

コンクリート舗装のFWD試験結果に対する 版内温度差の影響に関する研究

小梁川雅¹・竹内 康²・西沢辰男³・野田悦郎⁴・小森谷一志⁵

1正会員 工博 東京農業大学助教授 生産環境工学科 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1)

2正会員 農修 東京農業大学講師 生産環境工学科 (〒156-8502 東京都世田谷区桜丘1-1-1)

3正会員 工博 石川工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒929-03 河北郡津幡町北中条)

4正会員 日本道路(株)技術研究所 (〒146 東京都大田区多摩川2-11-20)

5正会員 建設省土木研究所 道路部舗装研究室 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

コンクリート舗装版の版内に温度差がある場合、コンクリート版はそり変形を生じるため一部において路盤との接触が失われることがある。この様な状態でFWD試験を行った場合には、得られるたわみデータが路盤との接触状態により異なる。したがって同一のコンクリート版であっても、測定時間によって評価が異なることとなる。本研究では、試験用に作成された実物大のコンクリート舗装により24時間の連続測定を行い、版内温度差とFWDたわみ量、また逆解析結果の関連を検討した。その結果、逆解析によって得られる推定路盤k値は、コンクリート版内の温度差によって補正することが可能であることがわかった。

keywords: concrete pavement, warping, FWD, load transfer efficient, backcalculation

1・はじめに

FWD試験は舗装の非破壊評価手段として定着しつつあるが、コンクリート舗装に対する適用に関しては、コンクリート版の剛性が高いため試験結果として得られるたわみ量が小さく誤差が入りやすいこと、コンクリート舗装は一般に目地を有するため測定箇所によってたわみ量が異なること、荷重の大きさによってはセンサー位置とたわみ量の関係に逆転現象が生じること等の問題点が指摘されている¹⁾。これらの問題点の中でコンクリート版のそりは、たわみ量の測定ばかりでなく、その解析に対しても大きな影響を与える問題であると考えられる。

コンクリート舗装はアスファルト舗装と異なり、比較的剛性の低い路盤の上に剛性の高いコンクリート版が載った構造となっている。コンクリート版はその曲げ作用によって荷重に対抗し、路盤はコンクリート版に下から均一な支持を与えることが構造上の役割となっている。したがって供用中のコンクリート舗装の路盤の支持状態を把握することは、コンクリート舗装の評価にとって重要な意味を持っている。

また通常の無筋コンクリート舗装では、コンクリートの収縮・膨張による応力を緩和し、ひび割れの発生を予防するために目地が設けられる。この目地

はコンクリート舗装の構造的な弱点であり、目地部における隣接するコンクリート版同士の荷重伝達機能は、コンクリート版に発生する応力に大きな影響を与える。すなわち目地部での荷重伝達能力を表す荷重伝達率の把握は、コンクリート舗装の残存寿命の予測上重要な情報となる。これらの路盤支持力および目地部における荷重伝達機能は、FWD試験の結果得られるたわみ量を逆解析することによって評価できる。

しかしコンクリート舗装で得られるFWDたわみ量はたとえ同一箇所における試験結果であっても、測定する時間によって異なることが知られている²⁾。これは主にコンクリート版内に生じる温度勾配のためと考えられている。すなわちコンクリート版内に深さ方向の温度差が存在すると、コンクリート版はそり変形を生じ、一部において路盤との接触が失われる。したがって路盤の支持が失われた部分でFWD試験を行えば、得られるたわみ量は大きくなり、逆解析によって評価される路盤支持力は見かけ上小さいこととなる。一方、目地部においてはコンクリート版の温度が高いとコンクリートの膨張によって目地幅が減少するため、荷重伝達率は見かけ上大きくなる。この様に、コンクリート舗装のFWD試験結果およびこれによる評価は、コンクリート版の温度に大きく影響される。

