

RC 床版の二方向の劣化度に関する一考察

A Study on Tow-way deterioration Ratio of Reinforced Concrete Slabs

佐藤貢一*, 金田尚志**, 吉川弘道***, 小玉克巳***

Kouichi SATOH, Hisashi CANADA, Hiromichi YOSHIKAWA and Katsumi KODAMA

*奈良建設(株) 技術研究所 (〒222-0033 横浜市港北区新横浜 1-13-3)

**武蔵工業大学大学院生 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒158-0087 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

***工博 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科 (〒158-0087 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

Since about 1965, deterioration of reinforced concrete slabs of high way bridges have become a serious subject for civil engineers in Japan. Those damages are considered as fatigue due to a rapid increase of traffic load and volume. Therefore, design specifications for slabs have been frequently revised according to the surveys of cause for deterioration. Recently, the design live loads for high way bridges were increased from TL-20 to B-type load system from many experiences of bridge deterioration and demands by vehicle production parties. The revise has again increased the tendency of reinforcing works. It is important things that strengthened method have to be selected by deterioration level. Therefore understanding of deterioration level is important. Deterioration ratio has been determined by deflection and crack density of RC slabs. The deflection of RC slab is influenced by two-way moment of inertia, which are longitudinal section and right-angled section. In this study deflection of RC slabs was calculated using two-way moment of inertia. Relationship two-way moment of inertia and deterioration of RC slabs is confirmed. In addition this Relationship is verified by measured value of high way bridge.

key words : reinforced concrete slab, deterioration, damage, fatigue, tow-way moment of inertia

1. まえがき

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下床版と略記)の損傷が昭和40年代初頭より問題となり, 床版損傷機構の解明や損傷への対策に関する調査研究が行われてきた¹⁾. 床版損傷機構は車両の走行による配力鉄筋断面に作用するせん断力とねじりモーメントの交番により, 橋軸直角方向に貫通ひびわれが生成され, ついでより状化した主鉄筋断面がせん断破壊に至るものであり, 過程の複雑さから広義の疲労現象と言われる^{2, 3)}. さらに橋面からの雨水のひびわれへの浸透が床版の疲労損傷を促進させることが明確にされた³⁾. これらの損傷原因の解明や多くの調査研究により道路橋示方書等の床版設計基準が改訂されてきた.

したがって改訂以前に施工された床版は現行床版に対して床版厚さ, 鉄筋量等が不足し, 疲労損傷対策として各種床版補強が施されてきた.

また平成5年には交通荷重の上限規制が緩和され, 設計荷重が従来の TL-20 荷重(床版設計軸荷重 8t) から B 活荷重(床版設計軸重 20t=軸荷重 10t) に変更され, 今後

さらなる床版補強対策工の開発が必要となった.

損傷した床版の補強を行うにあたり, 床版の損傷度を的確に把握し補強対策を検討する必要がある. しかし, 床版の損傷過程は前述したように複雑で劣化損傷レベルを十分に把握し, 補強工法の選定が行われているとはいえない. 松井らは床版の劣化度をひびわれ密度とたわみ量から定量的に定義し, 定義した劣化度から使用限界状態を提案している³⁾. この提案では床版たわみ量が床版断面の引張側を無視した RC 断面のたわみ量に達したときに使用限界としている. 床版は橋軸方向と橋軸直角方向の二方向の剛性を有していることから, 本研究ではこの二方向剛性を変化させ床版のたわみ量と劣化度の関係をより明確に判断することを試みた. また, 実橋の計測データを基に床版の二方向剛性を算定し, 本手法の確実性を照査した. 計測は補強前と床版下面増厚工法により床版補強を施した後で実施し, 補強後の劣化度の変化についても検討を実施した.

