

国際ラフネス指数による橋梁伸縮装置近傍の路面形状の評価

Evaluation of Road Surface Profile near Expansion Joint of Bridges by Using International Roughness Index

山田靖則*, 川谷充郎**

Yasunori Yamada and Mitsuo Kawatani

*博(工) 高田機工(株)技術研究所 所長代理 (〒654-0111 和歌山県海草郡下津町方 1375-1)

**工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

So far it has been considered that road surface profile affects largely dynamic effects of bridge superstructures, for example reaction forces. In the road surface profiles, the road surface gap near expansion joint has been paid attention to. Recently it has been made clear analytically that road surface unevenness with wave length of several meters in front and behind of expansion joint affects dynamic reaction concerned with management criteria along vehicle moving direction of bridge pavement. However the dynamic effects for dynamic reactions are very various regard on unevenness length and pattern, unevenness height and vehicle velocity. Therefore the management criteria on such pavement unevenness has not been presented up to now. Authors investigate an evaluation procedure of this road surface profile near expansion joint at girder end by using International Roughness Index (IRI). In this paper, a management criteria on pavement unevenness under construction and maintenance of bridges is presented.

Key Words: IRI, road surface profile, dynamic response analysis, dynamic reaction

キーワード: 国際ラフネス指数, 路面プロファイル, 動的応答解析, 動的反力

1. まえがき

走行車両による道路橋上部構造への動的影響は路面凹凸によって引き起こされるものが大きく、とりわけ伸縮装置近傍の路面形状については路面段差が着目されてきた。桁や床組、床版に対する衝撃係数は最大で0.4であるのに対し¹⁾、伸縮装置に対する衝撃係数は、伸縮装置やその近傍の路面段差を考慮して、道路橋伸縮装置便覧において1.0が採用されている²⁾。しかし近年、路面舗装の施工あるいは維持における形状管理に関連して、伸縮装置の前方あるいは後方の比較的長い区間の路面凹凸形状(路面プロファイル: road surface profile)が車両接地力、すなわち上部構造の応答としての動的反力に大きく影響することが分かってきている^{3)~6)}。この影響は動的応答解析によって調査されており、路面の形状パターンや車両の走行速度をパラメータとして、この応答の評価が試みられている。しかし、これらのパラメータによる評価は、車両の走行速度とも関連して、応答値そのものやその傾向のばらつきのため困難なものとなっており、これらを包含する、当該箇所の路面プロファイルの管理値を提案するに至っていない。

本研究では、路面形状の不陸長さやその間の不陸量によってデータを評価するのではなく、これら不陸形状の全体あるいは部分的評価を可能とする、路面プロファイルのラフネス形状管理として国際的に使用されつつある、

レスポンス型ラフネス指数である「国際ラフネス指数(International Roughness Index: 以下 IRI と略称する。)」を用いてこの路面形状を評価する。その結果から、桁端伸縮装置近傍の路面形状管理値を提案するものである。

なお、本論文では研究対象である比較的長い区間(数 m)での路面形状の変化を「路面不陸(road surface unevenness)」と表現し、いわゆる「路面凹凸(road surface roughness)」や伸縮装置の前後や舗装のポットホールのように局部的な路面高さの変化「路面段差(road surface gap)」と区別している。

2. 評価量としての橋梁上部構造の動的応答

本研究における評価量として、既往の研究^{3)~6)}と同様に上部構造の動的反力を選定する。これは、この路面形状に起因する上部構造の応答の影響が橋脚を伝搬して地盤振動に与える影響を考慮するためである。この動的反力を求めるための、走行車両による橋梁上部構造の動的応答解析は、これまで、筆者等が用いてきた解析プログラムを使用する⁷⁾。しかし、各桁の動的反力にそれぞれに着目することはデータ処理上煩雑になるだけであるので、ここでは各桁の動的反力を合計し、一支承線における合計動的反力を取り扱う。なお、本研究で使用する解析プログラムは文献⁷⁾のものから、車両の接地力が負になったときは接地力が0となるよう改良されている。

