

アーチ型合成床版の静的および動的荷重下の構造挙動に関する研究

Study on Structural Behaviors of Arch Shape Composite Deck under Static and Dynamic Loading

加々良 直樹*、秦 裕彰**、櫻井 孝***、大西 弘志****、松井 繁之*****
 Naoki Kagara, Hiroaki Hata, Takashi Sakurai, Hiroshi Onishi, Shigeyuki Matsui

- * 工修 (株)東京鐵骨橋梁 技術開発部技術開発課 係長 (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-18-32)
- ** 大阪大学大学院 工学研究科土木工学科 博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
- *** 工修 (株)東京鐵骨橋梁 技術開発部 部長 (〒108-0023 東京都港区芝浦 4-18-32)
- **** 工修 大阪大学大学院 工学研究科土木工学科 助手 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)
- ***** 工博 大阪大学大学院 工学研究科土木工学科 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

As a rational deck, arch shape composite deck with curved steel plate and concrete is developed by the authors. To confirm the effect of arch shape steel plate on the deck behavior, two types of specimen were compared by static loading test and fatigue test using wheel running machine were carried out. Also typical models of arch shape composite deck and flat type composite deck were analyzed by a three dimensional FEM program.

From static test, the maximum deflection shows elastic behavior until the load 700kN at the arch shape deck, on the other hand the flat deck showed rigidity decrease at 300kN due to cracking of concrete. From dynamic test, arch effect could observed clearly by comparison with ordinary flat composite deck. Analytical result showed the effect of arch action of the bottom steel plate. Strain and deflection decreased from the results of a flat type composite deck.

Keyword : steel plate-concrete composite deck, curved bottom steel plate, flat bottom steel plate, arch action, structural characteristic, static test, fatigue test, wheel running machine

1. まえがき

近年、道路橋床版の高耐久性、および現場施工の省力化、工期短縮を目指して、PC床版に匹敵する鋼・コンクリート合成床版が各種開発され、新形式の床版として注目されてきている。

本研究グループでは、底鋼板をアーチ状に湾曲させ、床版コンクリートの死荷重をこのアーチ鋼殻で受け持たせ、コンクリートの硬化後の活荷重はコンクリートと鋼殻との合成床版で受け持たせる床版構造を考案開発している。この床版では底鋼板のアーチ効果を期待するものである。アーチ効果を高めるには支点となる主桁の横移動を拘束する必要があり、主桁の上フランジ付近で、主桁同士を繋ぐ横繫材を挿入している。本床版（アーチデッキスラブと呼称する）を橋梁に使用した場合には、床版と主桁とも合成構造として更なる合理化も期待できる。

アーチデッキスラブの構造図を図-1に示す。

構造上の特徴としては以下のとおりである。

- ①アーチ形状の底鋼板、横リブで構成される型枠パネルとコンクリートが一体となる合成構造である。
- ②床版厚はアーチ形状であるため、床版中央が最も薄く、主桁上が最も厚い形状である。一般の床版のように中

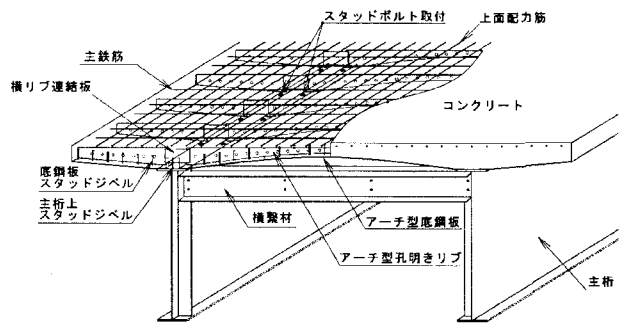


図-1 アーチデッキスラブ構造図

央の床版厚とハンチ厚で床版形状を定義するのではなく、主桁上の床版厚さと床版下面のアーチ形状で床版形状を決定する。

- ③アーチ反力を生じさせるため、適切な断面の横繫材を適切な間隔で用いて、主桁上フランジ直下で連結する構造である。
- ④張り出し床版と中央床版は横リブ断面を連結して、支持する。
- ⑤主桁と合成床版はスタッドジベルによって結合され、合成桁として設計する。

以上のような特徴と設計概念を持つアーチ型合成床版の構造挙動を明らかにし、合理的な設計法を見つけるための基本試験として、静的実験ならびに輪荷重走行試験による疲労実験を実施するとともに、本構造の構造挙動を定性的に調べるため、立体 FEM 解析を試みた。本報告でこれらの概要を述べる。

