

コンクリート舗装における隅角ひび割れ発生 原因となる温度-荷重合成応力の計算法

西澤辰男¹ ・ 尾関孝人² ・ 河野広隆³

¹正会員 石川工業高等専門学校 環境都市工学科 (〒 929-0392 河北郡津幡町北中条)

nishi@ishikawa-nct.ac.jp

²正会員 大成建設 土木本部土木設計部 (〒 160-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

³正会員 京都大学 経営管理大学院 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター)

コンクリート舗装に負の温度勾配と隅角部載荷の条件が重なったとき、版表面に大きな引張応力が発生する。この応力が隅角部に円弧上に発生する隅角ひび割れの発生原因となると考え、その計算法について検討した。コンクリート版の厚さが厚くなると、厚さ方向の温度分布は非線形になり、従来から用いられている温度差から温度応力を計算する式では正確に算定できない。本研究では、熱伝導解析によって計算された非線形温度分布を直接 3DFEM で考慮し、同時に荷重が作用した場合の合成応力を計算する。温度勾配が負のとき、荷重が隅角部に作用すると、ちょうど円弧状ひび割れが発生するような位置に最大引張応力が発生する。その応力は、温度応力と荷重応力を別々に計算して足し合わせた値より大きくなる。

Key Words : *corner crack, concrete pavement, thermal stress, 3DFEM, nonlinear temperature distribution*

1. はじめに

コンクリート舗装における主要な構造的破損形態は、コンクリート版のひび割れである。コンクリート版のひび割れには、版の中央部に生ずる横ひび割れと、目地縁部より車輪走行部に生ずる縦ひび割れおよび隅角部に円弧状に生ずる隅角ひび割れがある¹⁾。横ひび割れは荷重による疲労あるいは温度応力によるものであり、目地縁部からの縦ひび割れはもっぱら荷重の疲労による。隅角ひび割れについては、事情がやや複雑である。

隅角部に荷重が作用した場合、コンクリート版の隅角先端部からやや内側に入った部分の表面に最大引張応力が発生する。これに加えてコンクリート上下面の温度差が負(上面の温度が下面の温度よりも低い)の場合、隅角部がそり上がり自重の作用によってコンクリート版表面に引張応力が生ずる。また、隅角部の大きなたわみによって路盤の劣化に伴う隙間が生じやすく、この隙間は荷重応力をさらに大きなものとする²⁾。さらに、施工時のコンクリートが硬化する過程で、コンクリート版の上面の収縮量が下面よりも大きい場合、縁部や隅角部がそりあがる現象があり、これは Build-in curling と呼ばれている。この現象はアメリカ合衆国では表面からのひび割れの 1 つの原因とされている^{3),4)}。同様なそり変形はコンクリート硬化後のコンクリート版上下面の水分勾配によっても生ずる^{5),6)}。これらの

幾つかの要因が複合して隅角部ひび割れを発生させる。

道路の場合、通常であれば車線内を車両が走行することや路肩の存在で、隅角ひび割れが発生する頻度は小さいが⁷⁾、車線幅が狭い場所や、交差点では隅角部載荷の状況から隅角ひび割れの発生がありうる。空港の場合は特に深刻で、重量の大きな航空機のギアが隅角部を走行する状況はかなり頻繁なため、隅角ひび割れがみられる^{8),9)}。深夜から明け方にかけて温度勾配が負になる時間が持続するため、24 時間運用する道路や空港では上のような状況は避けられない。

このような隅角ひび割れについては、その破損形態は知られているものの、設計では特に考慮されていない¹⁰⁾。これは、道路の場合発生頻度が小さいこと、またそのメカニズム自体が複雑であるため予測法が確立されていないことによる。道路における交差点や多車線道路、空港エプロン、港湾ヤードなどのコンクリート舗装の構造設計においては、隅角ひび割れに対する検討をしておくべきと考える。そこで、本研究では隅角ひび割れの発生原因である表面引張応力について、温度解析と 3DFEM 解析によって計算する方法を検討した。