3. 走行車両による橋梁の動的反力の解析

3.1 解析モデル

解析対象橋梁として支間長 26.3m の単純プレストレスコンクリート I 桁を選定する。構造諸元を Table 1 に示す。

(1) 構造モデル

対象橋梁を Fig.1 に示すように床版を板要素とする格子構造にモデル化する。壁高欄は床版の両側に梁要素として考慮する。

(2) 車両モデル

車両モデルは Fig.2 に示す、筆者等がこれまで用いてきた三次元車両モデルを用いる。車両の諸元は Table 2 に示すとおりである。ここで、25tf 車両を使用していないのは、標準的な車両モデルが道路橋示方書等で示されていないことによる。

車両走行位置は追越し車線とし、車両走行速度は緩速走行車から高速走行車までを考慮し $v=40, 60, 80, 100\text{km/h}$ の 4 種類とする。車両走行位置は Fig.1 に示してある。

3.2 路面プロファイル

路面プロファイルは式(1)で示される路面凹凸スペクトルを用いてシミュレーションにより生成させる。

$$S_r(\Omega) = \frac{\alpha}{\Omega^2 + \beta^n} \tag{1}$$

伸縮装置前後の路面不陸による車両応答を強調させるため、平滑パラメータ α はできるかぎり小さくし、舗装施工直後の路面凹凸の実測値を参考にして $\alpha=0.003$ とする。 β および n はそれぞれ 0.02, 2.5 とする。左右輪位置での路面プロファイルは乱数によって異なったものとしている。このパラメータを用いて発生させた路面プロフ

ァイルを基本路面という。

伸縮装置前後の路面不陸は Fig.3 に示す 4 つのパターンを考え、 l を 2m, 4m, 5m に、 δ を 10mm, 20mm, 30mm に変化させる。路面不陸の基本形状は sin 半波である。これにより、車両走行速度の変化と合わせ、解析するケース数は 148 ケースとなる。

3.3 解析結果

車両進入側動的反力の時系列例を各路面形状パターンごとに Fig.4 に示す。これらより、解析の結果を動的反力(車両自重による反力+変動反力)の最大値に関して Fig.5

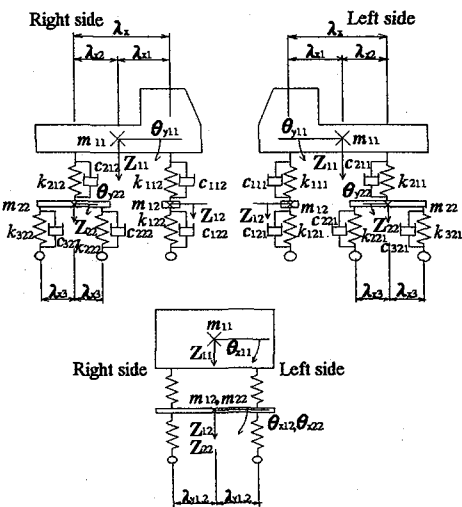


Fig.2 3-dimensional vehicle model with 8-degree-of-freedom

Table 2 Properties of model vehicle

Items	Unit	20tf dump truck
Distance between front axle and rear axle (λ_{12})	m	3.880
Distance between tandem axles ($2\lambda_{13}$)	m	1.310
Tread ($\lambda_{11}, \lambda_{22}$)	m	1.860
Mass of vehicle body (m_{11})	t	18.0
Mass of front axle (m_{12})	t	0.5
Mass of rear axle (m_{22})	t	1.5
Spring constant of vehicle body at front axle	tf/m	168.0
Spring constant of vehicle body at rear axle	tf/m	485.0
Spring constant of tire at front axle	tf/m	1030.0
Spring constant of tire at rear axle	tf/m	1495.0
Natural frequency of vehicle body	Hz	3.0
Natural frequency of tire	Hz	10.0