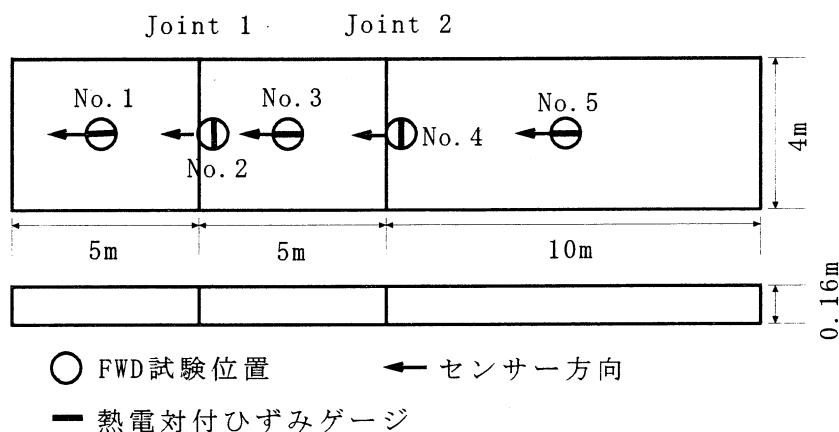


図-1 試験舗装区間の概要

この影響を取り除くためには、同一温度条件においてFWD測定を行う方法³⁾と、何らかの手法により測定結果の補正を行う方法が考えられる⁴⁾。しかしながら前者の方法では測定区間が長く、多くのコンクリート版を測定する場合には困難がある。

本研究では建設省土木研究所で行われた24時間連続FWD試験結果を用いて、版内温度差と逆解析結果の関係について検討を行った。

2・試験方法および解析方法

2.1 コンクリート舗装

試験に用いられたコンクリート舗装は図-1に示されるものであり、1997年3月に建設省土木研究所構内に新たに作成された。コンクリート版厚は16cmであり、鉄網は使用されていない。横目地間隔は図に示すとおり5mと10mの2種類となっている。また2ヶ所の横目地にはダウエルバーが設置されている。このうちJoint 1には50cm間隔に8本のダウエルバーが、またJoint 2には40cm間隔に10本のダウエルバーが設置されている。路盤は粒状路盤であり、コンクリート版施工前に行われた平板載荷試験より、路盤支持力係数 k_{rs} は平均で 8.5kgf/cm^3 となっている。

2.2 FWD測定

試験に用いられたFWDは日本道路(株)が所有する試験機であり、その載荷重は5tfである。試験は1997年8月に実施され、14:00から翌日の14:00までの24時間にわたって、1時間おき(22:00から翌日の6:00までは2時間おき)に図-1に示される5地点でFWD測定が行われた。載荷は一地点において4回ずつ行われ、2回目から4回目までのデータを平均してその時刻におけるたわみ量としている。同時にFWD実施地点のコンクリート版内温度分布を測定して

いる。温度測定は図-1に示されるそれぞれのFWD測定個所に、版上面から3、8、13cmの深さで埋設された熱電対付ひずみゲージによって行われた。

2.3 逆解析

測定されたたわみ量と版内温度差より、平板FEMを用いた逆解析を行った。この際用いたたわみ量は、荷重直下のたわみ量のみである。通常、FWD試験結果の逆解析では全てのセンサーにより測定されたたわみ量を用いられ、コンクリート版の弾性係数と、路盤の弾性係数もしくは路盤支持力係数が計算される。しかしコンクリート舗装の場合には、コンクリート版の剛性が高いことから得られるたわみ量が小さく、特に荷重から離れた地点のたわみ量には誤差が含まれやすい。この様なデータによって逆解析を行うと、コンクリートの弾性係数が $1,000,000\text{ kgf/cm}^2$ を越えるような解がしばしば得られてしまう。筆者らは逆解析に用いるセンサー個数に関して検討を行い、荷重直下のたわみ量のみを用いた場合に比較的現実的な逆解析結果が得られることを明らかにした⁵⁾。さらに本試験では、施工されたコンクリート版と同一のコンクリートにより供試体を作成し、FWD試験時の材齢において弾性係数を求めている。これによれば、このコンクリート版の弾性係数は約 $320,000\text{kgf/cm}^2$ と推定されるので、逆解析にあたってはコンクリートの弾性係数としてこの値を用い、路盤 k 値のみを求めた。

