

鋼・コンクリート合成床版の解析のモデル化に関する検討

Study for finite element analysis to evaluate for wheel trucking test of steel plate-concrete composite deck

倉田幸宏\*1, 鈴木 統\*1, 橋 吉宏\*2, 小林 潔\*1, 上村明弘\*2

Yukihiro KURATA, Osamu SUZUKI, Yoshihiro TACHIBANA, Kiyoshi KOBAYASHI, Akihiro UEMURA

\*1 工修 (社)日本橋梁建設協会 (〒104-0061, 東京都中央区銀座二丁目2番18号 鐵骨橋梁会館1階)

\*2 工博 (社)日本橋梁建設協会 (〒104-0061, 東京都中央区銀座二丁目2番18号 鐵骨橋梁会館1階)

The composite deck consists of steel-plates, upper re-bars and concrete. A wheel trucking test was conducted using the real-size specimen of the composite deck.

Finite element analyses of the specimen were carried out to compare with the measured values of the wheel trucking test. In this paper, comparisons of the measured values and the analytical values of study case, was evaluated by the deflection characteristics of the specimen reported.

キーワード：鋼・コンクリート合成床版, 輪荷重走行試験, 疲労耐久性, 有限要素法解析

Key Words: steel plate-concrete composite deck, wheel trucking test, fatigue durability, finite element analysis

1. はじめに

鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と略す）は、高い耐力および疲労耐久性などの特徴を有する床版形式として近年、実橋への適用や長支間化に関する種々の研究が行われ、鋼2主げた橋、鋼少数主げた橋、鋼開断面箱げた橋などに積極的に採用されるに至っている。

また、合成床版の疲労耐久性の評価については、国土交通省土木研究所で実施した図-1 に示す輪荷重走行試験機による階段状漸増載荷試験をの結果について同様に実施した RC 床版実験や PC 床版実験との比較により考察してきた現状がある。

著者らは、このような合成床版のうち、ロビンソン型の合成床版を対象として有限要素法解析により試験結果を再現でき得るモデル化の検討を試みた。解析対象としたロビンソン床版の輪荷重走行試験の実施状況の写真を図-1 に、試験体概要について、表-1~2 に示す。

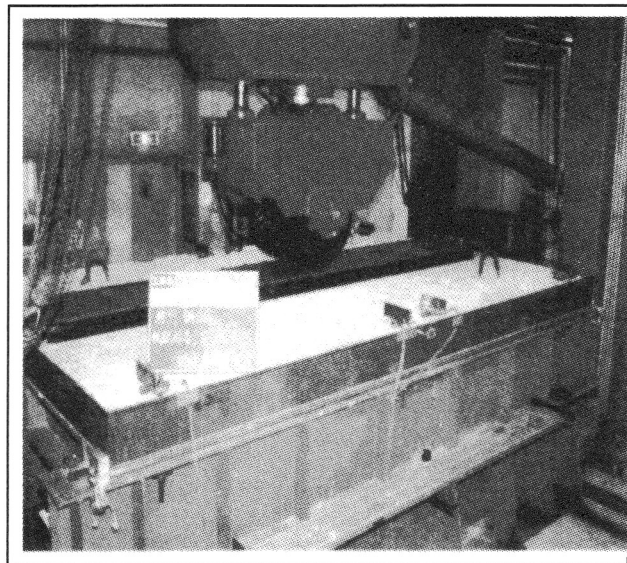


図-1 輪荷重走行試験

表-1 試験体の構造諸元

		単位	構造諸元
コンクリート	版厚	mm	200
	設計基準強度	N/mm <sup>2</sup>	30
下鋼板	板厚	mm	9
	断面	mm	100×16
横リブ	橋軸方向間隔	"	750
	寸法	mm	φ16×120
スタッド	橋軸方向間隔	"	250
	橋軸直角方向間隔	"	250
主鉄筋 (橋軸直角方向)	呼び	-	D19
	間隔	mm	250
配力鉄筋 (橋軸方向)	呼び	-	D16
	間隔	mm	250

