

V-18

遺伝的アルゴリズムを用いた弾性係数の 逆解析による現場弾性係数の推定

北海道大学	正会員	姫野賢治
長岡技術科学大学	学生会員	龜山修一
長岡技術科学大学	正会員	丸山暉彦
北海道工業大学	正会員	笠原 篤
石川工業高等専門学校	正会員	西澤辰男

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)が普及しており、その解析法としては逆解析が広く用いられている。従来、逆解析法としてはガウス・ニュートン法が一般的であり、これを適用した逆解析プログラムとしてはLMBS¹⁾、BALM²⁾などがある。しかしながら、ガウス・ニュートン法を用いて実測値を逆解析する場合、層弾性係数の初期値の与え方によっては、工学的に意味をなしないような解が得られる場合も見受けられる。この原因としてはモデル誤差や測定誤差等の影響が考えられるが、その他逆解析における解が唯一解ではないことから、初期弾性係数の値によっては局所解に陥ってしまう可能性があることが明らかにされている。

本研究ではこのように解の唯一性が保証されない場合の逆解析法として遺伝的アルゴリズム(GA)を適用し、実際に現場においてFWDにより測定されたアスファルト舗装とコンクリート舗装の表面たわみを逆解析し、ガウス・ニュートン法による逆解析結果との比較検討をおこなった。

2.アスファルト舗装の逆解析

1993年3月に建設省土木研究所大型走行試験路内の一地点において測定された7組のFWDデータを用い、LMBSとGAにより逆解析を行った。舗装構造は4層構造とし、Table 1に示す値を各逆解析法への入力条件とした。

LMBSによる逆解析の場合、5番目の測定たわみから推定された逆解析弾性係数はTable 2に示されているように明らかに異常な値となった。このとき、得られた逆解析弾性係数から算出される R_i が他の測定と比べて大きいことから、得られた解は局所解である可能性が高い。

一方、Table 3に示すようにGAによる逆解析の場合、推定された逆解析弾性係数の R_i はすべての測定においてLMBSより小さくなっており、より測定たわみに近いたわみを与える逆解析弾性係数が得られた。さらに、5番目の測定においても、 R_i がLMBSよりも小さくなる逆解析弾性係数が得られた。

Table 1 逆解析の入力条件（アスファルト舗装）

		LMBS	GA
	弾性係数(kgf/cm ²)	50,000	1.0x10 ⁴ ~2.0x10 ⁵
表層	ポアソン比	0.35	0.35
	層厚(mm)	90	90
	弾性係数(kgf/cm ²)	3,000	1.0x10 ² ~1.0x10 ⁴
上層路盤	ポアソン比	0.35	0.35
	層厚(mm)	140	140
	弾性係数(kgf/cm ²)	1,000	1.0x10 ² ~1.0x10 ⁴
下層路盤	ポアソン比	0.35	0.35
	層厚(mm)	220	220
	弾性係数(kgf/cm ²)	100	10~1.0x10 ³
路床	ポアソン比	0.40	0.40
	層厚	—	—

Table 2 LMBSによる逆解析結果（アスファルト舗装）

	反復回数	評価関数 R_i (m)	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	E_3 kgf/cm ²	E_4 kgf/cm ²
1 st	13	2.8378x10 ⁻⁵	30294.3	3601.6	243.6	618.8
2nd	84	2.6168x10 ⁻⁵	33682.3	3378.9	260.0	620.8
3 rd	10	3.7569x10 ⁻⁵	36165.0	3135.6	293.1	587.2
4 th	10	2.7554x10 ⁻⁵	38805.7	3232.9	253.9	613.0
5 th	80	4.7378x10 ⁻⁵	78089.1	158.9	9345.6	577.4
6 th	10	3.3573x10 ⁻⁵	35085.2	3402.6	282.0	594.8
7 th	12	2.4385x10 ⁻⁵	40995.7	3032.7	264.9	613.5
平均	34	3.2771x10 ⁻⁵	43803.8	2723.6	1783.3	601.1
標準偏差	37	8.6968x10 ⁻⁵	17000.0	1264.3	3704.8	17.2

Table 3 GAによる逆解析結果（アスファルト舗装）

	世代	評価関数 R_i (m)	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	E_3 kgf/cm ²	E_4 kgf/cm ²
1 st	1000	1.9090x10 ⁻⁵	33028.5	3263.7	259.2	613.2
2nd	1000	1.7058x10 ⁻⁵	36614.6	3034.8	280.1	611.1
3 rd	1000	2.2158x10 ⁻⁵	37026.0	3064.2	294.8	586.8
4 th	1000	2.1118x10 ⁻⁵	42215.2	2868.6	270.6	607.5
5 th	1000	1.9383x10 ⁻⁵	42344.4	2779.4	295.0	589.9
6 th	1000	2.1867x10 ⁻⁵	36724.6	3228.5	289.3	592.8
7 th	1000	1.6756x10 ⁻⁵	44271.6	2700.7	281.0	608.4
平均	1000	1.9633x10 ⁻⁵	38889.3	2991.4	281.4	601.4
標準偏差	—	2.2920x10 ⁻⁶	4075.3	216.8	13.2	11.1

Table 4 逆解析の入力条件（コンクリート舗装）

		LM BS		GA
		CASE1	CASE2	
表層	E_1 (kgf/cm ²)	350,000	300,000	$1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^6$
	ポアソン比	0.17	0.17	0.17
	層厚 (mm)	322	322	322
上層路盤	E_2 (kgf/cm ²)	3,000	3,000	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^4$
	ポアソン比	0.35	0.35	0.35
	層厚 (mm)	110	110	110
下層路盤	E_3 (kgf/cm ²)	2,000	2,000	$1.0 \times 10^2 \sim 1.0 \times 10^4$
	ポアソン比	0.30	0.30	0.30
	層厚 (mm)	118	118	118
路床	E_4 (kgf/cm ²)	1,000	1,000	$10 \sim 1.0 \times 10^4$
	ポアソン比	0.50	0.50	0.50
	層厚	—	—	—