2. アーチデッキスラブの基本設計

2-1 アーチ形状の予備決定

アーチ効果に影響を与えるパラメータには以下の要因がある。すなわち、①床版支間長、②床版厚と床版下面のアーチライズ、③横繫材の設置間隔、④底鋼板板厚、横リブ断面 等である。

このうち、②の床版厚、アーチライズは基本的に重要である。しかし、これを一義的に決定することは困難であり、これは横繫材の間隔やコンクリート強度などとも関係する。よって、基本的には過去の経験と試行錯誤で下記のように提案した。これらの妥当性についてはさらなる研究が必要と考えている。

一般のフラットな合成床版に対しては土木学会・合成床版指針で規定されている必要床版厚を採用できる。これに対して、アーチ型合成床版ではアーチ効果を期待して、主桁上の床版厚を一般の合成床版と同一にし（路面高さが同一となる）かつハンチに相当する厚さを与えることとした。既往の床版で採用されたハンチを勘案して、その厚さを 9cm 程度として、次式のように与えることとした。すなわち、主桁上の床版厚（H1）は床版支間 L を m 単位で表して、

$$H1 = 2.5L + 11 + 9 \text{ cm}$$

そして床版中央の床版厚（H2）はアーチクラウンにおける最小床版厚であり、アーチクラウンの横リブ断面、コンクリートのかぶりを考慮して下記のように決定した。

$$H2 = 0.5L + 15 \text{ cm}$$

2-2 立体 FEM 解析による照査

上記の床版厚式の妥当性を確認するため、主桁、横繫材、合成床版で構成する立体 FEM モデルを汎用プログラムで解析した。主桁、底鋼板、横リブをシェル要素、コンクリート床版はソリッド要素とし、横繫材は回転および水平移動を拘束しない棒要素で構成した。コンクリート要素は引張、圧縮に等方性材料で、全断面有効として、設計基準強度 30N/mm²、ヤング係数比は 10 を用いた。床版は片持部も含めて全幅とし、活荷重は道示に従い、輪荷重満載とする。

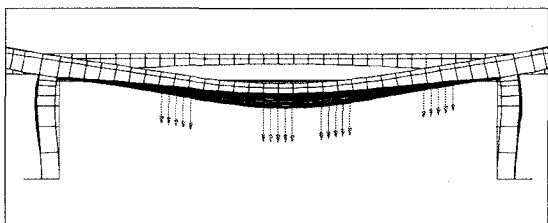


図-2 活荷重によるたわみ図

床版支間長と活荷重たわみの関係は図-3 に示すように、支間 4m から 8m までいずれも活荷重たわみ制限を満足することが判った。このように床版中央で薄い厚さ

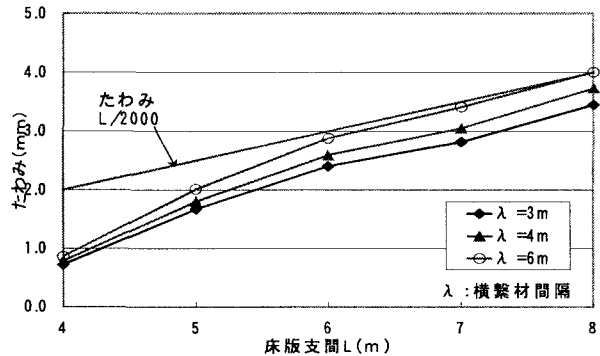


図-3 FEM 解析 活荷重たわみ-床版支間

を採用しても満足したのはアーチ効果のためと言える。

つぎに、横繫材の間隔決定方法について述べる。図-4 に床版支間と横繫材の間隔をパラメータとしたときの横繫材に作用する軸力比の変化状況を示した。この比は、横繫材上の床版に輪荷重を載荷した時に発生する横繫材の軸力に対して、荷重を横繫材の中間で載荷した場合に発生する軸力の比である。支間長および横繫材間隔が大きくなるにつれて増大する傾向にあるが、支間が 6m を超えると、軸力はほぼ横這いになる傾向があるが、これを変化させるとアーチ効果が不均一となることが予想され、0.8 程度以上は必要と思われる。これを満足する横繫材間隔は床版支間長の 0.75 倍程度となる。