表-2 コンクリートの材料試験結果

番号	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	静弾性係数 ×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>	ポアソン比	引張強度 N/mm <sup>2</sup>
1	38.2	2.95	0.210	3.65
2	36.7	2.75	0.208	3.60
3	37.9	2.95	0.180	3.80
平均値	37.6	2.88	0.199	3.68

2. 解析の着目点

ロビンソンタイプの鋼コンクリート合成床版の輪荷重移動載荷試験を解析的に再現するため

に移動荷重を受ける合成床版のたわみに着目して解析を実施した。移動荷重は載荷ステップ毎に荷重の載荷/除荷を繰り返す要領でモデル化を実施する方針とした。

## 2.1 移動荷重を受ける合成床版の評価

移動荷重を受ける合成床版の評価を実施するにあたって、ロビンソントタイプの鋼コンクリート合成床版の輪荷重移動載荷試験における、試験体中央点のたわみ（98kN 換算）の推移に着目した（図-2 参照）。

走行回数の増加に伴い 98kN 換算した試験体中央のたわみは増加している。

ここで「98kN 換算たわみ」が増加することは「合成床版の局部疲労」が主原因と考え、このたわみの増加を解析的に評価する事を目的に各ケースの解析を実施し、それらの解析結果を用いて、

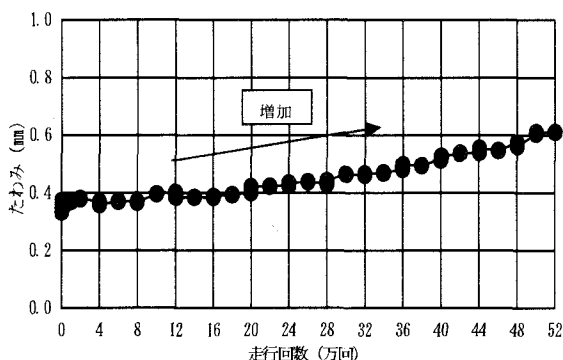


図-2 98kN 換算たわみの推移

実験結果を評価できるモデル化の妥当性の検討を行った。検討は以下の4つのケースについて比較を行った。

- ・ 弾性・弾塑性、接触考慮の有無
- ・ 荷重の載荷方法
- ・ コンクリート強度・スタッドバネ値
- ・ 輪荷重の載荷回数の変化→たわみが収束するまで載荷

## 3. 解析モデル

### 3.1 解析対象と解析モデル

解析対象は輪荷重走行試験の供試体とし、3次元FEMを用いた（解析コードはABAQUS Ver. 6.5-5）。図-3は輪荷重走行試験の供試体、図-4は解析に使用したモデル図を示す。主桁上は2辺単純支持として、端部横桁については弾性支持としてモデル化した。

### 3.2 解析ケース

解析は、土木研究所における輪荷重試験結果を再現でき得る解析モデルを検討するために、以下

の8ケースについてFEM解析を実施した。

- ① 下鋼板および鋼リブと床版コンクリートを剛結合とする弾性解析（リブ間載荷）
- ② 下鋼板および鋼リブと床版コンクリートを接触要素とする弾性解析（リブ間載荷）
- ③ 下鋼板および鋼リブと床版コンクリートを剛結合とする弾塑性解析（リブ間載荷）
- ④ 下鋼板および鋼リブと床版コンクリートを接触要素とする弾塑性解析（リブ間載荷）
- ⑤ ④のモデルにおいて載荷範囲を3mにした場合
- ⑥ ⑤のモデルにおいて、輪荷重を三角形分布とした場合
- ⑦ ⑤のモデルにおいて、コンクリート引張強度・スタッドジベルバネ定数を変更した場合
- ⑧ ⑤のモデルにおいて、各荷重ステップ（160kN, 280kN, 400kN）でそれぞれたわみの増加が収束するまで載荷を行った場合（最大5往復）。

