

床版張出し部の輪荷重走行試験および曲げモーメント性状について

Behaviors and bending moment distributions on overhanging slabs under wheel trucking test

街道 浩*, 渡辺 滉**, 橘 吉宏***, 松井繁之****, 堀川都志雄*****

Hiroshi KAIDO, Hiroshi WATANABE, Yoshihiro TACHIBANA, Shigeyuki MATSUI, Toshio HORIKAWA

* 工修 川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

** 川田工業(株)橋梁事業部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

*** 博士 (工学) 川田工業(株)橋梁事業部東京技術部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

**** 工博 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

***** 工博 大阪工業大学教授, 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

In Japan, fatigue durability of slabs of highway bridges has been evaluated by wheel trucking tests. However, these tests were mainly for the simply supported slabs, but not the overhanging slabs. Thus, wheel trucking tests for overhanging slabs are conducted on the reinforced concrete slab specimen and the steel plate-concrete composite deck specimens. This paper reports behaviors, concrete cracking conditions and bending moment distributions of each specimen. Furthermore, the experimental results of these specimens are compared with the numerical values by FEM analyses.

Key Words: overhanging slab, wheel trucking test, RC slab, steel plate-concrete composite deck
キーワード: 床版張出し部, 輪荷重走行試験, RC床版, 鋼・コンクリート合成床版

1. はじめに

わが国では道路橋の床版として鉄筋コンクリート床版 (以下, RC床版と略す), プレストレストコンクリート床版 (以下, PC床版と略す), 鋼床版, 鋼・コンクリート合成床版が主に用いられている。このうち, RC床版は比較的短い3m程度までの床版支間に適用されている最も一般的な床版形式である。PC床版は3mを上回る長支間床版に適用されることが多い床版形式であり, 最近では床版支間が10m程度のPC床版も施工されている。都市内の高架橋や長大橋などに採用されることが多い鋼床版は, 上部工死荷重を軽減することを目的とした床版形式である。鋼・コンクリート合成床版は, 桁下空間の安全性の確保や現場工期の短縮などを目的として開発されてきたが, 近年, 高い耐荷力および疲労耐久性が確認されたことにより, 長支間床版にも積極的に適用されている。

今日, これらの道路橋床版の疲労耐久性に関する評価は, 実橋での損傷過程を比較的忠実に再現できる輪荷重走行試験 (以下, 走行試験と略す) により行われるのが一般的となっており, 各種床版形式に対して走行試験が活発に適用されている¹⁾。しかしながら, これまでの研究は, 主に床版の支間部を対象としたものであり, 張出し部を対象とした研究はほとんどないのが現状である。この原因としては, 走行試験装置が床版支間部を対象として開発されたことにもよるが, 張出し部に走行試験を適用する場合, 試験

体の安定性の確保が比較的困難であることや床版の変形に伴って車輪が傾き, 載荷装置に損傷を与える危険性があることなども実施を妨げている要因であると考えられる。

本研究は, このような床版張出し部に関して, 走行試験における①たわみ・ひずみ, ②コンクリートのひびわれ, ③曲げモーメント分布などの基礎的な性状を明らかにすることを目的としたものである。走行試験の実施にあたっては, 車輪の傾きを低減できる空気入りゴムタイヤを有する車輪を備えた試験装置を使用するとともに, 固定架台を設けることにより試験体の安定性を確保している。なお, 本研究において対象とした床版形式は, 道路橋床版として一般的なRC床版および著者らが開発したロビンソン型の鋼・コンクリート合成床版²⁾ (以下, 合成床版と略す) である。

走行試験における具体的な着目点は, コンクリートのひびわれ状況, 床版のたわみ, 鉄筋のひずみなどであり, 合成床版に関しては下側鉄筋と鋼製型枠の役割を兼ねる下鋼板のひずみについても測定した。また, 試験体を薄板要素および骨組み要素によりモデル化した立体FEM解析を実施し, 床版のたわみや鉄筋および下鋼板のひずみの経時挙動について測定結果とFEM解析による結果との比較を試みた。さらに, 鉄筋および下鋼板のひずみの測定結果から床版に発生する曲げモーメントを算出し, 張出し部の曲げモーメント性状についても検討を加えた。

2. 試験体および試験方法

2.1 試験体の構造および種類

走行試験における試験体は、RC床版1体および合成床版3体である。試験体は、2本の主げた上に床版を固定したものであり、橋軸方向の端部に横げたを設け、床版と横げたの間に間詰材を挿入し床版を支持している。主げたと床版はハンチを介して結合しており、主げた上フランジ上にはスタッドを配置している。したがって、張出し部は橋軸方向の相対2辺が単純支持、橋軸直角方向の2辺の一方が自由端、残りの辺が主げたで支持された連続版の境界条件をもつ構造系となる。また、試験体の主鉄筋方向は車輪走行方向に直角としており、主げたの間隔が0.8m、横げたの間隔が2.9m、張出し部の全長が1.3m、外主げたG2から輪荷重走行位置までの距離が0.8mである。なお、主げた上フランジ上のスタッドの橋軸方向の間隔はおおむね150mmである。

RC床版と合成床版の基本タイプの構造を図-1および図-2に示す。また、各試験体の床版の鉄筋配置を表-1に、合成床版の下鋼板の構造諸元を表-2示す。試験体は道路橋示方書³⁾に示される張出し部のT荷重に対する支間長を0.725mとして設計した実物大の模型であり、地覆ないし壁高欄の幅およびこれらの縁端からT荷重載荷位置までの距離などを加えた張出し部の全長が1.5m程度の床版に相当する。なお、鋼材はJIS規格のものを使用しているため、部材寸法は鋼材のミルシートに示された値を採用している。

表-1に示す合成床版の試験体のうち、下鋼板連続タイプは図-3に示すように外主げたG2上で下鋼板の張出し部と支間部とをタイプレートにより連続させた試験体であり、主げた上における下鋼板の連続性の有無による差異を確認することを目的としている。また、床版厚低減タイプは、合成床版のコンクリート版厚を最小厚⁴⁾である150mmとした試験体であり、コンクリート版厚の違いによる差異を確認することを目的としている。

ハンチ部の形状については、RC床版は実橋のハンチ部の形状を反映して、外主げたG2から輪荷重走行位置までをハンチ部とし、ゆるやかなテーバーを設けている。一方、合成床版は実橋においてハンチ部の形状を支間部と張出し部とを連続させた試験体であり、主げた上における下鋼板の連続性の有無による差異を確認することを目的としている。