3・測定結果

表-1に測定時刻と各測点の版上下面の温度差を示す。これを図示すると、図-2に示されるような関係となる。温度差が正とは版上面の温度が下面に比較して高い場合を示す。この測定の場合、測点により多少のばらつきは見られるが、温度差は約 $+8^\circ\text{C}$

表-1 測定時刻と版内温度差

測定No	測定時	版内温度差(°C)				
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
1	14	1.6	1.92	2.56	3.236	2.72
2	15	1.76	2.4	3.04	4.16	3.52
3	16	1.12	1.6	2.08	2.88	2.4
4	17	0.16	0.96	0.96	0.96	0.64
5	18	-0.48	0	-0.08	0.48	-0.8
6	19	-0.8	-0.48	-0.56	0	-1.28
7	21	-1.28	-1.28	-0.88	-0.16	-1.28
8	22	-1.28	-1.28	-0.88	0	-1.12
9	00	-0.96	-0.64	-1.04	-1.28	-1.76
10	02	-1.12	0.16	-0.72	-1.12	-2.24
11	04	-1.12	-0.96	-1.44	-2.4	-3.2
12	06	-1.28	-0.8	-1.2	-0.64	-1.92
13	07	-0.64	0.32	0.16	1.12	0
14	08	0.32	1.28	1.12	1.6	0
15	09	2.88	3.84	3.2	3.84	2.24
16	10	4	2.56	3.92	5.6	4.64
17	11	4.48	3.52	4.64	6.24	6.4
18	12	6.88	5.92	6.32	6.56	7.84
19	13	5.6	4.8	5.92	7.52	6.72
20	14	4.48	4.32	4.56	4.8	3.84

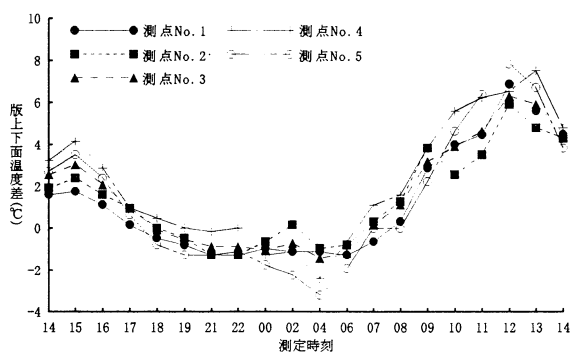


図-2 版上下面の温度差変化

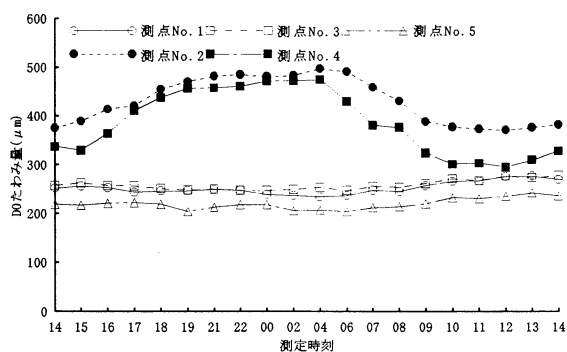


図-3 D0たわみ量の変化

～3°Cにおよんでいる。また目地部と版中央部を比較すると、温度差の変化に特に相違は見られない。なおここでいう温度差とは、前述の版深さ方向の3点で測定された版内温度分布より、版上下面の温度