①一方向ひびわれの発生 ②二方向ひびわれの発生 ③二方向ひびわれの発達 ④抜け落ち
細網化

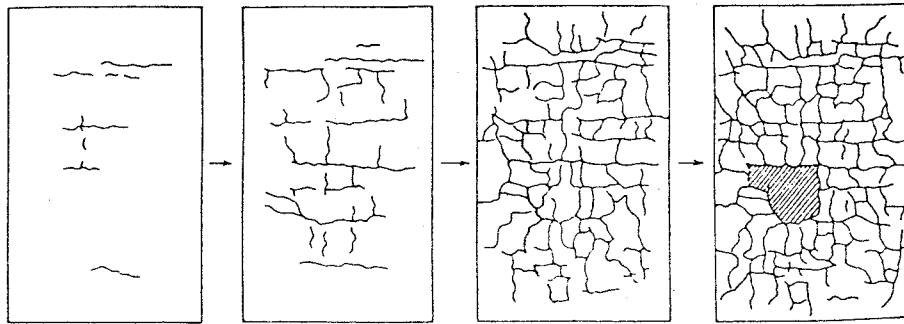


図-1 床版の劣化過程³⁾

2.床版劣化のメカニズム

道路橋床版は直接交通荷重を受ける構造部材であり、薄版構造であることから、活荷重応力の繰り返し載荷が損傷要因に及ぼす影響は大きい。また、過積載車両の通行や通行量の増大、さらには RC 床版のひびわれ内に浸透した雨水による疲労耐久性の低下も指摘されている。以下に床版の劣化過程と劣化メカニズムを示す^{4, 5)}。

2.1 床版劣化の過程

床版の劣化過程を図-1 に示す。鋼桁に拘束されている床版はコンクリートの乾燥収縮や、温度変化により桁方向の引張力が発生し、輪荷重による曲げモーメントも重なり最初に主鉄筋方向の一方向ひびわれが発生する。特に昭和 42 年の床版設計に関する道路局長通達が出される以前に設計された床版では配力鉄筋が極度に少ないため、ひびわれ幅も大きなものとなっている。主鉄筋方向のひびわれの発生により、床版は等方性版から異方性版へと変化し配力鉄筋方向の曲げモーメント負担率の低下により、配力鉄筋方向のひびわれが発生する。この二方向ひびわれの発生後、二方向ひびわれが発達し亀甲状化する。二方向ひびわれは輪荷重の繰り返し作用による曲げモーメントやねじりモーメントの繰り返しにより貫通ひびわれとなる。貫通ひびわれの発生により疲労耐久性は著しく低下し、床版下面には遊離石灰が発生する。ひびわれは輪荷重の繰り返しにより開閉やこすり合わせ現象が生じ、ひびわれの角落ちが生じ、やがて陥没や抜け落ちが生じる。

2.2 床版劣化のメカニズム

輪荷重走行試験機による疲労実験から、床版の疲労破壊の原因は輪荷重の走行によるねじりモーメントと配力鉄筋断面に作用する垂直せん断力が交番することによる広義の疲労破壊であると考えられている。これらの断面力により床版は橋軸直角方向に貫通ひびわれが発生し、橋軸方向にはりが並んだ状態になり、最終的にはりがせん断破壊することが検証されている³⁾。

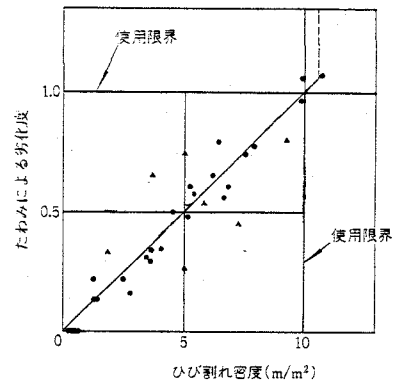


図-2 ひびわれ密度と劣化度の関係³⁾

2.3 床版劣化と使用限界条件

1)ひびわれ密度とたわみ量の関係

車両走行による床版の劣化進行はひびわれの進展により床版剛性が低下し、床版の弾性たわみ量がコンクリート全断面有効から引張側コンクリートを無視した状態のたわみ量へと増加する。この弾性たわみ量と劣化度との関係を式(1)に示す。弾性たわみ W が引張側コンクリートを無視した断面の理論たわみ量となった時が劣化度 $D_s = 1.0$ となり、このときを使用限界と定義している。

