

軽量化を図ったサンドイッチ型複合床版の輪荷重走行試験

Wheel Running Test on Sandwich Slab with Lightweight Concrete

上條崇¹，柳本泰伴²，遠山義久¹，中川敏之¹

Takashi KAMIJO, Yasutomo YAGIMOTO, Yoshihisa TOOYAMA and Toshiyuki NAKAGAWA

¹ 住友金属工業株式会社 土木橋梁部 (〒104-6111 東京都中央区晴海 1-8-11)

² 住友金属工業株式会社 土木橋梁部 (〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜 4-5-33)

Recently, the continuous composite girder bridge with a steel-concrete composite slab has been attracting attention because of economical efficiency, roadability and load carrying capacity. Authors have developed a steel-concrete sandwich slab. The sandwich slab is composed of upper steel plates, lower steel plates, H-beams and filled concrete. By applying the sandwich slab to continuous composite girder bridge, the design of superstructure becomes more rational. However, the sandwich slab is slightly heavier than the ordinary composite slab that consists of bottom steel plates and concrete, because the amount of steel material of the sandwich slab is large. So, we are trying to lighten the sandwich slab by using the lightweight concrete. This paper describes the result of a wheel running test carried out to check the fatigue durability of the sandwich slab with lightweight concrete.

Key Words: sandwich slab, fatigue durability, composite slab, hybrid structure

1. まえがき

近年，合成床版を用いた連続合成桁が注目されている。著者らは，経済性，走行性，耐荷力に優れた合成床版としてサンドイッチ型複合床版（以下，サンドイッチ床版）を提案し疲労耐久性を実験検討している^{1),2)}。サンドイッチ床版の概要を図1に示す。いまのところ，サンドイッチ床版の設計では床版厚をオープンサンドイッチ型合成床版の最小コンクリート厚算定式³⁾に準じて決定しているが，サンドイッチ床版は上下2枚の鋼板を有しているのでコンクリート厚を一般的な合成床版と同じにすると合成床版よりも重量が大きくなる。

既往の実験から，十分に版厚を確保したサンドイッチ床版ではRC床版や他の合成床版のようにコンクリートのひび割れ進展が支配的な損傷モードにならないことが確認されている。これは，サンドイッチ床版は上下2枚の鋼板を有するにも関わらず，一般的な合成床版と同等のコンクリート厚を採用しているために，耐荷力や床版各部の発生応力の余裕が大きいためと考えられる。

そこで著者らは，サンドイッチ床版の充填材に軽量コンクリートを用いるとともに，従来よりも床版厚を低減することでサンドイッチ床版の軽量化を検討中である。

本文では軽量化を図ったサンドイッチ床版の疲労耐久性を輪荷重走行試験で確認した結果を報告する。輪荷重走行試験は独立行政法人土木研究所の試験機で実施した。

本研究が対象とするサンドイッチ床版は従来のサンドイッチ床版に対して以下2点を変更したものである。

1) 充填材に軽量I種コンクリートを用いることで，充

填材の重量を15%低減。

2) 充填コンクリートの厚さを約15%低減。

2. 試験内容

2.1 実験供試体

供試体は床版支間 3.0m の連続版として設計したサンドイッチ床版であり，上下鋼板の板厚を9mm，コンクリート厚を150mmとした。上下鋼板の間隔は橋軸直角方向に配置されたH形鋼（H150x150x7/10）により一定に保たれており，上下鋼板とH形鋼とからなる鋼殻内に軽量高流動コンクリートを充填した。供試体のコンクリート厚は，同じ床版支間に対して底鋼板1枚の合成床版（TRC床版⁴⁾）で設計した場合の曲げ剛性を，サンドイッチ床版の曲げ剛性が下回らない範囲で低減した。供試体形状を図-2に既往の実験と本研究の供試体の曲げ剛