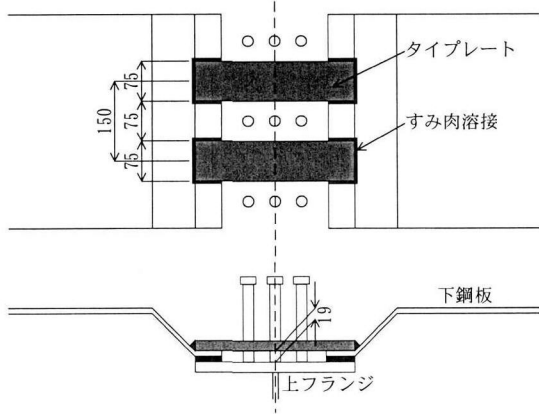


図-3 下鋼板連続部の構造

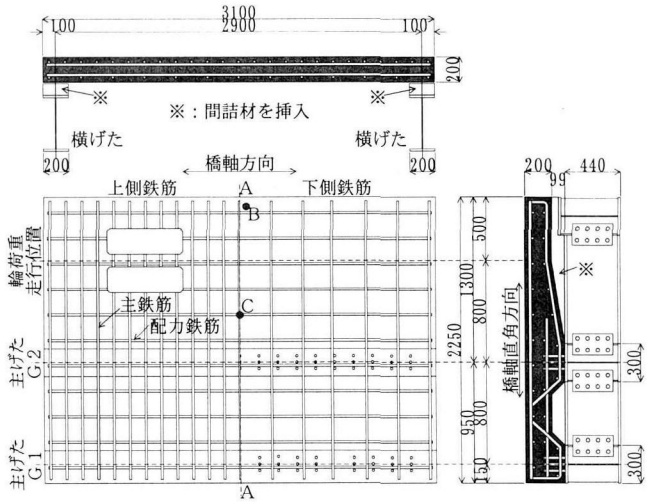


図-1 RC床版の試験体

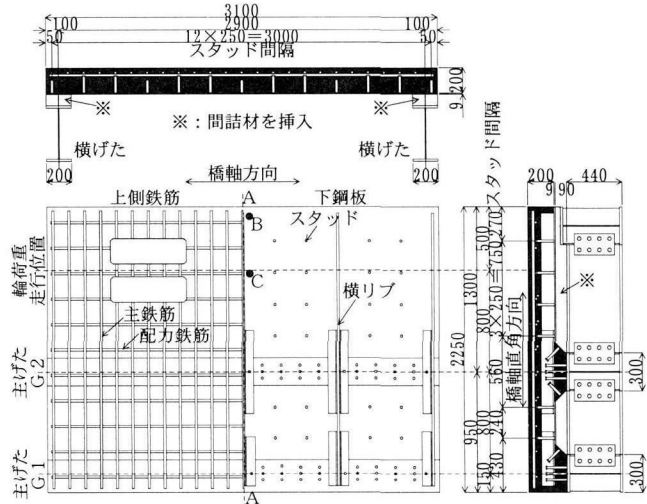


図-2 合成床版基本タイプの試験体

表-1 床版の鉄筋配置

		コンクリート 版厚 (mm)	主鉄筋 (mm)		配力筋 (mm)	
			呼び	間隔	呼び	間隔
RC 床版	上側鉄筋	200*	D19	125	D16	200
	下側鉄筋		D19	250	D16	200
合成 床版	基本タイプ	200	D19	125	D16	200
	下鋼板連続タイプ	200	D19	125	D16	200
	床版厚低減タイプ	150	D19	125	D16	200

*テーバーを有する。

表-2 合成床版試験体の下鋼板の構造諸元

	鋼板厚 (mm)	横リブ (mm)		スタッド (mm)	
		断面	間隔	断面	間隔
基本タイプ	9	100×16	750	φ16×140	250
下鋼板連続タイプ	9	100×16	750	φ16×140	250
床版厚低減タイプ	9	75×16	750	φ16×100	250

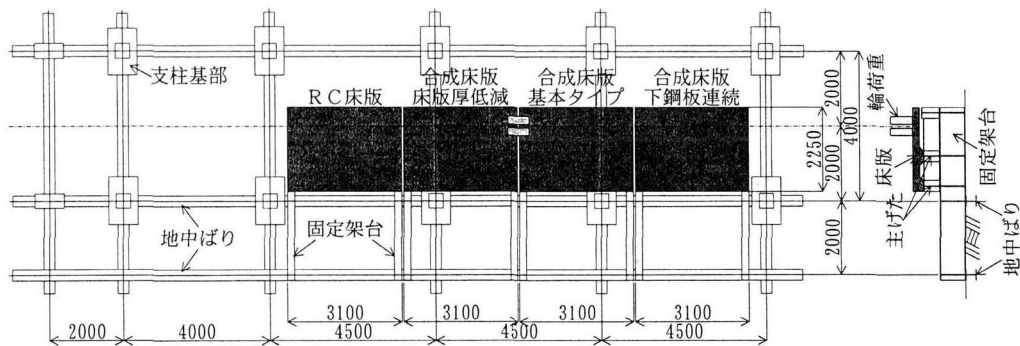


図-4 試験装置および試験体の配列

し部において同一としていることから、試験体のハンチ部についても同様とした。なお、実橋の張出し部には、先端付近に地覆ないし壁高欄が設けられており、これらが床版の曲げ剛性に寄与する影響は大きいものと考えられる。しかしながら、この影響は張出し部の挙動に対して安全側の評価につながるものと判断し、試験体には地覆や壁高欄を設けないものとした。

2.2 試験体の配列および試験方法

試験体の配列は、図-4 に示すようにR C床版の試験体1体と合成床版の試験体3体を直列に配置し、4体同時に走行試験を行った。各試験体は2本の固定架台に主げた下フランジ部を取付け、固定架台はテストフロアに埋め込んだ2本の地中ばりに取付けた。主げたは両端のみ固定架台に取付けているため、輪荷重の荷重により床版とともに変形する構造になっている。なお、固定架台の設置位置は、各試験体の橋軸方向の両端に配置した横げた位置に一致させている。走行試験時には、試験体の主げたG1の取付け位置に上揚力が発生するが、この上揚力を固定架台を介して地中ばりに伝達することにより、試験体の安定性を確保している。

走行試験の荷重プロセスは図-5 に示す通りであり、荷重荷重が98kNから157kN、総走行回数が26.6万回の階段荷重を行った。荷重荷重98kNはT荷重に、157kNは実測された最大輪荷重に相当する。各荷重段階において、コンクリートのひびわれ発生がおおむね完了したところで荷重荷重を増加させた。なお、輪荷重の走行速度は、車輪の傾きによる荷重装置の損傷を防止するために、一時間当たり110往復程度の低速に設定した。走行試験装置および試験体の状況写真を写真-1 に示す。

3. 材料試験結果

3.1 コンクリートの材料特性

試験体の床版部に用いたコンクリートは、R C床版および合成床版ともに設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の普通コンクリートである。試験体と同一の条件のもとで養生を行ったコンクリートの供試体の材料試験結果を表-3 に示す。材料試験は走行試験開始時に実施しており、コンクリートの材齢は44日である。

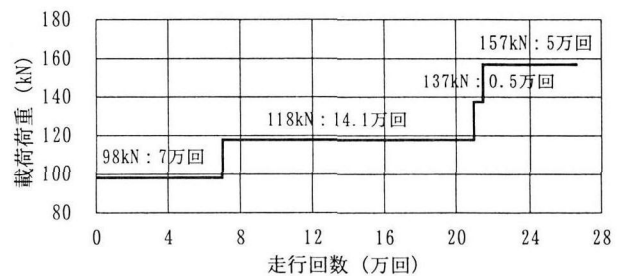


図-5 荷重プロセス

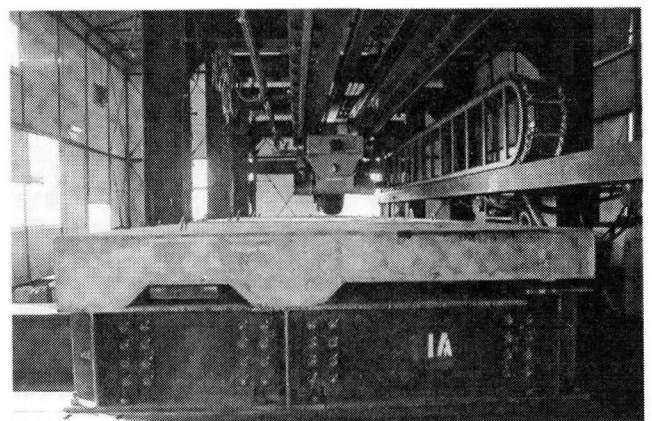


写真-1 試験装置および試験体

表-3 コンクリートの材料試験結果

番 号	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 ×10 ⁴ N/mm ²	ポアソン比	引張強度 N/mm ²
1	30.6	2.78	0.199	2.97
2	32.0	2.39	0.191	2.09
3	28.7	2.60	0.212	2.78
平均値	30.4	2.59	0.201	2.61

