

長岡技術科学大学	○ 学生員	亀山 修一
北海道工業大学	正会員	笠原 篤
北海道大学	正会員	姫野 賢治
長岡技術科学大学	正会員	丸山 暉彦

1. はじめに

現在、舗装の支持力を評価するための非破壊試験の一つとしてFWD（Falling Weight Deflectometer）が用いられており、その解析手法としては逆解析がある。これは、舗装を構成する各層の弾性係数を変動させて、多層弾性理論によって表面のたわみを算出し、測定されたたわみに一致するような弾性係数の組み合わせを求めるものである。しかしながら、初期値の選び方によっては、工学的に意味を解釈できないような弾性係数が求まる場合があり、解が一つだけか否か、いわゆる解の唯一性が問題となっている¹⁾。本研究では各層の弾性係数を広範囲にわたって変動させたときに生じる舗装表面のたわみと基準舗装構造モデルの表面たわみとの平均平方誤差（RMS）を解析することで、逆解析における解の唯一性の検討をおこなった。

2. 解析条件

解析対象の基準舗装構造として、図-1のような3層構造モデルを取り上げ、基準舗装構造とした。多層弾性構造プログラム（ELSA）²⁾を用いて舗装表面のたわみを算出した。このときの荷重条件は実際のFWD測定に対応させるために5tf、載荷半径は15cmとした。舗装厚、ポアソン比を一定としたまま、各層の弾性係数（ E_1, E_2, E_3 ）を広範囲にわたって変動させ、表面たわみを算出し、基準舗装構造に生じる表面たわみとの平均平方誤差（RMS）を求めた。各層の弾性係数は、対数目盛上で0.1ずつ、 $10^2 \text{ kgf/cm}^2 \sim 10^7 \text{ kgf/cm}^2$ にわたって変動させ、合計 $51^3 (=132,651)$ 通りの組み合わせにおけるRMSを求めた。

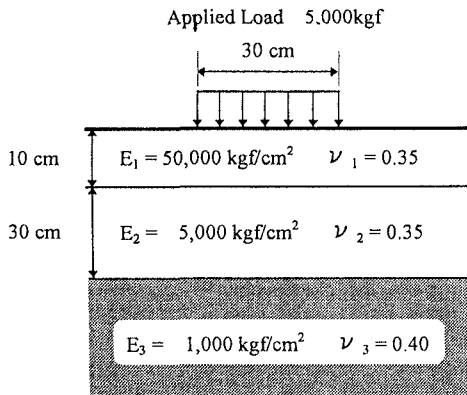


図-1. 基準舗装構造

3. 極小値の抽出

51^3 通りの弾性係数の組み合わせの中で、RMSの極小値を与える弾性係数の組み合わせを抽出するために、各層の弾性係数（ E_1, E_2, E_3 ）から構成される3次元空間において、等しいRMSの値を持つ平面（等RMS面）を描いた。RMSが 1.0×10^{-3} と十分小さいとき、等RMS面は図-2に示すように、基準舗装構造の弾性係数（ $E_1=50,000 \text{ kgf/cm}^2$, $E_2=5,000 \text{ kgf/cm}^2$, $E_3=1,000 \text{ kgf/cm}^2$ ）近傍にのみ存在し、閉じた空間を形成している。したがって、RMSの極小値（この場合は最小値）を与える弾性係数は真値近傍の空間に存在していると考えられる。

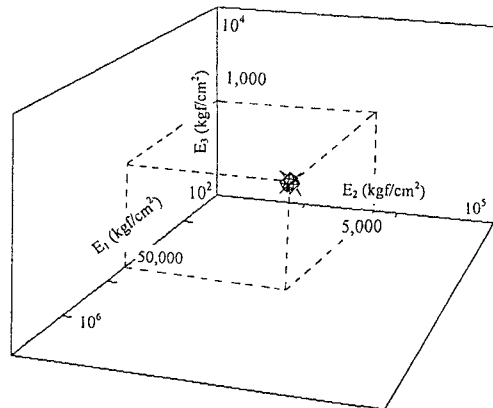
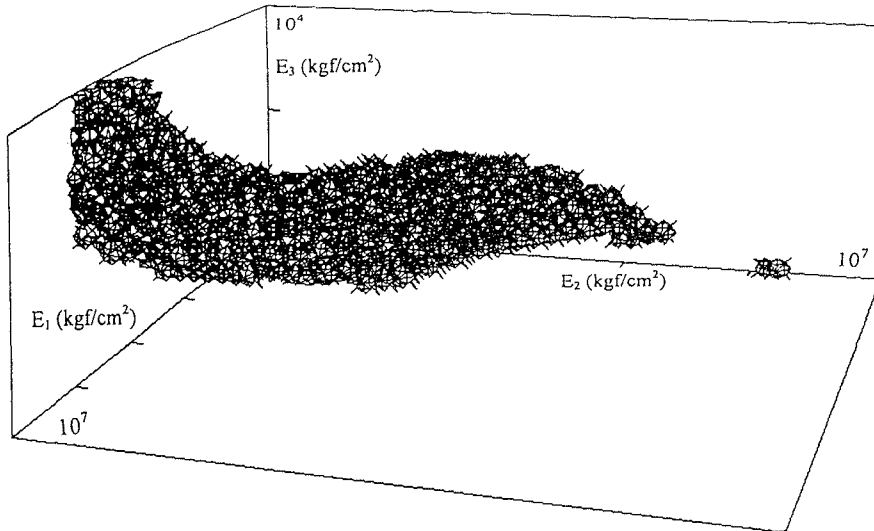


