

## 輪荷重走行試験による ADS 合成床版の疲労耐久性に関する研究

An Experimental Study on Fatigue Durability of ADS Composite Slab by Wheel Running Test

鈴木 孝洋\*, 青島 孝幸\*\*, 碓山 晴久\*\*\*, 松井 繁之\*\*\*\*

Takahiro SUZUKI, Takayuki AOSHIMA, Haruhisa IKARIYAMA, Shigeyuki MATSUI

\* (株)東京鐵骨橋梁 技術開発部 技術開発課 (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-18-32)

\*\* 青島建材(株) 生産課 (〒422-8058 静岡県静岡市駿河区中原 658-1)

\*\*\* (株)東京鐵骨橋梁 技術開発部 技術開発課 (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-18-32)

\*\*\*\* 工博 大阪工業大学 八幡工学実験場構造実験センター (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4 番地)

Recently, steel-concrete composite slab has been researching as durable slab type. This report describes the content of the verification by the fatigue durability test and the FEM analysis concerning ADS composite slab. After wheel running test by using two models, which models were made in order to clarify the lateral tie effect, authors made comparative study of the fatigue durability. It turned out that ADS composite slab had durability after the wheel running test, without a few stud damages on the bottom plate.

**Key words** : composite slab, wheel running test, fatigue durability, lateral tie

キーワード : 合成床版, 輪荷重走行試験, 疲労耐久性, 横つなぎ材

### 1. はじめに

近年, 道路橋床版の疲労耐久性に関する研究が進み, 鋼-コンクリート合成床版 (以下, 合成床版と称す) は RC 床版と比べて高い耐荷力および高い疲労耐久性を有していることが明らかとなってきた. そのため, 橋梁全体として施工の合理化・省力化を図るために, 合成床版を用いて少数主桁橋などの床版支間の大きな橋梁形式の採用が増加してきている. 一般に, 合成床版の最小厚さは床版支間長をパラメータとして設定されることが多いため, 床版支間長が増大すれば床版厚も厚くなる. 筆者らは, 合成床版の床版厚をできるだけ押さえて, 床版による死荷重を軽減できる合成床版に関する研究を行った. 本稿では, ADS 床版 (図-1) の疲労耐久性に関する検討を行うこととした.

### 2. 試験概要

#### 2.1 試験体

試験体概要を図-2 に示す. 本試験には, 主桁間を結ぶ横つなぎ材がない ADS1 と横つなぎ材を有する ADS2 の 2 タイプの試験体を用いた. 試験体は長さ 3.5m, 床版支間 2.5m で, ともに主桁を設けている. 本試験では, 最終的に試験体を破壊させ, 疲労寿命を把握することを目的としているため, 両試験体とも床版厚は支間中央で 160mm, 底鋼板厚は 4.5mm とした. 床版支間 2.5m の実橋で採用する場合は, 床版厚 180mm, 底鋼板厚 8mm となる. 床版下面は, ライズを 100mm としたアーチ形状である. 試験体に用いた鉄筋は D16 であり, 主鉄筋は 125mm ピッチ, 配力筋は 200mm ピッチとした. 鋼とコンクリートのずれ止めには横リブに孔を設けた孔あき鋼板リブとスタッドジベルを用い, 橋軸方向に 200mm

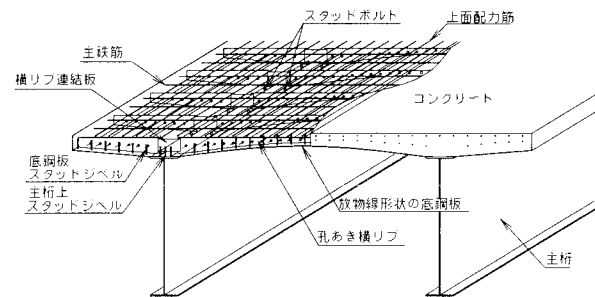
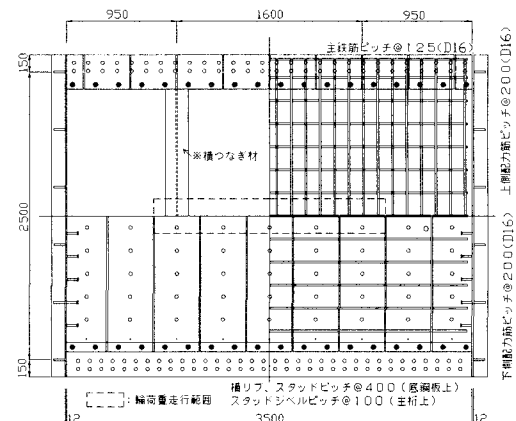
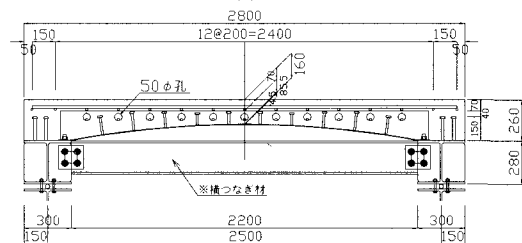