検討においては、まずケース①からケース④の解析の解析を行い、コンクリートと鋼板の結合条件の比較（剛結と接触考慮）およびコンクリートの材質特性の比較（弾性と弾塑性）を行った。

以降のケース⑤からケース⑧は、コンクリートと鋼板の結合条件を接触考慮のみとし、載荷範囲の比較（3m 載荷とリブ間載荷）および輪荷重の分布形状（等分布と三角形分布）の比較を行った。

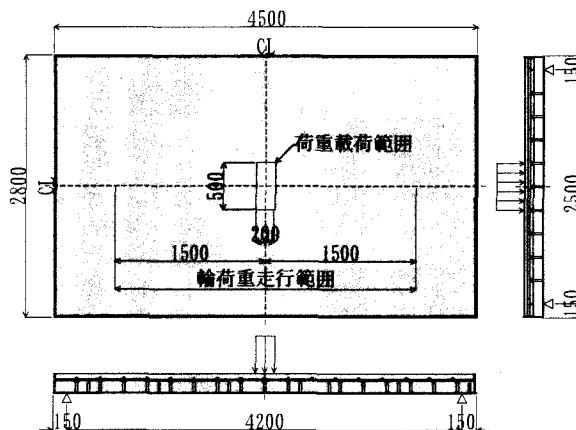


図-3 輪荷重走行試験の供試体

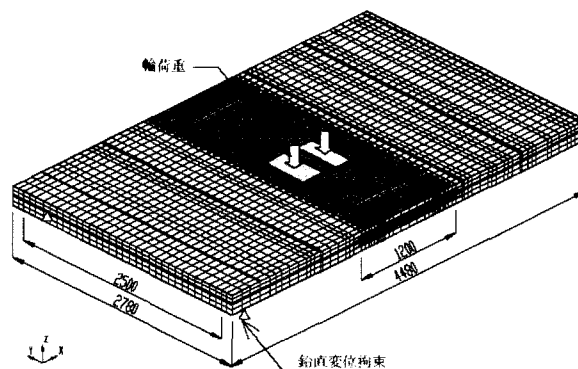


図-4 解析モデル図

### 3.3 要素の特性と要素分割

#### (1) 要素の特性

##### 1) 構造部位と適用要素

構造部位ごとの適用要素を表-3、図-5に示す。コンクリート部はソリッド要素、鋼部材はシェル要素、スタッドはバネ要素、鉄筋はロッド要素を基本としている。ケース⑦および⑧のスタッドのバネ要素については、水平方向バネ定数 ( $K_x$ ,  $K_y$ ) を既存の実験結果<sup>1)</sup> などより、相対変位が0.2mmまでを表-3の値とし、相対変位が大きくなるほどバネ定数が低下するように設定した。また、鋼部材のリブについては、図-6に示すような着目部位のみソリッド要素とし、コンクリートとの接触を考慮できるようにした。

表-3 供試体パラメータと載荷方法

部位	要素	諸元	備考
コンクリート部	ソリッド	厚さ：200 (mm)	
底鋼板	シェル	板厚：9 (mm)	
型枠	シェル	板厚：9 (mm)	
リブ	シェル、ソリッド	板厚：16 (mm)	
スタッド	バネ	$K_x=124,000$ (N/mm)	ケース①～⑥
		$K_y=124,000$ (N/mm)	
		$K_z=323,000$ (N/mm)	
鉄筋	ロッド	$K_x=185,000$ (N/mm) ※	ケース⑦、⑧
		$K_y=185,000$ (N/mm) ※	
		$K_z=323,000$ (N/mm)	
		主鉄筋：D19 配力筋：D16	