2. 温度応力の解析法

(1) FEMによる定式化

3次元空間における温度応力は次式のように算定される。

$$\{\sigma_t\} = [\mathbf{D}] \cdot (\{\epsilon\} - \{\epsilon_t\}) \quad (1)$$

ここに、 $\{\sigma_t\}$ は3次元の温度応力ベクトル、 $[\mathbf{D}]$ は弾性応力マトリックス、 $\{\epsilon\}$ は全ひずみベクトル、 $\{\epsilon_t\}$ は温度ひずみベクトルで、次式で表される。

$$\{\epsilon_t\} = \{\alpha t \ \alpha t \ \alpha t \ 0 \ 0 \ 0\}^T \quad (2)$$

温度応力を考慮した場合の3DFEMの基礎方程式は次式ようになる。

$$[[\mathbf{K}] + [\mathbf{J}]] \{\mathbf{d}\} = \{\mathbf{f}_p\} + \{\mathbf{f}_t\} \quad (3)$$

ここに、 $[\mathbf{K}]$ はコンクリート版、路盤、路床の剛性マトリックス、 $[\mathbf{J}]$ は目地およびコンクリート版と路盤との境界面要素の剛性マトリックス、 $\{\mathbf{d}\}$ は変位ベクトル、 $\{\mathbf{f}_p\}$ は自重ベクトルである。また、 $\{\mathbf{f}_t\}$ は温度荷重ベクトルであり、温度ひずみから次式によって評価する。

$$\{\mathbf{f}_t\} = \int_V [\mathbf{B}] [\mathbf{D}] \{\epsilon_t\} dV \quad (4)$$

ここに、 $[\mathbf{B}]$ は変位-ひずみマトリックスである。

コンクリート版と路盤との境界面では、はがれを考慮する。すなわち、温度によるそり変形が生じてコンクリート版が路盤から浮きあがろうとすると、境界面要素の剛性を0としてはがれをモデル化する。このようなはがれを考慮すると、式(3)の $[\mathbf{J}]$ は $\{\mathbf{d}\}$ によって変わることになるため、式(3)は非線形な方程式となる。そこで、Newton-Raphson法と増分法を組み合わせた解法によって式(3)の解を求める。本研究では、以上の定式化によって荷重と温度が同時に作用したコンクリート舗装の応答を求めることができるPave3Dを用いて解析を行った^{11),12),13)}。

(2) コンクリート版の温度応力解析例

本項では、道路用の厚さ300mmと空港用の厚さ460mmのコンクリート舗装を想定し、温度応力について調べた。そのために、まずコンクリート版の温度分布について調べた。著者らは、熱伝導解析によって、1年分のコンクリート舗装の温度分布について1時間ごとに計算する方法を開発している¹²⁾。この方法を用いて計算した温度分布を図-1に示す。温度勾配が負の例として8月12日の3:00、温度勾配が正の例として同日15:00の温度分布を計算した。図からわかるように、温度分布は必ずしも線形ではない。特に空港舗装のように版厚が厚くなると、強い非線形性が現れる。現在の舗