$$D_s = (W - W_0) / (W_c - W_0) \quad (1)$$

W :弾性たわみ量

W_0 :全断面有効とした場合のたわみ量

W_c :引張側コンクリートを無視とした場合のたわみ量

松井らは床版の劣化度とひびわれ密度の関係を図-2 に示すグラフで表わした³⁾。この床版の劣化度とひびわれ密度の関係は相関関係にありひびわれの進展により床版剛性が低下していることが分かる。

2)二方向床版の剛性

床版の剛性は橋軸方向と橋軸直角方向の二方向の剛性があり、床版の劣化度を判定する場合二方向の剛性を考慮したたわみ量の算定が必要であると考えられる。床版たわみ量は同一たわみ量であっても二方向剛性は様々な

表-1 道路橋示方書の改訂と二方向剛性比

道路橋示方書	$R=I_y/I_x$	配力鉄筋配置例	示方書の規定する最低量
昭和39年6月	0.31	主鉄筋断面の29%	主鉄筋断面の25%以上
昭和42年9月	0.59	主鉄筋断面の70%	主鉄筋断面の70%以上
昭和46年3月	0.66	主鉄筋断面の82%	主鉄筋断面の80%以上

※二方向剛性比 R は RC 断面時

組み合わせが存在する。二方向剛性の組み合わせとたわみ量の関係と二方向剛性の組み合わせと床版劣化度との関係を以下の項より検討する。

3.二方向剛性を用いた床版の劣化度

3.1 示方書における床版剛性比

二方向剛性は主鉄筋及び配力鉄筋の配筋量により変化し、ひびわれが進展した使用限界状態では二方向の断面がそれぞれ RC 断面となる。ここで道路橋示方書（以下道示と記す）の改訂により変わってきた配力鉄筋量と二方向が RC 断面時の二方向断面剛性の関係を表-1 に示す。橋軸直角方向及び橋軸方向の断面二次モーメント I_x 、 I_y の比を二方向断面剛性比と定義し、 $R=I_y/I_x$ と表す。配力鉄筋は主鉄筋の内側に配置され有効高さが小さいため、 I_x と比べ I_y は小さくなり RC 断面における二方向剛性比も主鉄筋量に対する配力鉄筋量の比率より小さい値となる傾向がある。昭和39年以前の道示を基に設計された床版の、配力鉄筋は主鉄筋の25%以上の配置が必要で、この時期に設計された床版例は配力鉄筋量が主鉄筋の29%、二方向断面剛性比は RC 断面時で $R=0.31$ となった。昭和39年道示以降の改訂に伴い二方向断面剛性比は増加し、昭和46年道示では床版の二方向断面剛性比は RC 断面時で $R=0.66$ となっている。

3.2 解析手法

1)示方書年度別のたわみ量の関係

各道示年別に二方向断面剛性とたわみ量の関係を解析により算定する。二方向断面剛性は全断面有効の状態から床版の引張側を無視した RC 断面まで断面剛性が低下した場合とした。二方向の断面剛性は別々に低下していくものと考えられることから、この点に関しても検討を加えた。

2)床版のモデル化と着目点

解析に用いたモデルを図-3,4に示す。床版モデルは $3000 \times 1800 \times 180$ (mm)で周辺四辺単純支持とし、配力鉄筋量を増加させ、二方向剛性を変化させた。たわみ量着目点は3点で W_y ($x=900, y=1500$)、 W_x ($x=400, y=1500$)、 W_z ($x=900, y=1000$)とし、解析は MSC/NASTRAN を用い有限要素法線形解析により行った。

