

Pavement Engineering Issues for The 21st Century

T. F. Fwa*

INTRODUCTION

Among the various disciplines of study in civil engineering, the study of pavement engineering is comparatively young although different forms of roads have been used by human being for thousands of years. In the beginning of this century, transportation of people and goods was mainly by either by rail or horse-drawn vehicles, and urban populations were concentrated to limited areas due to the lack of mobility.

The overall picture of land transport began a rapid process of change after 1920 when dependable automobiles gain wider and wider acceptance. The demand for reliable all-weather road surface to accommodate high-speed motor-vehicle travel has called for a rational engineering design procedure and new technology in pavement construction. This has led to a number of large scale test-road experiments in Europe and North America. The most well-known of all, and by far the most significant in terms of the impacts on pavement design and construction practices around the world, is undoubtedly the AASHTO Road Test conducted in Illinois, USA in the late 1950s. The AASHTO Interim Design Guide was published in 1961 based on the findings of the AASHTO Road Test.

There have been considerable technological advancements in pavement engineering since the 1960s. This presentation reviews the major developments in pavement design, pavement evaluation and pavement management in the last 30 years or so, and identifies some important issues in these areas to be addressed in the 21st century.

PAVEMENT DESIGN -- TOWARDS MECHANISTIC BASED DESIGN PROCEDURES

* Professor, Department of Civil Engineering Director, Center for Transportation Research Head, Division of Geotechnical & Transportation Engineering National University of Singapore



Need for Mechanistic Design Method

Mechanistic design methods are procedures with the ability to relate the analytical computation of pavement response, based on fundamental engineering properties of materials determined in the laboratory, to the in-service performance of actual pavements. Compared with the design procedures of other civil engineering structures such as buildings, bridges, and structural foundations, the design methods of pavement structures have not advanced to the same level of sophistication in terms of links between the following aspects: (a) design analysis, (b) material properties by laboratory tests, and (c) in-service material behavior and pavement performance.

The major pavement design methods in use today have been established based on the performance of a wide range of experimental pavements measured from either full-scale road tests under controlled loading conditions or in-service road sections under actual traffic loading. The general approach has been to interpret the observed performance using theoretically computed stresses and strain within the pavement layers. Representatives of this design approach include the design procedures by AASHTO [1993] and TRRL [Powell et al. 1984] for flexible pavements, and the AASHTO [1993] and PCA [1984] procedures for rigid pavements.

The need and significance for adopting a mechanistic design concept in pavement design is well understood and accepted by pavement professionals and researchers in general. Considerable efforts have been made by researchers over the years to develop theoretical models and test procedures to improve the rigor of pavement analysis and design, and admittedly much progress has been achieved in this direction. For example, the theories developed by Westergaard [1926, 1927 and 1939] and Bradbury [1938] in the 1920s and 1930s have been used widely in concrete pavement design. The development of multi-layered elastic theories [Burmister 1945, Peutz et al. 1968] has made it convenient to analyze stresses, strain and deflections in flexible pavements under traffic loads. A major development in the direction of mechanistic design of pavement is made in the SHRP program of USA initiated in 1987. However, in spite of the tremendous research efforts so far, the current state-of-the-art knowledge and understanding of the three aspects identified in the first paragraph of this section is still inadequate to provide a comprehensive mechanistic design framework.

Limitations of Current Approaches

A review of the limitations of the current approaches can be made in the following three aspects identified earlier: (a) design analysis, (b) material properties by laboratory tests, and (c) in-service material behavior and pavement performance.

Design Analysis

Multi-layered elastic analysis and finite element methods have been widely used nowadays to compute pavement stresses, strains and deflections for design purpose. Static linear elastic



analysis has been the most widely used method so far due mainly to its comparative simplicity and easy availability of its computer software. This is so despite the long established understanding in pavement engineering that the materials of asphalt pavements and the subgrade soils are nonlinear in their response under the normal range of traffic loading.

The elastic moduli of pavement materials, including asphaltic mixtures, granular base and subbase materials, and the cohesionless or cohesive subgrade soils are known to be nonlinear functions of applied loads. The magnitudes of elastic moduli (often measured in terms of resilient moduli from repeated load tests) of these materials vary with the confining pressure and deviator stress. These behavior cannot be correctly modeled using the linear elastic analysis. The properties of asphaltic mixtures are also known to be temperature and loading-time dependent. The fact that the stiffness and compressive strength of asphaltic materials are affected by the state of stress developed under load is often ignored.

There is also the issue of the mode of load application. Static load analysis is commonly used today for pavement design. This is applicable for the design of pavements for car parks, aircraft parking apron and harbor and storage yard. However, for most highway pavements where moving traffic loads are the norm, a much more appropriate analysis would be one that is based on dynamic or moving load models. Studies are required to incorporate the effects of vertical dynamic loads caused by tire-pavement interaction.

The various aspects discussed in the preceding paragraphs have been the topics of on-going work by pavement researchers. For example, the Superpave Level 3 asphaltic mix design procedure [SHRP 1994] has considered the nonlinear elastic properties of asphalt mixtures, although the primary response model is a static analysis based on a two-dimensional axi-symmetric finite element program. An analytical tool that appears to have a strong potential to offer further improvement in the structural analysis of pavement is three-dimensional nonlinear finite element analysis. A number of nonlinear 3-D finite element programs have been in use in the field of structural engineering in the 1980s. These programs have the capability to analyze different modes of load application, including static, steady-state dynamic, impact and moving loads. As one of the most critical design considerations is the effect of edge loading, the 3-D modeling capability is a useful necessity as it removes the limitation of many current axi-symmetric or two-dimensional analysis that are unable to study correctly the effects of pavement edges and joints.

In the analysis of rigid pavements, the solutions by Westergaard [1926, 1927] have been used widely although they were derived based on the assumption of infinite slab. To consider the geometric configuration of concrete pavements exactly, several numerical models [Chou 1981, Huang 1983] have been developed. However, all these models, either analytical or numerical, were developed in terms of thin-plate theory and conventional subgrade models represented by either Winkler foundation or elastic solid foundation. Improvements to these models can be made in these areas: the use of thick-plate model and more advanced subgrade representation. Recently,



Shi et al. [1993, 1998] have developed thick-plate models for single- and three-slab analytical solutions for rigid pavements supported on Pasternak foundation. However, the solutions are restrictive in terms of the conditions of joints that can be considered.

Test Procedures for Material Properties

An important related issue is that appropriate test methods must be developed to determine the parameter values of the properties for the material models that are required for nonlinear analysis. Historically this has been a hurdle to the adoption of sophisticated analytical methods in pavement design and analysis. For instance, although resilient modulus has been used in the development of the AASHTO and Asphalt Institute design procedures, few highway laboratories are equipped to perform the test for subgrade soil and base materials. The material property parameters associated with nonlinear models involved elaborate laboratory test methods. The expertise required to perform such tests and the equipment required are currently available only in selected research laboratories. Major research and development efforts are required to establish practical laboratory test procedures for the determination of the material parameters before the nonlinear analysis could be applied effectively for pavement design.

The conventional test procedures for asphaltic binder, such as the penetration test, ring-and-ball softening point test and the Saybolt-Fural viscosity test do not provide fundamental engineering properties that can be used in the design analysis. SHRP program in the USA has made a significant contribution by introducing a performance-based asphalt mix design specification in the early 1990s [SHRP 1994]. A complete SHRP Superpave mix design analysis involving Shear Tester and Indirect Tensile Device would add about four weeks to the total testing time for an asphalt mixture [May et al. 1997]. The validity of these new tests and analysis systems is currently being subjected to further laboratory evaluation and field verification. For example, May et al. [1995] has inconsistent trends with several of the Superpave property parameters and suggested the current Superpave mix analysis be used only for research purpose pending additional investigations and modifications.

In-Service Performance

It is an important requirement for a pavement engineer to know the expected time-history of pavement performance during its service life. This is unique in pavement engineering because a typical pavement of a major road is used by thousands of motorists daily, and the level of service provided by the pavement is judged by these motorists everyday of its service life. To the pavement engineer, knowledge of the expected pavement performance is needed for pavement maintenance planning and pavement management decision making. Mechanistic pavement design is especially useful in these regards as such information could theoretically be derived once the loading conditions are known.