を外挿して求めたものである。

図-3に各測点におけるFWD試験の結果得られたたわみ量のうち、荷重直下であるD0たわみ量の変化を示す。これによると目地部と版中央部で明らかに相違が見られる。目地部のたわみ量は、版上下面の温度差に大きく影響されており、負の温度差が大きくなるにしたがってたわみ量が大きくなっている。これは次のように考えられる。コンクリート版内に負の温度差が生じると、コンクリート版は下に凸の形に変形しようとする。すなわち目地部ではコンクリート版が上方へそり上がる。したがって目地部では、コンクリート版と路盤との接触が失われるためFWDたわみ量は増加する。今回の測定結果はこの現象によって説明されると考える。

一方版中央部では、FWDたわみ量に対する温度差の影響がさほど見られない。温度差が負の領域では、版中央部は路盤に十分接地しているので、温度差が大きくなってもFWDたわみ量はさほど変化しない。これに対して温度差が正の領域では、版中央部は上方へ凸の形にそり上がり路盤との接触が失われると考えられるが、この測定結果によると、FWDたわみ量の変化はわずかなものとなっている。

以上のようにFWD試験の結果得られるたわみ量は、過去の報告にあるようにコンクリート版内の温度差に影響されている。しかしその影響は目地部と版中央部によって明らかに異なり、また影響の度合いもかなり異なることがわかった。

このコンクリート舗装は実験用であるため、コンクリート版厚が16cmと通常のコンクリート版と比較してかなり薄くなっている。版厚が薄いとコンクリート版の剛性が小さいため、版内温度差によるコンクリート版の変形は生じやすくなる。目地部でのたわみ量の大きな変化はこれを反映していると考えられる。ところが版中央部でのたわみ量変化は、版厚が薄いにもかかわらず小さくなっている。したがって版厚が25cm以上あるような通常のコンクリート舗装では、版中央部におけるたわみ量変化はさらに小さくなると推測される。このようにたわみ量変化が小さいと、既往の報告にあるような、版内温度差の影響をたわみ量そのもので行うことは困難であると考えられる。

4・荷重伝達率

図-4に目地部における荷重伝達率の変化を示す。荷重伝達率は、FWD試験の結果得られるたわみ量から計算される。本試験では、荷重直下であるD0センサーとそこから30cm離れた位置にあるD30センサーが、目地を挟んで等距離になるように試験機を設置している。この様な場合目地の荷重伝達率は、次のような式により計算される。

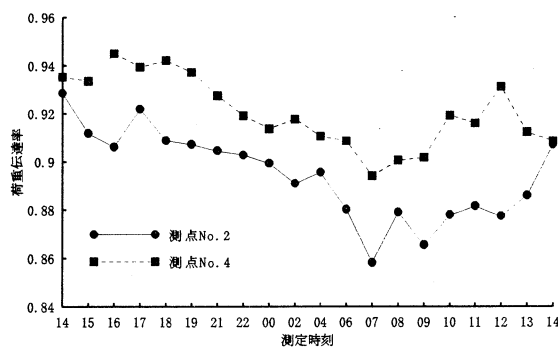


図-4 荷重伝達率の変化

$$\text{荷重伝達率} = 2 \times D30 / (D0 + D30) \quad \dots \dots (1)$$

ここで、D0：D0センサーによるたわみ量

D30：D30センサーによるたわみ量

図-4によると測点No.4のJoint 2における荷重伝達率がJoint 1に比較して高くなっている。これは両目地に設置されたダウエルバーの相違の影響のためであり、ダウエルバーの設置間隔が短い方が荷重伝達率が高くなっている。

また双方の測点ともに、コンクリート版内温度差によって荷重伝達率が変化していることがわかる。版内温度差が負になるにしたがって、荷重伝達率が減少している。これは次のように考えられる。すなわち版内温度差が負の場合には、目地部でコンクリート版のそり上がり現象が生じるため路盤との接触が失われる。目地部でコンクリート版と路盤の接触が失われると路盤による荷重伝達効果がなくなるため、荷重伝達はダウエルバーに大きく依存することとなる。したがって温度差が負の場合には、荷重伝達率が減少することとなる。ダウエルバーの間隔が長い、すなわち本数が少ないJoint 1では、荷重伝達率の減少程度も大きくなっている。

