密粒アスファルト混合物の粘弾性的特性を有する Burger's モデルにひずみ波形を与えて応力波形を求めた．構成則の計算は有限要素法解析ソフトウェア DIANA を用いて行い，**図-2** に示すようにソリッド要素 1 個に対して 1 方向への強制変位を与えるものとした.

40℃の改質密粒アスファルト混合物に対して，5Hz の圧

キーワード　アスファルト混合物，粘弾性，Burger's モデル，
連絡先　〒532-0011　大阪市淀川区西中島 2-12-11　JIP ﾃｸﾉｻｲｴﾝｽ(株)　ｼｽﾃﾑ技術研究所　ＴＥＬ06-6307-5401

© Japan Society of Civil Engineers

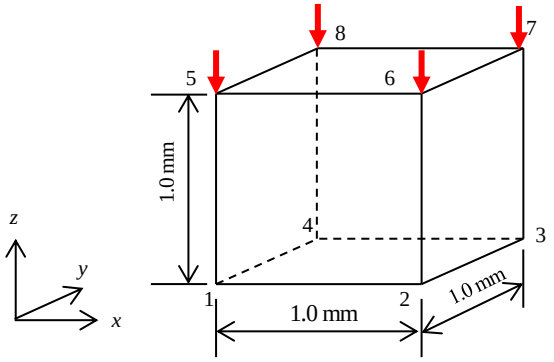

図-2　解析モデル

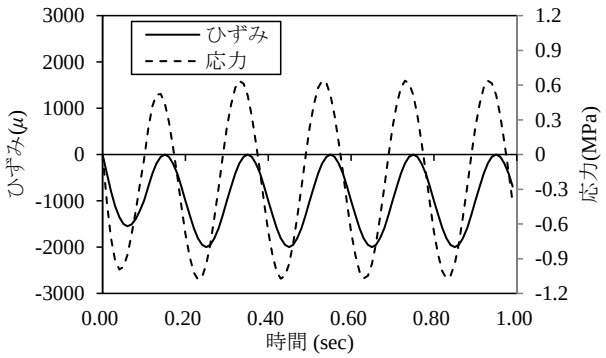

図-3　ひずみ波形および応力波形（40℃，5Hz）

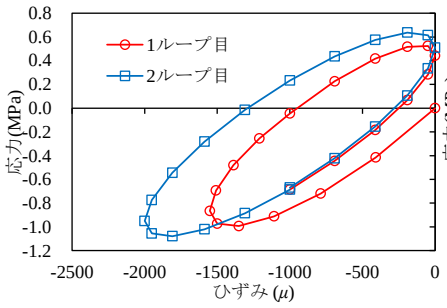

図-4　応力-ひずみ関係（40℃，5Hz）

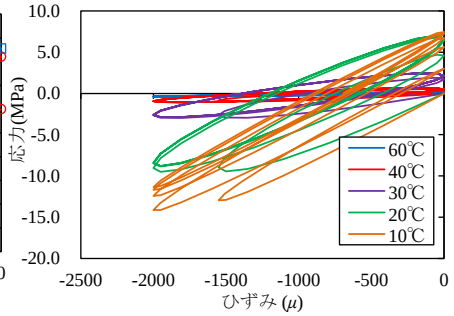

図-5　温度の影響（5Hz）

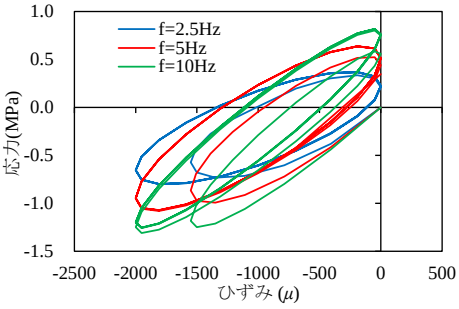

図-6　載荷速度の影響（40℃）

縮片振り載荷を与えた結果の時刻歴波形を**図-3** に，応力-ひずみ関係を**図-4** に示す．**図-3** よりひずみは圧縮領域に存在するが，応力は引張領域に進入しており，これは既往の研究[2),3)]において報告された挙動に一致する．**図-4** の応力-ひずみ関係に着目すると，最初は原点からスタートしたあと，2 ループ目からは第 3 象限に中心を持った楕円形状の軌跡を描いている．同図において第 2 象限に引張応力が生じているが，これは Burger's モデルの粘弾性的特性によるものであり，弾性構成則では表現されない特徴である．

4．温度および載荷速度の影響

圧縮片振り載荷に対して温度を 10℃～60℃に変化させた結果を**図-5** に示す．ひずみ波形は 5Hz とした．計算結果では，全ての温度のケースで楕円の軌跡を描いており，第 2 象限の粘弾性的引張応力が生じている．また，楕円の傾きは低温のケースほど大きい．これは低温ほど Burger's モデルの剛性が大きくなるためであると考えられる．今回の計算ではひずみ振幅を一定とした条件のため，結果として低温のケースほど粘弾性的引張応力も大きい．

さらに，温度 40℃のケースに対して，ひずみ波形を 2.5Hz，5Hz，10Hz とした計算結果を**図-6** に示す．載荷速度が速いほど大きな引張応力が発生することが確認できる．Burger's モデル粘弾性体に対して載荷速度を上昇させることと，温度を低下させることは同様の効果が見られることを示している．載荷速度は実構造物における走行速度に対応していると考えれば，実構造物において車両の走行速度が速いほど大きな粘弾性的引張応力が発生し得ることを示している．

ただし，低温かつ高速時にはひずみの発生も抑制されることから，必ずしも橋面舗装において応力が大きくなるとは限らず，実際の舗装おける引張応力の解明のためには載荷範囲の周囲の拘束状態を表現できる実物大の解析モデルを用いた粘弾性解析が必要であると考えられる．

5．まとめ

本稿では Burger's モデル粘弾性構成則によりモデル化された改質密粒アスファルト混合物に対して圧縮片振り載荷を与えた際の応力-ひずみ関係を示し，圧縮ひずみ下における引張応力の発生を確認した．今後，鋼床版舗装を対象とした粘弾性 FEM 解析を実施し，鋼床版舗装におけるひずみ状態，および応力状態を明らかにする予定である．

参考文献

1) 戸田圭彦，久利良夫，鎌田修，横田慎也，谷口惺：損傷発生原因に着目した鋼床版橋面舗装部の線形粘弾性解析，土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol. 72, No. 3, (舗装工学論文集　第 20 巻), pp. I_219-I_227, 2016.12.　2) 平戸利明，姫野賢治，村山雅人，高橋将人，高橋修：応力緩和に着目した縦表面ひび割れの発生メカニズムとその要因，土木学会論文集 E1（舗装工学）, Vol. 72, No. 3,（舗装工学論文集第 21 巻）, pp. I_203-I_210, 2016.　3) 内田喜太郎，西澤辰男，姫野賢治，野村健一郎：鋼床版舗装の表面縦ひび割れに関する研究，土木学会舗装工学論文集，第 4 巻, pp. 103-110, 1999.　4) (公社)土木学会：舗装工学ライブラリー13a アスファルトの特性と評価，丸善, 2015.10.　5) de Borst, R. : Finite-element modeling of deformation and cracking in early-age concrete, Journal of Engineering Mechanics, No. 120, pp. 2519-2534, 1994.

© Japan Society of Civil Engineers