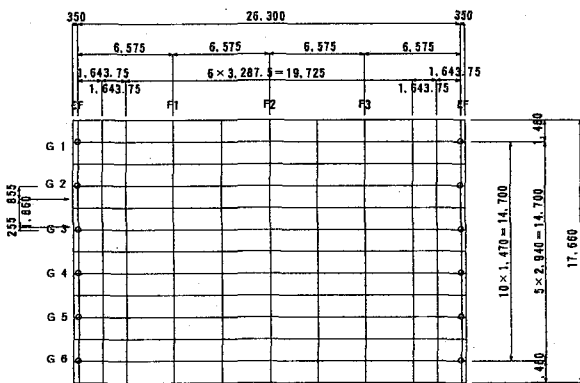


Fig.1 Analytical model of bridge

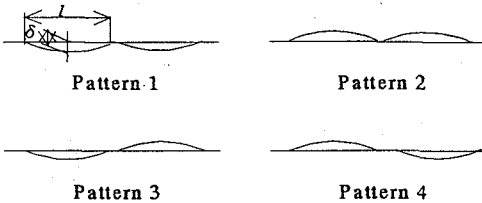
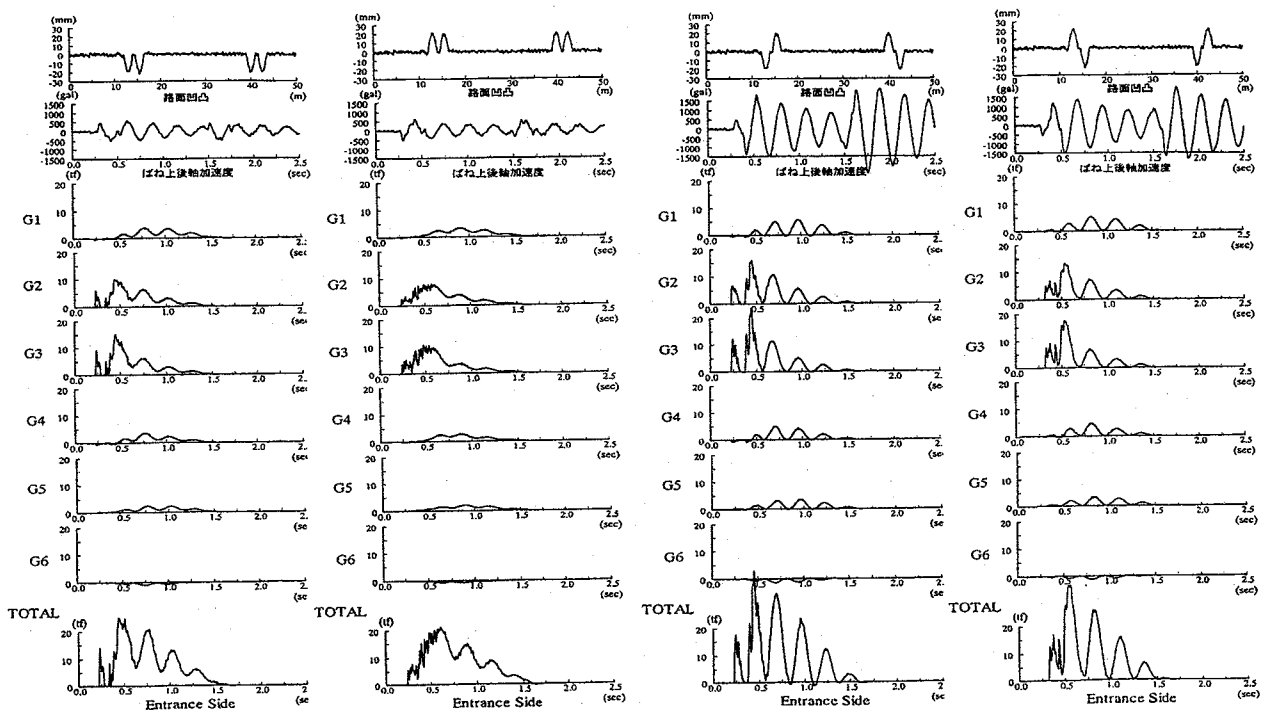