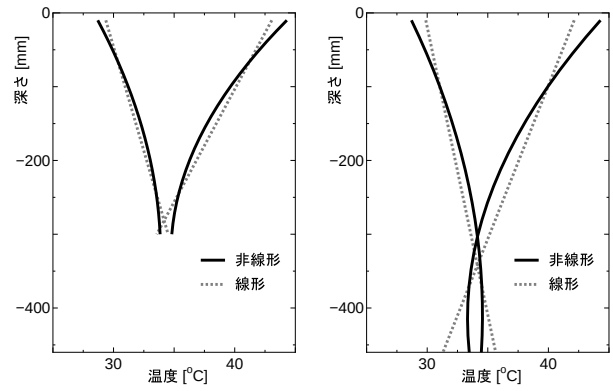


図-1 コンクリート版の深さ方向の温度分布

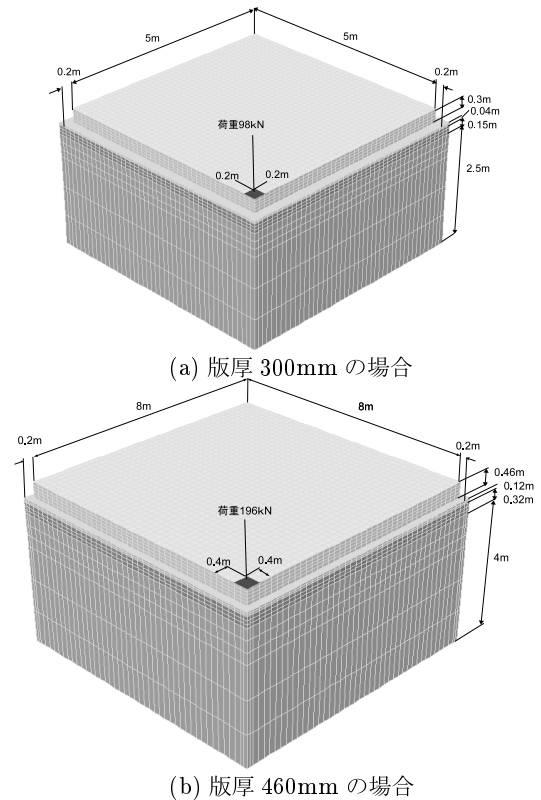


図-2 要素分割図

装の構造設計においては、Westergaardの考え方に基づいて、厚さ方向の非線形な温度分布にコンペンセーションラインを引いて線形の温度分布とし、表面と底面の温度差から温度応力を計算する¹⁴⁾。岩間の式¹⁵⁾や坪川の式¹⁶⁾は、非線形の影響による底面の内部拘束応力を考慮するために、Westergaardの温度応力を適切な割合で減じる。

これらの温度分布によって発生する温度応力をPave3Dによって計算した。計算に用いたコンクリート舗装の要素分割を図-2に示す。基本的なそり変形の状況を調べるために1枚のコンクリート版のみをモデル化した。コンクリート版は正方形とし、1辺の長さは道路用の版厚300mmの場合5m、空港用の版厚460mmの場合8mとした。コンクリート版は厚さ方向に5分割し、非線形な分布を考慮できるようにした。図には

表-1 3DFEM による温度解析入力データ

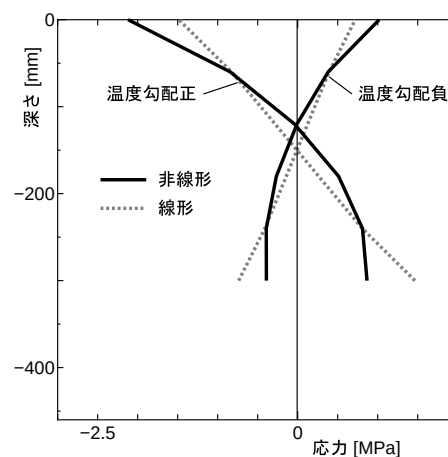
項目 (単位)	値	
コンクリート版		
厚さ (mm)	300	460
弾性係数 (MPa)	30000	
ポアソン比	0.206	
線膨張係数 ($/^{\circ}\text{C}$)	10×10^{-6}	
境界面層		
水平方向のばね係数 (MN/m^3)	0.0	
鉛直方向のばね係数 (MN/m^3)	1.0×10^5	
アスファルト安定処理層		
厚さ (mm)	40	120
弾性係数 (MPa)	2000	
ポアソン比	0.35	
粒状路盤層		
厚さ (mm)	150	320
弾性係数 (MPa)	500	
ポアソン比	0.35	
路床層		
厚さ (mm)	2500	4000
弾性係数 (MPa)	80	
ポアソン比	0.35	

荷重の位置が示されているが、これは後の温度と荷重の合成効果を調べるためのもので、ここでの解析では荷重は作用させていない。材料定数は表-1 に示すとおりである。各層の弾性係数やポアソン比は、一般的な値を用いた。コンクリート版と路盤の境界面では、鉛直方向のばね係数は大きな値とし、水平方向のばね係数は非常に小さな値として水平方向の拘束を小さくするようにした。