図-1 ADS 床版 (ADS2)



a) 平面図



b) 断面図 ※横つなぎ材は ADS2 のみ

図-2 試験体概要

ピッチで交互に配置している。また、孔あき鋼板リブの孔にはずれ止め補強鉄筋を貫通させている。ADS2の横つなぎ材は試験体中央から±800mmの位置に計2本設けた。試験開始日のコンクリートの材料試験結果は、ADS1が圧縮強度 $\sigma_{447}=39.5\text{N/mm}^2$ 、弾性係数 $E_{447}=3.2 \times 10^4\text{N/mm}^2$ 、ADS2が圧縮強度 $\sigma_{469}=46.4\text{N/mm}^2$ 、弾性係数 $E_{469}=3.1 \times 10^4\text{N/mm}^2$ であった。

## 2.2 試験方法

試験は大阪大学所有の輪荷重走行試験機(GongoroII)を使用した。荷重方法は、初期荷重を176kNとし、試験中に3回荷重を増加させ、最大荷重255kN、累計走行回数60万回(ADS2は試験日程の都合上、累計走行回数58万回で試験終了)に達する階段荷重を行った。最大荷重は試験機最大能力(294kN)の85%とした。荷重載荷ステップを図-3に示す。本試験では、輪荷重の1往復を1走行と称する。輪荷重走行位置は、床版支間中央とした。支持条件は、主桁の下に丸鋼を配置し、主桁の水平変位を拘束しない支持条件(単純支持)とし、試験体の移動を防ぐために計6箇所をボルト止めた。

## 3. 試験結果

### 3.1 たわみの発生状況

試験体中央のたわみの経時変化を図-4に、橋軸方向のたわみ分布を図-5に示す。走行回数0回の際のたわみはADS1が0.27mm、ADS2が0.26mmとほぼ同等であるが、ADS1では輪荷重走行開始直後にたわみが大きく増加し、ADS2では走行回数10万回付近でたわみが大きく増加している。その後はADS1、ADS2ともにたわみは荷重の増加とともになだらかに増加し、最終的なたわみはADS1が0.46mm、ADS2が0.36mmとなり、ADS2はADS1の78%となった。橋軸方向のたわみは、全体的にADS1の方が大きくなっている。また、試験体中央のたわみと荷重の関係から、両試験体とも走行回数の増加に伴い、試験体の剛性は低下しているが、試験終了まで弾性範囲内で挙動していることを確認した。

### 3.2 底鋼板下面のひずみ(橋軸直角方向)

底鋼板下面の橋軸直角方向ひずみの橋軸直角方向分布を図-6に示す。ADS1とADS2を比較すると、全体的にADS2の方がひずみは小さい。また、ADS2では主桁近傍に圧縮ひずみが生じており、床版に横つなぎ材の影響が現れている。

### 3.3 ひび割れ発生状況および鋼-コンクリートのはく離状況

底鋼板の打音検査による底鋼板とコンクリートのはく離状況を図-7に示す。ADS1では走行開始直後からはく離がはじまり、走行回数10万回までに輪荷重走行範囲を含む広い範囲ではく離が発生し、その後も走行回数

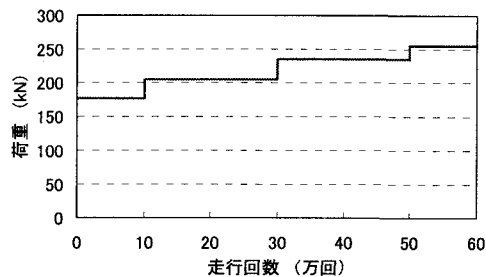


図-3 荷重載荷ステップ

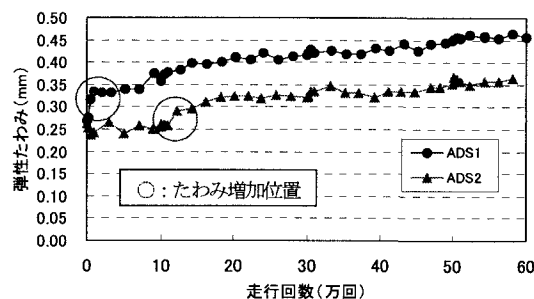


図-4 試験体中央のたわみと走行回数(98kN換算)