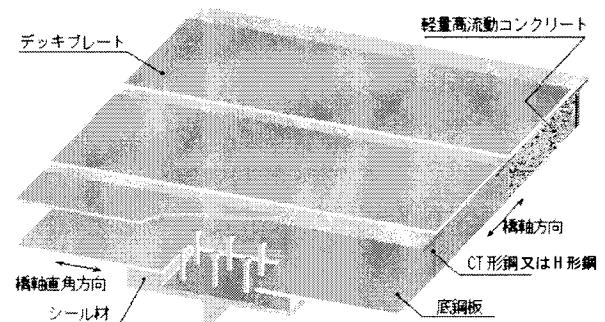


図-1 サンドイッチ型複合床版

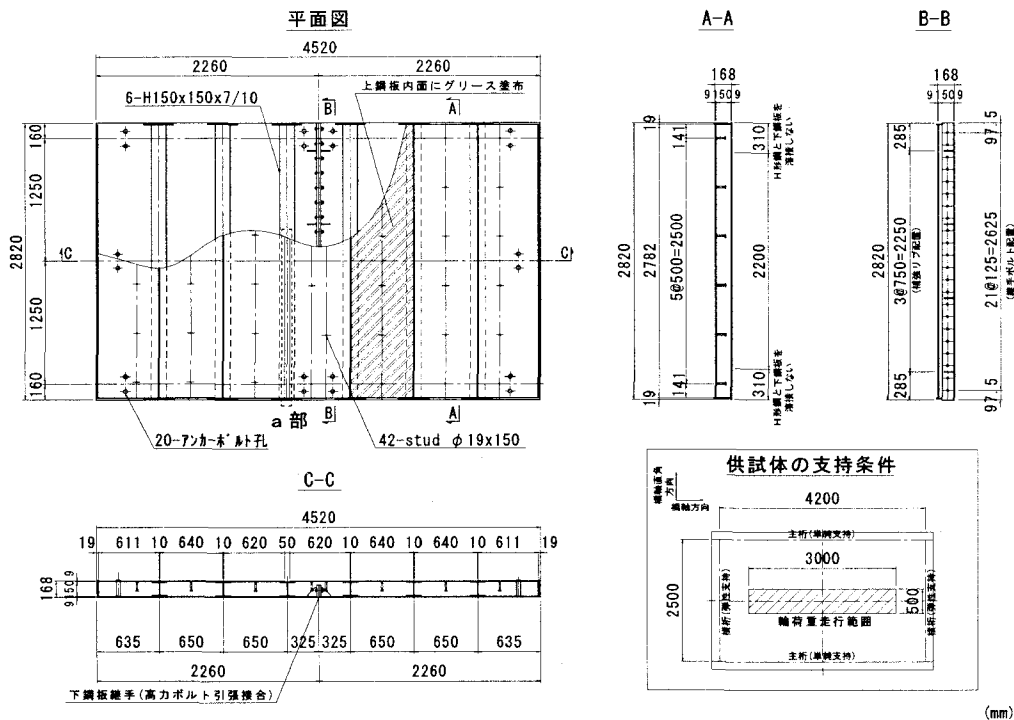


図-2 供試体形状と支持条件

表-1 曲げ剛性の比較

	床版全厚 (mm)	コンクリート厚 (mm)	鋼板厚 (mm)	断面二次モーメント(mm ⁴ /mm)			
				橋軸直角方向		橋軸方向	
サンドイッチ床版(本研究)	168	150	9+9	1.47×10 ⁵	(1.29)	1.25×10 ⁵	(1.27)
サンドイッチ床版(文献2)	218	200	9+9	2.67×10 ⁵	(2.35)	2.21×10 ⁵	(2.24)
TRC床版(文献4)	206	200	6	1.13×10 ⁵	(1.00)	9.85×10 ⁴	(1.00)

※1) 断面二次モーメントはヤング係数比を $E_s/E_c=10$ として鋼材換算で表示.

※2) 断面二次モーメントは引張領域のコンクリートを無視した断面で算出. () は TRC 床版に対する比.