※相対変位 0.2mmまで 0.5mmで1/2 1.0mmで1/3 2.5mmで1/4に低下

##### 2) 要素の材料特性

鋼材およびコンクリートの材料特性を表4.3.2に示す。鋼およびコンクリートは弾塑性材料とした。

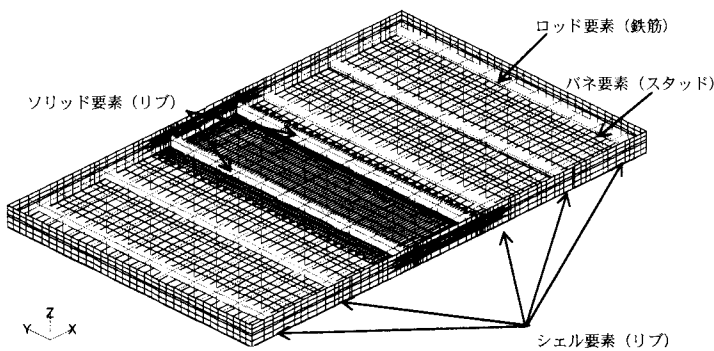


図-5 各構造部位の要素

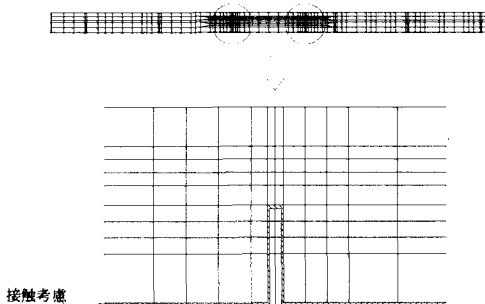


図-6 リブのソリッド要素のモデル化

##### 3) 要素の結合条件

コンクリートと鋼板の境界面には、両者間に付着が生じるが、付着を無視した接触とする場合と剛結合とする場合の2ケースを考慮した。接触を考慮する場合の要素は、境界面が接触して面圧が発生する場合には面圧力を伝達し、境界面での力が離れる方向の場合には、両面が自由に変位する特性を持つ要素間の結合条件である。

##### (2) 要素分割

###### 1) 着目範囲と要素分割

解析における着目点は、試験体中央近傍のリブ位置およびリブ間で、橋軸方向に約1.2mの範囲である。この範囲については、一般部より要素を細かくし、着目リブについてはソリッド要素とし、コンクリートとの接触を実試験体での状況に合うようにモデル化している。

###### 2) 要素サイズ

要素サイズについては、着目部のソリッド要素のリブ厚さ ( $t=16\text{mm}$ ) を、床版支間直角方向の最小寸法とし徐々に変化させた。また、床版厚方向の寸法は、鉄筋位置とリブ厚さから、着目部のリブ周辺の要素ができるだけ縦横比1となるように要素分割を行った。なお、既往の研究<sup>2)</sup> を参考にして、要素サイズを決定している。

### 4. 移動荷重を受ける合成床版の解析結果

#### 4.1 弾性・弾塑性、接触考慮の有無

##### (解析ケース①～④の比較)

解析結果と実際の輪荷重走行試験における計測結果を比較する。解析の載荷位置については図-7のように輪荷重の移動の影響を考慮して、試験体中央付近のリブ間について5ステップの荷重を連続的に載荷した。図-8に解析ケース①～④のたわみと実験値をプロットしたグラフを示す。

ここで凡例にある基本モデルとは、既往の研究<sup>※1)</sup> において下鋼板およびリブとコンクリートを接触要素としたモデルの弾性解析結果であり、本検討における接触要素の弾性解析と相違する点は、基本モデルではリブをシェル要素としてモデル化しているのに対し、

本検討では床版中央部のリブにソリッド要素を用いた点である。またひび割れモデルとは、既往の研究において床版断面における力のつり合いから求めた、引張領域に位置するソリッド要素に関して隣接するソリッド要素に節点力を伝達しないモデルである。