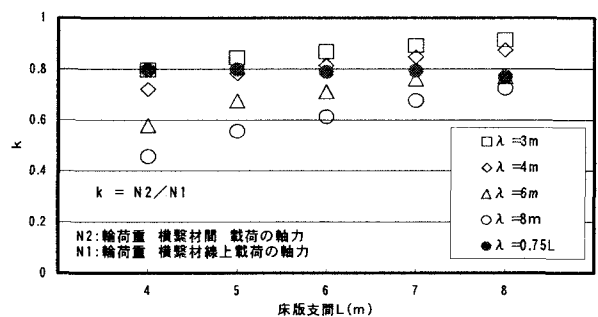


図-4 横繫材間隔による横繫材軸力の変動率

そして、設計輪荷重を満載したときの横繫材に発生する軸力は許容軸力の約 10% 程度にとどまり、応力余裕のある断面となるが、アーチ効果の均一性から判断されるべきものと考えた。

また、床版各部の応力度は、全て許容応力度に比べ非常に小さいが、約 1/2 あるいは 2/3 程度であり、設計上満足される値に止まっており、従来の合成床版の応力度と同程度である。

3. 静的載荷試験の結果と考察

3-1 静的載荷試験概要

アーチ型合成床版 (ADS) とフラット型合成床版 (FDS) について、構造挙動を比較し、アーチ効果について検証することとした。

両合成床版の試験体は、図-5 に示すように床版支間 4 m、主桁上床版厚をともに 30cm と同一とし、フラット型では土木学会の設計指針・合成床版から厚さを一定の 20cm とし、主桁上のハンチを 10 cm とした。アーチ型では主桁上の厚さを 30 cm で支間中央の最小床版厚を 17cm とした。また、底鋼板厚 $t=8\text{mm}$ 、横リブ間隔 500mm 横リブ厚 $t=12\text{mm}$ とし、床版コンクリートは設計基準強度 30N/mm^2 の膨張材入り普通コンクリートなどは同一とした。

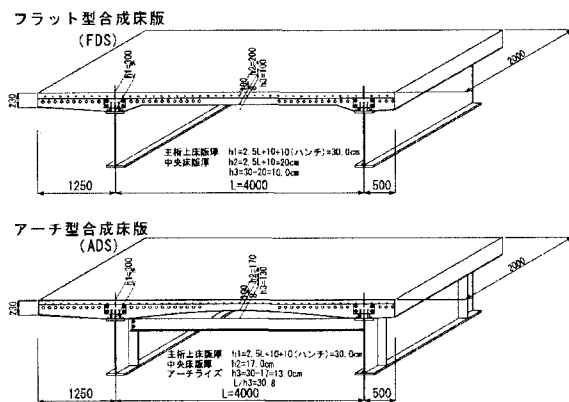


図-5 試験体図

載荷荷重は、支間長 4 m の床版に道路橋示方書 B 活荷重の輪荷重 $P = 98\text{kN}$ を満載した時の最大曲げモーメントに同等のものを発生する 1 輪荷重の換算荷重を求めると、衝撃係数を考慮しない場合で $P = 160\text{kN}$ 、衝撃を考えると $P = 218\text{kN}$ となる。この荷重を基準として結果を評価することとする。

3-2 実験結果

1) たわみ結果

アーチ型およびフラット型合成床版の支間中央に設計荷重 160kN が載荷した場合のたわみ分布を図-6 に示す。また試験機の最大荷重である 980kN まで静的繰返載荷した床版中央のたわみ結果を図-7 に示す。

- ①設計荷重載荷では、アーチ型はフラット型に比べ中央床版厚が 3cm 薄いにもかかわらず、たわみはアーチ型のほうが若干小さくなっている。
- ②図-6 の曲線変化から、フラット型の初期の弾性限界荷重は約 300kN で、この時、コンクリートにひび割れが発生したと考えられる。一方、アーチ型の初期弾性限界荷重は約 700kN であり、フラット型の 2.5 倍にまで向上した、これはアーチ効果のためと思われる。
- ③両供試体とも試験機最大荷重の 980kN の荷重に十分