表-4 鋼材の引張強度試験結果

単位: N/mm²

番 号	異形鉄筋				鋼 板			
	D16		D19		PL		FB	
	降伏点 応力	引張 強さ	降伏点 応力	引張 強さ	降伏点 応力	引張 強さ	降伏点 応力	引張 強さ
1	395	594	349	560	288	442	294	444
2	406	598	353	561	279	427	301	442
3	400	595	356	566	278	427	292	445
平均値	400	596	353	562	282	432	296	444

材料試験結果のうち、圧縮強度についてはほぼ設計基準強度と同等の値を示しており、静弾性係数については道路橋示方書に規定されている設計基準強度が $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の場合の静弾性係数 $2.7\times 10^4\text{N/mm}^2$ との差が4%程度である。なお、標準養生を行ったコンクリートの供試体の材齢28日における圧縮強度の平均値は 30.2N/mm^2 であり、設計基準強度に等しい値を示している。

以上の結果から、試験体に用いたコンクリートが設計において設定したコンクリートの材料特性と同様な特性を有することが確認できた。

3.2 鋼材の材料特性

試験体の床版部に用いた材質 SD345 の異形鉄筋および合成床版の下鋼板に用いた材質 SS400 の鋼板の引張強度試験結果を表-4に示す。なお、鋼材は JIS Z 2241 金属材料引張試験方法に従って機械的性質を確認した。

引張強度試験結果のうち、異形鉄筋については公称降伏点応力 $345\sim 440\text{N/mm}^2$ 、公称引張強さ 490N/mm^2 以上を満足している。また、鋼板については公称降伏点応力が 245N/mm^2 以上、公称引張強さが $400\sim 510\text{N/mm}^2$ を満足している。なお、ミルシートに記載されている引張強度試験結果についても、上記の公称値を満足することを確認した。

以上の結果から、試験体に用いた鋼材が設計において設定した鋼材の材料特性と同様な特性を有することが確認できた。

4. 立体FEM解析

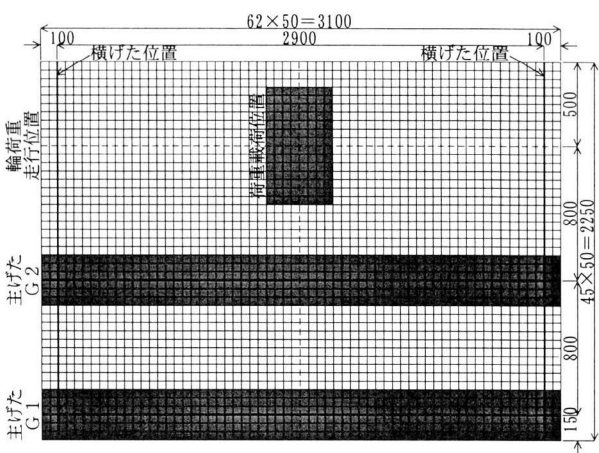
走行試験の測定結果と比較することを目的として、各試験体のFEM解析を行った。以下にFEM解析の解析モデルおよび床版部の換算版厚の算出方法について述べる。

4.1 解析モデル

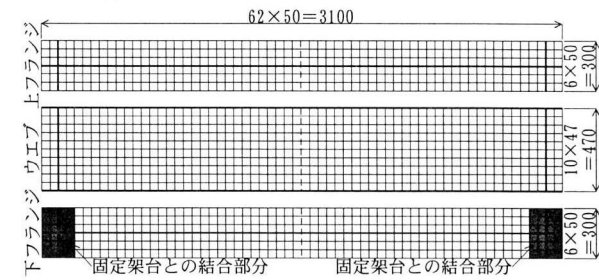
試験体はその構造から走行試験における輪荷重の载荷により床版のみならず主げたも同時に変形する。このため、FEM解析にあたっては、床版と主げたの変形を考慮できる立体的なモデル化を試験体に適用した。

床版および主げたの要素分割をそれぞれ図-6(a)および(b)に示す。床版および主げたは、等方性の薄板要素でモデル化し、床版については後述する換算版厚を、主げたについては上下フランジおよびウェブを構成する各鋼板の板厚を与えた。床版と主げたは、図-7に示すように骨組み要素によりモデル化した結合部材によって両者が一体化して挙動するように結合した。結合部材の配置は、橋軸方向については100mm間隔、橋軸直角方向については、フランジの両端と中央に3部材配置した。また、結合部材には無限大の剛性を与え、床版側の結合条件は回転変位成分を伝達しないものとし、主桁側の結合条件はすべての変位成分および回転変位成分を伝達するものとした。

図-8に解析モデルの全体図を示す。解析モデルの拘束条件は、図-6(a)に示す床版の横げた位置の鉛直成分を固定とし、図-6(b)において着色した主げたの下フランジと



(a)床版の要素分割および荷重載荷位置



(b)主げたの要素分割 (主げたG1・G2共通)

図-6 解析モデルの要素分割

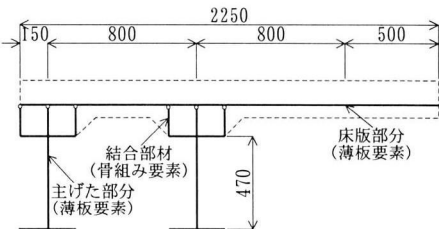


図-7 結合部材の配置 (試験体断面を示す。)

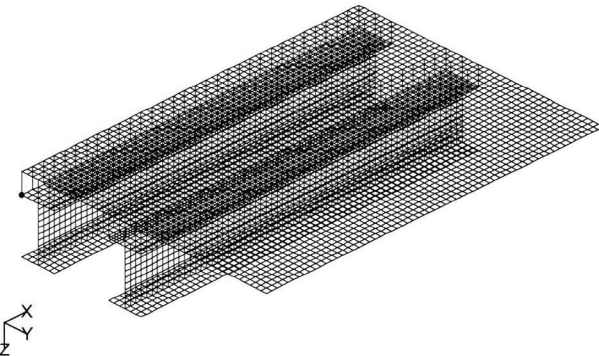


図-8 解析モデルの全体構造

表-5 各試験体の床版の換算版厚

単位: mm

	RC床版	合成床版		
		基本タイプ	下鋼板連続タイプ	床版厚低減タイプ
全断面有効時	203.6	256.1	256.1	199.3
引張領域無視時	115.1	132.9	132.9	100.9

固定架台とを結合する部分の鉛直成分を固定とした。一方、荷重条件は、輪荷重走行位置の横げた間隔の中央に走行試験の開始時の荷重である98kNを載荷した。また、荷重の分布範囲は、輪荷重の接地面積を20cm×50cmと仮定し、輪荷重の接地面から等分布荷重が床版厚の1/2の位置まで45度の角度で分散する範囲⁹⁾とした。なお、解析モデルの節点数は5796、要素数は5710である。