3. コンクリート舗装の逆解析

コンクリート舗装における逆解析としては1995年5月9日、鹿島道路（株）機械センター内において測定されたデータを用いた。測定は10:00から22:00までの12時間にわたって、2時間毎に、同一地点で行ったものである。8回重錐を落下させたときの測定たわみの平均値を入力たわみとしてLMBSとGAによって逆解析を行った。入力条件をTable 4に示す。

LMBSにおいては、入力するコンクリート層の弾性係数の初期値を350,000 kgf/cm²、300,000 kgf/cm²の2通りに設定し、逆解析に与える影響を検討した。初期値を350,000 kgf/cm²に設定した場合、下層路盤の弾性係数 E_3 の弾性係数が特に大きく変動し、得られた逆解析弾性係数を時間毎に比較することが困難であった。さらに、Table 5中の18:00、22:00の場合のように工学的に解釈できないような解が求まった。

次に、コンクリート版の表面と底面の温度差から生じる版のそりの影響により、日中、コンクリート版中央部では上層路盤との境界付近に空洞が生じ、この時間帯に測定されたFWDたわみから推定される逆解析弾性係数は夜間の測定データから得られる逆解析弾性係数よりも見かけ上小さくなると言われていることから、コンクリート層の弾性係数の初期値のみを300,000 kgf/cm²と小さく設定し、逆解析を試みた。結果をTable 7に示す。得られた逆解析弾性係数はコンクリート層の弾性係数の初期値を350,000 kgf/cm²とした場合とは異なる結果となった。また、いずれの時間帯においても、得られた逆解析弾性係数は設定した弾性係数の初期値近傍の値となっていることから、初期値周辺の局所解に陥っている可能性が高い。

一方、GAによって逆解析を行った場合Table 10のようにLMBSで得られたいずれの解よりも評価関数 R_f が小さくなった。また日中の12:00～16:00におけるコンクリート層の逆解析弾性係数は午前、夜間に

Table 5 LMBSによる逆解析結果
(E_1 の初期値：350,000 kgf/cm²)

時刻	反復回数	評価関数 R_f (m)	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	E_3 kgf/cm ²	E_4 kgf/cm ²
10:00	1000	6.4379×10^{-5}	369727.0	3285.6	2245.6	1072.5
12:00	1	2.6022×10^{-5}	350090.1	2948.6	2012.4	620.8
14:00	58	2.7277×10^{-5}	349806.6	1068.3	604.8	587.2
16:00	27	4.1695×10^{-5}	349315.0	3037.4	2081.6	613.0
18:00	183	1.3907×10^{-5}	327895.1	1695.1	1019280.8	974.4
20:00	922	5.3093×10^{-5}	344415.8	2053.2	1257.2	1223.6
22:00	166	1.3172×10^{-5}	356731.7	2421.3	1213407.9	1052.1

Table 6 LMBSによる逆解析結果
(E_1 の初期値：300,000 kgf/cm²)

時刻	反復回数	評価関数 R_f (m)	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	E_3 kgf/cm ²	E_4 kgf/cm ²
10:00	103	1.3009×10^{-4}	315517.2	1158.1	1176.3	1018.0
12:00	46	4.0449×10^{-5}	304390.9	2343.9	1790.4	1003.1
14:00	19	2.5923×10^{-5}	301891.9	2465.2	1975.0	1001.0
16:00	203	6.0870×10^{-5}	308938.3	2193.1	1597.1	1009.5
18:00	67	1.1997×10^{-4}	306766.5	1927.8	1607.8	1010.3
20:00	318	9.0415×10^{-5}	322142.5	1442.9	1479.3	1152.3
22:00	593	4.7423×10^{-5}	394631.1	1239.3	1620.8	1266.9

Table 7 GAによる逆解析結果

時刻	世代	評価関数 R_f (m)	E_1 kgf/cm ²	E_2 kgf/cm ²	E_3 kgf/cm ²	E_4 kgf/cm ²
10:00	1000	2.5400×10^{-5}	408122.3	3022.4	2536.7	1181.3
12:00	1000	2.5402×10^{-5}	346232.6	3013.4	2133.2	1013.4
14:00	1000	2.5780×10^{-5}	316153.7	2619.2	1925.9	987.2
16:00	1000	2.4284×10^{-5}	353797.2	2708.9	2087.0	1068.7
18:00	1000	1.9306×10^{-5}	374668.2	2822.1	2339.8	1193.5
20:00	1000	1.6148×10^{-5}	389409.8	3488.3	2452.4	1289.2
22:00	1000	1.9724×10^{-5}	426575.0	3365.4	2812.1	1332.0

における逆解析弾性係数と比べると若干小さな値となり、コンクリート版のそりの影響を確認できることから、得られた逆弾性係数は工学的に妥当であると言える。

4. おわりに

逆解析にGAを用いた場合、ガウス・ニュートン法とは異なり、得られる解が初期値に影響されにくいことから、より安定した逆解析弾性係数を推定することができる。

参考文献

- 1) 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, pp.401-410, 1990.
- 2) 松井邦人、井上武美、三瓶辰之：舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法、土木学会論文集, No.420/V-13, pp.107-114, 1990