耐えたが、アーチ型床版のたわみはフラット型の約 $2/3$ 程度に減少している。アーチ効果と言える。

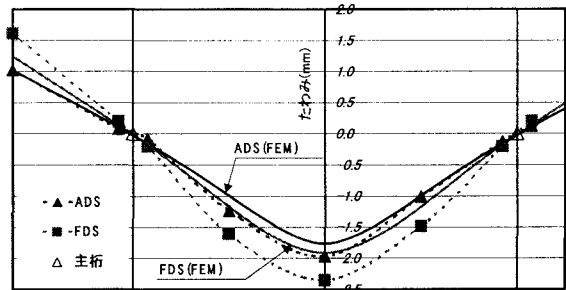


図-6 たわみ分布の比較

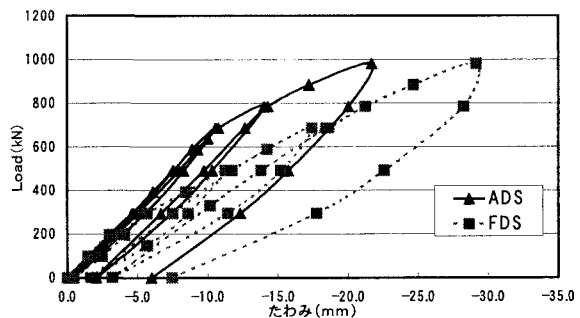


図-7 中央部のたわみ比較

2) ひずみ結果

設計荷重 218kN を支間中央載荷した場合の底鋼板、横リブおよび床版コンクリート上面のひずみ分布を図-8~10、試験機最大荷重 980kN までの中央点のひずみを図-11~13 に示す。これらから以下のことが言える。

荷重 300kN 程度までは両供試体の底鋼板のひずみ分布はアーチ型がやや尖った分布形状であるが、最大値は両床版とも同程度であった。しかし、初期弾性挙動はたわみ結果と同様にアーチ型では 700kN まで継続している。また、使用鋼材の許容応力度のひずみを 700μ とすると、アーチ型床版の荷重は約 650kN に対してフラット型では 500kN 程度となり、アーチ効果が見られる。

横リブのひずみの測定値、解析値は、アーチ型がフラット型の応力度の約 2 倍であり、両床版とも FEM 解析値の約 6 割程度となった。

コンクリート上面のひずみは、設計荷重時も、最大荷重 980kN までの載荷においてもアーチ型のほうが小さい結果となった。また両方とも FEM 解析結果と良く一致している。

図-11 のコンクリートのひずみ変化図から、アーチ型床版の場合、コンクリートのひずみが非常に小さくなっているのは特徴的である。この現象もアーチ効果によるものと考えてよいであろう。