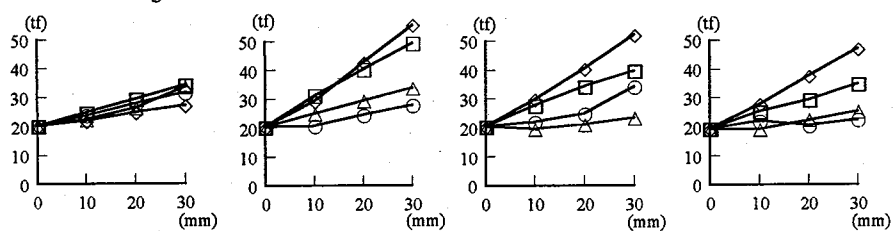
Fig.3 Patterns of road surface unevenness



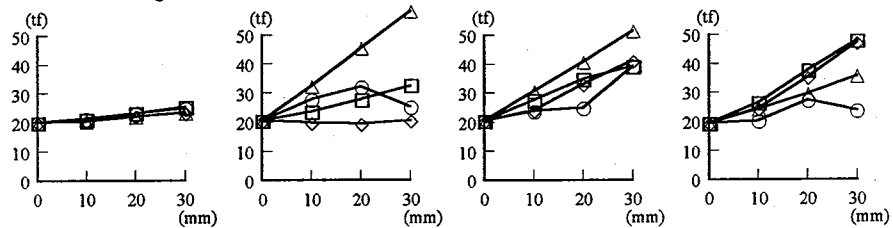
a) Unevenness -,- b) Unevenness +,+ c) Unevenness -,+ d) Unevenness +,-

Fig.4 An example of dynamic reaction at vehicle entrance side ($v=80\text{km/h}$, $l=2.0\text{m}$, $\delta=20\text{mm}$)

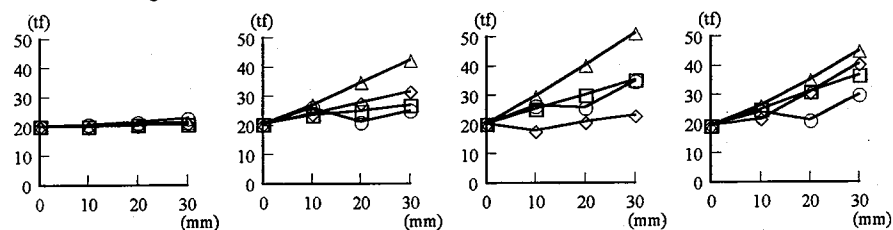
Unevenness length 2m



Unevenness length 4m



Unevenness length 5m



a) $v=40\text{km/h}$

b) $v=60\text{km/h}$

c) $v=80\text{km/h}$

d) $v=100\text{km/h}$

Remarks : X-axis : Level of unevenness, Y-axis : Reaction force

○ Unevenness profile -,- (Pattern 1), △ Unevenness profile +,+ (Pattern 2),
 ◇ Unevenness profile -,+ (Pattern 3), □ Unevenness profile +,- (Pattern 4)

Fig.5 Relations of reaction forces at entrance side, unevenness lengths, unevenness heights and vehicle velocities

に示す。これら解析結果から分かることは以下のとおりである。

- ① 不陸量が大きくなると当然のことながら、動的反力も大きくなる
- ② 同じ車両速度に対しても路面形状のパターンによって動的反力には大きな差が見られる。とくに不陸形状が伸縮装置の前後で異なる場合に顕著であり、本解析では路面不陸を考慮しないときの3倍以上の動的反力の発生が見られる。
- ③ 車両速度の増大が一概には動的反力の増大には結びつかない。
- ④ 車両進入側の動的反力は車両の進入時に最大となる。しかし、Fig.4 には示していないが、車両退出側の動的反力は上部構造の振動の影響を受け、退出時に最大となるとは限らない。またその際、 $V=100\text{km/h}$ の場合以外は進入側動的反力の最大値の方が大きい。 $V=100\text{km/h}$ の場合でも進入側動的反力の最大値との差はそれほど大きくない。