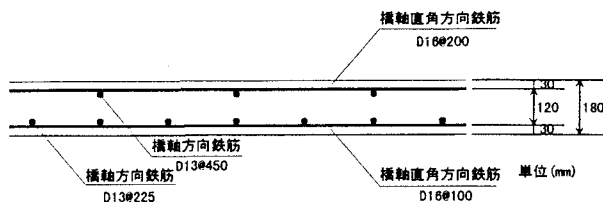


図-3 床版断面図(道示 S39)

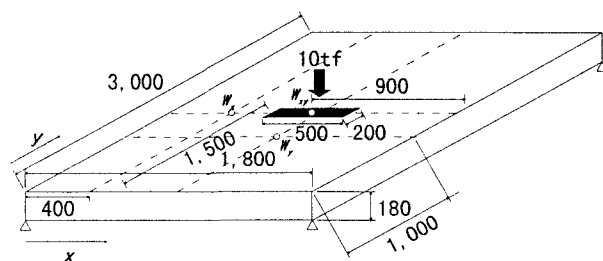


図-4 解析モデル

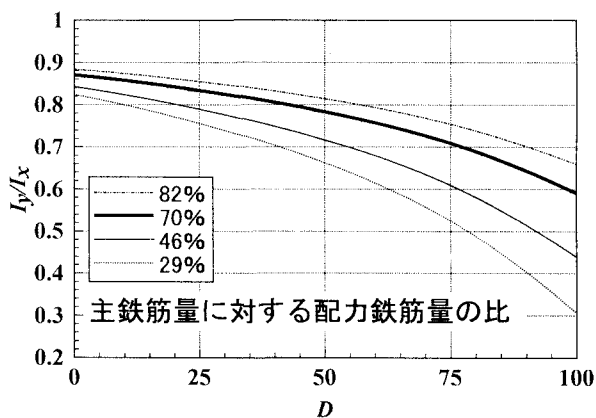


図-5 各比率における二方向剛性比と劣化指数

4.解析結果

4.1 道示年別剛性比と劣化度との関係

断面剛性が全断面有効から RC 断面に劣化していく過程を劣化指数と定義する。床版断面剛性が全断面有効の場合劣化がないものとして劣化指数 $D=0\%$ とし、RC 断面に達した場合劣化指数 $D=100\%$ と定義する。各道示年の二方向剛性比 R と劣化指数 D の関係を図-5 に示す。橋軸方向と橋軸直角方向の断面剛性は同一比率で全断面有効から RC 断面まで減少したものとして算定している。従って、図中に示される二方向剛性比は劣化指数 $D=100\%$ でそれぞれ道示の RC 断面二方向剛性比 R となる。

4.2 たわみ量と劣化度

床版断面の劣化に伴い断面剛性が低下するとたわみ量が増加する。各道示の二方向剛性比を用いてたわみ量を

算定し劣化指数 D との関係を示したものが図-6 である。解析に用いた二方向剛性比は前項と同様に橋軸方向と橋軸直角方向の断面剛性が同一比率で、床版の断面剛性が全断面有効から RC 断面まで減少したものと算定している。図-5、6 より道示の改訂により配力鉄筋方向の鉄筋量が増し、二方向剛性比が増加し、たわみ量が改善したことが分かる。その結果、使用限界状態におけるたわみ量の低減に相当する疲労耐久性が向上したものと考えられる。

実際の床版の劣化過程では、橋軸直角方向にひびわれが発生し橋軸方向の剛性が先に低下するものと考えられる。また、その後は橋軸方向及び橋軸直角方向の断面剛性は別々に低下するものと考えられ、それぞれの組み合わせ毎のたわみ量が存在する。橋軸直角方向の剛性低下を劣化指数 D_x 、橋軸方向の剛性低下を劣化指数 D_y で表し、二方向剛性低下率とたわみ量との関係をマトリックスで示す(表-2~4)。劣化指数 D_x 、 D_y を以下に示す。

$$D_x = \frac{I_{xg} - I_x}{I_{xg} - I_{xcr}} \times 100(\%) \quad (2)$$

$$D_y = \frac{I_{yg} - I_y}{I_{yg} - I_{ycr}} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$D_R = (D_x, D_y) \quad (4)$$