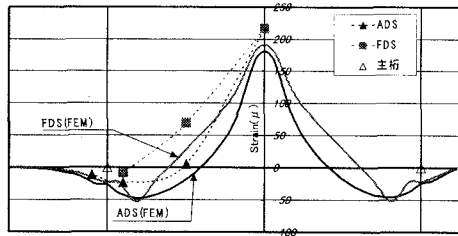


図-8 底鋼板のひずみ分布

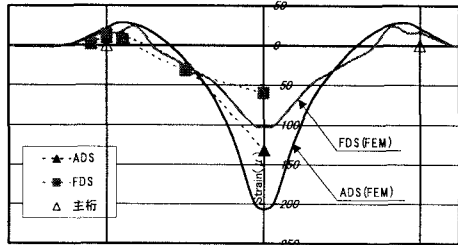


図-9 横リブのひずみ分布

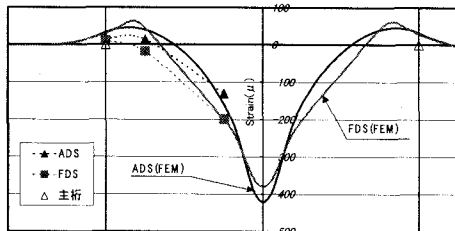


図-10 コンクリート上面のひずみ分布

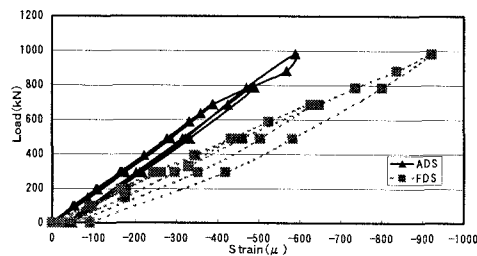


図-11 床版コンクリート上面のひずみ

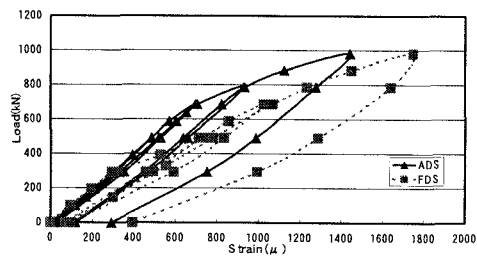


図-12 支間中央の底鋼板最大ひずみ

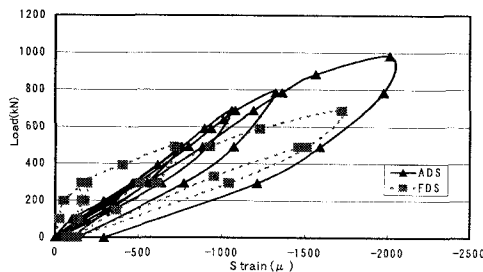


図-13 支間中央の横リブ最大ひずみ

4. 輪荷重走行試験機による疲労実験結果

4-1 試験体および試験概要

静的耐力力試験により、アーチ型床版ではコンクリートのひび割れの影響が見えず、フラット型に比べて高い弾性限界耐力を備えていることが分かったが、走行輪荷重の繰り返し载荷に対する耐久性についても検討することとした。

载荷プログラムを図-14に、試験体の概要を図-15に示す。床版支間 4.0m のものを対象に設計し、アーチ状底鋼板厚 $t=8\text{mm}$ 、孔空き鋼板リブを 500mm 間隔で 4本設定している。床版厚は主桁上で 30cm とし、支間中央で 17cm とした。実験では試験室の都合上、この床版を床版支間のみ 2.5m に減少させた。床版中央から 50cm の位置に橋軸方向の底鋼板継手部を設け、継手部の挙動を確認することにした。

供試体は 2 体で、1 体は底鋼板上面のリブ間中央にスタッドを設けたもの (以下 ASCD)、他方は設けないもの (以下 ASCD-N) で、鋼-コンクリート間の付着の程度による床版挙動への影響を調べることにした。試験終了後、床版を 4 つに切断し、疲労による損傷の発生状況を確認した。

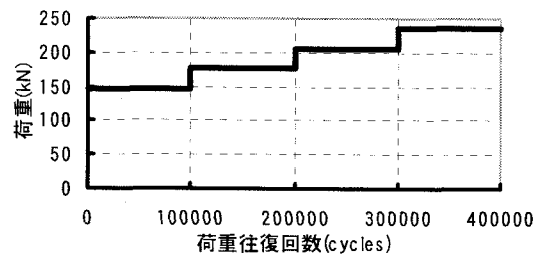


図-14 载荷プログラム

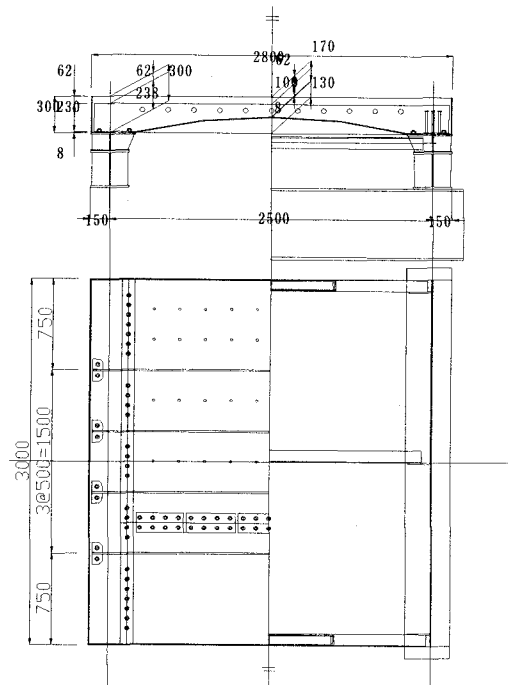


図-15 試験体の概要図

4-2 解析の概要

実験結果の評価のために有限要素法解析を行った。解析対象は ASCD とした。コンクリートは 8 節点 Solid 要素、鋼板および主桁は 4 節点 Shell 要素、横桁および横支材は 2 節点 Beam 要素とする 1/2 モデルとした。

コンクリートに関しては、弾性係数を 3.0×10^4 (MPa) としたが、引張を受ける部分では橋軸・橋軸直角方向の弾性係数をそれぞれ 3.0×10 (MPa) まで落とし、ひび割れが発生したと考え、コンクリートに引張抵抗を期待しないようにした。