Fig.5 からは、各種パラメータによって動的反力の傾向が異なるため、解析結果を評価することは困難である。

4. IRI による評価の方法

4.1 IRI

国際ラフネス指数 (IRI) は、すでに国内においては文献 8) および 9) において詳しく紹介されているのでここではその概要を述べるにとどめる。

IRI はレスポンス型の路面プロファイルの評価方法であり、クォータカーシミュレーション (QC シミュレーション) とよばれる手法で計算された指数である。

IRI の算出方法には4種類の方法がある。ここではクラス 2 といわれる「任意の測定装置で縦断プロファイルを測定し、QC シミュレーションにより IRI を算出する。」方法に準拠し、縦断プロファイルの測定値の代わりに、3.2 で算出するシミュレーション値を利用する。

QC シミュレーションでは Fig.6 に示すクォータカーモデル (QC モデル) を用いて、このばね上質量とばね下質量の間の相対的変位が求められる。IRI はこの累計を評価するプロファイル長さ (以下評価長という) L で割って基準化した量である。すなわち、IRI は式(2)として与えられる。

$$IRI = \left\{ \int_0^{L/V} |\dot{z}_s - \dot{z}_u| dt \right\} / L \quad (2)$$

ここに、 $\dot{z}_s, \dot{z}_u$ はそれぞればね上およびばね下質量の変位速度であり、 V は QC シミュレーションにおける走行速度 ($=80\text{km/h}$) である。

文献 8) によれば、IRI を算出するためのプロファイル長は 0.1mile (160m) が普通であるとされているが、IRI を局所的に利用する際には IRI 算出のための標準の

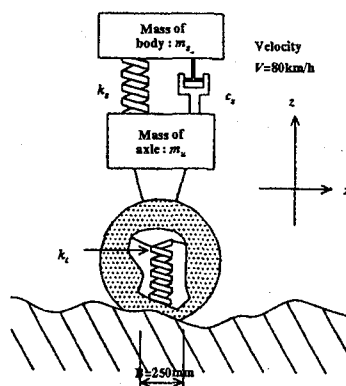


Fig.6 Quarter car model

長さを決めるべきである、としている。そのため、ここでは評価のための長さは伸縮装置の両側にそれぞれ 5m, 4m, 3m, 2m とすることで適切な評価長さを決定する。さらに、参考のために橋梁区間を含む長さ 50m に対しても IRI を計算する。この IRI の計算には UMTRI (University of Michigan Transportation Research Institute) が作成したプログラム (IRIANDRN) を使用する。このプログラムは UMTRI のホームページからダウンロードできる。

なお、文献 8) および 9) 中の QC モデルの状態方程式中のマトリックス A の 1 行目 $\{1, 0, 0, 0\}$ は $\{0, 1, 0, 0\}$ の誤りであるので、注意されたい。

4.2 路面モデルの IRI による評価

IRI の計算結果を Table 3 に示す。Table 3 における Profile 列の数字の意味は、4 桁目が不陸長さ、3, 2 桁目が不陸高さ、1 桁目が Fig.3 に示すパターンである。IRI-AV は車両の左側車輪位置での IRI-L と、右側車輪位置での IRI-R の平均値であり、二つのプロファイルに対する IRI の求め方として認められたものである。Table 3 によれば、IRI は δ が大きくなれば大きな値をとることが分かる。また、路面形状のパターンに対しては、 L が 2m のとき以外は大きな変動はみられない。評価長さの違いに対しては大きな差はないものの、 L, δ により微妙な差が認められる。