I_x, I_y : 主鉄筋, 配力鉄筋方向の有効断面二次モーメント
 I_{xg} : 主鉄筋方向の全断面有効時断面二次モーメント
 I_{yg} : 配力鉄筋方向の全断面有効時断面二次モーメント
 I_{xcr} : 主鉄筋方向の RC 断面時断面二次モーメント
 I_{ycr} : 配力鉄筋方向の RC 断面時断面二次モーメント

二方向の剛性の低下を劣化指数として D_R で示し 25%毎に変化させている。実際は各値間の組み合わせも存在している。このマトリックスをグラフで示したのが図-7 である。

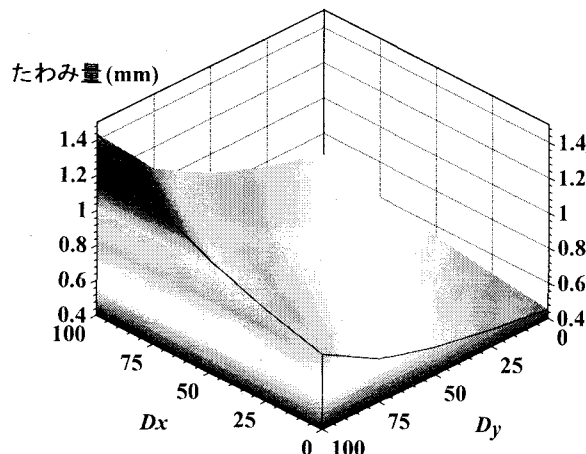


図-7 S39 年道示におけるたわみ量と二方向剛性比

ある。図中において同一たわみ量を結んだ水平方向の曲線上は存在する全二方向剛性比となる。また、最高たわみ量から最低たわみ量まで結んだ縦の曲線は二方向の剛性が同一比率で低下した場合で図-6 道示 S39 年(29%)と同ラインとなる。

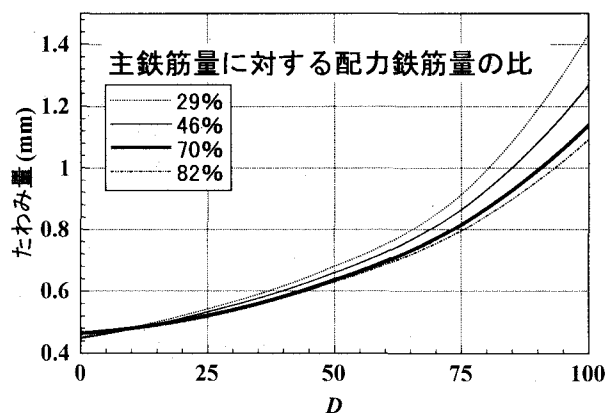


図-6 各比率におけるたわみ量と劣化指数

表-2 道示 S39 年二方向剛性比の組合わせとたわみ量(mm) (W_{xy})

$D_x \setminus D_y$	0	25	50	75	100
0	0.4521	0.4964	0.5556	0.6447	0.8277
25	0.4918	0.5427	0.6097	0.7118	0.9174
50	0.5403	0.6002	0.6798	0.7981	1.0347
75	0.6006	0.6735	0.7705	0.9137	1.1955
100	0.6802	0.7701	0.8947	1.0783	1.4332

表-3 道示 S39 年二方向剛性比の組合わせとたわみ量(mm) (W_x)

$D_x \setminus D_y$	0	25	50	75	100
0	0.2657	0.2918	0.3265	0.3782	0.4828
25	0.2888	0.3189	0.3788	0.4179	0.5359
50	0.3170	0.3525	0.3996	0.4689	0.6052
75	0.3518	0.3952	0.4527	0.5370	0.7003
100	0.3969	0.4509	0.5251	0.6338	0.8408

表-4 道示 S39 年二方向剛性比の組合わせとたわみ量(mm) (W_y)