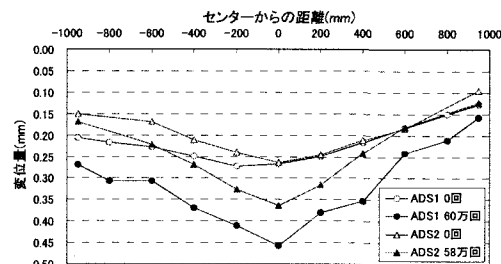


図-5 橋軸方向のたわみ分布(試験体中央載荷, 98kN換算)

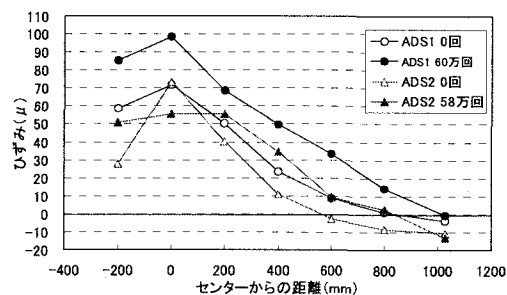
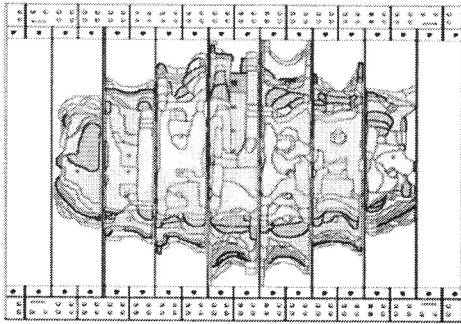


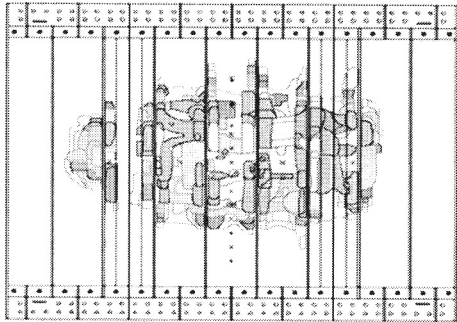
図-6 底鋼板下面の橋軸直角方向ひずみの橋軸直角方向分布(試験体中央載荷, 試験体中央位置, 98kN換算)

を増すごとにはく離範囲は広がった。ADS2では走行回数10万回までほとんどはく離は発生せず、10万回以降に走行回数を増すごとにはく離範囲が広がったが、ADS1に比べてはく離の進行速度は遅く、試験終了時はく離範囲はADS1の走行回数10万回時のはく離範囲とほぼ同じとなった。ADS2では横つなぎ材が主桁の変形を拘束し、たわみが小さいこと、軸圧縮力によって床版の引張領域が減少することによって考えられる。

試験終了後に試験体を切断し、コンクリート断面のひび割れの観察を行った。コンクリート断面のひび割れはADS1、ADS2ともに、床版支間方向断面では上側配筋位置、床版支間直角方向断面では横リブ上端および主鉄筋位置の輪荷重走行範囲直下に水平ひび割れが観察さ



a) ADS1



b) ADS2

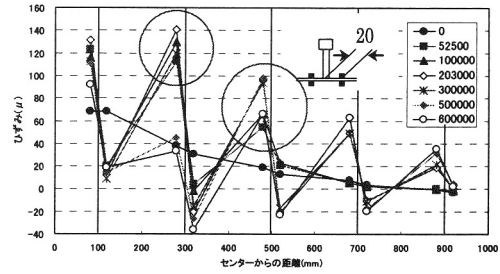
○0-10万回 ●10-20万回 ◐20-30万回 ◑30-40万回 ◒40-50万回 ◓50-60万回

図-7 底鋼板とコンクリートのはく離状況

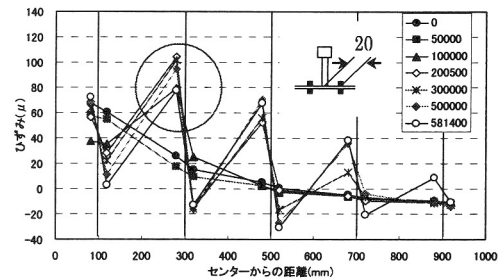
れた。これは、輪荷重直下の領域では圧縮側の鉄筋層を境に重ねばり化が進行していることが考えられる。ただし、横リブからコンクリート上面まで貫通するひび割れや斜め方向のひび割れは認められないことから、横リブ間でのみ状態や押抜きせん断破壊には至っていないことを確認した。