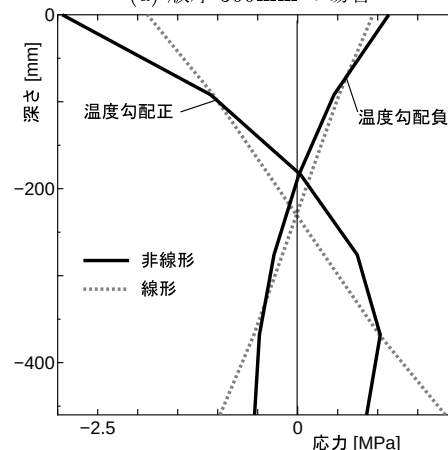
コンクリート版の温度分布は図-1 に示したものをを用いた。非線形温度分布を直接用いた場合と、コンペーンセーション法によって非線形温度分布を線形に置き換えた温度分布を用いた場合について計算を行った。線形温度分布では、版厚 300mm における温度勾配は負の場合で $-0.18^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 、正の場合で $0.33^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ であり、版厚 460mm における温度勾配は負の場合 $-0.12^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 、正の場合 $0.24^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ であった。なお、路盤以下の層の温度はゼロとし、温度応力が発生しないようにした。

図-3 は FEM 解析によって得られた版中央の深さ方向の温度応力分布である。線形温度分布と非線形温度分布による温度応力分布は大きく異なることが分かる。温度勾配が正の場合、厚くなると温度応力の最大値は必ずしも底面になるわけではなく、底面よりやや上の場所に発生する。

表-2 は表面と底面の温度応力をまとめたものである。温度勾配が正のとき底面の温度応力は引張になるが、線形温度分布に比べて非線形温度分布の方が応力の値は小さい。線形温度分布の応力に対する非線形温度分布の応力の比は、版厚 300mm の場合で 0.59、版厚 460mm の場合で 0.47 であり、厚くなるほど非線形の影響が大



(a) 版厚 300mm の場合



(b) 版厚 460mm の場合

図-3 厚さ方向の温度応力分布

表-2 表面と底面の温度応力 (MPa)

版厚 300mm の場合						
温度勾配	正			負		
	線形	非線形	比	線形	非線形	比
表面	-1.486	-2.120	1.43	0.719	1.0182	1.42
底面	1.465	0.866	0.59	-0.738	-0.392	0.53
版厚 460mm の場合						
温度勾配	正			負		
	線形	非線形	比	線形	非線形	比
表面	-1.878	-2.942	1.57	0.941	1.1378	1.21
底面	1.845	0.861	0.47	-0.971	-0.539	0.56

きくなる。温度勾配が負になると表面の温度応力が引張になるが、底面と異なり、線形温度分布に比べて非線形温度分布の方が応力の値が大きくなる。線形温度分布の応力に対する非線形温度分布の応力の比は、版厚 300mm の場合で 1.42、版厚 460mm の場合で 1.21 であり、厚くなるほど非線形の影響はむしろ小さくなる。

したがって、負の温度勾配で表面での引張応力を考える場合、線形温度分布から温度応力を計算することは危険側の近似になるため、FEM などによって正確に計算する必要がある。

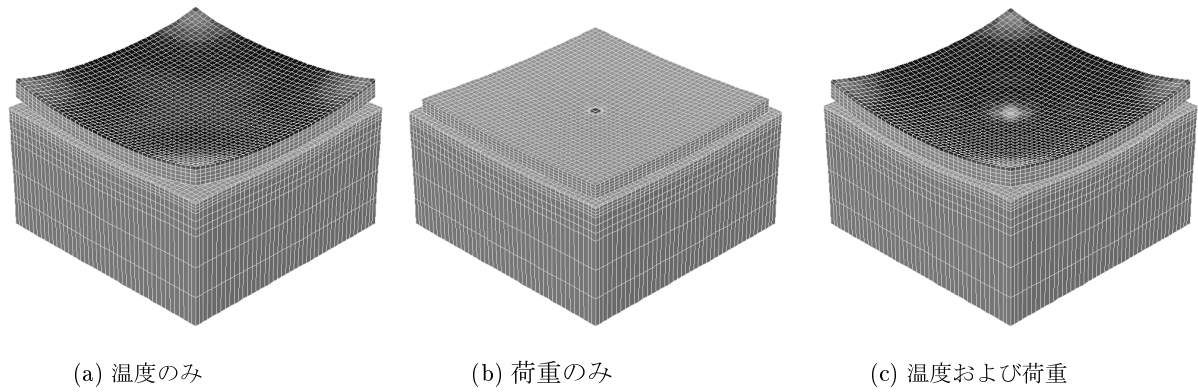


図-4 負の温度勾配と中央部載荷の場合の変形図 (版厚 300mm)