One of the biggest challenges in pavement design is therefore to develop material response models that closely describe the behavior of pavement materials during service. This has been a major research issue since many field service conditions cannot be easily replicated in a laboratory test environment. Factors which are not possible to simulate fully in laboratory tests include the following: (a) mixed-traffic loading; (b) effect of mixed loading times and rest periods; (c) local climatic conditions; (d) time-temperature dependency; and (e) development interaction of different distress types.

Besides the inadequacy of laboratory tests and material performance models, there are also the inherent variability pavement material properties and the lack of accurate assessment of traffic loads and environmental factors, prediction of material behavior and pavement performance cannot be predicted precisely. Probabilistic approach and the concept of reliability will have to be applied.

The common predictive pavement distress models used in the mechanistic design approach include fatigue cracking, rutting, and low temperature cracking. These are the distress models included in the SHRP Level 3 mix design. The common approach adopted in establishing the fatigue cracking and the low temperature cracking models has been based on crack initiation and crack propagation theories, with material parameters determined from laboratory repeated load tests conducted at selected temperatures. Rutting models are also usually developed using parameters derived from laboratory repeated load testing. The model parameters in these models are obtained directly from mechanical testing with no apparent link to properties of mix design. Further research work may be needed in this area to develop an integrated mix design and response prediction framework.

A desirable element of pavement performance assessment is the pavement roughness. Pavement roughness is closely correlated with the pavement serviceability concept introduced at the AASHO Road Test. It has been a useful indicator for pavement rideability as assessed by common motorists. The widely used AASHTO serviceability equations for rigid and flexible pavement design were empirically derived from the results of the AASHO Road Test. Several attempts have been made by researchers to relate pavement serviceability performance to stresses and strains generated by traffic loads. These include the work by Ullidtz et al. [1987] that relies on an analytical-empirical method for predicting pavement serviceability. A fully mechanistic model for the prediction of pavement serviceability under the action of traffic loading will be an essential element for a complete pavement design and pavement management system.

PAVEMENT EVALUATION --

TOWARDS INTELLIGENT HIGH-SPEED NONDESTRUCTIVE TESTING

Pavement evaluation is an integral element of pavement maintenance and rehabilitation planning. There are two major aspects of pavement evaluation: (a) pavement distress survey and evaluation,



and (b) structural evaluation. The following are major considerations governing the conduct of pavement evaluation:

- Nondestructive testing is preferable to avoid unnecessary destruction to pavement structure;
- Disruption to traffic should be kept to a minimum; test methods that cause no disruption to traffic should be used if available;
- Speed of testing should be sufficiently high to cover a road network of typical size within a practical timeframe to meet operational requirements;
- Evaluation of test results should be accurate, reliable and based on mechanistic analysis;
- Processing and evaluation of test results should be time efficient to meet operational requirements.

An assessment of current evaluation techniques and future needs of pavement evaluation technology is presented in this section with respect to these major considerations.

Pavement Distress Survey and Evaluation

Pavement distress survey is regularly carried out by highway authorities to obtain the necessary information for maintenance operations. The automation of the distress survey, identification and analysis of distresses has attracted much attention due to the potential benefits of speedy survey, and efficiency of data collection and processing. Considerable progress has been made in equipment development to conduct high speed automated pavement distress survey. This is desirable as automated survey conducted at the prevailing traffic speed does not obstruct traffic, provides systematic recording and processing of survey data, and eliminates uncertainties involved with subjective judgement by manual survey. Currently, commercially available distress survey equipment is able to perform at normal traffic speed non-contact measurements of the longitudinal surface roughness, lateral surface profiles and hence rut depths, and surface depressions.

Surface defects such as cracks, bleeding, stripping and other surface deterioration can be captured by color video recording of actual road surface images. Automated image processing technology has been developed to interpret the recorded images. Distress feature information such as the type, location, severity and extent of distresses, and the length and width of cracks, as well as the percent area cracked can be determined.

Pavement crack is a major distress type of concern to pavement engineers. With the advent of digital image processing technology, it is now possible to distinguish cracked surface automatically from the normal uncracked pavement surface. For the purpose of pavement maintenance, it is necessary to identify the pattern of cracks for further classification of the crack type. Expert systems have been employed to perform such classification. The main feature of cracks that cannot be obtained reliably from image processing technique is the depth of cracks. New techniques are needed to acquire this useful information as part of the output of automated distress



survey.

Practically all existing distress rating systems have in their evaluation assigned severity assessments to different distresses identified. However, such severity ratings are usually assigned based on subjective judgement without making references to the original design of the pavement concerned. While this is acceptable for short-term maintenance planning, it is not entirely satisfactory as the link between such ratings and the original design philosophy is missing. It has not been possible to establish this link if the pavement is designed based on an empirical method. With the use of mechanistic design approach, such link would be desirable and should be established. With the rapid progress of information and computer technologies, this form of linkage at the entire road network level would be possible in the not too distant future. This will help to integrate the entire process of pavement design, evaluation and maintenance.

The reliance of subjective experience and empirically based methods like expert systems is expected to be gradually giving way to analytically derived assessment and rating based on mechanistic evaluation of the distress conditions. This has not been possible currently due to the limitations of the knowledge presently available in the development and deterioration process of various pavement distress types. Better understanding of this process and the ability to model the process mechanistically are necessary before it is possible to assess and evaluate pavement distress conditions based on sound engineering analysis.

Nondestructive Testing of Pavement

The concept of nondestructive structural evaluation of pavement can be traced to the use of plate-loading test and the development of the well-known Benkelman Beam in the 1950s. The idea of relying on measured pavement surface deflections under a known applied load for structural evaluation of pavement has been the dominant approach since the 1950s. The main application of nondestructive deflection measurements in the early days was for the purpose of pavement overlay design [California Department of Highways 1972, Asphalt Institute 1981]. This form of nondestructive surface deflection test assumed increased importance in the early 1970s when the concept of pavement management systems (PMS) was introduced and as the need for PMS became increasingly accepted by the highway authorities and pavement professionals worldwide.

The type of nondestructive deflection measuring equipment has gone through a number of transformations and is becoming more and more sophisticated. Automated versions of Benkelman Beam test were available in the 1960s, the California Travelling Deflectometer and the French La Croix Deflectograph [Kennedy et al. 1978] were representatives of this generation of deflection test equipment. By the mid 1970s, the demand for speedy and higher productivity test equipment as necessitated by introduction of PMS had led to the development of steady-state vibratory testers such as the Dynaflect and Road Rater [Smith and Lytton 1985]. By the late 1980s, falling weight deflectometers (FWD) were gaining popularity and increasing acceptance by pavement researchers



and professionals due to their better representation of traffic loading. However, FWD as a nondestructive test equipment is not entirely satisfactory in two aspects: (i) the mode of loading is different from actual traffic loading, and (ii) the overall speed of travel during testing is very much lower than normal traffic.

Two technologically more advanced versions of deflection testing equipment are currently being explored by researchers. One is the Rolling Weight Deflectometer (RWD) [Briggs et al. 1999] and a laser based High Speed Deflectograph [Hildebrand et al. 1999]. RWD is a trailer mounted device that continuously measures the maximum pavement deflection under a load wheel under a moving condition. Currently the device could perform deflection measurements at a maximum speed of 6 mph with loads up to 50,000 lbs, or up to 20 mph under a 9000 lb wheel load. A version with an operating speed of 50 mph is being developed. The High Speed Deflectograph is being developed to perform continuous deflection measurements at all driving speeds in the range of 20-70 km/h. Both devices possess the potential to replace the FWD in the foreseeable future as the tool for conducting pavement deflection measurements at normal traffic speeds.

Structural Evaluation Techniques

The development history of test equipment reflects the advancement of the state-of-the-art of nondestructive pavement evaluation techniques. More and more advanced backcalculation techniques have been developed to estimate pavement material properties from deflection measurements. Initially, semi-mechanistic methods based on the magnitudes of surface deflections and shapes of deflection bowls have been used [Wang et al. 1978]. Such methods, however, do not provide enough information on the structural properties of the materials for modern-day pavement management systems. Backcalculation is an inverse problem which is typically poorly conditioned and the solution is sensitive to small changes in the measured surface deflections. There is also the nonuniqueness of solutions that makes the problem a complicated one. The selection of appropriate initial seed values of the unknown pavement material parameters is an important aspect of the backcalculation analysis.