$D_x \setminus D_y$	0	25	50	75	100
0	0.3203	0.3442	0.3728	0.4077	0.4514
25	0.3526	0.3816	0.4161	0.4599	0.5162
50	0.3922	0.4282	0.4721	0.5276	0.6023
75	0.4417	0.4881	0.5454	0.6193	0.7228
100	0.5057	0.5674	0.6466	0.7513	0.9046

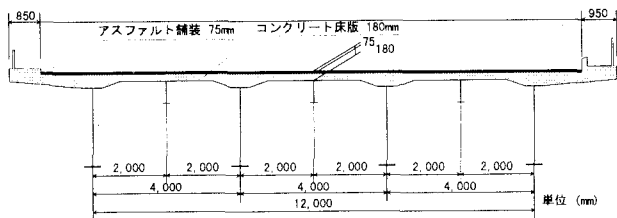


図-8 実橋床版断面図

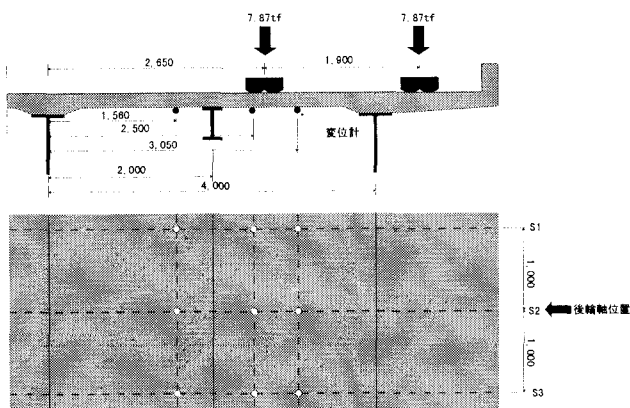


図-10 実橋載荷試験状況

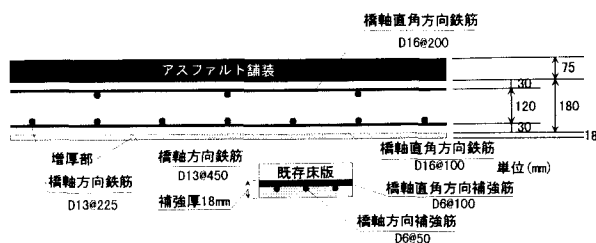


図-9 床版断面図（補強後）

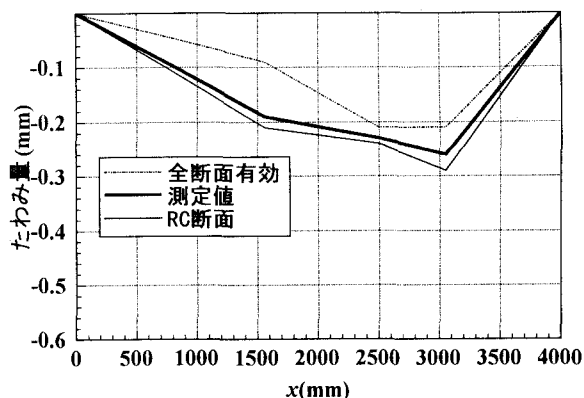


図-11 補強前計測データ (S1)

5. 実測値との検証

5.1 実橋計測と解析手法

本橋は昭和 39 年道示を基に設計された自動車専用道 3 径間連続非合成鋼桁橋である。床版スパンは 4m で主桁中央部に増桁補強が施されている。床版厚さ 180mm, RC 断面時の二方向剛性比は $R=0.31$ である。本橋は供用後 30 年を経過し劣化損傷が進行していることから、床版下面増厚工法により補強を実施した。補強構造は補強鉄筋 D6 (SD295A) を橋軸直角方向 100mm, 橋軸方向に 50mm 間隔で配置し、ポリマーセメントモルタルで一体化している。補強後の RC 断面時の二方向剛性比は $R=0.91$ となる。