3. 荷重と温度の合成作用

前章において、コンクリート版の負の勾配の温度分布によって表面に発生する温度応力が比較的大きいことが判明した。そこで、本章においては負の勾配の温度分布が発生している時に、荷重が隅角部に作用した場合の合成応力について検討した。

a) 中央部載荷

まず、負の温度勾配のとき、中央部に荷重が作用した場合について調べた。図-2の要素分割を用い、図に示す荷重をコンクリート版の中央部に作用させた。その際の変形図を図-4に示す。負の温度勾配が作用すると、コンクリート版の縁部や隅角部が路盤面から離れ、そりがあがっていることが分かる。この場合表面全体が引張応力になる。荷重が作用した場合には、荷重作用付近が大きくたわみ、その付近のみに大きな曲げ応力が生ずる。両者が同時に作用した場合には、縁部や隅角部がそりがあがったまま、荷重付近がたわむ。表面の曲げ応力については、荷重付近が圧縮となり、それ以外は引張となる。

図-5はコンクリート版中央を横断する方向の表面のたわみ形状および最大主応力分布を示している。たわみについては、温度のみが作用した場合、円弧上のたわみ形状を示す。荷重のみが作用した場合、荷重作用付近で折れ曲がったような直線的なたわみ形状を示す。温度と荷重が同時に作用した場合、上の2つのたわみ形状を単純に合計したものにほぼ等しい。温度のみが作用した場合、中央部に最大の引張応力が生じ、縁部に向かうにつれ緩やかにその値は減少していく。荷重のみが作用した場合、荷重付近のみに大きな圧縮応力が発生し、荷重作用点から離れるとその値は急速に減少する。温度と荷重が同時に作用した場合、主応力方向が同じなので上の2つの最大主応力を単純に合計したものに等しい。すなわち、中央部載荷の場合には、温度応力と荷重応力を別々に計算して両者を単純に加算すれば、両者が同時に作用した場合の合成効果を考慮

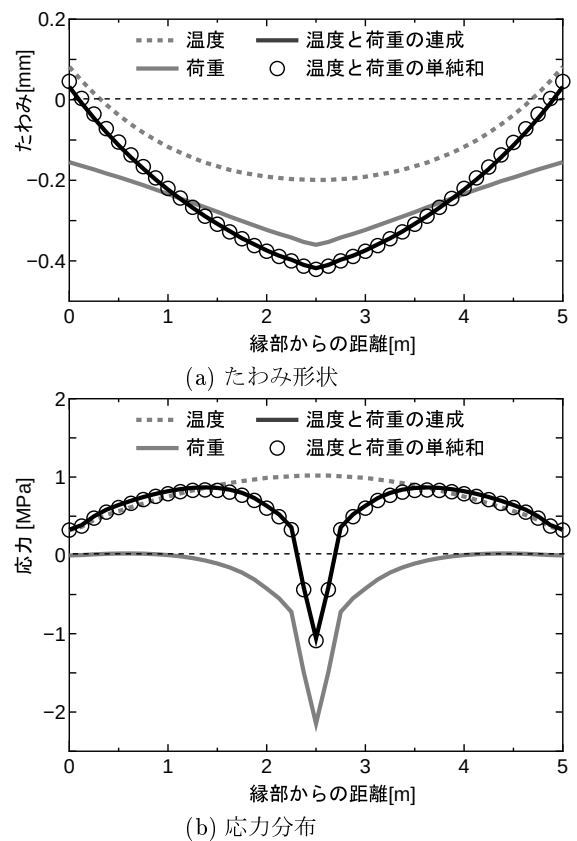


図-5 中央部載荷の場合 (版厚 300mm)