表-2 コンクリートの配合

コンクリート 種類	目標フロー (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤(C×%)
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤
軽量高流動	65±5	4.5±1.5	40	175	438	827	547	1.0

粗骨材； 造粒系人工軽量骨材，表乾密度 1.68 g/cm³，絶乾密度 1.34 g/cm³，含水率 26.5%

性の比較を表-1 に示す.

供試体の橋軸方向中央には下鋼板継手（パネル継手）を設けるとともに上鋼板とコンクリートとが完全に剥離した状態を模擬した充填区画を設け（上鋼板内面にグリースを塗布してコンクリートを充填），これらの部位が疲労耐久性の面で弱点となるか否かを検討した.

下鋼板継手は高力ボルト引張接合方式とした. 下鋼板継手の詳細を図-3 に示す.

充填コンクリートは造粒系人工軽量骨材を用いた軽量Ⅰ種コンクリートであり，コンクリートを狭い鋼殻内に充填する必要性から単位セメント量を高めて高流動コンクリートとしている. このため，一般的な床版コンクリートよりも圧縮強度が高目である. なお，供試体のコンクリートの配合は実橋床版に適用する配合⁵⁾と同等とした. コンクリート配合表を表-2 に，コンクリートの材料

試験結果を表-3 に，鋼材の引張試験結果を表-4 に示す.

供試体の上下鋼板と形鋼との溶接方法を図-4 に示す. 隣接する上鋼板同士および上鋼板とH形鋼上フランジとの溶接はI形鋼先の突合せ溶接（図-4(a)）を基本としたが，一部の溶接線（図-2のa部）では，上鋼板は連続させずに上鋼板とH形鋼とをすみ肉溶接する方法（図-4(b)）を採用した. 図-4(a)の溶接方法は，上鋼板が橋軸方向に連続しているの上鋼板の橋軸方向応力は隣接する上鋼板同士で直接に伝達される. 一方，図-4(b)の溶接方法では上鋼板の橋軸方向応力はすみ肉溶接を介してH形鋼上フランジへ伝達される構造である. 図-4(b)の溶接方法は製作誤差，施工誤差への対応が容易であるものの，すみ肉溶接に溶接線直交方向のせん断力が作用するので，図-4(a)よりは疲労強度が劣ると考えた. 供試体に両方式の溶接部を設けることで溶接方法の差異によって

表-3 コンクリートの材料試験結果

	材 齢 (日)	圧縮強度 f_c (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	ポアソン比 ν	引張強度 f_t (N/mm ²)
走行試験開始時	32	49.2	2.26×10^4	0.205	3.30
走行試験終了時	54	51.1	2.19×10^4	0.210	2.66

表-4 鋼材の引張試験結果

種 類	材 質	降伏応力度 f_{sy} (N/mm ²)	引張強さ f_{su} (N/mm ²)	破断伸び [*] (%)	使用部位
鋼板 t=9mm	SS400	285	441	43.2	上下鋼板
鋼板 t=22mm		264	422	53.8	継手板
H-150x150x7/10		305	439	42.4	