図-2. 等RMS面（ $\text{RMS} = 1.0 \times 10^{-3}$ ）

RMS値を大きくしていくと、等RMS面は基準舗装構造の弾性係数を中心として次第に広がっていく。しかしながら、図-3に示すようにRMSが 1.49×10^{-2} となると、これらとは独立した位置に等RMS面が存在し、閉じた空間を形成している。このときの弾性係数の範囲は E_1 で $1,600 \text{ kgf/cm}^2 \sim 2,500 \text{ kgf/cm}^2$ 、 E_2 で $1.3 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2 \sim 2.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ 、 E_3 で 250 kgf/cm^2 であった。よって、RMSの極小値を与える弾性係数の組み合わせは、基準舗装構造の弾性係数の近傍のみではなく、これとは大きく離れた空間にも存在すると考えられる。

図-3. 等RMS面 ($\text{RMS} = 1.49 \times 10^{-2}$)

4. 逆解析の実行

逆解析により最適な弾性係数を求めるということは、弾性係数が変動しても、RMS値がほとんど変化しない点、すなわちRMSの停留点を求めることである。従って、上記の解析から、極小値が存在すると考えられる空間内の弾性係数を初期値として与え、逆解析をおこなった。逆解析には Layer Modulus Backcalculation Analysis (LMBS)³⁾を採用した。極小値が存在する弾性係数の範囲が狭いため、プログラムの中で算出される弾性係数の増分を小さくし、逆解析における弾性係数の変動範囲が小さくなるようにした。結果を表-1に示す。計算回数が49回目にはRMSがほとんど変化せず、停留点となっていることがわかる。

表-1 停留点におけるRMSと弾性係数

No.	RMS	E_1 (kgf/cm ²)	E_2 (kgf/cm ²)	E_3 (kgf/cm ²)
0	1.459490E-02	1600.0	2000000.0	250.0
1	1.457111E-02	1598.2	2046120.8	247.5
2	1.455286E-02	1603.7	2058804.1	246.7
3	1.453817E-02	1610.6	2062413.9	246.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
47	1.447526E-02	1684.6	2057198.4	245.4
48	1.447526E-02	1684.6	2057191.1	245.4
49	1.447526E-02	1684.7	2057184.5	245.4

また、逆解析により得られた弾性係数は、図-3において得られた極小値が存在する真値近傍以外の空間 (E_1 : $1,600\text{kgf/cm}^2 \sim 2,500\text{kgf/cm}^2$, E_2 : $1.3 \times 10^6\text{kgf/cm}^2 \sim 2.5 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$, E_3 : 250kgf/cm^2) に含まれる。このことより、得られた弾性係数はRMSの最小値（真値）ではなく、極小値（局所解）を与えており、逆解析によって得られる解は唯一解ではないと考えられる。しかしながら、RMSの極小値を与える弾性係数は基準舗装構造の弾性係数とは大きく異なっており、非現実的な値となることから、逆解析で得られた解に工学的な判断を加えることによってこれらの異常な値を棄却できると考えられる。

5. おわりに

本研究で設定した条件では、上記の弾性係数の範囲以外には極小値は存在しなかった。しかし、弾性係数やRMS値を広範囲にわたり、より細かく変動させると、他の領域においても極小値が存在する可能性があると考えられる。

参考文献

1. 亀山、姫野、丸山：舗装体の弾性係数の逆解析における解の唯一性に関する検討、土木学会第49回年講、pp.40-41, 1994.
2. 姫野ほか：パソコン用多層弾性構造解析システム(ELSA)の開発、日本道路会議論文集、pp.338-339, 1989.
3. Himeno, K. Maruyama, T. and Hayashi, M., "The use of FWD Deflection Data in Mechanistic Analysis of Flexible Pavements," Proceedings of 3rd International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Vol.1., The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, July 1990, pp.401-410.