剛結合モデルの弾性解析 (解析ケース①)、弾塑性解析 (解析ケース③) はともに計測値と比較した場合、解析結果は小さくなっている。接触要素の弾性解析 (解析ケース②) については、剛結合モデルより計測値に近い値を示しており、これは鋼板とコン

クリートとの界面における付着を無視したことによる影響と推察される。さらに接触要素の弾塑性解析（解析ケース④）については、コンクリートの塑性化の影響が加わることにより、計測値とほぼ整合性がとれた結果となっている。

なお、図-9 に示す接触考慮モデル・弾塑性解析結果の同一走行回数におけるたわみの変動は、各荷重ステップでの床版中央たわみの変化を表している。表-4 に解析ケース④のたわみ値を示すが、荷重が往復することでたわみが増加していることから、輪荷重の移動に伴ってコンクリートの塑性域が広がり、床版剛性が低下しているものと思われる。

表-4 解析ケース④のたわみ値

載荷位置		走行回数 0 回 (荷重 98kN)	走行回数 26 万回 (荷重 280kN)	走行回数 50 万回 (荷重 400kN)
STEP-1	98kN換算	0.349	0.392	0.457
	換算前	0.349	1.121	1.864
STEP-3	98kN換算	0.380	0.440	0.502
	換算前	0.380	1.256	2.050
STEP-5	98kN換算	0.396	0.475	0.538
	換算前	0.396	1.358	2.198
STEP-3'	98kN換算	0.386	0.477	0.545
	換算前	0.386	1.362	2.224
STEP-1'	98kN換算	0.355	0.453	0.525
	換算前	0.355	1.295	2.143
STEP-3'	98kN換算	0.386	0.485	0.558
	換算前	0.386	1.386	2.276
STEP-5	98kN換算	0.399	0.500	0.573
	換算前	0.399	1.427	2.341
STEP-3	98kN換算	0.383	0.486	0.562
	換算前	0.383	1.389	2.294
STEP-1	98kN換算	0.353	0.459	0.537
	換算前	0.353	1.312	2.193

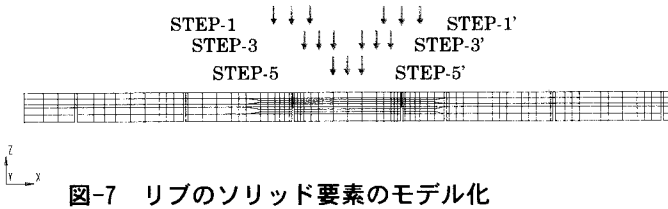


図-7 リブのソリッド要素のモデル化

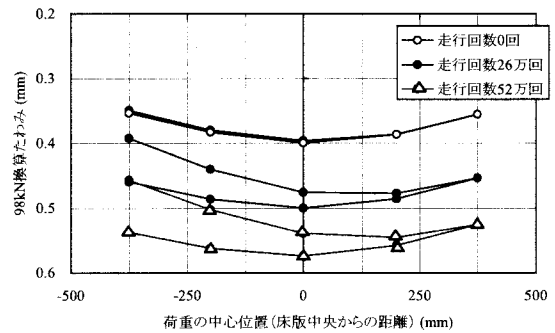
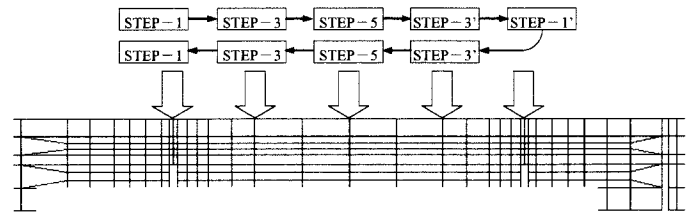