The formulation of the backcalculation problem consists of four major components: (a) surface loading model, (b) materials model, (c) pavement response model, and (d) back-analysis model.

Surface Loading Models

The applied load can be may be modelled as a static load, a moving load, a vibratory load, or an impulse load. Most backcalculation algorithms in use in practice employ the static load model. Moving load or dynamic load modelling are much more complex requiring considerable more formulation and computational effort. The use of the dynamic loading model permits the deflection time history of each deflection sensor of the FWD deflection test to be considered. More data points are now available from a single test, thereby increasing the reliability of the backcalculated



material properties considerably. In view of the expected development of moving-load deflection testing equipment such as the Rolling Weight Deflectometer and the High Speed Deflectograph, backcalculation algorithms based on moving-load model would be appropriate.

Material Models

The majority of the common backcalculation algorithms used in practice assume linear elastic pavement materials. These are approximations for most pavement materials. Granular base and subbase materials are stress-dependent and hence are nonlinear in their response under load. The behavior of subgrade materials, either sandy or clayey, is also known to be stress-dependent and nonlinear. The modulus of a sandy subgrade will increase with depth under the action of the overburden, while that of a clayey subgrade will increase as horizontal distance from the load increases or as the deviator stress decreases. On the other hand, the response of asphalt mixtures under load is time and temperature dependent. A more accurate representation of pavement materials is needed as more accurate deflection measuring equipment are developed in the future.

Pavement Response Models

A pavement response model is needed in the backcalculation procedure for computing pavement surface deflection under the test load. In general, depending on the material model and surface loading model adopted, pavement response models can be classified into four types: (a) linear static analysis, (b) nonlinear static analysis, (c) linear dynamic analysis, and (d) nonlinear dynamic analysis. Linear static analysis is undoubtedly the most widely used procedure in practice. This is due mainly to its simplicity in application, ease of interpretation, and the wide availability of such pavement response computer programs. Perhaps with the development of new generation testing equipment such as the High Speed Deflectograph which closely simulates the moving loading mode of actual traffic, a pavement response model that incorporates the moving loading mode into the analysis would be necessary.

Back-Analysis Models

Two general approaches of back-analysis to compute pavement material properties may be identified: the inverse back-analysis and direct back-analysis. The inverse back-analysis adopts an equation error criterion to minimize the errors of pavement response equations in estimating the actual in-situ surface deflections. The direct back-analysis approach is based on the minimization of the output error, i.e. the discrepancy between the measured and computed surface deflections. This approach has been used in virtually all the backcalculation algorithms reported in the literature so far. It is noted that output errors are a complicated nonlinear function of the unknown parameters and its analytical expression often cannot be determined. Different iterative search techniques have been employed to obtain values of material parameters that provide the best



match between computed and measured deflections. Alternatively, database method and regression predictive models can be used to reduce the computation time. However, the transferrability of the database method and the regression techniques are rather restrictive. Currently, the relative performance of the various back-analysis methods cannot be compared directly due to different assumptions made and the different material models adopted in their formulation.

PAVEMENT MANAGEMENT

TOWARDS EFFICIENT INTWEGRATED NETWORK LEVEL MANAGEMENT

Network Level Multi-Year Programming

A primary objective of pavement management at the road network level is to program pavement investments and schedule pavement activities to achieve optimal results of pavement network performance. To ensure that pavements provide the expected level of service according to design, timely corrective and preventive maintenance have to be performed. The importance of proper planning and programming of pavement activities, including maintenance and rehabilitation trade-off analysis, cannot be over-emphasized.

In the pavement maintenance and rehabilitation planning of a road network over a multi-year planning horizon, pavement engineers are faced with the decision to determine which road segments are to be repaired, when repairs should be carried out, and what repair treatments (i.e. type of maintenance or rehabilitation action) to use. This presents a major problem known as combinatorial explosion due to the extremely large number of combinations of possible choices arising from the large number of pavement sections in a typical road network, and the different repair treatments possible.

The magnitude of the problem can be easily demonstrated by a simple example. Consider a planning period of m years and n possible pavement defect types. There are $(m \times 2n)$ possible repair strategies per pavement segment in terms of repair type and time combinations. At the network level, the total number of combinations that needs to be considered increases exponentially with the number of pavement segments in the network. This is because the need for maintenance of every single pavement segment is independent of those of other segments. For a network with r segments, the total possible combinations is equal to $(m \times 2n)r$. It can be seen that even for a small local network having $r = 20$, $m = 10$ and $n = 3$, there would be a total of about 1038 combinations. This figure would be astronomical when more pavement segments and more maintenance treatment types are included.

Many optimization techniques have been employed since the 1970s to assist highway agencies in making pavement management decisions. These techniques include linear programming [Lytton 1985], integer programming [Fwa et al. 1988], dynamic programming [Feighan et al. 1987], and



nonlinear programming and heuristic methods [OECD 1987]. Because of the complexity of problem formulation and the magnitude of the problem due to combinatorial explosion, the conventional optimization techniques could not be easily applied to solve the network level pavement management programming problem.

Recently, it has been demonstrated that genetic algorithms could serve as a practical analytical tool to programming of pavement management activities at the network level [Fwa et al. 1994a, 1994b]. Genetic algorithms are an optimization technique operating on the basis of natural selection and natural genetics. It offers flexibility in objective function formulation and possesses robust global search capability. The technique could also handle effectively multi-objective analysis in programming of pavement management activities [Hoque et al. 1999]. However, none of these proposed algorithms have been tried out on a large scale for actual road network operations. The challenge to pavement engineers and researchers is to achieve a full-scale implementation of the concept of multi-year network level pavement management by road agencies.

Performance Based Pavement Management Concept

The complete pavement management cycle should logically cover the entire process beginning from pavement design to rehabilitation, encompassing pavement construction and maintenance. Ideally, alternative pavement designs should be evaluated incorporating implications of pavement maintenance and rehabilitation. Unfortunately, this is rarely the case in practice. All existing pavement design procedures do not call for design evaluation addressing requirements of pavement maintenance and rehabilitation. The traditional management organisation of practically all highway agencies is not structured to handle such operations. Typically pavement management is set up as a separate entity within a road agency, with the responsibility to plan and program maintenance activities after the completion of the road construction phase. This practice is undesirable as it will not be utilizing optimally the available road agency funds.

Traditionally, most highway agencies perform pavement maintenance in-house. The agency owns the equipment and employs full-time engineers and maintenance crew to plan and carry out the maintenance works. This is sometimes combined with force account to handle extra work or overloads. Force-account maintenance involves engaging labour and equipment from a contractor on a unit price basis. The main concern to these two forms of maintenance approach has been the general lack of incentive for innovation, and the relatively high tendency of operational inefficiency.

There is a growing trend around the world toward privatized or contracted maintenance management of road network. A common practice is the end-result based contracted maintenance. In this approach, the road agency works out the required maintenance program and work items, and appoints a contractor by negotiation or through open bidding to carry out the works. The contract amount may be a lump sum or based on unit prices for various work items. The end



results in terms of performance requirements are specified by the agency. A more recent approach is the long-term performance based contract maintenance where contract is awarded to a contractor for an extended period, in the order of 5 to 10 years or more. This offers the contractor tremendous flexibility to plan and optimize resources usage on a network wide basis. It also presents a tremendous potential for cost savings, operational efficiency and innovation. It is expected that this form of contract maintenance will gain increasing acceptance in time to come.

CONCLUDING REMARKS

The rapid pace of today's economic activities requires the service of high quality highway pavements. This paper has reviewed the current state-of-the-art knowledge in pavement design, pavement evaluation and pavement management, and examined their limitations in meeting the needs of modern day traffic operations. It has been pointed out that a better understanding of the behavior of pavement materials under traffic loading is required. This calls for more comprehensive test methods to characterize various types of pavement materials, and more refined analytical tools for performing mechanistic design analysis.

Needed improvements in the area of pavement evaluation have also been identified. Pavement distress surveys need to be performed with assessments which are mechanistically linked to the original design considerations. Current generation of nondestructive testing devices for structural evaluation of in-service pavements is expected to be replaced by test equipment adopting the moving load concept and operating at normal traffic speed. Matching techniques for structural evaluation will have to be developed.