4.3 IRI による動的反力の評価

動的反力の解析結果を、IRI を横軸に、動的反力を縦軸にとって各車両走行速度、評価長さごとに Fig.7 に示す。

図から車両速度が 40km/h の場合は IRI に対する動的反力のばらつきはさほど大きくないが、60km/h 以上になると動的反力は大きくばらつくことが分かる。しかし、各 IRI に対する動的反力の最大値はどの評価長さと車両速度をみてもほぼ直線になる。この傾向を利用して、この直線とある評価値、例えば基準路面における動的反力の n 倍値、との交点から管理値としての IRI を推定することが

可能である。

ここでは、車両の進入による衝撃的な動的反力に着目する。道路橋の諸基準類を参考にし、かつ、供用後の路面プロファイル管理を考慮して、反力の衝撃係数を0.4および1.0とした場合のIRIについて検討する。すなわち、静的活荷重反力の最大値に対する係数を1.4および2.0とする。対象橋梁の場合、モデル車両に対して静的活荷重反力は19.6tfであるので、これらの設定値はそれぞれ27.4tf（Fig.7中の点線）および39.2tf（Fig.7中の実線）である。この設定値に対するIRIは、評価長に対しては大きな変動はなく、車両の走行速度によって変化する。Fig.7より衝撃係数を0.4とすればIRIは2.0以下となり、管理値としては非常に厳しいものとなる。

これに対し、衝撃係数を1.0とすれば、車両の走行速度が60km/h、80km/h、100km/hに対しIRIは各評価長ごとの平均でそれぞれ3.83、4.16、4.99であり、管理値として妥当なものと思われる。この結果から最も厳しく評価すればIRI=3.83となり、この値とTable 3とを対比すれば、

解析した路面プロファイルと車両走行速度を包括する評価長（ L ）とそれに対する不陸量（ δ_1, δ_2 ）は、すべての不陸パターンに対してそれぞれ2mと10mmという値となる（Table 3中の網掛け部）。

伸縮装置の幅を考慮すれば、伸縮装置をはさんで長さ約4.5mに対して片側10mmの不陸が伸縮装置付近の舗装

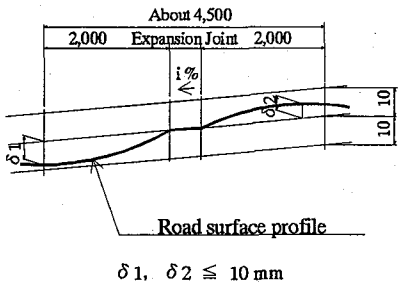
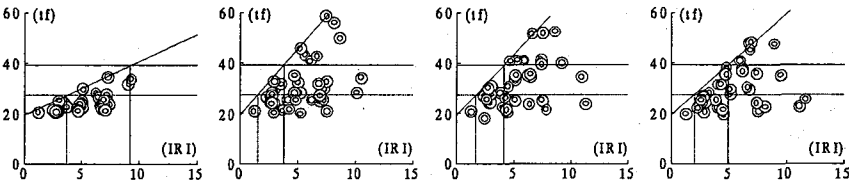
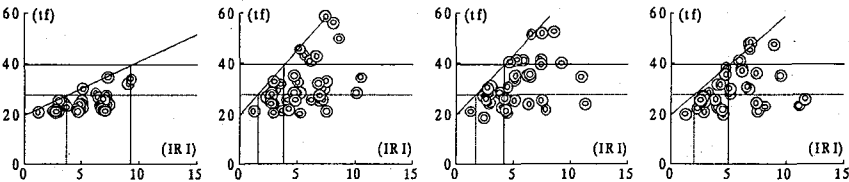