鋼板とコンクリート間でずれを許すために、底鋼板要素とコンクリート要素で、別々の節点を設け、互いの節点を Spring 要素で結び、橋軸直角方向 (x 方向)、橋軸方向 (y 方向)、および荷重作用方向 (z 方向) にそれぞれバネ定数をいれることとし、スタッドを設定している点、それ以外の節点においてバネ定数を変えた。表-1 にそれぞれの方向のバネ定数を示す。

表-1 バネ定数の一覧

バネの設置位置		バネ定数(kN/m)		
		x方向	y方向	z方向
スタッド	ひび割れ範囲内	2.03E+05	2.03E+05	1.00E+08
	ひび割れ範囲外	4.06E+05	4.06E+05	1.00E+08
横リブ		0	1.00E+08	1.00E+08
その他の底鋼板		0	0	1.00E+08

4-3 実験結果

1) たわみ結果

図-16 に両供試体の床版支間中央縦断面のたわみ分布結果を示した。これによると、ASCD と ASCD-N で大きな差異は見られないが、10 万回以降、ASCD-N には分布形状にジグザグの乱れが現れた。リブ中間点で、スタッドがないために鋼-コンクリートの付着が切れて、リブのあるところでの荷重分担が増加したと思われる。いわゆるせん断遅れの現象が発生した。

図-17 に床版中央点のたわみの経時変化を示す。どちらの床版も試験終了時まで緩やかな単調増加の傾向にある。リブ間にスタッドの無い ASCD-N のたわみが若干大きいのが認められる。スタッドのある ASCD の最終のたわみ値に対して、解析結果を当てはめるとコンクリートと鋼板間のずれとひび割れを考慮し、かつ、ひび割れ領域を床版中央部の約 600mm の幅と仮定するとほぼ実験値に一致する。このように範囲が狭いのはアーチ効果によるものと推定している。

2) 底鋼板のひずみ結果

図-18 に床版中央横断面における底鋼板のひずみ分布を示す。ASCD では 30 万回までほとんど変化がなかったが、30 万回後、荷重を 207 kN に増加後、ひび割れの影響のためと思われるひずみの増加があった。一方、ASCD-N では中央のひずみが若干下がった。これは先のべたせん断遅れの現象のためと思われる。

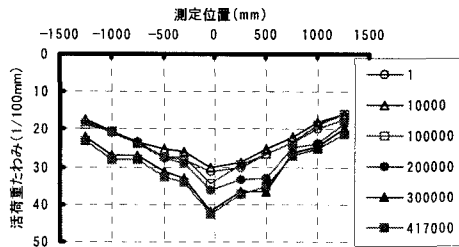
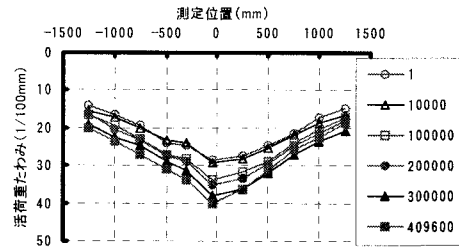


図-16 床版中央縦断面たわみ分布
(98kN 換算活荷重たわみ、上:ASCD、下:ASCD-N)

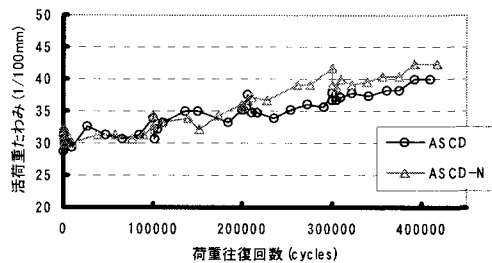


図-17 たわみの経時変化

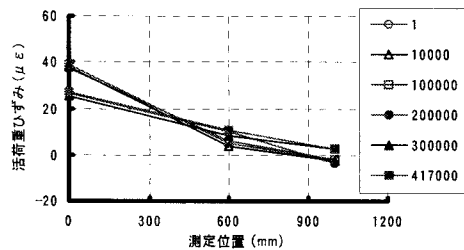
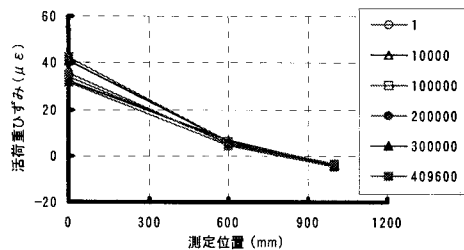