4.2 床版部の換算版厚

床版を薄板要素によりモデル化するさいの各試験体の換算版厚を表-5に示す。表中の換算版厚は、下鋼板とコンクリートとが完全に合成しているものとして算出したものであり、すべてコンクリートに換算した値である。換算版厚は、床版の全断面を有効とした場合と、コンクリートの引張領域を無視した場合の両方について算出した。ただし、合成床版の換算版厚については、いずれの場合に関しても下鋼板は全断面有効とし、横リブは換算版厚への寄与が比較的小さいことから無視した。なお、換算版厚の算出にあたっては、材料試験結果のばらつきを考慮して、コンクリートのヤング係数を既往の実験結果の平均値より算出し、ヤング係数比をすべて $n=10$ とした。また、ポアソン比については、コンクリートの材料試験による結果から $\nu=0.2$ に設定した。表-5に示すそれぞれのケースについてFEM解析を実施した。

5. 弾性たわみおよび弾性ひずみの性状

走行試験の測定結果のうち、走行回数に伴う各試験体の輪荷重による弾性たわみと鉄筋および下鋼板の弾性ひずみの経時変化を以下に示す。また、同時にFEM解析による値も図中に示す。

なお、測定値および解析値はすべて載荷荷重を98kNで除した値で測定値および解析値を除すことにより98kNに換算した値である。また、弾性たわみは横げたに固定した架台に変位計を取付け、床版と横げたとの相対変位を測定したものである。

5.1 RC床版の測定結果

図-9に試験体中央の橋軸直角方向断面(図-1のA-A断面)の弾性たわみの分布を示す。弾性たわみの測定値は、載荷初期においては床版の換算版厚をヤング係数比を $n=10$ と仮定し、かつ全断面有効とした時の解析値に比較してやや小さい値となるものの、たわみ分布はよく一致している。

図-10に試験体中央での張出し部先端付近(図-1のB点)の弾性たわみの経時変化を示す。弾性たわみの測定値は、載荷初期から21.1万回の118kN載荷までは一様な傾きで増加する傾向にあるが、21.1万回以降の137kNおよび157kN載荷においては増加の勾配が大きくなっている。なお、測定値の大きさは、走行試験終了時においては床版の換算版厚をヤング係数比を $n=10$ と仮定し、かつコンクリートの引張領域無視とした時の解析値の40%程度に留

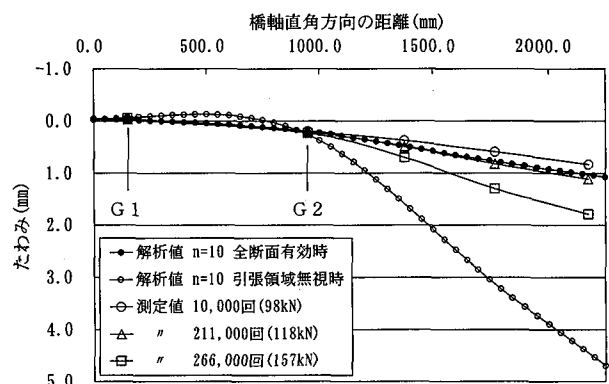


図-9 RC床版のたわみ分布

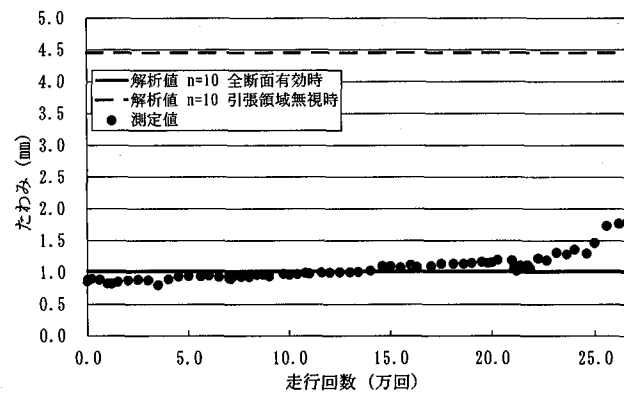


図-10 RC床版のたわみ経時変化

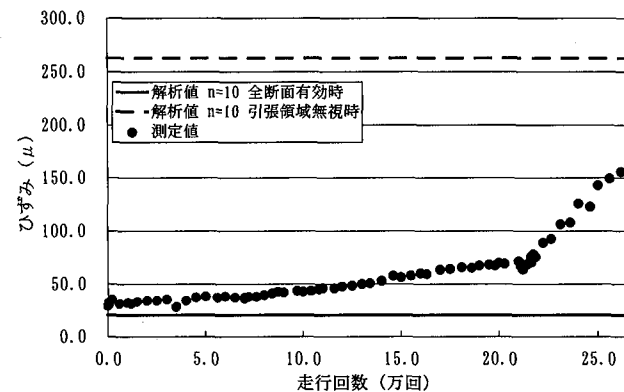


図-11 RC床版の主鉄筋ひずみ経時変化

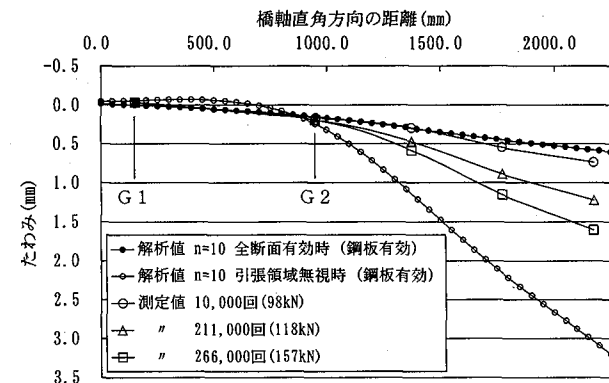


図-12 合成床版基本タイプのたわみ分布

まっている。

図-11 に試験体中央の張出し部根元付近（図-1 のC点）における主鉄筋の弾性ひずみの経時変化を示す。弾性ひずみの測定値は、弾性たわみと同様に载荷初期から21.1万回の118kN 载荷までは一様な傾きで増加する傾向にあるが、21.1万回以降の137kN および157kN 载荷においては勾配の増加が顕著である。なお、測定値の大きさは、载荷初期においては全断面有効時の解析値よりやや大きく、走行試験終了時には引張領域無視時の解析値の60%程度に留まっている。

5.2 合成床版基本タイプの測定結果

図-12 に試験体中央の橋軸直角方向断面（図-2 のA-A断面）の弾性たわみの分布を示す。弾性たわみの測定値は、载荷初期においては全断面有効時の解析値とほぼ等しい値となり、たわみ分布もよく一致している。

図-13 に試験体中央での張出し部先端付近（図-2 のB点）の弾性たわみの経時変化を示す。弾性たわみの測定値は、走行試験全体を通して急激な変化がなく、一様に増加する傾向にある。なお、測定値の大きさは、走行試験終了時には引張領域無視時の解析値の50%程度に留まっている。

図-14 に試験体中央の輪荷重走行位置直下（図-2 のC点）における下鋼板の橋軸直角方向に関する弾性ひずみの経時変化を示す。弾性ひずみの測定値は、弾性たわみに比較してばらつきがやや大きいものの、走行試験全体を通して急激な変化はない。測定値の大きさは、载荷初期においては全断面有効時の解析値よりやや大きく、21.6万回以降の157kN 载荷においては引張領域無視時の解析値を平均で9%程度上回っている。

上記の結果において、下鋼板とコンクリートとが完全に合成しているものとして算出した換算版厚を用いた解析値と測定値が比較的近い値を示すことから、張出し部において両者が一体化するために必要なスタッドが配置されており、下鋼板が床版の剛性および応力の伝達に寄与していることが判る。