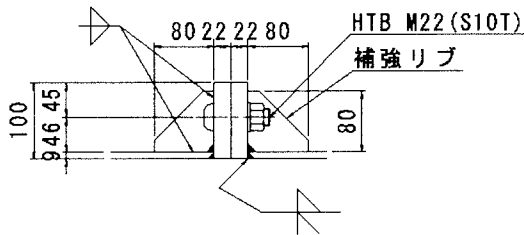


図-3 下鋼板継手

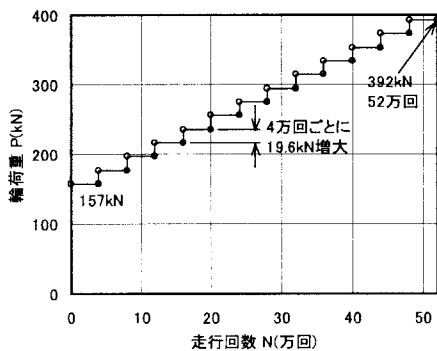


図-5 載荷パターン

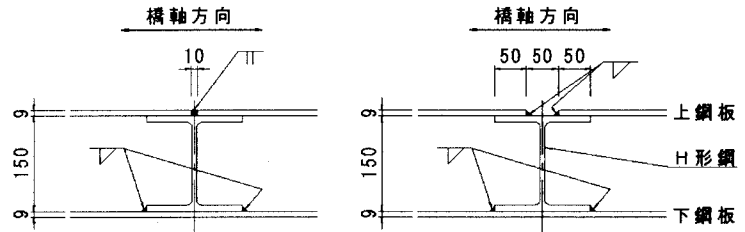


図-4 上下鋼板と形鋼との溶接方法

表-5 解析ケース

	床版本体の 曲げ剛性 ^{*1}	下鋼板継手の 回転ばね	セルのせん断 変形の影響
case0	全断面有効	—	—
case1	引張域コンクリート 無視(RC断面)	—	—
case2		○	—
case3		○	○

*1) 床版本体の曲げ剛性はヤング係数比を $E_s/E_c=10$ として算出。

疲労亀裂発生時期に差が生じるか否かを検討した。しかし、結果的に今回実験した範囲ではいずれの溶接継手にも損傷は生じなかった。

2.2 載荷方法

供試体は 2.5m 間隔の主桁で単純支持し供試体の橋軸方向端部は主桁と結合された横桁 (H300x300x10/15) で弾性支持した。

載荷パターンは階段状荷重漸増載荷 (図-5) とした。供試体上面の輪荷重走行レーンには橋軸直角方向 500mm×橋軸方向 200mm の載荷ブロックを並べ、載荷ブロックを介して輪荷重を供試体に作用させた。

3. FEM解析

3.1 解析ケース

実験結果と比較するため、シェル要素による弾性解析を実施し床版の断面力ならびに各部の応力度を計算した。解析パラメータは以下とした。解析ケースを表-5 に示す。

a) 床版本体の曲げ剛性

b) 下鋼板継手の変形の影響

c) サンドイッチ床版のコンクリート充填区画 (セル) のせん断変形の影響

サンドイッチ床版は橋軸直角方向にだけH形鋼を配置しているため、橋軸方向と橋軸直角方向の曲げ剛性に差がある。このため、解析では床版を材料異方性を有する均質板として扱った。モデルに与える材料定数は以下の手順で設定した。

- 1) Huber の式で床版の板剛性 (曲げ, ねじり) を算出。
- 2) 解析モデルの板厚は供試体版厚と同じとし、1) で求めた板剛性と均質板の板剛性が等しくなるように弾性係数とポアソン比を調整。
- 3) 解析モデルの横せん断弾性係数には充填コンクリートのせん断弾性係数を与える。ただし、セルのせん断変形を考慮する case3 は 3.3 の方法に従う。

上記 1), 2) の具体的な計算方法は文献 6) を参考にした。実験では床版上面に 500×200mm の寸法の輪荷重を載荷しているが、解析ではこれに床版厚の 1/2 深さまでの荷重分散効果を加味して橋軸直角方向 668mm×橋軸方