図-9 98kN換算たわみの変動 ケース④

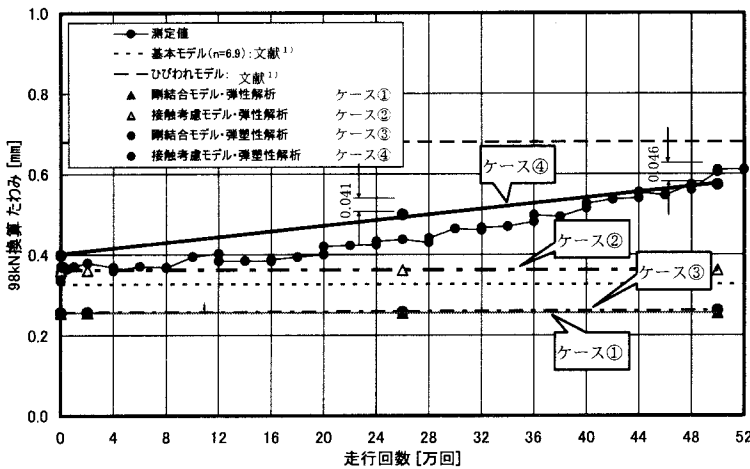


図-8 98kN換算たわみ解析結果

## 4.2 荷重の載荷方法

(解析ケース④, ⑤, ⑥の比較)

①において解析ケース④の接触考慮・弾塑性解析モデルが最も実験値に近い値を示した。しかし、400 kN 載荷時の値では解析結果が実験結果を下回っており、若干傾向が異なるように思われた。そこで、以下に示す載荷幅と輪荷重分布形状の2つについて検討した。

解析ケース④では、リブ間の 1.2m の距離で荷重を往復させているのに対し、実験においては 3m の範囲を輪荷重が載荷されている。そこで、解析ケース⑤においては実験と同様に移動距離を 3m として解析を行った。図-10 に各解析ケースの載荷方法を示す。

また、本解析においては、輪荷重を 500×200 の幅に等分布で荷重を載荷しているが、実際の輪荷重試験においては床版がたわむことによって載荷板の端部に荷重が集中する傾向があることが考えられるため、解析ケース⑥においては輪荷重を図-11 に示すような三角分布にして、等分布である解析ケース④との比較を行った。

解析ケース④, ⑤のたわみ値のグラフを図 4-10 に示す。走行範囲が広くなり、塑性化範囲が大きくなった分たわみ値が若干大きくなった。解析ケース⑤, ⑥のたわみ値のグラフを図-13 に示す。荷重の中心が床版支間中心より端部寄りになるのでたわみが小さくなる傾向にある。

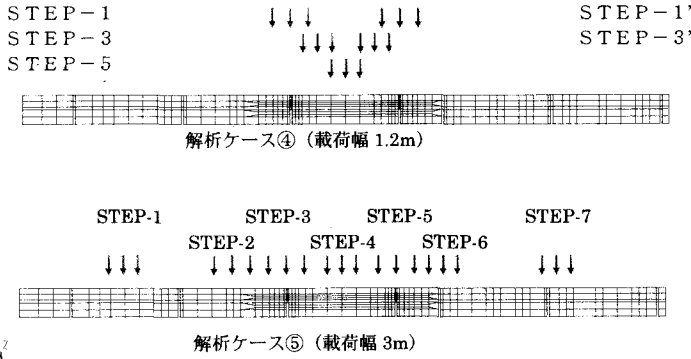


図-10 移動載荷幅の変化 (解析ケース④, ⑤)