5.3 合成床版下鋼板連続タイプの測定結果

一般に、合成床版の下鋼板は主げた上で不連続となる構造を採用している場合が多い。しかしながら、下鋼板とコンクリートが合成する前の段階において下鋼板の剛性の連続性を確保することや、合成した後の曲げモーメントの伝達を円滑にするためには、主げた上において下鋼板を連続させる構造を採用することが有効であると考えられる。特に、張出し部を支持する外主げた上に発生する曲げモーメントは、合成前および合成後ともに内主げた上での発生曲げモーメントより大きいことが予想される。このことから、図-3 に示すように外主げたG2上で下鋼板を連続させた試験体を製作して、下鋼板の連続の有無による挙動の差異を確認する。

図-15 に試験体中央の橋軸直角方向断面（図-2 のA-A断面に対応）の弾性たわみの分布を示す。弾性たわみの

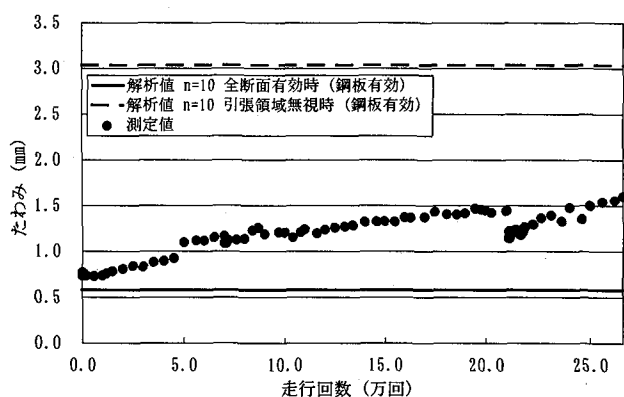


図-13 合成床版基本タイプのたわみ経時変化

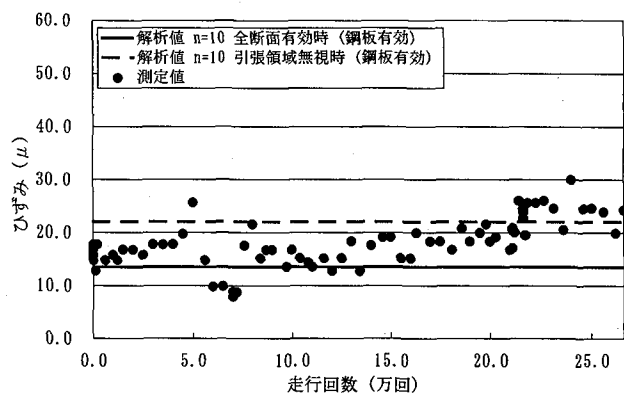


図-14 合成床版基本タイプの下鋼板ひずみ経時変化

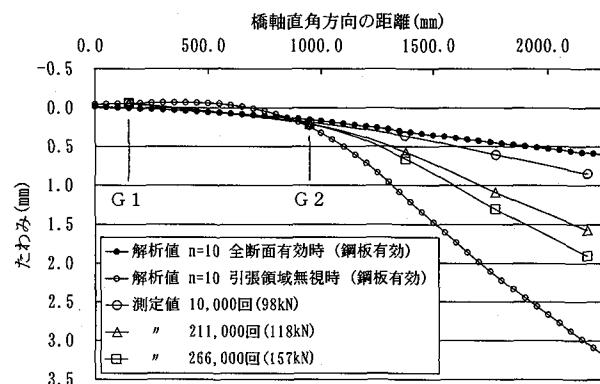


図-15 合成床版下鋼板連続タイプのたわみ分布

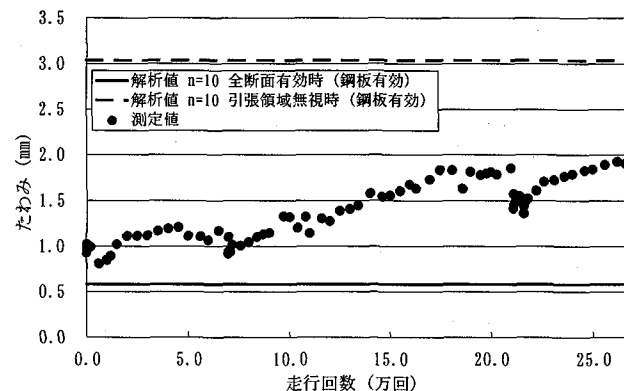


図-16 合成床版下鋼板連続タイプのたわみ経時変化

測定値は、載荷初期においては全断面有効時の解析値に比較しやや大きくなっている。

図-16に試験体中央での張出し部先端付近（図-2のB点に対応）の弾性たわみの経時変化を示す。弾性たわみの測定値は、走行試験全体を通して急激な変化がなく、その大きさは、走行試験終了時においては引張領域無視時の解析値の60%程度の値である。

上記の結果において、下鋼板連続タイプの弾性たわみが、外主げたG2上の下鋼板の構造のみが異なる基本タイプに比較して平均で17%程度大きい値となっている。この理由は明らかではないが、図-3に示すように上フランジとタイプレートとの間隔が20mm程度と狭く、この部分にコンクリートが十分に充填されていなかったことによってハンチ部の剛性の低下をもたらし、弾性たわみを増加させたためと推定される。したがって、このような下鋼板を連続させるような構造を採用する場合は、主げた上フランジ上のコンクリートの充填に十分に留意した施工方法を採用する必要があるものと考えられる。

5.4 合成床版床版厚低減タイプの測定結果

コンクリート版厚を合成床版基本タイプより 50mm 低減した合成床版の最小厚である 150mm とした試験体を製作し、コンクリート版厚の違いによる挙動の差異を確認する。

図-17に試験体中央の橋軸直角方向断面（図-2のA-A断面に対応）の弾性たわみの分布を示す。弾性たわみの測定値は、載荷初期においては全断面有効時の解析値とよく一致しており、また、走行回数 22.6 万回においては引張領域無視時の解析値に近い。

図-18に試験体中央での張出し部先端付近（図-2のB点に対応）の弾性たわみの経時変化を示す。弾性たわみの測定値は、走行回数 21.6 万回の 137kN 載荷までは一様に増加するが、21.6 万回以降の 157kN 載荷において急激に増加しはじめたため、22.6 万回で実質的に走行試験を終了した。なお、このときの測定値の大きさは、引張領域無視時の解析値の 80%程度にも達する。

図-19に試験体中央の輪荷重走行位置直下（図-2のC点に対応）における下鋼板の橋軸直角方向に関する弾性ひずみの経時変化を示す。弾性ひずみの測定値は、載荷初期においてすでに引張領域無視時の解析値とほぼ等しく、走行試験全体を通しておおむねこの解析値の上下にばらついている。

上記の結果において、床版の弾性たわみの測定値は基本タイプに比較して平均で2.2倍程度であり、解析値の比率とおおむね一致する。また、下鋼板の弾性ひずみの測定値は基本タイプに比較して平均値で1.9倍程度であり、解析値の比率である1.5倍を上回っている。