To fully exploit the benefits of pavement management, it has been emphasized that a planning and programming methodology for performing multi-year network level pavement management must be developed. Finally, the emergence of long-term performance based contract maintenance management is described. Its significance with respect to the concept of integrated pavement management has been highlighted. In summary, the field of pavement engineering is expected to move into an exciting un-charted territory full of challenges. Pavement researchers and professionals alike can look forward to the development of more reliable testing techniques and new equipment, more sophisticated theory and analytical tools, and better and more efficient techniques of managing pavements.



REFERENCES

- AASHTO [1993] AASHTO guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., USA
- Asphalt Institute [1981, 1991] Thickness Design Asphalt Pavement for Highways & Streets, Manual Series No.1 (MS-1), Lexington, USA
- Briggs R. C., Pierce L. and Johnson R. [1999] A Comparison of the Rolling Weight Deflectometer with the Falling Weight Deflectometer, paper presented at 3rd Int. Conf. On Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, June 30-July 1, Seattle, Washington, USA.
- Burmister D. M. [1945] The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems, J. of Applied Physics, Vol. 16, No.2, pp. 89-96; No. 3, pp. 126-127; No. 5, pp. 296-302.
- California Department of Highways [1972] Methods of Test to Determine Overlay and Maintenance Requirements by Pavement Deflection Measurements, Test Method Number Calif. 356-C.
- Chou Y.T. [1981] Structural Analysis Computer Programs for Rigid Multi-Component Pavement Structures with Discontinuities WESLIQUID and WESLAYER, Technical Report GL-81-6, Reports 1, 2 and 3, US Army Waterways Experiment Station.
- Feighan K. J., Shahin M. Y. and Sinha K. C. [1987] A Dynamic Programming Approach for Pavement Management Systems, Proc. 2nd North American Conference on Managing Pavement, Toronto, Canada, Vol. 2, pp. 2.195-2.206.
- Fwa T. F., Chan W. T. and Tan C. Y. [1994a] Optimal Programming by Genetic Algorithms for Pavement Management. Transportation Research Record, No. 1455, pp. 31-41.
- Fwa T. F., Sinha K. C. and Riverson, J. N. D. [1988] Highway Routine Maintenance Programming at Network Level, J. of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 5, pp. 539-554.
- Fwa T. F., Tan C. Y. and Chan W. T. [1994b] Road Maintenance Planning using Genetic Algorithms, J. of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 710-722.
- Hildebrand G., Rasmussen S., and Andres R. [1999] Development of a Laser based High Speed Deflectograph, paper presented at 3rd Int. Conf. On Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli, June 30-July 1, Seattle, Washington, USA.
- Hoque, Z. K. , Fwa T. F. and Chan W. T. [1999] Multi-Objective Programming by Genetic Algorithms for Pavement Management, Proc. 3rd EASTS Conference, 15-17 September, Taipei, Taiwan.
- Huang Y.H. [1993] Pavement Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA.
- Kennedy C. K., Fevre P. and Clark C. S. Pavement Deflection Equipment for Measurement in the United Kingdom, TRRL Report 834, Transport and Road Research Laboratory, United



Kingdom.

- Lytton R. L. [1985] *From Ranking to True Optimization*, Proc. North American Pavement Management Conf., March Vol. 3,
- May R. W., Anderson, R. M. and Perdomo D. [1997] *Comparison of Superpave with Conventional Pavement Design*, Proc. 8th Int. Conf. on Asphalt Pavements, August 10-14, Seattle, Washington, pp.1625-1641.
- May R. W. and Killingsworth B. M. [1995] *Superpave Performance Prediction A First Look at Utility, Sensitivity, and Repeatability*, J. of Asphalt Paving Technologists, Vol. 64, pp. 669-717.
- OECD [1987] Pavement Management Systems, Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.
- PCA [1984] Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, Portland Cement Association, Skokie, USA
- Peutz M.G.F., van Kempen H.P.M. and Jones A. [1968] *Layered Systems under Normal Surface Loads*, Highway Research Record, No. 228, pp. 34-45.
- Powell W.D., Potter J.R., Mayhew H. and Nunn M. [1984] *Design of Bituminous Roads*, TRRL Laboratory Report LR1132, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK.
- SHRP [1994] *The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, USA.
- Shi X. P., Fwa T. F. and Tan S. A. [1999] *Three-Slab Model for Concrete Models*, J. of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 5, pp. 449-455.
- Shi, X. P., Tan S. A. and Fwa T. F. [1994] *Rectangular Thick Plate with Free Edges on Pasternak Foundation*, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 971-988.
- Smith R. E. and Lytton R. L. [1985] *Operating Characteristics of and User Satisfaction with Commercially Available NDT Equipment*, Paper presented at 64th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., USA.
- Ullidtz P., Simonsen P. and Lentz G. [1987] *The Analytical-Empirical Method Used in a Pavement Management System*, Proc. 6th Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Vol. 2, 13-17 July, Ann Arbor, USA, pp. 795-806.
- Way R.W., Anderson R.M. and Perdomo D. [1997] *Comparison of Superpave with Conventional Pavement Design*. Proc. 8th Int. Conf. On Asphalt Pavements, Vol. 2, 10-14 August, Seattle, USA, pp. 1625-1641.
- Westergaard H.M. [1926] *Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis*, Public Roads, Vol. 7, pp. 25-35.
- Westergaard H.M. [1927] *Theory of Concrete Pavement Design*, Proc. Highway Research Board, Part I, pp. 175-181.

21세기에 해결해야 할 포장공학의 문제점들(번역본)

T. F. Fwa

서 론

비록 여러 형태의 도로들이 오랜 기간동안 인간에 의해서 만들어져왔지만, 토목공학에 있어서 여러 분야의 연구중 포장공학 연구는 비교적 초기단계에 있다. 금세기초에 인간과 화물의 수송은 주로 철도나 마차에 의해서 이루어졌고, 기동력의 부족으로 인해 도시인구는 제한된 지역으로 집중되었다.

자동차를 점점 더 많이 사용하게 된 1920년 이후 육로운송의 전반적인 상황은 급속한 변화과정을 겪기 시작하였다. 고속의 자동차 여행을 하기 위해 어떠한 기상조건에서도 신뢰할 수 있는 도로포장을 갖고자 하는 바램은 포장시공의 새로운 기술과 합리적인 공학설계 과정을 필요로 하게 되었다. 이로 인해 유럽과 북미에서 수 많은 대규모의 시험도로 시험을 하게 되었다. 전세계적으로 포장설계와 시공에 영향을 준 가장 잘 알려져 있고 중요한 실험은 1950년대 후반 미국 일리노이주에서 실시한 AASHO Road Test이다. AASHTO Interim Design Guide는 AASHO Road Test의 결과를 근거로 1961년에 발표되었다. 1960년대 이후로 포장공학은 상당한 기술적 진보를 이루었다. 이 논문은 지난 약 30년간의 포장설계, 포장평가와 포장관리에 있어서 주요 발전을 재검토하고 있으며 21세기에 거론되는 이들 분야에 있어서 몇가지 중요한 문제점들을 확인하는 것이다.

포장설계 : 역학적설계 과정

역학적 설계방법의 필요성

실험실에서 결정된 재료의 기본적인 공학적 특성에 근거를 둔 역학적 설계법은 포장 반응의 분석적 계산을 실제 포장의 현장 공용성에 관련시키려는 과정이다. 빌딩, 교량 그리고 기초 같은 여러 토목공학 구조물의 설계과정과 비교할 때 포장구조물의 설계방법은 (a) 설계분석 (b) 실내실험에 의한 재료 특성 (c) 현장의 재료거동과 포장공용성과 같은 관계에 있어서 같은 수준의 정교한 진보는 이루어지지 않았다.

오늘날 사용하고 있는 대부분의 포장설계방법은 실제 교통하중에서 현장의 도로구역이나 조절된 재하조건에서 전면적인 도로시험으로부터 측정된 폭넓은 범위의 실험에 입각한 포장 공용성에 근거를 두고 제정되었다. 일반적인 접근방법은 포장층내에서 이론적으로 계산된 응력과 변형을 사용하여 관찰된 공용성을 해석해왔다. 이러한 설계 접근에 대한 대표적인 것으로는 강성포장에 대한 AASHTO[1993]와 PCA[1984]설계과정과 가요성포장에 대한 AASHTO[1993]와 TRRL[Powell et al.