たわみ量の計測は図-10 に示す位置で行い、橋軸方向 1m 間隔に 3 列、橋軸直角方向 3 列とし、橋軸直角方向に加え橋軸方向も測定し二方向剛性を把握した。後輪荷重は S2 ライン上に静的載荷した。

解析は第 3 項と同様に二方向剛性を考慮したマトリックスを有限要素法を用いて算定した。このマトリックスから二方向劣化指数とたわみ量の関係グラフを作成後、たわみ量計測値から二方向剛性及び二方向劣化指数を算定した。増桁の剛性をそのまま用いると、たわみ量が小さく算出されるため増桁の剛性を 5%程度に下げて解析を行った。算定したたわみ量と一致する計測データから実橋の二方向剛性を求め劣化度の補強前後の比較を行った。

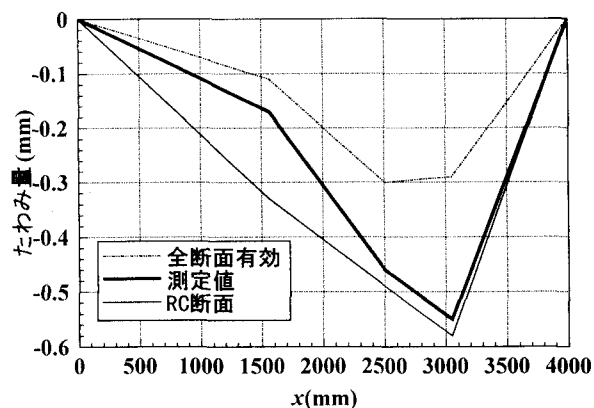


図-12 補強前計測データ (S2)

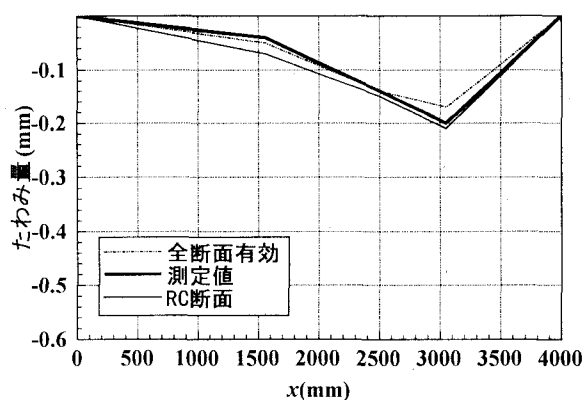


図-13 補強後計測データ (S1)

5.2 解析結果

S1, S2 ラインのたわみ量計測結果と解析結果を示す(図-11~14)。図中には二方向剛性が全断面有効とした場合、RC断面とした場合の床版各位置のたわみ量を示している。計測された床版たわみ量は全断面有効とRC断面の間に位置し、補強前はRC断面の理論値に近い値を示している。また、補強後は全断面有効の値に近く床版剛性の向上が確認できる。S2中央位置の補強前後における二方向劣化指数とたわみの関係を図-15, 16に示す。計測したたわみ量と解析値より求めた二方向劣化指数は補強前 $D_R=(D_x, D_y)=(100, 90)$ となった。補強後は二方向劣化指数は $D_R=(D_x, D_y)=(25, 10)$ となった。

二方向劣化指数のマトリックスを求めることにより、床版の劣化による二方向剛性の低下とたわみ量の関係を示すことができた。橋軸方向及び橋軸直角方向の劣化指数値により同一たわみ量でも劣化度は異なるものと考えられる。今後は二方向劣化指数と床版劣化度との関係を検討していきたい。

6.まとめ

本研究の範囲より以下のことがいえる。

- 1)橋軸方向と橋軸直角方向の二方向の断面二次モーメントを用いて床版たわみ量を解析的に求めた。二方向の断面二次モーメントを全断面有効からRC断面まで低下させ、二方向剛性の劣化指数を定義した。
- 2)二方向劣化指数とたわみ量の関係を示すマトリックスとグラフに示し、床版の二方向剛性を考慮した床版劣化過程をより明確に表現する方法を提案した。
- 3)二方向劣化指数とたわみ量の関係を示すマトリックスとグラフを実橋床版に拡張し、計測結果を基に解析を行い、本劣化指数を用いた手法の有効性を検証した。
- 4)今後の課題は二方向の劣化指数と床版劣化度との関係を検討したい。