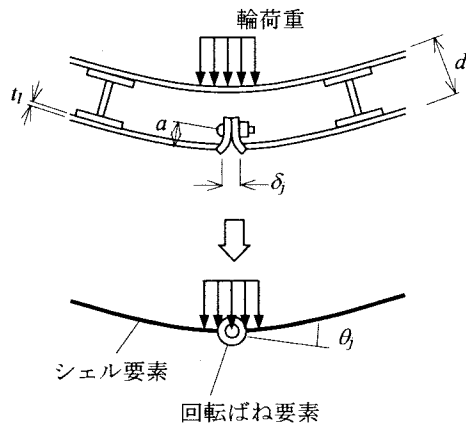


図-6 下鋼板継手のモデル化

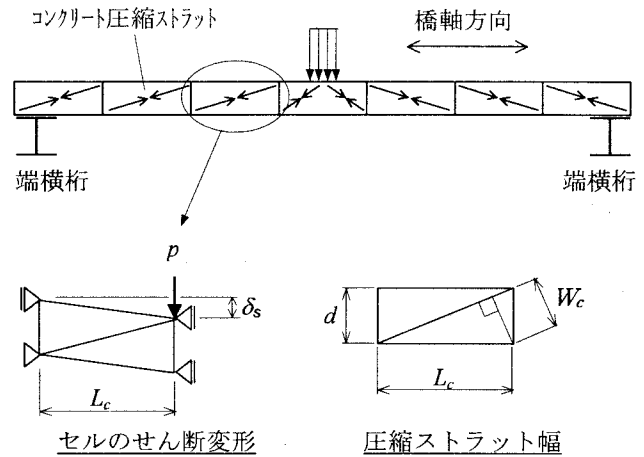


図-7 トラス機構に基づく版のせん断剛性（橋軸方向）

向 368mm の寸法で等分布荷重をモデル中央に載荷した。

3.2 下鋼板継手の回転ばね

下鋼板の連結に用いた高力ボルト引張接合では、継手板の弾性変形により継手板下端に目開きが生じ、版としてみると継手部にわずかが角変形が生じて版のたわみが増大する。

FEM の case2, case3 では、高力ボルト引張接合による底鋼板継手を以下の手順で回転ばねに置換しモデルに考慮した。下鋼板継手のモデル化要領を図-6 に示す。

継手板のボルト位置に離間が生じていない場合、継手板の変形はボルト位置を固定端とする片持はりで計算でき継手板下端の目開き量は式(1)で表される。

$$\delta_j = \frac{8a^3}{E_s \cdot t_j^3} \cdot T_j \quad (1)$$

$$T_j = \frac{M}{I_v} \left(d - x - \frac{t_j}{2} \right) \cdot t_j \quad (2)$$

ここに、

E_s : 鋼材のヤング係数

d : 床版全厚

t_j : 継手板の板厚

t_l : 下鋼板の板厚

I_v : 継手近傍の床版断面の断面二次モーメント（橋軸方向について求める）

x : 継手近傍の床版断面の中立軸位置（断面上縁からの距離）

δ_j を用いて継手断面の回転角 θ_j を式(2)で表す。

$$\theta_j = \delta_j / d \quad (3)$$

継手ばねの回転剛性を K_M とし、継手断面の単位幅当たりの作用曲げモーメント M と θ_j との関係 $M = K_M \cdot \theta_j$ と表すと K_M は式(4)により求まる。

$$K_M = \frac{E_s \cdot I_v \cdot d \cdot t_j^3}{4a^3 (2d - 2x - t_l) \cdot t_j} \quad (4)$$

3.3 セルのせん断変形の影響

部材軸直角方向のみせん断補強鋼板が配置されたサンドイッチ部材では、せん断補強鋼板によりコンクリートが分断されているため、部材軸方向のせん断力は上下鋼板を弦材、せん断補強鋼板を吊材、充填コンクリートを圧縮斜材とするトラス機構により伝達される^{7), 8)}。トラス機構の概要を図-7 に示す。

橋軸直角方向にせん断補強鋼材が配置されたサンドイッチ床版では、充填コンクリートはセル間でせん断力を直接には伝達しないので、版としての橋軸方向の横せん断剛性は充填コンクリート単体のせん断剛性よりも低下する。

FEM case3 では、このようなサンドイッチ構造に特有の耐荷機構を考慮し橋軸方向の横せん断剛性を設定した。FEM では床版を均質板として扱ったので、式(5)により橋軸方向のトラス機構と等価な横せん断弾性係数を求めモデルに与えた。

$$G_{eq} = \frac{p \cdot L_c}{\kappa \cdot \delta_s \cdot d} \quad (5)$$

ここに、

$\kappa = 5/6$

L_c : せん断補強鋼板の間隔

δ_s : 図-7 において荷重 p に対応する変形量

ここで、図-7 から明らかなようにセルのせん断剛性は充填コンクリートに形成される圧縮ストラットの断面積に左右される。ここでは、文献 8) を参考にセルの対角線からセルのコーナーへ下ろした垂線の長さをストラット幅（図-7 の W_c ）に採用し、ストラット断面積を求めた。