Fig.8 Management criteria of road surface profile

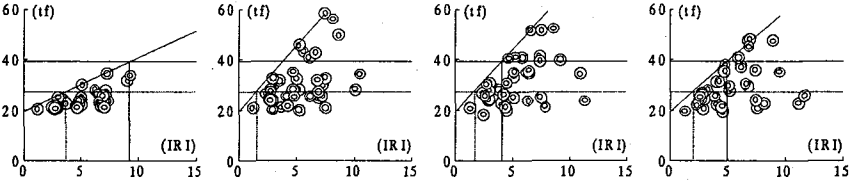
Evaluate Length $L=2\text{m}$ (oneside)



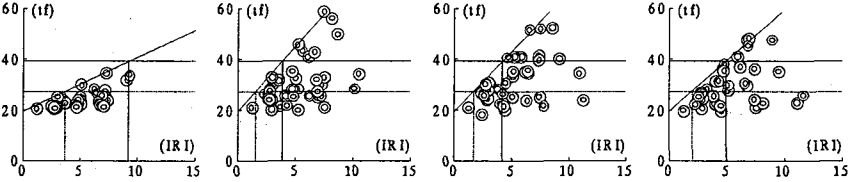
Evaluate Length $L=3\text{m}$ (oneside)



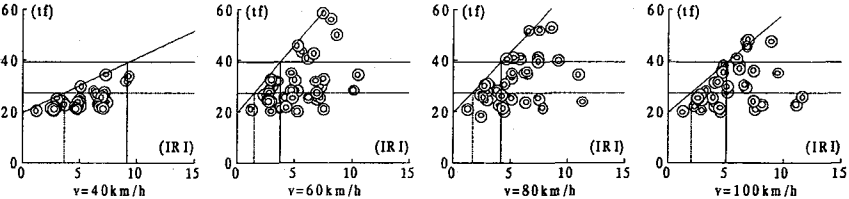
Evaluate Length $L=4\text{m}$ (oneside)



Evaluate Length $L=5\text{m}$ (oneside)



Evaluate Length $L=50\text{m}$



Remark ◎: reaction force at vehicle entrance side

Fig.7 Relations IRI vs. reaction force

Table 3 IRI of various road surface profiles

Evaluate length	$L=50\text{m}$	$L=5\text{m}$	$L=4\text{m}$	$L=3\text{m}$	$L=2\text{m}$
Profile	IRI-AV	IRI-AV	IRI-AV	IRI-AV	IRI-AV
0000	1.24	1.26	1.30	1.33	1.36
2101	3.48	3.78	4.07	4.11	3.02
2102	3.73	4.16	4.45	4.64	3.75
2103	2.95	3.08	3.22	3.35	2.64
2104	3.06	3.60	3.83	3.95	3.18
2201	6.28	6.95	7.53	7.63	5.45
2202	6.52	7.33	7.89	8.15	6.18
2203	5.09	5.62	5.92	6.15	4.60
2204	5.17	6.14	6.53	6.75	5.14
2301	9.13	10.13	10.99	11.15	7.88
2302	9.36	10.51	11.35	11.68	8.61
2303	7.25	8.17	8.63	8.95	6.55
2304	7.32	8.68	9.24	9.55	7.09
4101	2.82	2.82	2.89	2.95	2.68
4102	2.92	3.02	3.05	2.98	2.88
4103	2.86	2.99	2.95	2.69	2.50
4104	2.75	2.97	2.98	2.86	2.52
4201	5.02	5.05	5.15	5.18	4.67
4202	5.12	5.25	5.30	5.19	4.84
4203	4.95	5.26	5.18	4.72	4.20
4204	4.83	5.24	5.22	4.87	4.19
4301	7.28	7.29	7.42	7.46	6.70
4302	7.39	7.50	7.58	7.45	6.85
4303	7.09	7.55	7.44	6.81	5.95
4304	6.99	7.54	7.49	6.94	5.92
5101	2.55	2.42	2.41	2.58	2.47
5102	2.75	2.81	2.77	2.84	2.76
5103	2.77	2.71	2.52	2.35	2.30
5104	2.78	2.79	2.64	2.62	2.44
5201	4.53	4.31	4.29	4.55	4.33
5202	4.76	4.75	4.69	4.83	4.63
5203	4.90	4.75	4.40	4.13	3.89
5204	4.73	4.86	4.53	4.38	4.02
5301	6.60	6.27	6.26	6.64	6.30
5302	6.84	6.71	6.64	6.88	6.57
5303	7.10	6.85	6.37	6.00	5.60
5304	7.13	6.96	6.48	6.22	5.68