できる。

b) 隅角部載荷

隅角部に温度と荷重が作用した場合について検討する。図-2の要素分割を用い、図に示すように荷重を作用させた。その際の変形図を図-6に示す。荷重のみが作用した場合、荷重作用位置の隅角部が大きくたわみ、そこから対角方向にやや離れた付近の表面(図中で点線で囲んだ部分)に大きな引張応力が発生する。温度と荷重が同時に作用した場合には、縁部や隅角部がそりがあがったまま、隅角部が大きくたわむ。最大引張応力は荷重のみの場合よりもやや内側に生ずる。

図-7はコンクリート版対角方向に沿ったたわみ形状と最大主応力の分布を示している。たわみについては、

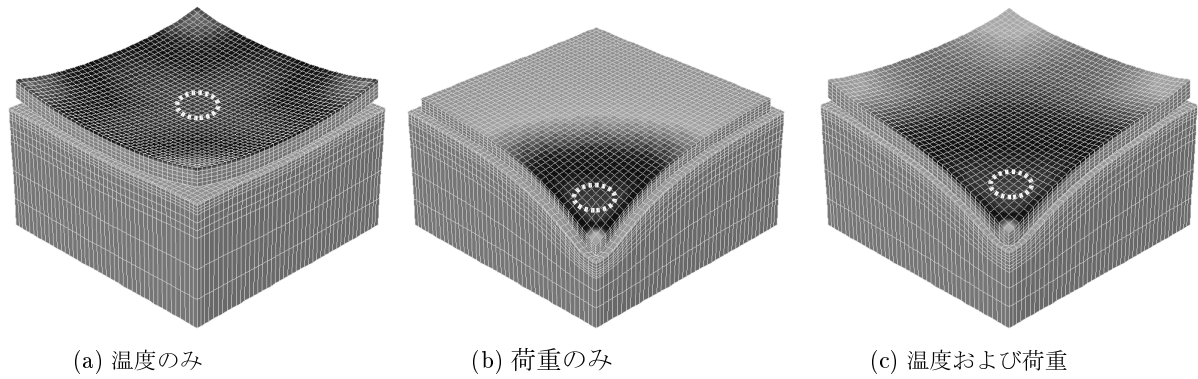
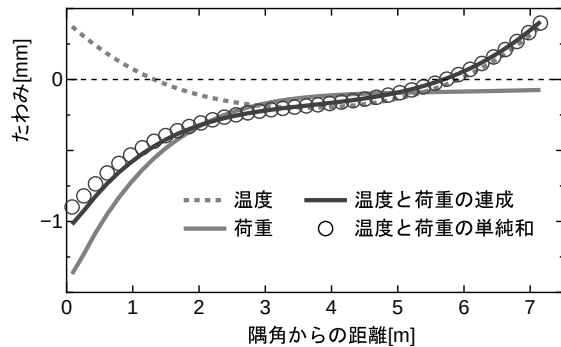
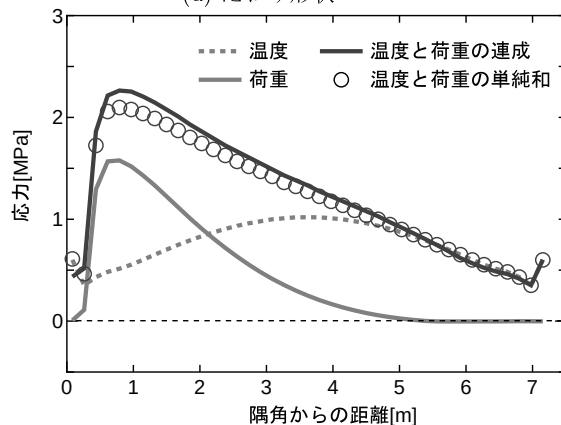


図-6 負の温度勾配と隅角部载荷の場合の変形図 (版厚 300mm)