### 3.4 スタッド近傍の底鋼板のひずみ (橋軸直角方向)

スタッド近傍の底鋼板上面のひずみ分布を図-8 に示す。スタッド近傍のひずみゲージはスタッドを中心に橋軸直角方向±20mm 位置の底鋼板の上下面に貼付けた。スタッド近傍の底鋼板上面のひずみはADS1, ADS2 とともに、はく離前は直線に近い分布形状を示すが、はく離後はスタッドにせん断力が働くことにより、底鋼板が板曲げを受けたひずみ分布を示している。また、ADS1 は試験体中央から 300mm, 500mm のスタッド位置、ADS2 は試験体中央から 300mm のスタッド位置でそれぞれ底鋼板上面・載荷点側ひずみが試験中に減少 (図中○で示す部分) している。試験体中央から 300mm のスタッド近傍・載荷点側の底鋼板上下面のひずみの経時変化を図-9 に示す。ADS1 は初期段階ではく離し、ADS2 は 10 万回直前ではく離したことがわかる。はく離後に底鋼板上下面に生じる板曲げひずみの経時変化は、弾性挙動を想定した場合、平行状態に近い推移を示すと考えられる。しかし、図-9 に示すスタッド近傍では、ADS1 では走行回数 20 万回付近、ADS2 では 30 万回付近から底鋼板上面のひずみが減少している。底



a) ADS1



b) ADS2

図-8 スタッド近傍の底鋼板のひずみ分布 (98kN 換算)

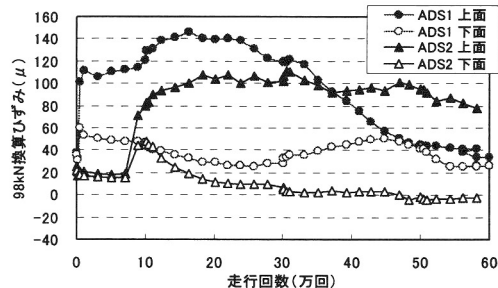


図-9 スタッド近傍の底鋼板のひずみ

(試験体中央から 300mm 載荷点側, 98kN 換算)

鋼板上面のひずみが減少する理由として、スタッドまわりのコンクリートが砂利化現象を起こして、スタッドに作用する力が低下することも考えられるが、試験体切断面の状況から推察すると、スタッド位置の底鋼板が輪荷重による損傷を受けていることが考えられる。

### 3.5 スタッドの損傷

試験終了後に図-10 に示すコンクリート部分を除去し、スタッドを露出させ、スタッドの曲げ試験を行った。その結果、図中の×, ○で示す部分の底鋼板がスタッドとともにめくれる現象がおきた。(写真-1) スタッドの疲労破壊の形態は、スタッドの径とスタッドが溶植されている鋼板の板厚によって変化することが既往の研究により示されており<sup>8)9)</sup>、それらによると、スタッド径  $d_s$  と板厚  $t_r$  の比が  $d_s/t_r < 2.7$  の場合はスタッドがせん断破壊し、 $d_s/t_r > 2.7$  の場合には鋼板が破壊するとされている。このことから本試験体はスタッド径  $d_s$  が 16 mm、底鋼板厚  $t_r$  が 4.5mm であるため、 $d_s/t_r = 3.6$  となり、破壊形態は底鋼板が疲労破壊する形態に分類され、スタッドの曲げ試験結果は想定される破壊形態と一致している。したがって、スタッドは、試験中にスタッ