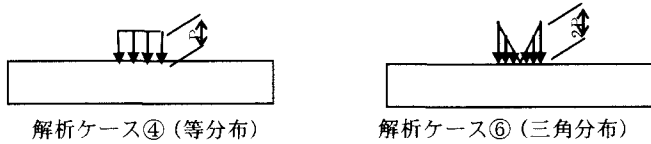


図-11 載荷荷重分布形状

解析ケース⑥の解析ケース④に対するたわみ値の比は0.99であり、絶対値の差は0.006mmであった。荷重分布の差異によるたわみの影響は少ない事が確認できる。

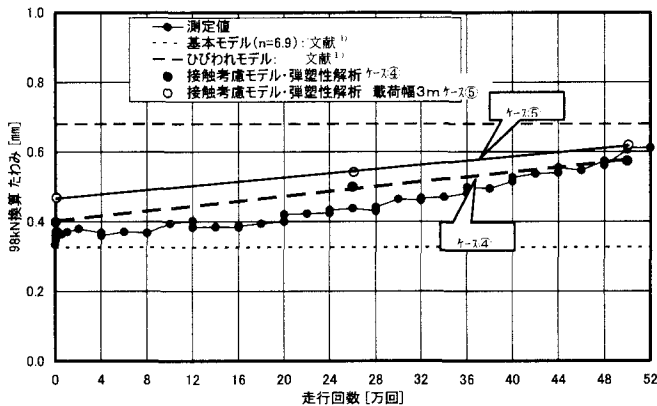


図-12 98kN換算たわみ解析結果 (解析ケース④, ⑤)

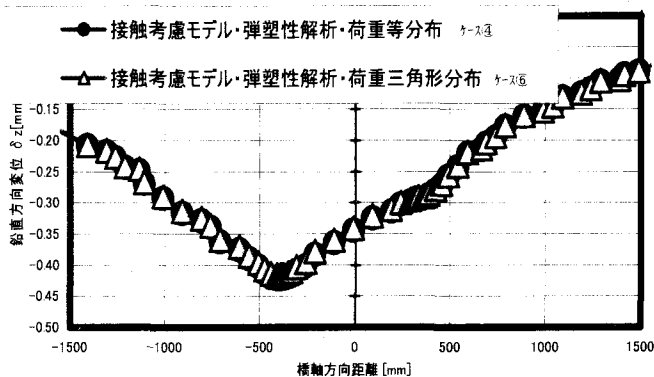


図-13 等分布荷重・三角形分布たわみ分布比較

4.3 解析ケース④, ⑥の強度, スタッドパネ値差異の比較 (解析ケース⑤, ⑦の比較)

解析モデルによるたわみ値と実験値の差異を検討するためのパラメータとして、コンクリートの引張強度とスタッドジベルのパネ定数を考慮した。これは、実験値のたわみ値の増加の割合が、280kN以降増加しており、解析にてこの傾向を再現させるためである。解析ケース⑤と解析ケース⑦のモデル条件の差異は表-5のとおり。

表-5 解析条件比較

解析ケース	解析ケース⑤	解析ケース⑦
コンクリート引張強度	2.5 N/mm <sup>2</sup>	3.68 N/mm <sup>2</sup>
スタッドパネ定数	Kx =Ky=1.24E+5[N/mm], Kz=3.23E+5[N/mm]	Kx=Ky=1.875E+5 [N/mm]*, Kz=3.23E+5[N/mm]

\* 相対変位 0.2mmまで 0.5mmで1/2 1.0mmで1/3 2.5mmで1/4に低下

解析ケース④, ⑤, ⑦のたわみの増加率を比較すると、解析ケース④, ⑤が280kN→400kN時のたわみの増加率が98kN→280kNに比べて小さくなっているのに対し、解析ケース⑦では280kN→400kNの増加率のほうが大きくなっている。これは、荷重の増加に伴い、スタッドジベルのパネ値が低下することによりコンクリートの塑性化が進行したと考えられる。

4.4 輪荷重の載荷回数の変化→たわみが収束するまで (載荷解析ケース⑤, ⑧の比較)

表-6に解析ケース⑤と解析ケース⑧のたわみ値の増加の割合を示す。98kN→280kN時のたわみの増加率より280kN→400kN時の増加率が大きく、更に実験のたわみの増加の傾向に近づく事が確認できた。

表-6 たわみ値の増加率

荷重		98kN	280kN	400kN
解析ケース④	たわみ値	0.399	0.500	0.573
	増加率	-	1.25	1.146
解析ケース⑦	たわみ値	0.394	0.434	0.487
	増加率	-	1.10	1.12
解析ケース⑧	たわみ値	0.396	0.438	0.499
	増加率	-	1.11	1.14