6. コンクリートのひびわれ性状

走行試験におけるコンクリートのひびわれ状況をRC床版については床版の上下面および側面、合成床版につい

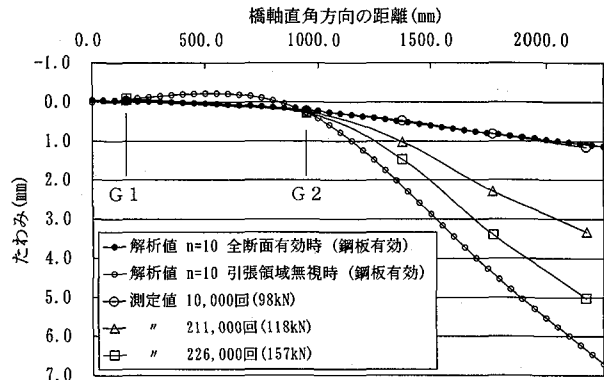


図-17 合成床版床版厚低減タイプのたわみ分布

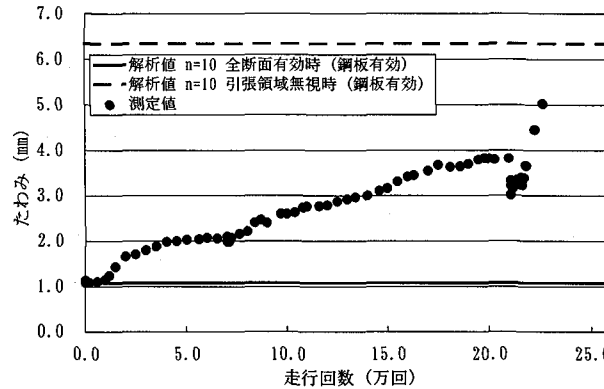


図-18 合成床版床版厚低減タイプのたわみ経時変化

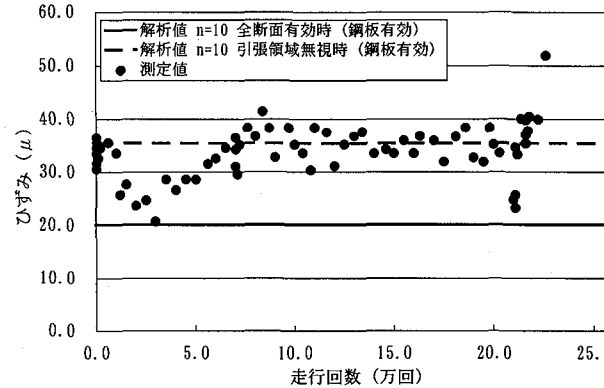


図-19 合成床版床版厚低減タイプの下鋼板ひずみ経時変化

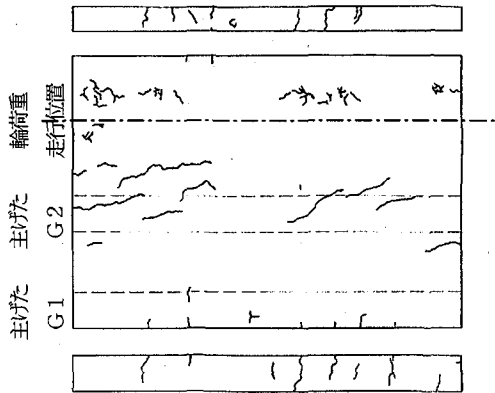


図-20 RC床版上面・側面のひびわれ状況

ては床版の上面と側面について以下に示す。ただし、床版の形式によりひびわれの性状が異なることから、各試験体における特徴的なひびわれが発生した走行回数でのひびわれ状況を示すものとする。なお、走行試験開始時のコンクリート材齢は前述のように44日であったが、このときすべての試験体のコンクリートに初期ひびわれは見られなかったことを付記する。

6.1 RC床版のひびわれ状況

図-20 に床版上面および側面の走行回数 21.1 万回におけるコンクリートのひびわれ状況図を示す。ひびわれは、輪荷重走行位置付近と外主げた G 2 付近に発生している。輪荷重走行位置のひびわれは載荷初期の 3.0 万回程度から発生しており、外主げた G 2 位置のひびわれは載荷荷重が 137kN となった 21.1 万回以降に発生している。走行試験全体を通して、ひびわれ幅の最大値は 0.13mm 程度である。

図-21 に床版下面の走行試験終了時におけるコンクリートのひびわれ状況図を示す。下面については、変位計が多数配置されていたことから、走行試験の途中段階におけるひびわれのスケッチが不可能であったため、走行試験終了時でのひびわれ状況を確認した。なお、斜線部分は、主げたおよび横げた位置であり、ひびわれが目視できない箇所である。ひびわれは、橋軸直角方向に発生しており、試験体の中央部ほどひびわれ長さが大きい。また、輪荷重走行位置付近ではひびわれが橋軸方向にも発生している。

6.2 合成床版基本タイプ

図-22 に床版上面および側面の走行回数 7.0 万回におけるコンクリートのひびわれ状況図を示す。ひびわれは、横リブ上および主鉄筋上において橋軸直角方向に発生しており、発生時期は 3.0 万回程度である。走行試験全体を通して、ひびわれ幅の最大値は 0.16mm 程度である。

これらのひびわれは、コンクリートの収縮を鋼部材が拘束することに起因したものと考えられる。本研究においては、基礎的な試験データを得ることを目的としているため、床版に普通コンクリートを使用した が、これらのひびわれに対しては膨張コンクリートの使用や溶接金網を横リブ上に敷設することなどの工夫⁹⁾が有効であると考えられる。

なお、合成床版下鋼板連続タイプのひびわれ状況については、基本タイプとほぼ同じであるため割愛する。

6.3 合成床版床版厚低減タイプのひびわれ状況

図-23 に床版上面および側面の走行回数 7.0 万回におけるコンクリートのひびわれ状況図を示す。ひびわれは張出し部全域にわたり半円弧状に発生しており、自由辺付近の押抜きせん断の破壊モードと類似している。半円弧状のひびわれ発生時期は 3.0 万回程度であり、載荷荷重の増加に伴いこの円弧状のひびわれが内側へと進展する。また、ひびわれは横リブ上にも橋軸直角方向に発生している。

この結果を合成床版基本タイプと比較すると、コンクリート版厚の違いによりひびわれの性状が大きく異なることが判る。

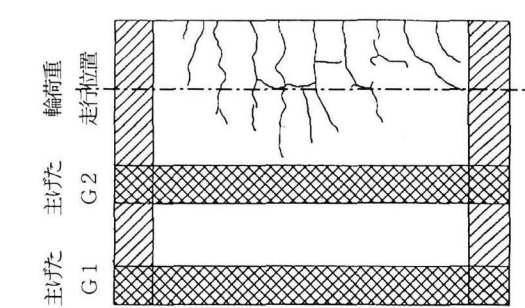


図-21 RC床版下面のひびわれ状況
(斜線部は主げたおよび横げた位置を示す。)