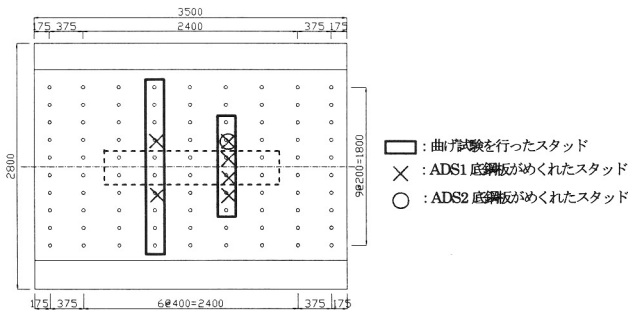


図-10 スタッド曲げ試験結果

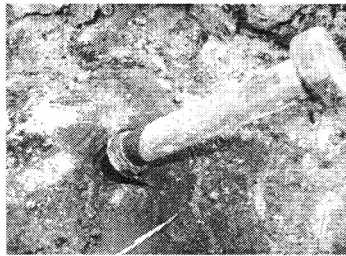


写真-1 曲げ試験後のスタッド

ト溶着部の溶接止端部から底鋼板の下面に疲労き裂が発生・進展し、曲げ試験により破断に至ったと考えられる。今回の曲げ試験の結果では、ADS2よりもADS1のスタッドに損傷が多く発生している。そこで、文らによって提案されているスタッド近傍の底鋼板上下面4点のひずみからスタッドに作用するせん断力を算出する式<sup>10)</sup>を用いてスタッドに作用しているせん断力を求めた。スタッドに作用するせん断力の経時変化を図-11に示す。試験体中心から300mm位置のスタッドに最も大きいせん断力が作用しており、ADS1にはADS2の最大で1.5倍のせん断力が発生していることがわかる。文献8)には、合成床版底鋼板のスタッド部のように引張力とせん断力が同時に作用する場合、大幅に疲労強度が低下することが示されており、組合せ応力が作用する場合の疲労き裂が発生する位置において鋼板に働く引張応力 $\sigma_x$ を求める式が提案されている。これらを利用し、スタッド部に作用する応力の振幅および等価換算繰り返し作用回数を算出し、スタッドの疲労強度を推定した。文献8)で提案されている式を測定値を使用した式に変形すると式①になる。

$$\Delta\sigma_x = 1.295(\sigma_1 - \sigma_2) + \frac{A_{ss}}{201}(-0.485 \cdot t + 7.565) \cdot (\tau_1 - \tau_2) \quad \dots \textcircled{1}$$

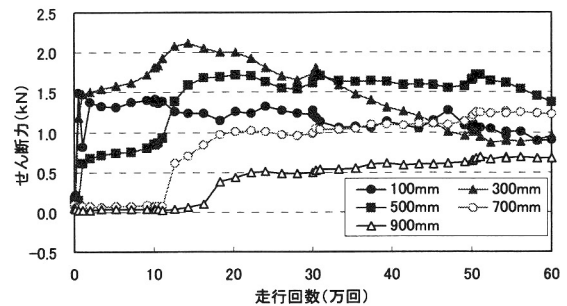
ここに、

$\Delta\sigma_x$ : 疲労き裂発生位置における鋼板の引張応力範囲 (N/mm<sup>2</sup>)

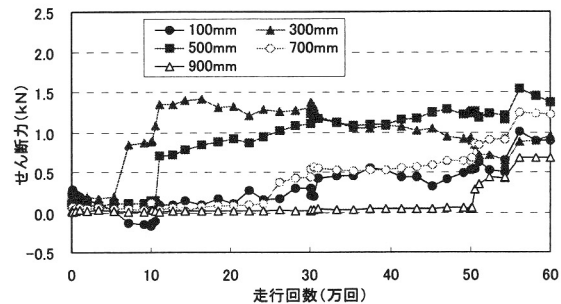
$\sigma_1, \tau_1$ :  $\sigma_x$ が最大となる $\sigma_1, \tau_1$ の組合せ (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_2, \tau_2$ :  $\sigma_x$ が最小となる $\sigma_2, \tau_2$ の組合せ (N/mm<sup>2</sup>)

スタッドから最も近い点に輪荷重が載荷されたときの $\sigma, \tau$ を $\sigma_1, \tau_1$ とし、スタッドから最も遠い点に輪荷重が



a) ADS1



b) ADS2

図-11 スタッドに作用するせん断力の経時変化 (98kN換算)

載荷されたときの $\sigma, \tau$ を $\sigma_2, \tau_2$ として $\Delta\sigma_x$ を算出した。 $\sigma_1, \sigma_2$ はスタッド両端100mmに位置する底鋼板下面の橋軸直角方向ひずみゲージの平均値にヤング係数をかけたものとして、 $\tau_1, \tau_2$ はスタッドに作用するせん断力/スタッドの断面積から算出した。また、上記の式では $\Delta\sigma_x$ は各静的載荷の測定毎に異なるため、試験中の最大の応力範囲に換算した等価繰り返し作用回数をマイナーの線形被害則を用いて次式②より算出した。

$$N_{eq} = k \sum_i N_i \left( \frac{\Delta\sigma_{xi}}{\Delta\sigma_{xmax}} \right)^m \quad \dots \textcircled{2}$$