なお、充填コンクリートは橋軸直角方向には連続しているため、解析モデルの橋軸直角方向の横せん断弾性係数には充填コンクリートそのものの横せん断弾性係数を用いた。

4. 実験結果と解析結果

4.1 たわみ性状

たわみと走行回数との関係を図-8 に、輪荷重の大きさを

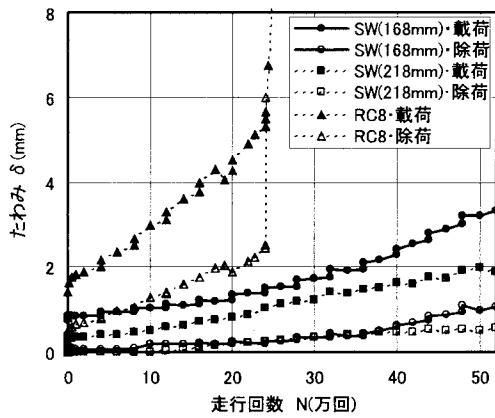


図-8 供試体中央たわみと走行回数の関係

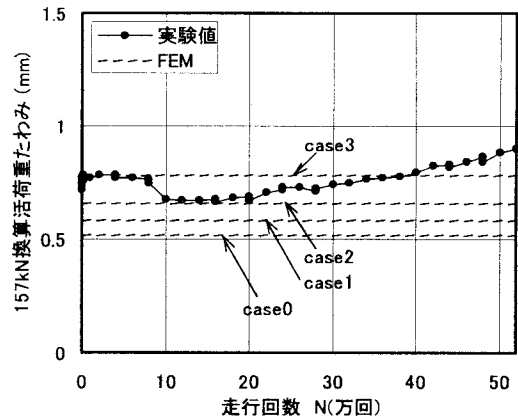


図-9 換算活荷重たわみと走行回数との関係

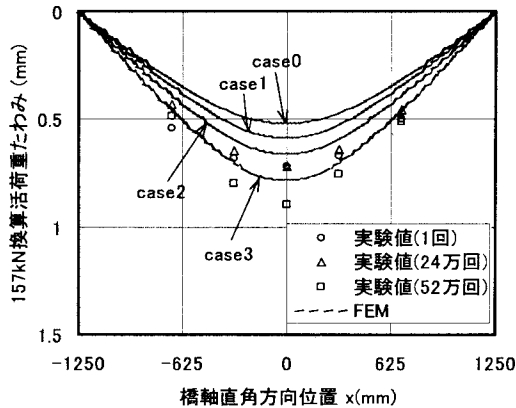


図-10 供試体中央断面のたわみ分布
(157kN 換算活荷重成分)

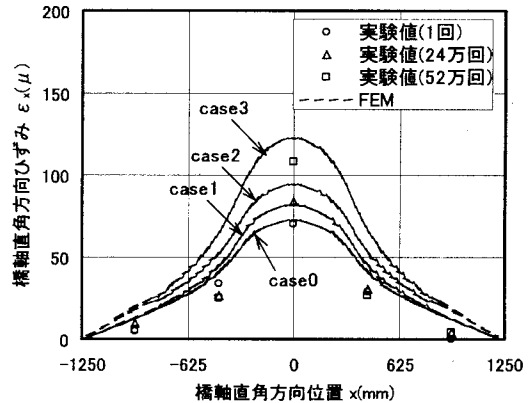


図-11 供試体中央断面の下鋼板ひずみ分布
(157kN 換算活荷重成分)