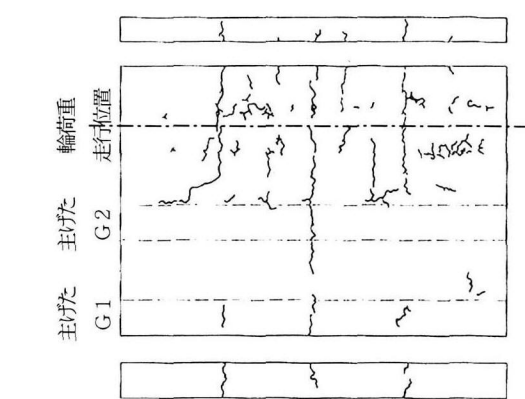


図-22 合成床版基本タイプの
床版上面・側面のひびわれ状況

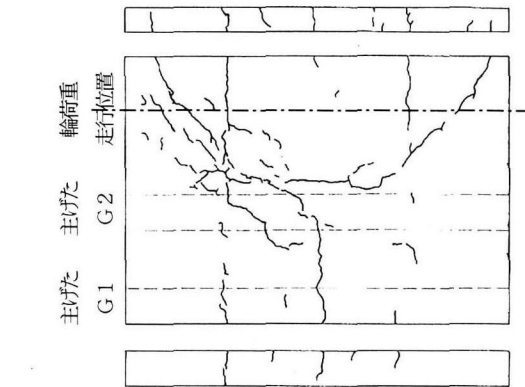


図-23 合成床版床版厚低減タイプの
床版上面・側面のひびわれ状況

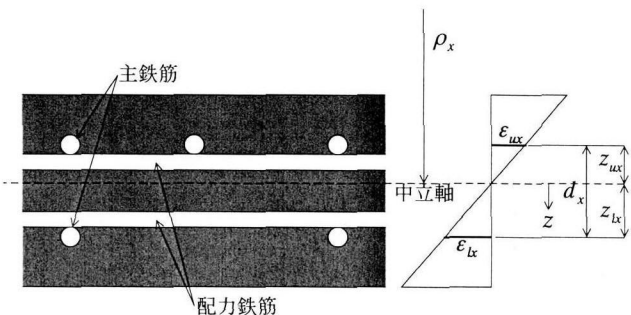


図-24 主鉄筋のひずみと床版の曲率の関係

7. 張出し部の曲げモーメント性状

床版張出し部の曲げモーメントをRC床版については上下鉄筋の弾性ひずみの測定結果から、合成床版については上側鉄筋と下鋼板の弾性ひずみの測定結果から算出し、FEM解析による曲げモーメントの解析結果もあわせて以下に示す。なお、弾性たわみおよび弾性ひずみと同様に測定値および解析値はすべて98kNに換算した値である。

7.1 曲げモーメントの算出方法

主鉄筋方向断面の主鉄筋のひずみと床版の曲率の関係を図-24のように示せば、下側主鉄筋のひずみと床版の曲率は式(1)のように関係付けられる。

$$\varepsilon_{lx} = \frac{z_{lx}}{\rho_x} \quad (1)$$

ここに、 ε_{lx} ：下側主鉄筋のひずみ
 z_{lx} ：中立軸から下側主鉄筋までの距離
 ρ_x ：主鉄筋方向断面の曲率

また、中立軸から下側主鉄筋までの距離と上下主鉄筋のひずみの関係は式(2)の通りである。

$$z_{lx} = \frac{d_x \cdot \varepsilon_{lx}}{\varepsilon_{lx} - \varepsilon_{ux}} \quad (2)$$

ここに、 d_x ：上側主鉄筋から下側主鉄筋までの距離
 ε_{ux} ：上側主鉄筋のひずみ
 式(2)を式(1)に代入して式(3)を得る。

$$\rho_x = \frac{z_{lx}}{\varepsilon_{lx}} = \frac{d_x \cdot \varepsilon_{lx}}{\varepsilon_{lx} \cdot (\varepsilon_{lx} - \varepsilon_{ux})} \quad (3)$$

同様にして、配力鉄筋方向断面に関して式(4)を得る。

$$\rho_y = \frac{z_{ly}}{\varepsilon_{ly}} = \frac{d_y \cdot \varepsilon_{ly}}{\varepsilon_{ly} \cdot (\varepsilon_{ly} - \varepsilon_{uy})} \quad (4)$$

一方、曲げモーメントと曲率の関係は式(5)および式(6)であり、これに式(3)および式(4)を代入することによって床版に作用する曲げモーメントが算出できる。

$$M_x = -D \left(\frac{1}{\rho_x} + \nu \frac{1}{\rho_y} \right) \quad (5)$$

$$M_y = -D \left(\frac{1}{\rho_y} + \nu \frac{1}{\rho_x} \right) \quad (6)$$

ここに、 M_x ：主鉄筋方向の曲げモーメント
 M_y ：配力鉄筋方向の曲げモーメント
 D ：床版の換算剛性
 ν ：ポアソン比

なお、合成床版については上記の下側主鉄筋および配力鉄筋のひずみの代わりに、下鋼板の主鉄筋方向および配力鉄筋方向のひずみを用いる。

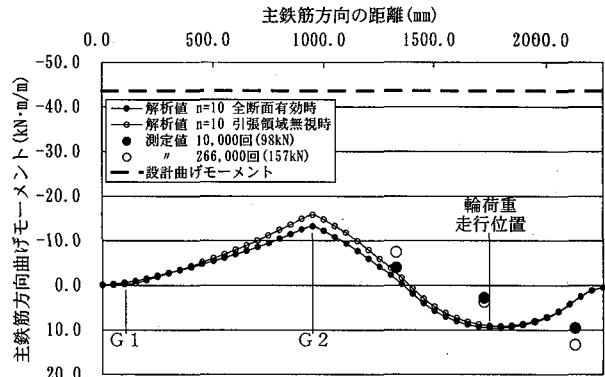


図-25 RC床版の主鉄筋方向曲げモーメント分布

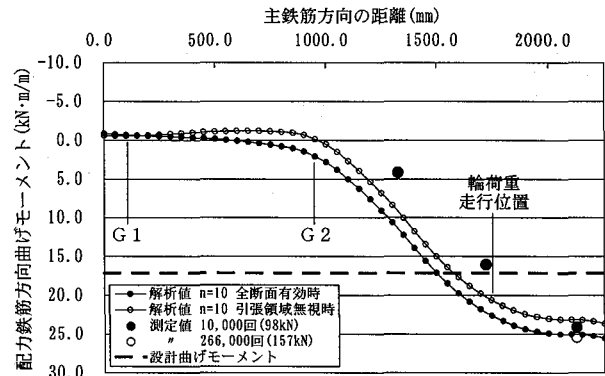


図-26 RC床版の配力鉄筋方向曲げモーメント分布

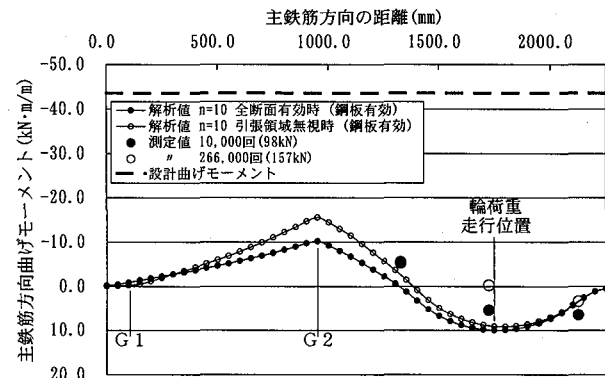


図-27 合成床版基本タイプの主鉄筋方向曲げモーメント分布

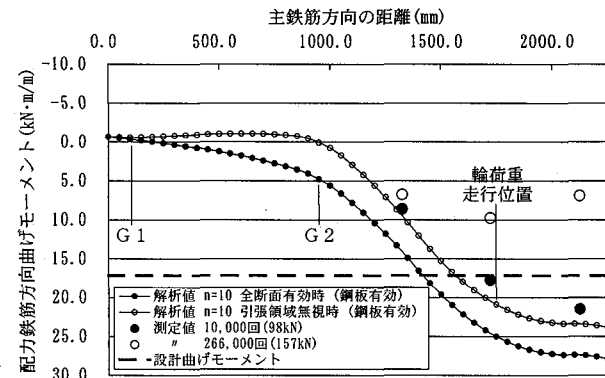


図-28 合成床版基本タイプの配力鉄筋方向曲げモーメント分布

7.2 RC床版の曲げモーメント分布

図-25 および図-26 に試験体中央の橋軸直角方向断面(図-1のA-A断面)における主鉄筋方向(橋軸直角方向)および配力鉄筋方向(橋軸方向)の曲げモーメント分布の測定値と解析値を示す。また、図中には道路橋示方書に規定された床版の設計曲げモーメントから衝撃の影響を除いた値をあわせて示す。