プロファイルの管理値として提案できる (Fig.8)。

5. 結 論

伸縮装置近傍の比較的長い範囲の橋軸方向路面プロファイルに対して、路面不陸長さ、不陸量、路面不陸パターン、車両走行速度のパラメータを変化させて車両走行シミュレーションを行った。シミュレーションによる動的反力の解析結果を、この路面プロファイルを各種の評価長に基づいて算出した IRI によって評価することを試みた。その結果は以下のとおりである。

- ① 動的反力は設定したパラメータに対してかなりばらつき、すべてのパラメータに対して統一的に評価することは困難である。
- ② IRI は路面パターンによって大きく変動するが、評価長さに対する変動は比較的少ない。
- ③ 動的反力を IRI で評価すると、車両走行速度が 40km/h の場合はそれほど大きなばらつきはないが、60km/h 以上になるとばらつきが大きくなる。
- ④ しかし、IRI に対する動的反力の最大値は一次関数として評価でき、動的反力の増加量を設定すれば、管理指標としての IRI を定めることが可能である。
- ⑤ 動的反力の増加率（衝撃係数）を道路橋伸縮装置便覧に基づいて 1.0 とすれば、IRI は車両の走行速度によって 3.83~4.99 となる。いちばん IRI が小さくなる IRI=3.83 を路面プロファイルに換算すれば、評価長さ片側 2m（伸縮装置を挟む長さとして 4.5m 程度）で不陸量は片側 10mm となる。この値を舗装の施工時あるいは維持管理時の管理値として提案する。

謝 辞

動的反力の解析は当時大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻の川木秀昭君（現川崎重工業㈱）が行った。また、クォーターカーモデルの状態マトリックスの確認には建設省土木研究所舗装研究室の東嶋さんの手を煩わした。誌面を借りてお礼申し上げる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，平成 8 年 2 月。
- 2) 日本道路協会：道路橋伸縮装置便覧，昭和 58 年 11 月。
- 3) 米田昌弘，徳永法夫：路面上の緩やかな段差によって誘起される橋梁交通振動に対する解析的考察，鋼構造論文集，Vol.7，No.25，pp.79-87，2000.3。
- 4) 徳永法夫，西村 昂，米田昌弘，薄井王尚：高架道路橋の路面段差の管理と交通振動の低減に関する研究，第 18 回交通工学研究発表会論文報告集，pp.109-112，1998.11。
- 5) 阪神高速道路公団，(財)災害科学研究所：弾性支承化・桁連結化が周辺環境に与える影響に関する研究（第二部），pp.21-28，1998.3。
- 6) 川谷充郎，川木秀昭，徳永法夫：伸縮継手近傍路面凹凸の道路橋交通振動への影響，土木学会第 54 回年次学術研究会講演概要集，I-B203，1999.9。
- 7) 川谷充郎，山田靖則，嶽下裕一：三次元車両モデルによる桁橋の動的応答解析，土木学会論文集，No.582/I-42，pp.79-86，1998.1。
- 8) Michael R. Sayers (著)，笠原 篤，関口幹夫，加藤昌太郎 (訳)：道路縦断プロファイルからの IRI の算出（上）（下），舗装，31-7，pp.21-27，1996.7.，31-8，pp.12-17，1996.8。
- 9) 東嶋奈緒子，池田拓哉：舗装の平坦性測定手法の検討，土木技術資料，40-12，pp.50-55，1998.12。

(2000 年 9 月 14 日 受付)