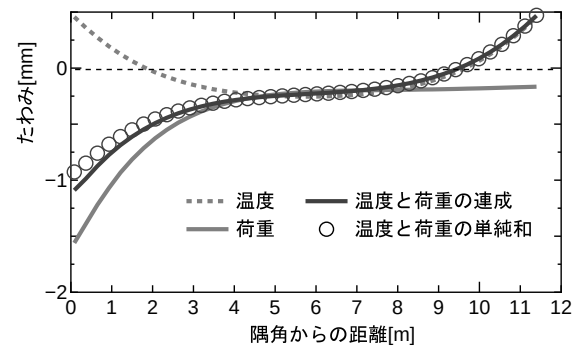
(a) たわみ形状



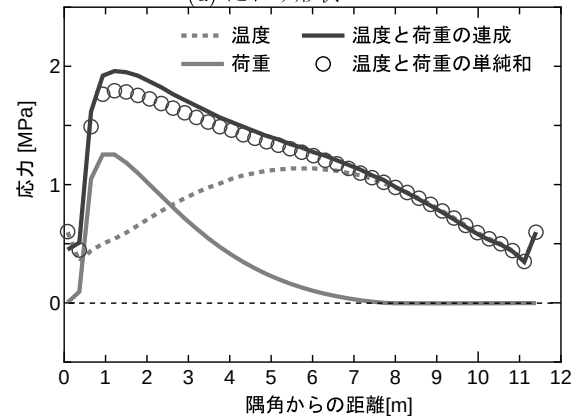
(b) 応力分布

図-7 隅角部载荷の場合 (版厚 300mm)

温度のみが作用した場合には、隅角部がそりあがった円弧状のたわみ形状を示す。荷重のみが作用した場合には、荷重作用位置が大きくたわみ、そこから離れた位置のたわみは小さい。温度と荷重が同時に作用した場合には、上の2つのたわみが形状が足されたような形になるが、単純に足したものよりも大きなたわみになる。これは、隅角がそりあがってコンクリート版と路盤面との間に隙間ができ、このことによってたわみが大きくなるためである。最大応力については、荷重のみの場合、隅角から0.75mの位置に隅角部方向に最大の引張応力が発生する。温度と荷重が同時に作用した場合、その位置はやや隅各部から離れた0.82mの位置の隅角部方向に発生し、その値は同じ方向の温度応力と荷重応力を単純に足した値より大きくなる。これ



(a) たわみ形状



(b) 応力分布

図-8 隅角部载荷の場合 (版厚 460mm)

もたわみ形状と同様の理由である。

図-8は版厚が460mmの空港舗装に対する同様の図である。版厚300mmの場合とまったく同じことが言える。すなわち、隅角部载荷の場合、温度応力と荷重応力を別々に算定してそれらを単純に合計すると応力値を過小評価することになる。

4. 結論

本研究では、隅角部に発生する表面からの円弧上のひび割れの発生原因となる表面引張応力について、3DFEMプログラムPave3Dを用いて検討した。Pave3Dは、非線形な温度分布を直接考慮できるほか、コンクリート版のそり上がりによる路盤との隙間や、荷重が同時に作用したときのその隙間の影響も考慮して計算

を行うことができる。道路と空港の目地のない1枚のコンクリート舗装について、温度のみ、荷重のみ、およびそれらが同時に作用した場合のたわみ形状や曲げ応力について調べた。その結果判明した事柄は以下のとおりである。

1. コンクリート版の厚さが厚くなると、厚さ方向の温度分布は非線形になる。
2. 非線形温度分布による温度応力は線形温度分布に比べて、底面では小さくなるが、表面では逆に大きくなる。したがって、Westergaardが提案した温度差から計算される式で表面の温度応力を計算すると危険側の算定になる。
3. 温度が作用し同時に中央に荷重が作用した場合、荷重直下に最大引張応力が発生し、その応力は温度応力と荷重応力を別々に計算したものを単純に足し合わせればよい。
4. 温度が作用し同時に隅角部に荷重が作用した場合、隅角部から対角方向にやや内側に入った位置に最大引張応力が発生する。その値は、温度応力と荷重応力を別々に計算したものを単純に足し合わせた値より大きい。

隅角部荷重による引張応力は、目地の荷重伝達を上げることによって減ずることができるとされている。今後、目地を含めたより現実的な状況をシュミレートし、隅角ひび割れの発生が予測できないかどうかを検討していきたい。