荷重伝達率の減少はコンクリート版に発生する応力を増加させるため、コンクリート版の疲労寿命を短くする可能性がある。しかしながら本試験結果によれば、版内温度差による荷重伝達率の変化率は比較的小さく、設計で考慮する必要はないと考えられる。ただし目地部の荷重伝達率は、目地の開きにも影響されるので、季節的な変動もあると考えられる。したがって、この点に関してはさらに検討が必要であると考えられる。

5・逆解析結果

5.1路盤支持力係数

図-5は、逆解析の結果得られた各測点の推定k値

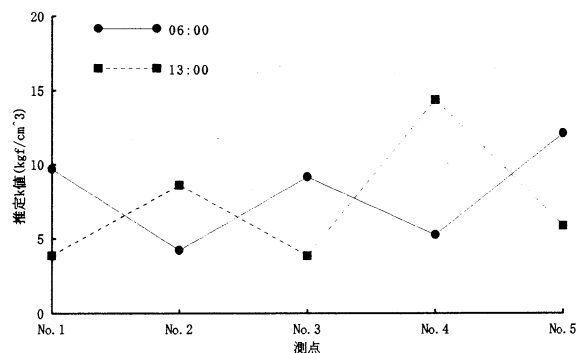


図-5 測点による推定k値の相違

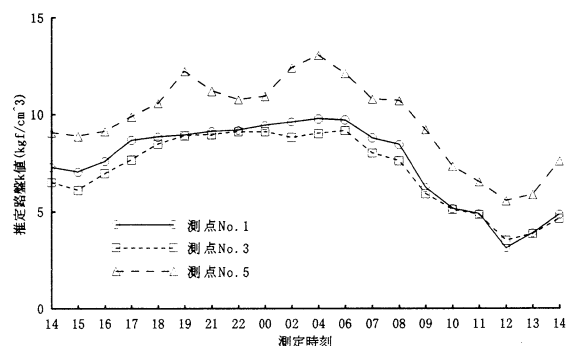


図-6 推定k値の変化(版中央部)

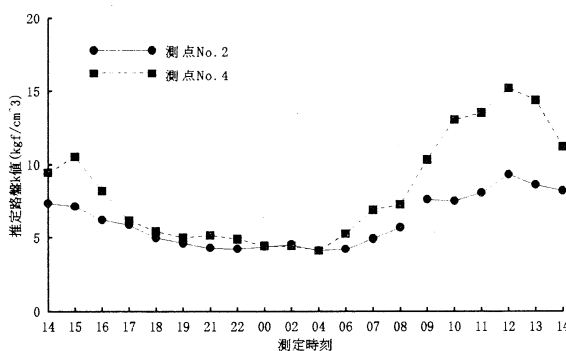


図-7 推定k値の変化(目地部)

を測点順に示したものであり、温度差が正および負の場合の代表的な例として、13:00と06:00の場合を示している。逆解析にはウェスターガード理論に基づく平板FEMを使用しており、前述の通り荷重直下のD0たわみ量のみを用い、またコンクリートの弾性係数として実測の結果を用いている。

図において推定k値が小さく評価されている部分は、コンクリート版と路盤の接触が失われている可能性を示している。すなわちその部分でコンクリート版がそり上がっていると考えられる。図からわか

るように、同じ測定点であっても温度差の正負によって推定k値が異なり、また測定点によってその傾向が逆であることがわかる。このことはコンクリート版にそり変形が生じた結果と推察される。

逆解析の結果得られた路盤支持力係数 $k_{7.5}$ の経時変化は、中央部の場合が図-6に示すように、また目地部の場合は図-7に示すようになった。図からわかるように、いずれの測点においても版内温度差の大きさによって推定k値が大きく影響されていることがわかる。