1984]에 의한 설계과정을 포함한다.

일반적으로 포장 전문가와 연구자는 포장설계에 있어서 역학적 설계 개념을 채택하기 위한 필요성과 중요성을 잘 이해하고 받아들이고 있다. 수십년동안 연구자들은 포장분석과 설계에 대한 정교성을 향상시키기 위한 시험과정과 이론적인 모델을 개발하기 위해 상당한 노력을 해왔다. 그리하여 포장분석과 설계 분야에 있어서 상당한 발전을 이루어 왔다. 예를 들면, 1920년대와 1930년대에 있어서 Westergaard[1926, 1927, 1939] 그리고 Bradbury[1938]에 의해 개발된 이론은 콘크리트 포장설계에 폭 넓게 사용했다. 다층탄성이론[Burmister 1945, Peutz et al. 1968]의 발전은 교통하중하의 가요성포장에 있어서 응력, 변형 그리고 변위에 대한 분석을 편리하게 했다. 포장의 역학적 설계분야에 있어서 주요한 발전은 1987년 미국에서 시작된 SHRP 프로그램에서 이루어졌다. 그러나 지금까지 엄청난 연구 노력에도 불구하고 이 절의 첫번째 단락에서 확인된 세가지 면에 있어서 현재까지의 개발된 기술에 대한 지식과 이해는 종합적인 역학적 설계구조를 제시하기에는 아직도 불충분하다.

현재의 접근방법에 대한 한계

현재의 접근방법에 대한 한계는 앞에서 확인된 다음과 같은 세가지 면에서 재검토될 수 있다.

(a) 설계분석 (b) 실내실험에 의한 재료특성 (c) 현장의 재료거동과 포장공용성이다.

설계 분석

다층탄성분석과 유한요소방법은 설계목적에 위한 포장 응력, 변형 그리고 변위를 계산하기 위해 오늘날 폭 넓게 사용되었다. 정적 선형탄성 분석은 대부분 컴퓨터 소프트웨어로 적용하기가 쉽고 비교적 단순하기 때문에 지금까지 가장 폭 넓게 사용된 방법이다. 정적 선형탄성 분석은 포장공학에 있어서 오래동안 확립된 이해에도 불구하고 아스팔트포장의 재료와 노상토는 통상적인 범위의 교통조건의 반응에 있어서 비선형이라는 것이다.

아스팔트혼합물, 자갈기층과 보조기층재료, 그리고 점착력이 없거나 점착력 있는 노상토를 포함하여 포장재료의 탄성계수는 적용된 하중에 대한 비선형 함수로 알려져 있다. 이들 재료의 탄성계수(종종 반복재하시험으로 구한 동탄성계수로 측정)의 크기는 구속압력과 축차응력에 따라 변한다. 이들 재료의 거동은 선형 탄성 분석을 사용하여 정확하게 모형화 될 수 없다. 아스팔트혼합물의 특성은 온도와 재하시간에 의존적인 것으로 알려져 있다. 아스팔트혼합물의 스티프니스와 압축강도는 하중 조건하에서 개발된 응력상태에 의해 영향을 받는다는 사실이 종종 무시된다.

하중을 적용하는 방법에 대한 문제가 또한 있다. 정적재하 분석은 오늘날 포장설계에 일반적으로 사용된다. 정적재하 분석은 자동차 주차장, 비행장 격납고, 항구 그리고 창고 적치장에 대한 포장설계에 적용할 수 있다. 그러나 움직이는 교통하중이 기준이 되는 대부분의 도로포장에서 더욱 적당한 분석은 동적 또는 움직이는 하중 모델에 근거를 둔 분석이다. 자동차 타이어와 포장의 상호작용에 의해서 유발되는 수직 동적 하중에 대한 영향을 설명하기 위해서 연구가 필요하다.

앞 절에서 토론된 여러 가지 측면은 포장 연구자들이 진행하고 있는 과업에 대한 주제이다. 예를 들면, 비록 초기의 반응 모델이 2차원 축대칭 유한요소 프로그램에 근거를 둔 정적 분석이지만, 수퍼 페이브 3단계 아스팔트혼합물 설계과정[SHRP 1994]은 아스팔트혼합물의 비선형탄성 특성을 고려하였



다. 포장 구조적 분석에 있어서 한층 더 나은 진보를 위해 강력한 잠재력을 가진 것으로 여겨지는 분석기술은 3차원 비선형 유한요소 분석이다. 수많은 비선형 3차원 유한요소 프로그램이 1980년대 현장의 구조공학에 사용되었다. 이들 프로그램은 정적, 동적 정상상태, 충돌 그리고 움직이는 하중을 포함한 여러 형태의 적용 하중을 분석하기 위한 용량을 가지고 있다. 가장 극한적인 설계 중의 하나는 가장자리 재하에 대한 영향을 고려하는 것으로서, 3차원 모형화 능력은 포장의 가장자리나 조인트에 대한 영향을 정확하게 연구할 수 없는 현재의 많은 축대칭 또는 2차원 분석에 대한 한계를 제거해 주기 때문에 유용하게 필요한 것이다.

강성포장의 분석에 있어서 Westergaard[1926, 1927]가 제시한 해석은 비록 무한 슬래브의 가정에 근거를 두고 유추한 것이기는 하지만 폭넓게 사용되었다. 콘크리트 포장의 기하학적인 형태를 정확하게 고려하기 위해서 몇 개의 수치모델[Chou 1981, Huang 1983]이 개발되었다. 그러나 분석적이든 혹은 수치적이든 이러한 모든 모델들은 thin plate theory 측면에서 개발되었고 기존의 subgrade model은 Winkler foundation나 elastic solid foundation에 의해서 나타났다. thick-plate model과 더 진보된 subgrade model을 사용하는 영역에서 모델의 발전이 이루어 질 수 있다. 최근에 Shi[1993, 1998] 등은 Pasternak foundation에 지지되는 강성포장의 single-slab와 three-slab의 분석적 해를 구하기 위해 thick-plate 모델을 개발했다. 그러나 그 해는 조인트의 상태면에 있어서 제한적이다.

재료특성에 대한 시험과정

비선형분석에 필요한 재료모델 특성 인자값을 결정하기 위해 적당한 시험방법이 개발되어야 한다는 것이 중요한 문제이다. 역사적으로 이것은 포장설계와 분석에 있어서 정교한 분석적 방법을 채택하는데 장애물이 되어왔다. 예를 들면 비록 회복탄성계수가 AASHTO와 아스팔트협회 설계과정의 개발에 사용되어왔지만 노상토와 기층재료를 실험할 수 있는 장비가 갖추어진 도로실험실은 거의 없다. 비선형모델과 관련된 재료특성 파라미터는 정교한 실내실험 방법을 포함한다. 그러한 시험을 수행하기 위해서는 전문가적인 기술이 필요하고, 필요한 장비는 현재 선택된 연구실험실에서만 활용할 수 있다. 비선형분석이 포장설계에 효과적으로 적용되기에 앞서서 재료 파라미터 결정을 위한 실제적인 실내실험과정의 제정을 위해 주요한 연구개발 노력이 필요하다.

침입도 시험, 연화점시험, 세이볼트-퓨렐 점도시험과 같은 아스팔트 바인더에 대한 기존의 시험과정은 설계분석에서 사용될 수 있는 기본적인 공학적 특성을 제시하지 못한다. 미국의 SHRP 프로그램은 1990년대 초[SHRP 1994]에 공용성에 근거한 아스팔트혼합물 설계규정을 도입함으로써 중요한 기여를 했다. 진단시험기와 간접인장시험장치를 포함하여 완전한 SHRP 수퍼페이브 혼합물 설계분석을 하는데 필요한 아스팔트혼합물[May et al 1997]의 전체 시험시간은 약 4주정도 소요될 것이다. 이들 새로운 시험과 분석체계에 대한 타당성은 현재 심도있는 실내평가와 현장검증을 실시하기로 되어있다. 예를 들면 May et al. [1995]는 몇개의 수퍼페이브 특성 파라미터에 대해 상반된 경향을 가지고 있으며 현재의 수퍼페이브 혼합물 분석은 추가적인 연구와 수정이 있을 때까지 단지 연구목적만을 위해서만 사용될 수 있다고 제안하였다.