ここに、

$N_{eq}$ : 応力の等価換算繰り返し作用回数

$N_i$ :  $i$ 回目の静的載荷から $(i+1)$ 回目の静的載荷までの輪荷重走行回数

$\Delta\sigma_{xi}$ :  $i$ 回目の静的載荷計測時データから計算される $\Delta\sigma_x$  (N/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\sigma_{xmax}$ :  $\Delta\sigma_{xi}$ のうち最大のもの (N/mm<sup>2</sup>)

$m$ : S-N線の傾き ( $m=3$ )

$k$ : 輪荷重走行1回に応力が作用する回数

スタッド位置に損傷が発生した走行回数は、底鋼板上表面・輪荷重側のスタッド近傍のひずみ経時変化からひずみの減少が認められた走行回数とした。各スタッドの計算結果を表-1に、試験終了までの繰返し作用回数でプロットしたS-N関係を図-12に示す。その結果、E等級線<sup>11)</sup>付近に疲労き裂が発生したスタッドがプロットされ、その他のスタッドはE等級線より下側にプロットされた。このことから、ADS床版の底鋼板上スタッドの疲労等級はE等級であると推察できる。また、ADS2の損傷が少なかったのは、ADS2は主桁が拘束されることで

たわみが抑制されることにより、スタッドに発生するせん断力が減少することに起因していると考えられる。

今回の試験ではスタッド部に損傷が見られたが、局所的な損傷であり構造全体に直ちに影響を及ぼすものではなく、スタッド部に損傷が発生した後もたわみの増加やスタッド部以外のひずみ分布に急激な変化は見られなかったため、構造全体に対する影響は小さく、鋼とコンクリートの合成は保たれていたと考えられる。

表-1 各スタッドの計算結果

試験体	スタッド名称	輪荷重中心からの距離 (mm)	実応力範囲 $\Delta\sigma_x$ (N/mm <sup>2</sup> )	試験終了までの最大実応力振幅換算等価繰返し作用回数Neq	疲労き裂発生時点の走行回数N
ADS1	ADS1-C1	100	109.87	757689	490600
	ADS1-C2	300	116.5	514990	241000
	ADS1-C3	500	111.42	575247	523100
	ADS1-C4	700	79.61	395672	-
	ADS1-C5	900	39.23	392527	-
	ADS1-S1	100	88.02	287593	-
	ADS1-S2	300	132.02	298397	510000
	ADS1-S3	500	109.31	195297	-
	ADS1-S4	700	34.56	150044	-
	ADS1-S5	900	10.01	311931	-
ADS2	ADS2-C1	100	103.5	451298	-
	ADS2-C2	300	127.71	583472	510000
	ADS2-C3	500	100.57	455355	-
	ADS2-C4	700	61.34	193388	-
	ADS2-C5	900	33.79	162994	-
	ADS2-S1	100	99.44	99306	-
	ADS2-S2	300	110	230115	-
	ADS2-S3	500	62.21	173691	-
	ADS2-S4	700	11.05	330272	-
	ADS2-S5	900	-	-	-

●・・・損傷が発生したと推測されるスタッド  
○・・・圧縮領域のため算出せず

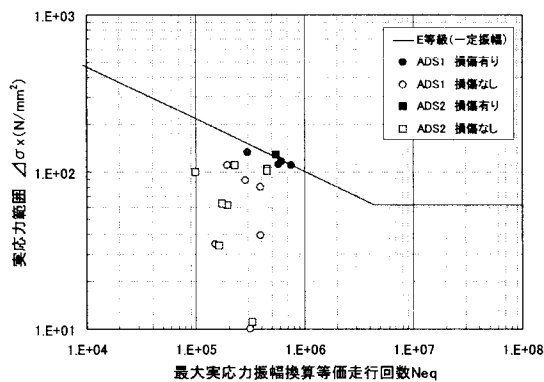


図-12 スタッド疲労のS-N関係 (試験終了までの繰返し作用回数)

#### 4. FEM解析による検証

本試験では、コンクリート、底鋼板、横リブ、スタッドをモデル化し、輪荷重走行試験による試験体の損傷を考慮したFEM解析を行い、測定値との比較を行った。

##### 4.1 解析モデル

コンクリートおよび底鋼板はソリッド要素、横リブはシェル要素、底鋼板上スタッドは梁要素を用いた。鉄筋はモデル化せず、ヤング係数比  $n=10$  を用いて評価した。はく離は底鋼板とコンクリートを切り離し、相互の節点間を鉛直方向 (Y方向) のみ剛なばね要素で連結することでモデル化した。横リブとコンクリートの付着は考慮せず、はじめから切り離してモデル化し、横リブとコンクリートは相互の節点間を橋軸方向 (Z方向) のみ剛な