中央部の場合、版内温度差が負の場合にはk値が大きく評価されており、逆に正の場合にはk値が小さく評価されている。測点No.1、No.3の場合には温度差が0度付近では、実測のk値である 8.5kgf/cm^3 とはほぼ一致している。測点No.5に関しては全ての時刻において、測点No.1、No.3と比較して推定k値が大きめに評価されている。これは測点No.5のコンクリート版だけが目地間隔10mであること、またこのコンクリート版の舗設位置の路床条件が他の2枚とは若干異なっていることが影響していると推察されるが、明確な原因は判明していない。

図-6からわかるように、図-3に示される荷重直下のたわみ量では明確ではなかった版内温度差の影響が、逆解析によって路盤k値を求めることにより明確に現れることがわかる。これはコンクリート舗装の場合、FWDによる測定たわみは特に版中央では小さいため、版内温度差によるたわみ変化が明確に現れにくいことによると考えられる。

一方目地部における逆解析結果を見ると、版内温度差が0℃付近の推定k値は 5kgf/cm^3 となっており、実測値と比較すると若干低めに評価されている。これは、逆解析にあたって仮定された目地部における荷重伝達効果が実際と異なっていたためと考えられる。版内温度差が負の場合に路盤支持力が小さく、また正の場合に大きく評価されており、コンクリート版のそり変形の影響が現れている。

5.2 版内温度差による補正

以上のようにFWD試験の逆解析結果は、コンクリ

ート版内温度差の大きさに大きく影響され、またその影響は版中央部と目地部で異なることがわかった。

次に、版内温度差と逆解析の結果得られた推定k値の相関関係について検討を行った。版中央部および目地部における両者の関係は、それぞれ図-8、図-9に示すようになった。図からわかるようにそれぞれの関係は高い相関を示しており、次のような式によって表すことが出来る。

版中央部

$$k_{7.5B}=9.11-0.73\times\theta \quad \cdots \cdots (2)$$

目地部

$$k_{7.5B}=5.15+1.11\times\theta \quad \cdots \cdots (3)$$

ここで、 $k_{7.5B}$ ：逆解析で得られた推定k値

θ ：コンクリート版内温度差

それぞれの式の傾きは、版内温度差による推定k値の変化率を表しているから、これを用いて版内温度差の影響を補正することが出来る。ここで示した係数はあくまで今回の試験舗装に対するものであって、これを普遍化するためにはコンクリート版の大きさ、版厚、路盤条件等が異なるコンクリート舗装で実施されたFWD試験結果による補正が必要である。

6・結論

本研究では、コンクリート舗装のFWD試験に大きな影響を与えるコンクリート版内の温度差に関して、24時間連続測定によって得られたデータを用いて検討を行った。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) D0たわみ量はコンクリート版内温度差の影響を受けている。しかしその影響はコンクリート版中央部と目地部では異なり、目地部でのD0たわみ量の大きな変化に比較すると、版中央部での変化はかなり小さいものであった。したがって、版中央部におけるFWD試験結果に対するコンクリート版内温度差の影響をたわみ量そのものによって補正することは、

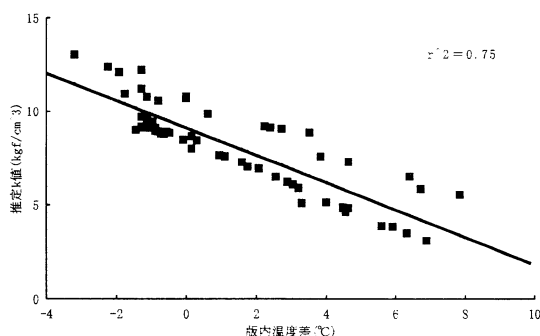


図-8 版内温度差と推定k値の関係(中央部)

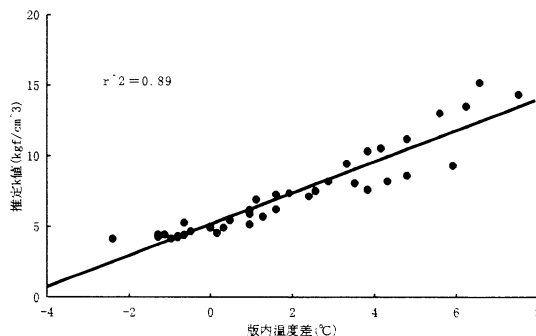


図-9 版内温度差と推定k値の関係(目地部)