현장공용성

포장기술자가 포장의 service-life 기간동안에 예상되는 시간이력에 대한 포장 공용성을 아는 것은 중요한 요구사항이다. 주요도로의 대표적인 포장이 매일 수 많은 자동차 운전자에 의해서 사용되기 때문에 이것은 포장공학에 있어서 대단히 중요한 것이다. 포장에 의해 제공되는 서비스의 수준은 포장의 service-life에 대해 자동차 운전자들이 매일 판단한다. 포장기술자에게 있어서 예상되는 포장공용성에 대한 지식은 포장관리에 대해 결정을 내리는 것과 포장유지계획을 짜는데 필요하다. 재하조건이 알려지면 그러한 정보가 이론적으로 추론된다는 점에 있어서 역학적 포장설계는 특히 유용하다.

포장설계에 있어서 가장 큰 도전중의 하나는 포장을 사용하는 동안에 포장재료의 거동을 면밀히 설명할 수 있는 재료반응을 개발하는 것이다. 이것은 많은 현장의 조건이 실내시험 환경에서 쉽게 반복될 수 없기 때문에 주요한 연구과제가 되어왔다. 실내시험에서 완전하게 모사할 수 없는 요소는 다음과 같은 것을 포함한다. (a) 혼합된 교통하중 (b) 혼합된 재하시간과 휴지기간의 영향 (c) 지역적인 기후조건 (d) 시간-온도 의존성 (e) 여러 파손(distress) 형태의 진행 작용이다.

실내시험의 불충분성과 재료의 공용성모델 외에 환경요소와 교통하중의 정확한 평가부족 그리고 포장재료 특성에 대한 고유의 변수가 또한 존재한다. 재료거동 예측과 포장공용성은 정확하게 예측될 수 없다. 확실적인 접근과 신뢰도 개념이 적용되어야만 할 것이다.

역학적 설계접근방법에서 사용된 일반적인 예측 포장파손모델은 피로균열, 소성변형, 저온균열을 포함한다. SHRP 제 3단계 혼합물 설계에 포함된 파손모델이 있다. 피로균열과 저온균열모델을 만드는데 채택된 일반적인 접근방법은 선택된 온도에서 실시된 실내반복 재하시험으로부터 결정된 재료파라미터와 더불어 crack initiation와 crack propagation theories에 근거를 두고 있다. 소성변형 모델은 일반적으로 실내반복 재하시험으로부터 나온 파라미터를 사용하여 개발되었다. 이들 모델에 있어서 모델 파라미터는 혼합물 설계 특성과 연관성이 없는 역학적 시험으로부터 직접적으로 구해졌다. 완전한 혼합물설계와 반응예측모델을 개발하기 위해 이 영역에서 더 많은 연구가 필요하다.

포장공용성 평가에 있어서 바람직한 요소는 포장의 거칠기(roughness)이다. 포장 거칠기는 AASHO Road Test에서 도입된 포장 serviceability 개념과 밀접한 관련이 있다. 포장 거칠기는 보통의 자동차 운전자에 의해서 평가되는 포장 승차감에 대한 유용한 지침이다. 강성 및 가요성포장설계에서 폭 넓게 사용된 AASHTO 사용성 방정식은 AASHO Road Test의 결과로부터 나온 실험적인 것이다. 연구자들은 교통하중에 의해서 발생된 응력과 변형을 포장 serviceability 공용성으로 연관시키기 위해 여러 번의 시도를 하였다. 이것은 포장 사용성 예측을 위한 분석적-경험적 방법에 의존하는 Ullidtz[1987]의 연구를 포함한다. 교통하중하에서 포장 serviceability 예측을 위한 역학적모델은 완전한 포장설계와 포장관리 체계를 위해 필수적인 요소가 될 것이다.

포장평가 : 고속의 비파괴시험

포장평가는 포장유지와 보수 계획을 수립하는데 있어서 필수적인 요소이다. 포장평가에는 두 가지 주요한 면이 있다. (a) 포장 파손조사와 평가 (b) 구조적 평가이다.

포장 평가를 실시하는데 있어서 특히 고려해야 할 사항은 다음과 같다.



- 비파괴시험은 포장구조물을 불필요하게 파괴하지 않기 때문에 선호된다.
- 교통혼잡은 최소로 유지되어야 한다. : 교통혼잡을 유발하지 않는 시험이 가능하다면 실시되어야 한다.
- 시험속도는 작동상의 요구사항을 충족시키기 위해 실제적인 기간 내에 대표적인 크기의 도로 네트워크를 감당하기 위해 충분히 높아야 한다.
- 시험결과의 평가는 정확하고 신뢰할 수 있어야 하며 역학적 분석에 근거해야만 한다.
- 진행과정과 시험결과의 평가는 작동상의 요구사항을 충족시키기 위해 충분한 시간이 있어야만 한다.

현재의 평가기술과 미래에 포장평가기술에 대한 필요성이 이들 주요한 고려사항과 관련하여 이 절에서 제시될 것이다.

포장 파손(distress) 조사와 평가

포장 파손조사는 유지사업에 대한 필요한 정보를 얻기 위해 도로기관이 정기적으로 실시한다. 파손 조사의 자동화, 파손확인 및 분석은 자료수집과 진행과정의 효율성, 조사의 신속함에 대한 이점때문에 상당한 관심을 끌었다. 고속의 자동화 포장파손조사를 실시하기 위해 장비개발에 있어서 상당한 발전이 이루어졌다. 이것은 일반적인 교통속도에서 실시된 자동화 조사로서 바람직한 것이며, 조사자료의 체계적인 기록과 진행과정을 제공하며 수동식 조사에 의한 주관적인 판단에 따른 불확실성을 제거한다. 현재 상업적으로 이용 가능한 파손조사 장비는 종방향 표면 거칠기, 횡방향 표면단면과 소성변형 깊이, 표면 침하 등을 정상적인 교통속도에서 직접 손으로 측정하지 않고 알아낼 수 있다.

균열, 블리딩, 스트리핑 그리고 다른 표면 침하 등과 같은 표면 결함은 실제 도로 표면의 형상(images)을 칼라 비디오로 녹화함으로써 찾아낼 수 있다. 자동 image processing(영상 처리) 기술이 개발되어 녹화된 도로표면의 형상을 해석할 수 있게 되었다. 파손의 형태, 위치, 범위 그리고 균열의 길이와 폭과 같은 파손 특성에 대한 자료 뿐만 아니라 균열이 발생한 면적 등을 계산할 수 있다.

포장의 균열은 포장공학자들의 관심을 끄는 주요한 파손 형태이다. 디지털 영상처리기술의 출현으로 인해 균열이 발생한 표면과 균열이 발생하지 않은 포장 표면을 자동적으로 구별하는 것이 가능해졌다. 포장유지를 위해서는 균열의 유형을 확인할 필요가 있다. 전문가 시스템이 균열 형태를 분류하는데 사용되어 왔다. 자동 영상 처리기술로부터 얻을 수 없는 균열의 주요 특징은 균열의 깊이이다. 자동화 파손 조사결과와 일부로서 균열의 깊이를 알아내는 데에는 새로운 기술이 필요하다.

실제로 존재하는 모든 파손 평가 시스템에는 확인된 여러 파손에 대한 severity assessment를 가지고 있다. 그러나 그러한 severity rating은 원래의 포장설계와는 관계없이 주관적인 판단에 근거를 둔 것이다. 이것이 단기간의 유지 계획에는 적합한 반면 rating 간에 연결체로서 전적으로 만족스러운 것은 아니며 원래의 설계 원리가 빠져있다. 포장이 경험적인 방법을 기초로 설계된다면 rating 간에 연결을 구축하는 것은 불가능하다. 역학적 설계방법을 사용한다면 rating 간의 연결은 바람직하게 구축될 것이다. 정보와 컴퓨터 기술이 급진전한다면 전체 도로 네트워크 수준에서 이러한 형태의 연결은 머지 않은 미래에 가능할 것이다. 이렇게 된다면 포장설계, 평가, 그리고 유지의 전 과정을 통합할 수 있게 될 것이다.