157kN に換算した活荷重たわみの推移を図-9 に、供試体中央ラインのたわみ分布の推移を図-10 に示す。

図-8 には既往実験データとして、H8 年道示の RC 床版と 218mm 版厚で実施したサンドイッチ床版の結果²⁾を示している。また、図-9 および図-10 には FEM の結果を示した。

今回実施した 168mm 版厚サンドイッチ床版は、52 万回・396kN を未破壊で終了した。図-8 より、52 万回走行時点での残留たわみは 1.07mm、載荷時たわみは 3.32mm であり、供試体に破壊の兆候は認められなかった。

図-9、図-10 において、走行回数 36 万回以前では換算活荷重たわみの実験値は、FEM case2 (継手の変形考慮) と FEM case3 (継手の変形とセルのせん断変形考慮) の間を推移しており実験の比較的初期の段階から継手部の変形の影響があったものと考えられる。図-9 において走行回数 10 万回未満で、換算活荷重たわみが FEM case3 と一致しその後、換算活荷重たわみが減少する傾向があるが、これは実験初期段階において供試体と支持桁との間のなじみの影響が表れたものと考えられる。走行回数が 36 万回を超えると、換算活荷重たわみは case3 よりも大きくなったが、これは、充填コンクリート内部にひび割れが進展し、版全体の曲げ剛性が低下したことによる

と考えられる。なお、図-2 に示したように、供試体には上鋼板内面にグリースを塗布してコンクリートとの付着を切ったセルを設けたが、実験後、供試体を切断してひび割れを観察した結果、グリースを塗布したセルと塗布しなかったセルのひび割れ発生状況に相違は無かった。グリースを塗布しなかったセルについても輪荷重の走行に伴って鋼板とコンクリートとの付着が徐々に消失するので、実験初期から付着が切れていたセルであっても弱点にはならないものと考えられる。

次に、図-9、図-10 の解析値に着目すると、FEM case1 (全断面有効) と FEM case0 (引張域コンクリート無視) のたわみには大きな差が無いことが確認できる。これは、サンドイッチ床版が上下 2 枚の鋼板を有しており RC 床版や一般的な合成床版と比較すると鋼材量が大幅に多いので、コンクリートにひび割れが生じて床版の曲げ剛性はあまり変化しないことが理由である。このことから、サンドイッチ床版の充填コンクリートは、床版鋼板を補剛し版としての形状を保持する効果と、輪荷重を直接受ける上鋼板の局部応力を低減する効果とを主に担っていると、充填コンクリートの役割は RC 床版や合成床版のコンクリートのそれらとは相違している。

RC 床版の損傷過程はコンクリートのひび割れ進展と

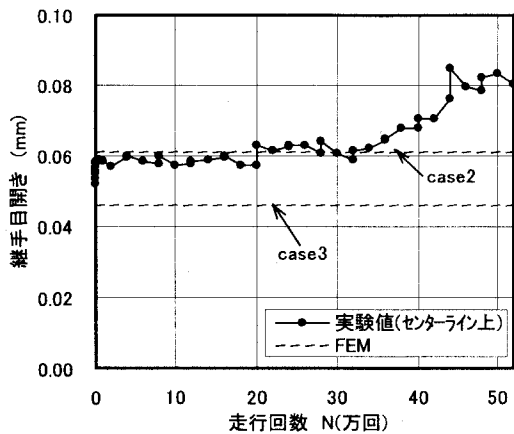


図-12 継手目開き
(157kN 換算活荷重成分)

その後生じる貫通ひび割れのすり磨き現象に支配されることから、RC床版ではたわみが引張コンクリート無視の計算値に一致した時点を使用限界状態と定義し床版の劣化度を評価する方法⁹⁾がある。

しかし、サンドイッチ床版では、コンクリートのひび割れ進展に伴うたわみの増加が小さいこと、床版の曲げ剛性や耐荷力に対する充填コンクリートの寄与が小さく床版の最終破壊は鋼部材の破壊に支配されるものと考えられることから、これらに応じた劣化度の指標が必要と考えられる。