困難であると考えられる。

(2)目地部における荷重伝達率は、コンクリート版内の温度差によって変化する。これはコンクリート版にそり変形が生じているためと考えられる。すなわち版内温度差が負の場合には、目地部でのそり上りのために荷重伝達効果が減少する。この減少の程度は、ダウエルバーの本数や間隔といった荷重伝達機能の程度によって異なる。しかし版内温度差による荷重伝達率の減少はわずかであり、設計にお手考慮する必要はないと考えられる。

(3)コンクリート版中央部のFWD試験結果を用いて平板FEMによる逆解析を行った結果、推定された路盤k値は、コンクリート版内温度差が0℃付近では実測結果とよく一致することがわかった。このことは、本研究で用いた逆解析手法が妥当であることを示している。

(4)版中央部における推定路盤k値は、コンクリート版内温度差の影響を受けて大きく変化することがわかった。版内温度差の影響は、D0たわみ量に対するものよりも逆解析の結果に対するものがより明確に現れている。したがって版内温度差の影響を補正する場合には、たわみ量そのものではなく逆解析の結果得られた推定k値に対して行った方がより効果的であると考えられる。

(5)逆解析による推定路盤k値とコンクリート版内温度差の間には、高い相関関係があることがわかった。本研究では中央部、目地部それぞれに対する回帰分析より、温度差の影響を補正するための係数を得た。この係数を用いることによって、FWD試験を連続して行った場合でも、測定時刻の相違すなわち版内温度差の相違の影響を補正することが出来る。

今回得た補正係数は、特定のコンクリート版による試験結果を基にしており、今後異なる条件のコンクリート舗装における測定結果により補正する必要がある。また本研究ではコンクリート版内温度差との関連で論じてきたが、実際のFWD試験においては版内温度差を知ることは難しい。したがって路面温度や外気温といった測定しやすいパラメータを用いて、版内温度差を正確に推定する必要がある。これに関してはいくつかの報告例もあるが、今後十分に検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1)FWD研究会「FWDに関する研究」、pp.7-25、1996
- 2)S. Higashi, K. Matsui, T. Nishizawa
"Effect of Temperature Gradient in Concrete Slab on Backcalculated Moduli", Proceedings of 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Volume 2, pp.115-126, 1997
- 3)佐藤勝久、八谷好高、田中孝士：「FWDによるコンクリート舗装構造の非破壊評価法」、土木学会第42回年次学術講演会概要集、pp.56-57、1987
- 4)B. Tang, O. Takahashi, K. Sugano,
"Temperature Effects on FWD Measurements of Concrete Pavement", Proceedings of 6th International Purdue Conference on Concrete Pavement Volume 2, pp.127-138, 1997
- 5)小梁川雅、竹内康、井上博、西澤辰夫：「平板FEMによるコンクリート舗装の逆解析」、土木学会第52回年次学術講演会概要集、pp.88-89、1997

A STUDY ON THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE DIFFERENCES WITHIN THE CONCRETE SLABS ON THE RESULTS OF FWD TEST

Masashi Koyanagawa, Yasushi Takeuchi, Tatsuo Nishizawa, Etsuo Noda, Kazushi Komoriya

Concrete Slabs are warped by the temperature differences within slabs, and there are possibility that the contact between slabs and base course is lost. The deflection measurements by the FWD test operated under such conditions are influenced by the contact condition. Consequently, the backcaluculation moduli of the same concrete pavement differs according to the time of test. In this paper, from the results of the FWD test on the controlled test pavement operated continuously in the period of 24 hours, the relationship among the slab temperature difference, the deflection measurement, the effect of load transfer, backcalculated k-value were investigationed. As the results, the backcalculated k-value were able to correct accorging to the slab temperature gradient.