図中の測定値は、走行回数1.0万回および走行試験終了時の26.6万回での弾性ひずみの測定値から曲げモーメントを算出した結果である。弾性ひずみから曲げモーメントを算出するさいの床版の換算剛性は、①走行回数1.0万回については全断面有効時における換算版厚により算出し、②走行回数26.6万回については張出し部の先端において弾性たわみの測定値と等価になる解析値を与える換算版厚により算出した。一方、図中の解析値は、これらの換算版厚を用いて解析した結果である。なお、換算剛性の算出にあたっては、ヤング係数比を $n=10$ 、ボアソン比を $\nu=0.2$ とした。

主鉄筋方向に関しては、測定値および解析値ともに外主げたG2付近では負の曲げモーメントが発生し、輪荷重走行位置付近から張出し部先端にかけては正の曲げモーメントが発生している。両者を比較すると、測定値が張出し部先端で大きく、輪荷重走行位置で小さい値となっており、直線的な分布形状を示している。負の曲げモーメントが最大値となる外主げたG2上に着目すると、解析値は設計曲げモーメントの40%以下に留まっている。この理由は、設計曲げモーメントが外主げた位置を固定とした片持ち版として算出されているのに対し、解析値は支間部を含めた張出し版として算出されていることや主げたの変形を考慮したモデル化を行っているためであると考えられる。なお、張出し部の大半に正の曲げモーメントが発生しているが、道路橋示方書にはこれに関する規定はない。

配力鉄筋方向に関しては、測定値および解析値ともに張出し部全体にわたり正の曲げモーメントが発生している。走行回数1.0万回と26.6万回における測定値はおおむね等しい値であり、引張領域無視時の解析値に比較的近い値を示す。正の曲げモーメントが最大値となる張出し部先端に着目すると、解析値は主鉄筋方向とは逆に設計曲げモーメントの1.4倍程度の値となっている。

7.3 合成床版基本タイプの曲げモーメント分布

図-27 および図-28 に試験体中央の橋軸直角方向断面(図-1のA-A断面)における主鉄筋方向(橋軸直角方向)および配力鉄筋方向(橋軸方向)の曲げモーメント分布の測定値と解析値を示す。図中の測定値および解析値の算出方法は、RC床版の場合と同様である。

主鉄筋方向に関しては、ほぼRC床版と同様な曲げモーメント分布を示している。輪荷重走行位置付近において正の曲げモーメントが発生していることは、図-14に示した輪荷重走行位置直下の下鋼板の橋軸直角方向に関する弾性ひずみが正の値であることと一致する。なお、外主げたG2上における解析値と設計曲げモーメントの比率も

40%以下である。

配力鉄筋方向に関しては、走行回数1.0万回における曲げモーメントの測定値が引張領域無視時の解析値に近い値を示す。また、走行回数26.6万回における曲げモーメントの測定値は、輪荷重走行位置および張出し部先端において1.0万回の測定値の50%以下となっている。これは、鉄筋のひずみ測定位置である試験体中央の橋軸直角方向断面付近に図-22に示すようなひびわれが発生したことによる影響であると考えられる。なお、張出し部先端付近における解析値と設計曲げモーメントの比率はRC床版と同様に1.4倍程度である。

8. まとめ

本研究は、床版張出し部の挙動やコンクリートのひびわれなどの基礎的な性状を明らかにすることを目的として、RC床版および合成床版を対象とした張出し部の走行試験を実施したものである。走行試験における測定結果のうち、床版のたわみ、鉄筋のひずみ、下鋼板のひずみについて、立体FEM解析の結果との比較を通して考察した。また、コンクリートのひびわれ性状や張出し部に発生する曲げモーメント性状についても検討を行った。

本研究において、得られた結果は以下の通りである。

(1) RC床版について

- ・床版の弾性たわみは、走行試験終了時において引張領域無視時の解析値の40%程度に留まる。
- ・137kN および 157kN 載荷において、床版の弾性たわみおよび鉄筋の弾性ひずみは、いずれも増加の勾配が大きくなる傾向にある。
- ・コンクリートのひびわれは、床版上面については外主げた付近の橋軸方向に、床版下面については橋軸直角方向に発生する。

(2) 合成床版について

- ・基本タイプでは、床版の弾性たわみは走行試験終了時において張領域無視時の解析値の50%程度に留まる。
- ・合成床版の張出し部において、下鋼板は床版の剛性および応力の伝達に寄与する。
- ・コンクリートのひびわれは、走行試験の比較的初期の段階において、床版上面の横リブ位置および主鉄筋位置に発生する。
- ・下鋼板連続タイプでは、基本タイプに比較して弾性たわみが増加している。この原因は、主げた上フランジ上にコンクリートが十分に充填されていなかったものと推定される。
- ・床版厚低減タイプには、張出し部全域にわたり半円弧状のひびわれが発生し、157kN 載荷において弾性たわみが急増する。
- ・なお、床版厚低減タイプは、床版に大きな損傷がもたらされることを前提として製作したものである。合成床版の疲労耐久性評価に関して、下鋼板とコンクリートを結合するスタッドに作用するせん断応力度が指標の一つと考えられるが、この試験体の98kN 載荷および157kN

載荷におけるスタッドに作用するせん断応力度の簡易計算値⁹⁾は、それぞれ 120N/mm^2 および 190N/mm^2 であり、許容値である 50N/mm^2 を大きく上回っていることを付記する。

(3) 張出し部の曲げモーメント性状について

- ・主鉄筋方向（橋軸直角方向）については、外主げた付近では負の曲げモーメントが発生し、輪荷重走行位置付近から張出し部先端にかけて正の曲げモーメントが発生する。また、配力鉄筋方向（橋軸方向）については、張出し部全体にわたり正の曲げモーメントが発生する。
- ・主鉄筋方向の負の曲げモーメントの最大値は設計曲げモーメントの40%以下に留まっている。一方、配力鉄筋方向の正の曲げモーメントの最大値は主鉄筋方向とは逆に設計曲げモーメントの1.4倍程度の値となっている。

なお、今後の課題として、本研究で得られた結果をもとに、床版張出し部のより合理的な設計方法について検討を行う予定である。さらに、張出し部に作用するせん断力の性状や異方性の影響、また、合成床版に関しては下鋼板とコンクリートを結合するスタッドの剛性の評価などに関する研究を行う必要がある。

最後に、本研究における輪荷重走行試験の実施および測

定データの整理にあたり、当時大阪工業大学研究生の松尾和政氏（現・株式会社橋梁メンテナンス勤務）の多大のご助力を得たことをここに記し、感謝を表する次第である。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計，pp.8-31，2000.
- 2) 渡辺 滉，街道 浩，水口和之，村松竹司，松井繁之，堀川都志雄：鋼・コンクリート合成床版の開発と実橋への適用について，鋼橋床版シンポジウム論文集，pp.213-218，1998.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，丸善，1996.
- 4) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 平成9年版，丸善，1997.
- 5) 前田幸雄，松井繁之：道路橋RC床版の設計曲げモーメント式に関する一考察，土木学会論文報告集 第252号，pp.11-22，1976.
- 6) 渡辺 滉，鈴木裕二，松井繁之，堀川都志雄，街道 浩，阿部昌雄：横リブで補強したロビンソン型合成床版の開発，土木学会第52回年次学術講演会概要集，pp.338-339，1997.

(2001年9月14日受付)