전문가 시스템과 같은 주관적인 경험과 경험적인 방법에 의존하던 것이 점차적으로 파손 상태의 역학적 평가에 기초를 둔 분석적 평가와 rating으로 바뀌어 질 것으로 예상된다. 다양한 포장 파손의 진행과 파괴 과정에 있어서 이용 가능한 정보가 제한되어 있기 때문에 현재까지 분석적 평가는 불가능했다. 공학적 분석에 근거를 둔 포장 파손 상태를 평가하기에 앞서서 이러한 과정을 더 잘 이해하고 역학적으로 과정을 모델화시키는 능력이 필요하다.

포장의 비파괴 시험

포장의 비파괴 구조 평가에 대한 개념은 1950년대에 잘 알려진 벤켈만빔의 개발과 평판재하시험의 사용에서 그 유래를 찾아볼 수 있다. 포장의 구조적 평가를 위해 알려진 적용하중하에서 포장 표면의 처짐을 측정하는 방법은 1950년대 이래로 지배적인 접근 방법이 되어왔다. 초창기에 비파괴 처짐 측정을 주로 적용한 것은 포장 덧씌우기 설계(캘리포니아 도로부 1972년, 아스팔트협회 1981)를 위해서였다. 전 세계적으로 도로기관과 포장전문가들이 PMS(포장관리시스템)의 필요성에 대한 인식이 점차적으로 증가해감에 따라 포장관리시스템 개념이 도입된 1970년 초에 이러한 형태의 비파괴 표면 처짐 실험에 대한 중요성이 증가되었다.

비파괴 처짐 장비는 수많은 변화를 거쳐왔으며, 더욱더 정교해져 가고 있다. 벤켈만빔 실험의 자동화는 1960년대에 가능했으며 캘리포니아 Travelling Deflectometer La Croix Deflectograph[Kennedy, 1978]는 이 시기에 만들어진 처짐실험장치의 대표적인 것들이다. 1970년대 중반까지 포장관리시스템의 도입으로 필요하게 된 빠르고 생산성 높은 실험장치에 대한 요구는 Dynaflect와 Road Rater[Smith Lytton 1985]와 같은 정상상태 진동실험기의 개발을 가져왔다. 1980년대 말까지, FWD(falling weight deflectometers)는 교통하중을 더 잘 나타내주기 때문에 포장 전문가와 연구자들에게 인정을 받고 인기를 얻고 있다. 그러나 비파괴 시험장비로서 FWD는 두 가지 면에서 완전히 만족스럽지 못하다. 첫째, 하중의 형태는 교통하중과 다르다. 둘째, 실험하는 동안 전체적인 교통속도는 정상교통보다 훨씬 더 낮다.

기술적으로 더욱 발전된 2개의 처짐시험장치가 최근에 연구자들에 의해 개발되고 있다. 하나는 Rolling Weight Deflectometer(RWD)[Briggs 1999]와 레이저가 달린 고속의 Deflectometer이다. RWD는 트레일러가 장착된 기구로 움직이는 상태에서 하중바퀴 아래의 최대 포장 처짐을 연속적으로 측정하는 장비이다. 최근에 이 장치는 50,000파운드의 하중에서 최대속도 6mph 또는 9000 파운드의 바퀴하중에서 20mph의 속도로 처짐을 측정할 수 있다. 50mph의 속도로 작동하는 장치가 개발되고 있다. 20~70km/h 범위의 작동속도에서 연속적으로 처짐을 측정하기 위하여 고속의 Deflectometer가 개발되고 있다. 이 두 장치는 정상 교통속도에서 포장 처짐을 측정하는 장비로서 앞으로도 FWD를 대신할 잠재성을 띠고 있다.

구조적 평가 기술

실험장비의 발전 역사는 최첨단 비파괴 포장 평가기술의 진보를 반영한다. 더욱 발전된 역계산 기술은 처짐 측정치로부터 포장재료의 특성을 평가할 정도로 발전되어 왔다. 초기에 포장 처짐 크기와 bowl의 모양에 기초를 둔 반역학적 방법이 사용되었다.[Wang et al 1978] 그러나 그런 방법은 현대



포장관리 시스템에 적합한 재료의 구조적 특성에 대한 충분한 자료를 제공해 주지 못한다. 역계산은 전형적으로 불충분한 조건인 inverse problem로 해(solution)는 표면 처짐 측정에 있어서 작은 변화에도 민감하다. 문제를 복잡하게 한 여러 개의 해들이 있다. 알려지지 않은 포장재료 인자에 대한 적절한 초기 입력값 선택은 역계산 분석에 있어서 중요한 면이다. 역계산 문제의 공식은 4개의 주요 구성인자로 이루어져 있다. (a) 표면 재하모델 (b) 재료모델 (c) 포장반응모델 (d) 역분석 모델이다.

표면재하모델

적용하중은 정적하중, 동적하중, 진동하중, 혹은 충격하중으로 모형화될 수 있다. 현재 사용중인 대부분의 역계산 알고리즘은 정적하중 모델을 사용한다. 움직이는 하중 또는 동적하중을 모형화하는 것은 더 많은 공식과 계산을 해야하는 것이므로 더 복잡하다. 동적하중 모델을 사용하면 FWD 처짐실험에서 각 처짐 센서에 대한 처짐시간기록이 가능하다. 현재 하나의 실험에서 더 많은 자료를 얻을 수 있으므로 역계산 재료특성에 대한 신뢰감은 상당히 증가한다. RWD와 고속의 Deflectograph와 같은 움직이는 처짐시험 장치의 개발을 예상해 볼 때, 움직이는 재하모델에 근거를 둔 역계산 알고리즘이 적절할 것이다.

재료모델

사실상 사용된 대부분의 역계산 알고리즘은 선형탄성모델의 성질을 띤다. 이들은 대부분의 포장재료에 대한 근사치들이다. 자갈 기층과 보조기층 재료는 응력에 의존적이므로 하중을 받을 때 반응값은 일직선을 이루지 않는다. 모래든 흙이든 노상재료의 거동은 응력에 의존적이며 비선형으로 알려져 있다. 모래질 노상의 계수는 상재하중의 작용하에서 깊이에 따라 증가할 것이다. 반면 점토질 노상토는 하중으로부터 수평거리가 증가하거나 축차응력이 감소함에 따라 증가할 것이다. 한편 하중을 받는 아스팔트혼합물의 반응값은 시간과 온도에 따라 변한다. 더 정확한 처짐측정장치가 앞으로 개발됨에 따라 포장재료의 더욱 정확한 값을 나타내는 것이 필요하다.

포장반응 모델

포장 반응모델은 실험하중하에서 포장 표면의 처짐을 계산하기 위해 역계산 과정에서 필요하다. 일반적으로 재료모델과 표면재하모델에 따라 포장반응 모델은 4가지 유형으로 분류된다. (a) 선형 정적분석 (b) 비선형 정적분석 (c) 선형 동적분석 (d) 비선형 동적분석이다.

선형정적분석은 사실상 가장 폭 넓게 사용되는 과정이다. 이것은 적용의 단순성, 쉬운 해석, 포장반응 컴퓨터 프로그램의 폭 넓은 유용성 때문이다. 움직이는 실제 교통 하중 모델을 가장 근접하게 모사하는 고속의 deflectograph와 같은 새로운 실험장비가 개발된다면 움직이는 하중 모델을 분석하고 통합하는 포장반응모델이 필요하게 될 것이다.

역해석 모델

포장 재료 특성을 계산하기 위한 역해석의 두 가지 일반적인 접근방법이 사용된다. : 역해석과 순해석이다.

역해석은 실제 현장 표면 처짐을 예측하는데 있어서 포장반응식 오류를 최소화하기 위해 방정식 오



류기준을 채택했다. direct back-analysis 접근법은 측정된 표면처짐과 계산된 표면처짐간의 차이 즉 output error를 최소화하는데 그 기초를 두고 있다. 이 접근법은 지금까지 논문에서 발표된 역계산 알고리즘에 사용되었다. 주목할만한 것은 output error가 알려지지 않은 인자의 복잡한 비선형 함수라는 것이며 그 분석적 표현이 확실하지 않을 수 있다는 것이다. 다른 상호간의 연구기술은 계산된 처짐과 측정된 처짐간의 최적의 조화를 이루기 위해 재료 인자값을 얻는데에 사용되어 왔다. 한편 데이터베이스 방법과 회귀 예측모델은 계산시간을 줄이기 위해서 사용될 수 있다. 그러나 데이터베이스 방법과 회귀 방법에 대한 호환성은 비교적 제한적이다. 최근에 여러 back-analysis방법에 대한 상대적인 공용성은 이들의 공식에 있어서 여러 가지 가정이 있을 수 있으며 여러 가지 재료모델을 채택할 수 있기 때문에 직접적으로 비교될 수 없다.