解析ケース④と解析ケース⑧のたわみ値のグラフを図-14に示す。グラフより、たわみの絶対値は解析ケース④に比べ、解析ケース⑦のたわみ値は小さくなり、400kN時に約85%である。

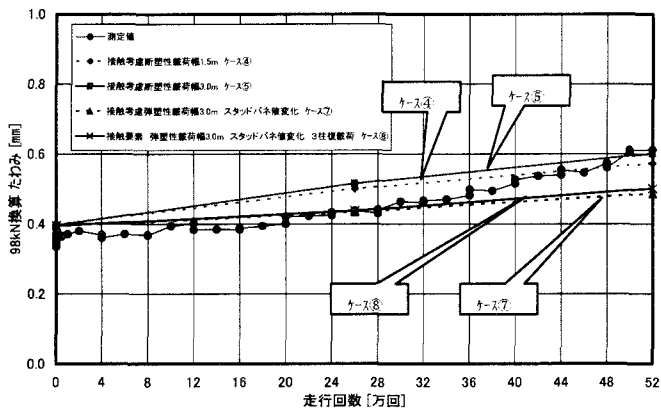


図-14 98kN 換算たわみ解析結果  
(解析ケース④, ⑤, ⑦, ⑧)

## 5. 考察

・「98kN 換算したたわみの増加」を評価可能なモデルは接触要素の材料非線形モデルであった。これはコンクリートと鋼板部材を接触要素としてモデル化する事により床版の剛度が移動荷重の繰り返しと共に落ちる事と材料非線形モデルとする事によりコンクリート材料そのものの塑性を評価する事により計算結果に現れたものと考えられる。

・非線形モデルの接触要素で解析したケース④～⑧のいずれも「98kN 換算たわみ」の増加を計算結果により評価できたが、ケース④～⑥についてのたわみの増加は床版の劣化が進んでいると考えられる 52 万回付近において近い値を示しているのに対して、床版の局部疲労があまり進行していないと考えられる 25 万回において解析結果の方が大きな値を示している。

・移動荷重範囲を 3m と広げた場合 1.2m と比較して塑性化の範囲が広がるため、結果としてたわみに影響する。また、荷重の分布形状がたわみに与える影響は少ない。

・コンクリートの引張り強度およびスタッドのバネ剛性についても、たわみに大きな影響を与える。

・輪荷重の繰り返しを考慮した解析によるたわみ増加は本解析においては 3 往復程度で収束する傾向がこの事は解析モデルがコンクリートに発生するひび割れを考慮していない事と、実際の合成床版の劣化のメカニズムを考えると矛盾が生じてしまう。これに対してケース⑦, ⑧については 25 万回付近では近い値を示し内部コンクリートのひび割れ等が発生していると推測される 52 万回付近については実験値と比較して解析値の方が小さくなっており、上記の事を勘案するとより、ケース⑦および⑧は現実に近いモデルになっていると考えられる。

謝辞:本研究は平成 16 年から 2 カ年の予定で国土交通省国土技術総合研究所, 大阪大学, 九州工業大学, (社) 日本橋梁建設協会の 4 機関が行った共同研究「道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究」の検討の一部であることを付記し,

関係者には深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 街道, 渡辺, 橋, 松井, 堀川: 鋼・コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および 3 次元有限要素解析による疲労耐久性評価, 構造工学論文集 Vol.50A, pp1119-1130, 2004 年 3 月, 土木学会
- 2) 平城弘一: 「頭付きスタッドの静的および疲労強度と設計法に関する研究」, 大阪大学博士論文, 平成 2 年 2 月
- 3) 建設省土木研究所, 他: 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その 2) - 標準試験方法および第 2 回試験報告 -, 平成 11 年 10 月