ばね要素を設定した。このとき、横リブ孔位置には貫通鉄筋位置が存在するため剛性が高いと考え、全方向 (X,Y,Z方向) に対して剛なばね要素を設定した。主桁とコンクリートも切り離してモデル化し、主桁上スタッド位置に剛なばね要素を設定し、スタッド部以外の節点間を鉛直方向 (Y方向) のみ剛なばね要素で連結した。境界に用いたばね定数の一覧を表-2に示す。また、ヤング係数は材料試験結果より、 $E_s=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、 $E_c=3.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ とした。

表-2 ばね定数<sup>12)</sup>

境界	CP軸方向ばね定数 (N/mm)		
	CP <sub>x</sub>	CP <sub>y</sub>	CP <sub>z</sub>
底鋼板-コンクリート	0	$1.0 \times 10^6$	0
横リブ-コンクリート	0	0	$1.0 \times 10^6$
横リブ孔位置-コンクリート	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$
主桁上 上フランジ(スタッド位置)-コンクリート	$4.0 \times 10^6$	$1.0 \times 10^6$	$4.0 \times 10^6$
主桁上 上フランジ-コンクリート	0	$1.0 \times 10^6$	0

X・・・橋軸直角方向、Y・・・鉛直方向、Z・・・橋軸方向

#### 4.2 解析方法

解析は輪荷重走行試験中の試験体の状態を考慮した6ケースに分けて行った。解析ケースを表-3に示す。コンクリートの引張領域に発生するひび割れは引張領域の剛性を低下させることで考慮した。剛性を低下させる範囲は、コンクリートの橋軸直角方向の応力が引張強度を超える範囲とし、ソリッド要素の橋軸方向、橋軸直角方向のヤング係数をそれぞれ1/100倍した。

表-3 解析ケース

Case	荷重 (kN)	試験体の状態	想定走行回数 (万回)
1	176.4	全断面有効(剥離なし、コンクリート部引張領域剛性低下なし)	0
2	176.4	底鋼板剥離(試験体中央より±800mm)	0
3	176.4	Case2モデル+176.4kN載荷時の引張領域剛性低下	10
4	205.8	Case3モデル+205.8kN載荷時の引張領域剛性低下	30
5	235.2	Case4モデル+235.2kN載荷時の引張領域剛性低下	50
6	254.8	Case5モデル+254.8kN載荷時の引張領域剛性低下	60

#### 4.3 測定値と解析値の比較

橋軸直角方向のたわみ分布を図-13に示し、底鋼板下面の橋軸直角方向ひずみの橋軸直角方向分布を図-14に示す。ADS1のたわみは、測定値と解析値はほぼ一致しており、分布性状も同様である。橋軸直角方向のひずみ分布は、測定値は主桁に近づくにつれ、ひずみは零に近づいているが、解析値では圧縮ひずみが生じている。本試験では、主桁上のコンクリートはく離は観察できていないが、ADS1でははく離が主桁まで達している箇所も見られ、試験体には底鋼板のひずみが低下する要因となるはく離やひび割れが発生していたことが考えられる。ADS2のたわみは、分布の傾向は同様であるが、解析値に比べ、測定値が小さい結果となった。解析モデルでは主桁上フランジとコンクリートの付着は考慮していないが、実際には主桁上フランジとコンクリートは付着しており、ADS2では試験終了まで付着が切れなかったためと考えられる。橋軸直角方向のひずみ分布は、ひずみの大きさと分布性

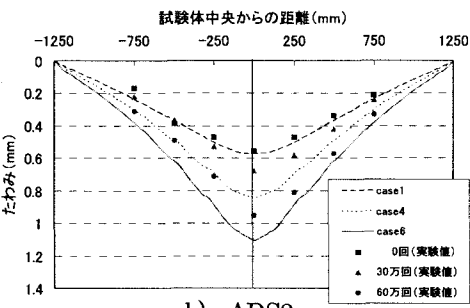
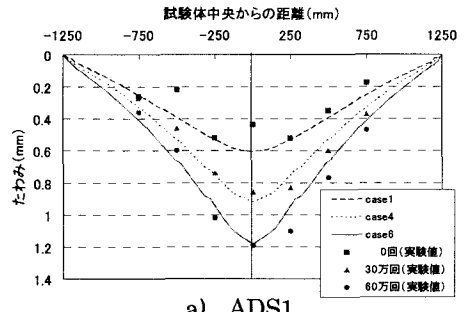