4.2 ひずみ性状

橋軸方向中央位置における、下鋼板のひずみ分布を図-11に示す。同図から、下鋼板の最大ひずみは実験開始時ではFEM case0(床版の曲げ剛性は全断面有効)の近傍に位置しているが、その後、走行回数の増大に伴って下鋼板ひずみが増加してゆく傾向が認められる。

これは、充填コンクリートと上下鋼板との剥離や、充填コンクリートのひび割れが徐々に進展することで、鋼板の応力分担が増して行くためと考えられる。

4.3 継手部の挙動

下鋼板継手部の目開き(157kN換算活荷重成分)の推移を図-12に示す。

実験値は荷重初期段階から走行回数が32万回まではFEM case2に一致して推移し、その後、荷重回数の増大に伴って目開きが増大した。図-12の解析値では、FEM case3の目開きはFEM case2よりも小さく計算されているが、これは、FEM case3では橋軸方向の横せん断剛性を低減したので橋軸方向の曲げモーメント分担率が低下するためである。

実験で32万回以降に目開きが増大した理由は、充填コンクリートのひび割れにより継手部の回転剛性が低下したことが理由と考えられる。これは式(4)において、 I_v が低下した状態に相当しており、走行回数や荷重の増

大に伴って充填コンクリート内にひび割れが進展してコンクリートの弾性係数が徐々に低下したことの現われと考えられる。

5. まとめ

実験結果と解析結果より以下の知見を得た。

- (1) サンドイッチ床版の充填コンクリートは主に鋼殻を補剛する機能を担っているため、充填コンクリートに軽量コンクリートを用いても床版の疲労耐久性が大きく低下することはない。
- (2) サンドイッチ床版のコンクリート厚は一般的な底鋼板一枚の合成床版よりも低減し得る。
- (3) 版厚を小さくしたサンドイッチ床版では、継手の変形の影響やセルのせん断変形の影響により、版全体のたわみが大きくなる傾向が認められる。継手の影響は回転ばねとして評価できる。
- (4) 走行回数の増大に伴い、コンクリートから鋼殻へ応力が移行する傾向が認められた。今回実験した荷重と走行回数の範囲では床版の破壊までは確認できなかったが、さらに荷重を継続する場合や今回の供試体よりもコンクリート厚を減じる場合には、充填コンクリートの劣化に応じて鋼殻各部の発生応力が増してゆき、最終的には鋼部材に疲労損傷が生じて破壊に至ると考えられる。

謝辞：本実験の実施にあたり、試験機貸与を受けました独立行政法人土木研究所に謝意を表します。

参考文献

- 1) 松井, 池田, 阿部, 井澤: サンドイッチ型複合床版の移動輪荷重に対する疲労強度特性, 土木学会年次学術講演会第1部(A), Vol.52, pp.340-341, 1997
- 2) 中川, 井澤, 阿部: サンドイッチ型複合床版の階段荷重漸増荷重による輪荷重走行疲労試験, 土木学会年次学術講演会第1部(A), Vol.55, pp.180-181, 2000
- 3) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物編, 1997
- 4) 中川, 井澤, 阿部: トラス鉄筋により補強された型枠付合成床版(TRC床版)階段状荷重漸増荷重による輪荷重走行疲労試験, 土木学会年次学術講演会 共通セッション, Vol.54, pp.342-343, 1999
- 5) 井澤, 遠藤, 中川, 上條, 土田: サンドイッチ型複合床版に充填する軽量高流動コンクリートに関する実験, 第三回床版シンポジウム講演論文集, pp.253-258, 2003
- 6) 国土交通省土木研究所: 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5)-評価編-, 2001 (引用箇所; pp.123-124)
- 7) 土木学会: 鋼コンクリートサンドイッチ構造設計指針(案), 1992
- 8) 鬼頭, 山脇, 園田: 鋼・コンクリートサンドイッチ部材のせん断耐荷機構, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.53-69, 1998
- 9) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋RC床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集 第374号/I-6, pp.419-426, 1986