参考文献

- 1)石井孝男：疲労寿命を考慮した鋼橋RC床版の設計法と維持管理に関する研究，博士学位論文，1994.1
- 2)前田幸雄，松井繁之；鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐荷力の評価式，土木学会論文集 No.348/V-1, pp.133-141, 1984.8
- 3)松井繁之；移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9, No.2, pp627-632, 1987.10
- 4)道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性，阪神道路高速公団 PP.5-6, 1991.3
- 5)道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷機構にもとづく健全度判定と補修工法の選択，日本道路公団試験所コンクリート試験室，試験研究所技術資料第413号

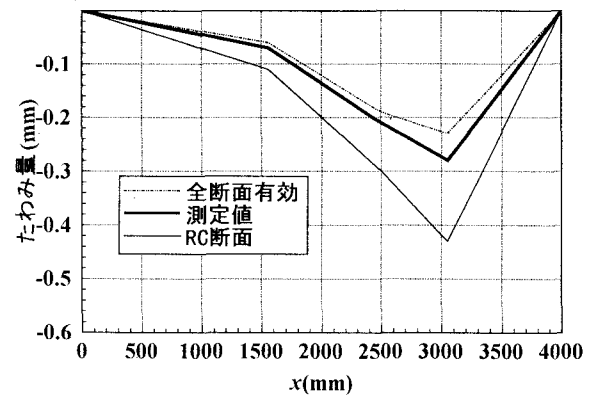


図-14 補強後計測データ (S2)

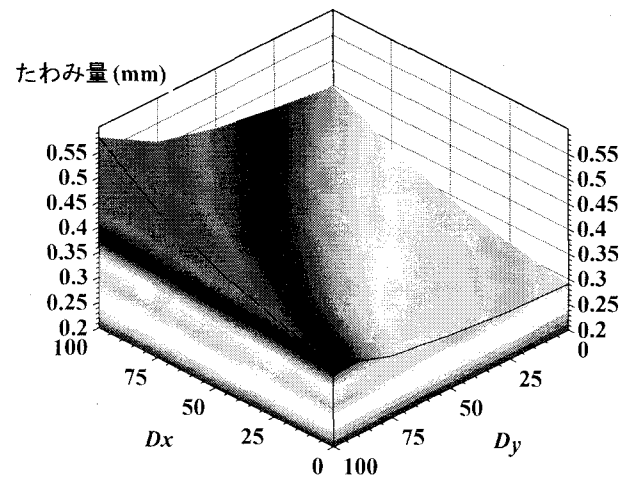


図-15 たわみ量と二方向剛性比 (x=3050・補強前)

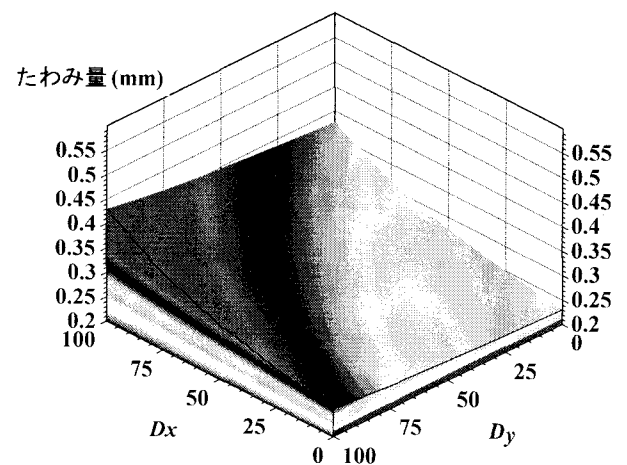


図-16 たわみ量と二方向剛性比 (x=3050・補強後)