図-13 橋軸直角方向のたわみ分布

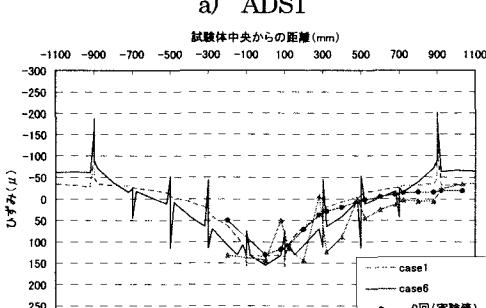
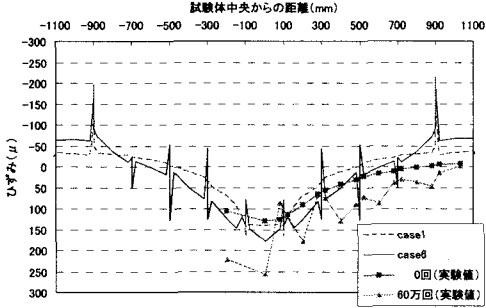


図-14 底鋼板下面-橋軸直角方向ひずみの橋軸直角方向分布

状はほぼ一致していると考えられる。また、ADS1とADS2ともに底鋼板とコンクリートのはく離をモデル化したことでスタッド近傍に局部的に大きなひずみが発生している。以上より、鋼とコンクリートのはく離をモデル化し、引張領域の剛性を低下させることで輪荷重走行試験による試験体の疲労状態をFEM解析により再現できると考えられる。

5. まとめ

本研究は、放物線形状の床版下面を有するADS床版

について、輪荷重走行試験を行い、主桁間を結ぶ横つなぎ材の有無による性状比較、疲労耐久性の確認を目的としたものである。本研究より得られた知見を以下に示す。

- (1) ADS2とADS1の比較から、主桁間に横つなぎ材を設けることにより、たわみの減少、はく離範囲の低減、スタッドに作用するせん断力の低下が確認できた。
- (2) 底鋼板のスタッドの疲労強度等級は、JSSCのE等級と同程度であることがわかった。
- (3) 輪荷重走行試験により床版に発生する底鋼板とコンクリートのはく離や引張領域のひび割れを考慮したFEM解析は、試験中のたわみの変化、ひずみの変化を再現するのに有効な方法であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 加々良直樹, 秦裕彰, 櫻井孝, 大西弘志, 松井繁之: 『アーチ型合成床版の静的および動的荷重下の構造に関する研究』, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 2003.6
- 2) 秦弘彰, 碓山晴久, 櫻井孝, 大西弘志, 松井繁之: 『アーチ効果による鋼-コンクリート合成床版の疲労耐久性向上度』, 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 2004.11
- 3) 秦裕彰: 床版内のアーチ効果とそれによる疲労耐久性向上度に関する研究, 大阪大学修士論文, pp.48-49, pp.73-74, 2004
- 4) 加々良直樹, 櫻井孝: 『アーチデッキスラブ(設計・構造特性編)』, 東京鐵骨橋梁 技術報 No.48, 2002
- 5) 加々良直樹, 櫻井孝, 上石田聡, 田中雅人: 『アーチデッキスラブ(輪荷重走行試験編)』, 東京鐵骨橋梁 技術報 No.48, 2002
- 6) 鈴木孝洋, 碓山晴久, 入部孝夫: 『ADS床版の疲労耐久性確認試験の報告-土木研究所 輪荷重走行試験機使用-』, 東京鐵骨橋梁 技術報 No.51, 2005
- 7) 鈴木孝洋, 碓山晴久, 入部孝夫, 櫻井孝: 『ADS床版の疲労耐久性確認試験』, 第60回年次学術講演会, 2005
- 8) 鈴木喜弥, 藤原良憲, 平城弘一, 梶田智子, 高田嘉秀, 宮地真一: 組合せ応力作用下におけるスタッド付き鋼板の疲労強度, 構造工学論文集 Vol.50A, 土木学会, 2004
- 9) G.G.GOBEL: Shear Strength of Thin Flange Composite Specimens, AISC ENGINEERING JOURNAL, pp.62-65, 1968
- 10) 文允景: 鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性と疲労設計法に関する研究, 大阪大学学位論文, 1992
- 11) 日本鋼構造協会編: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技術堂出版, 1993
- 12) 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, 大阪大学学位論文, 1990