参考文献

- 1) (社)セメント協会舗装技術専門委員会, コンクリート舗装の補修技術資料 2005 年版, (社)セメント協会, 2005.
- 2) Huang, Y.H., *Pavement Analysis and Design*, 2000.
- 3) Thomas Yu, H., and Khazanovich, L., Effects of Construction Curing on Concrete Pavement Behavior, *Proceedings of 7th International Conference on Concrete Pavements*, Orlando, Florida, USA, 2001.
- 4) Montepara, A., and Mingardi, M., The Shrinkage Model in the Non-Linear FEM Program PARMA

- for the Design of Reinforced Concrete Pavements, *Proceedings of the 8th International Symposium on Concrete Roads*, Lisbon, Portugal, 1998.
- 5) Rao, C., Barenberg, E., Snyder M. B., and Schmidt S., Effects of Temperature and Moisture on the Response of Jointed Concrete Pavements, *Proceedings of 7th International Conference on Concrete Pavements*, Orlando, Florida, USA, 2001.
 - 6) Hansen, W., and Schlangen E., Moisture Warping in Jointed Plain Concrete Pavements, *Proceedings of 9th International Conference on Concrete Pavements*, San Francisco, California, USA, 2008.
 - 7) 東北地方コンクリート舗装調査委員会, 東北地方におけるコンクリート舗装の現況調査, セメントコンクリート, No.428, 1982.
 - 8) Guo, E. H., Fundamental Modeling of Curling Responses in Concrete Pavement, *Proceedings of the 6th International DUT-Workshop on Fundamental Modelling of Design and Performance of Concrete Pavements*, Old-Turnhout, Belgium, 2006.
 - 9) Langeand, D., and Lie, S., Field Testing of Concrete Pavements at Chicago O'Hare International Airport, *Proceedings of the 8th International Conference (BCR2A'09)*, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, 2009.
 - 10) 土木学会, 2007年制定舗装標準示方書, 土木学会, 2007.
 - 11) Shimomura, T., Nishizawa, T., and Ozeki, T., Evaluation of Thermal Stress in Airport Concrete Pavement Slab by 3D-FEM Analysis, *Proceedings of 9th International Conference on Concrete Pavements*, San Francisco, USA, 2008.
 - 12) 尾関孝人・西澤辰男・加藤浩司: 空港コンクリート舗装版の温度分布特性, 土木学会舗装工学論文集, 第13巻, pp.141-148, 2008.
 - 13) Nishizawa, T., Ozeki, T., Kato, K., and Matsui, k., FEM Analysis of Thermal Stresses of Thick Airport Concrete Pavement Slabs, *Journal of the Transportation Research Board*, No.2095, Transportation Research Board, National Research Council, 2009.
 - 14) Westergaard, H.M., Analysis of stresses in concrete pavements caused by variations of temperature, *Public Roads*, Vol.8, No.3, pp.54-60, 1927.
 - 15) 岩間滋: コンクリート舗装の構造設計に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.111, pp16-46, 1964.
 - 16) 坪川将丈, 水上純一, 八谷好高, 亀田昭一: 日温度変化による空港コンクリート舗装の温度応力に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第12巻, pp157-164, 2007.

(2010.6.28 受付)

ANALYSIS OF COMBINED STRESSES DUE TO THERMAL AND TRAFFIC LOADINGS FOR CORNER CRACKING IN CONCRETE PAVEMENTS

Tatsuo NISHIZAWA, Takahito OZEKI, Hirotaka KAWANO

Corner cracks in concrete pavements are caused by negative temperature distribution throughout slab depth and corner loading. The temperature distribution is strongly nonlinear in thick concrete slabs, which results in higher tensile stresses at the top of the slabs. This nonlinearity is not taken into account in the previously proposed thermal stress equations. In this study, a 3DFEM program Pave3D was employed to calculate stresses under a combination of nonlinear temperature distribution and corner loading. The simulation results show that the tensile stress at the top of slab is greater than simple addition of thermal stress and loading stress that are separately estimated.