포장관리 : 효과적인 통합 Network level 관리

Network Level Multi-Year Programming

도로 네트워크 수준에서 포장관리의 기본목적은 포장의 투자를 계획하고 포장 활동 계획을 짜서 포장 네트워크 공용성의 최적의 결과를 얻어내는 것이다. 설계에 따라 포장이 제공하는 예상된 service의 수준을 확실히 하기 위해 시기적절한 예방 유지가 실시되어야 한다. 유지와 보수, 교환분석을 포함하여 포장활동을 적절히 계획하고 설계하는 것에 대한 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 다년간에 걸친 도로 네트워크의 포장 유지와 보수계획에 있어서 포장 공학자들은 어떤 도로 구역이 보수되어야 하고 언제 보수가 이루어져야 하며 어떤 보수 조치(즉, 유지나 보수 활동)가 사용되어야 하는가를 결정하는 문제에 부딪히게 된다. 이것은 가능한 여러 가지 보수처리방법과 전형적인 도로 네트워크에서 수 많은 포장 구역에서 생기는 선택 가능한 많은 조합에 기인한 조합의 급증으로 알려진 주요한 문제를 제시한다.

문제의 규모는 단순한 예로 쉽게 설명될 수 있다. m년의 설계기간과 가능한 포장의 결합 유형 n을 생각해 보자. 보수 형태와 시간의 조합에 있어서 포장 구역당 가능한 보수 전략 $m \times 2n$ 이 있다. 네트워크 수준에서 필요한 조합의 총 숫자는 네트워크에서 포장 구역수에 따라 지수적으로 증가한다. 그 이유는 모든 포장 구역 유지에 대한 필요성이 다른 구역의 유지와는 독립적이기 때문이다. r 구역을 갖는 네트워크에 대해 전체 가능한 조합의 수는 $(m \times 2n)^r$ 이다. 이것으로 보아 $r=20$, $m=10$, $n=3$ 을 갖는 작은 지역의 네트워크조차도 전체 조합이 약 1038일 것이라는 것을 알 수 있다. 더 많은 포장 구역과 더 많은 유지처리 유형이 포함되면 이 숫자는 더 커지게 된다.

1970년대 이후로 많은 적정 기술이 사용되어 도로기관이 포장관리를 결정하는데 도움을 주고 있다. 이 기술에는 linear programming[Lytton 1985], integer programming[Fwa et al. 1987], nonlinear programming, heuristic method[OECD 1987]가 있다. 조합의 급증으로 인해 생기는 문제의 규모와 공식의 복잡성 때문의 기존의 적정 기술은 네트워크 수준 포장관리 프로그램 문제를 해결하는데 쉽게 적용될 수가 없었다.

최근에 genetic algorithms은 네트워크수준에서 포장관리 활동을 프로그램화하는 실용적 분석적 도



구로서의 역할을 할 수 있다는 것이 최근에 증명되었다. genetic algorithms은 자연선택과 자연유전학을 기초로 만들어진 최적 기술이다. genetic algorithms은 객관적 함수 공식에서 유연성을 띠며, robust global search capability를 갖는다. 이 기술은 또한 포장관리 활동[Hoque 1999]을 계획하는데 있어서 multi-objective analysis을 효과적으로 분석할 수 있다. 그러나 이렇게 제시된 알고리즘 중 어느 것도 실제 도로 네트워크 시행에 있어서 대규모로 이루어진 적은 없다. 포장 공학자들과 연구자들이 해야 할 일은 도로기관에 의한 다년간 네트워크 수준 포장관리 개념을 전면적으로 이행해야 한다는 것이다.

포장관리 개념에 근거를 둔 공용성

완전한 포장관리 주기는 포장 시공과 유지를 포함하여 포장설계부터 보수까지의 전 과정을 다루어야 한다. 이상적인 포장 설계는 포장 유지와 보수를 결합하여 평가해야 한다. 불행하게도, 이것은 실제로는 매우 드물다. 현재의 모든 포장설계과정은 포장유지와 보수에 필요한 것들에 대한 설계 평가를 요구하지 않는다. 사실상 모든 도로기관의 전통적 포장관리 체계는 그러한 작업을 하도록 만들어지지 않았다. 전형적인 포장관리는 도로기관내에 개별적인 존재로 만들어져 있으며 도로시공 완성 후에 유지활동을 계획하고 설계하는 책임성을 띠고있다. 도로기관의 이용 가능한 자금을 적절하게 활용하지 못하기 때문에 이것은 바람직하지 못하다.

전통적으로 대부분의 도로기관은 조직 내에서 포장유지를 수행한다. 도로기관은 장비를 가지고 있으며 유지작업을 계획하고 수행할 기술자와 유지관리요원을 고용하고 있다. 이것은 때때로 과중한 작업을 조절하기 위한 force account와 결합되어 있다. force account 유지는 단가를 기초로 계약자로부터 노동과 장비를 제공받는 것을 포함한다. 이 두 가지 형태의 유지접근 방법에 대해 우려되는 점은 혁신에 대한 자극이 부족하고 상대적으로 높은 작업상의 비효율성이라 할 수 있다. 세계적으로 도로네트워크의 유지관리를 민영화하거나 계약하는 방향으로 증가추세에 있다.

일반적으로 시행되는 것은 계약 유지에 기초를 둔 최종 결과이다. 이 접근방법에서, 도로기관은 필요한 유지 프로그램과 작업 항목을 내놓고 협상이나 공개입찰을 통해 사업을 수행한다. 계약의 양은 상당히 많을 수도 있고 여러 작업 항목당 단가에 기초를 두고 있을 수도 있다. 공용성 요구사항에 있어서 최종적인 결과는 도로기관이 명시한다. 가장 최근의 접근방법은 계약유지에 근거를 둔 장기간의 공용성으로 계약을 5~10년 혹은 그 이상 연장된 기간동안 계약자에게 맡겨진다. 이렇게 함으로서 계약자는 네트워크 규모를 기초로 정보를 계획하고 잘 활용할 수 있다. 이것은 또한 비용절감, 작업의 능률성과 혁신에 대한 상당한 잠재성을 제시해 준다. 이러한 형태의 계약유지는 앞으로도 더 많은 인정을 받게 될 것이다.

결 론

오늘날 경제활동의 발전으로 인해 질적으로 높은 고속도로 포장의 서비스가 요구된다. 이 논문은 포장 설계, 포장 평가, 포장관리에 있어서 현재 이미 개발된 지식을 고찰해 보았으며, 오늘날 교통 활동의 필요성을 충족시키는데 있어서의 한계성을 검토하였다. 교통하중하에서 포장재료의 거동을 더



잘 이해해야 함은 이미 지적되었다. 그러기 위해서는 포장 재료의 여러 형태를 특징짓는 포괄적인 실험방법과 역학적 설계분석을 위한 더욱 정교한 분석장비가 필요하다.

포장 평가에서 요구되는 개선점들이 또한 확인되었다. 포장 파손 조사는 처음에 설계시 고려되어야 할 사항들과 역학적으로 연결되어 평가할 필요가 있다. 현장 포장의 구조적 평가를 위한 현재의 비파괴 실험장비는 정상교통속도에서 작동하고 동적 하중 개념을 채택한 시험장비로 대체될 것으로 예상된다. 구조적 평가를 위한 정교한 기술이 개발되어야 할 것이다.

포장관리의 이점을 충분히 개발하기 위해서, 다년간 네트워크 수준 포장관리에 맞는 계획과 설계방법이 개발되어야 함이 강조되었다. 마지막으로 계약유지관리에 기반을 둔 장기간 공용성에 대해 기술하였다. 통합된 포장관리개념과 관련하여 그 중요성이 강조되었다. 요약컨데, 포장공학분야는 도전으로 가득찬 흥미로운 미지의 영역으로 향하고 있음이 예상된다. 포장 연구자와 전문가들은 더 신뢰성 있는 실험기술과 새로운 장비의 개발, 더 수준 높은 이론과 분석기술의 개발, 그리고 포장관리의 더 나은 효과적인 기술 개발을 기대한다.