図-18 床版中央横断面ひずみ分布
(床版中央から 500mm 離れた橋軸直角方向断面、
98kN 換算活荷重ひずみ、上:ASCD、下:ASCD-N)

3) 横繫材の軸力の結果

図-19 に中央荷重における横繫材の軸力変化図を示す。両供試体ともひび割れ発生後と思われる回数後から軸力が増加している。これはひび割れによって変形が進もうとするが、それを横繫材が拘束するためであり、この変化がアーチ効果を表す特徴的現象と言える。

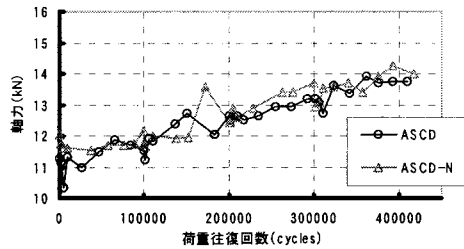


図-19 横繫材軸力の経時変化

4) 試験終了後における試験体の断面の観察

試験終了後、両床版を切断し、コンクリートの断面を観察した。コンクリートはほぼ全域で鋼板から剥離していたが、目視ではひび割れはほとんど発見できず、継手部も健全なままであった。フラット型床版では従来の経験では曲げひび割れやせん断ひび割れがよく観察されていたが、今回の床版ではアーチ効果によってひび割れ開口が抑制されていたと言える。

4-4 解析によるアーチ型とフラット型の比較

一般的な形状を有する合成床版（フラット型合成床版：以下FCD）と解析上で比較することで、アーチ形状の効果について検討を試みた。

1) 解析概要

FCDについてはASCDの平均床版厚（20cm）を有するモデルとした。このように決定したFCDの床版厚では、コンクリートの使用量がASCDとほぼ同量となるものである。床版を支持する主桁、横桁、リブについてはASCDと同様としたが、FCDには横繫材は設けなかった。

コンクリートのひび割れ領域についてはASCDでは4-3で述べたように中央部分600mm範囲とし、ひび割れ深さは床版厚の1/3とし、フラット型ではこれまでの実験から範囲を支間の約半分の1250mmの範囲で、ひび割れ深さを床版厚の1/2とした。

載荷荷重としてB活荷重98kNを床版中央に載荷した。

2) たわみ結果

床版中央横断面のたわみ分布を図-20に示すが、アーチ型の方がたわみが少なくなっている。解析値は実験値とよい一致を示していることからひび割れ範囲の仮定がほぼ正しいと判断できる。

床版中央縦断面のたわみ分布を図-21に示したが、一致度は若干低下している。この方向のたわみ分布は滑らかさを欠いているが、これはリブの拘束のある所でたわみが小さい傾向が見られる。

3) 底鋼板のひずみ結果

図-22に床版横断面での底鋼板のひずみ分布を示したが、リブ中間点、およびリブ直下においても、ASCDの方がFCDに比べ発生する引張応力は小さい結果となった。リブ間の中間ではスタッドの影響でASCDの実験値と解析値との一致度がたわみより低下している。

これらのひずみ分布において圧縮側になる範囲が支

点側から支間長の1/4程度になっており、フラット型より範囲が広いことがわかる。これはアーチ効果によると判断してよいであろう。

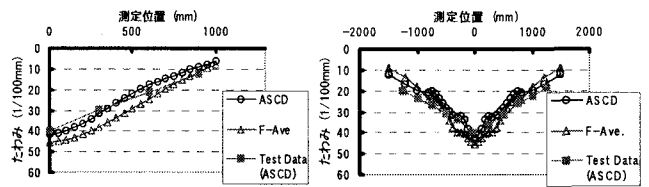
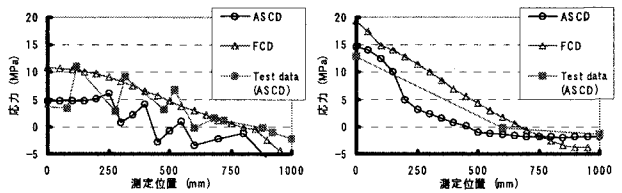


図-20

図-21

床版中央横断面たわみ分布

床版中央縦断面たわみ分布



・)リブ中間点

・)リブ直下

図-22 床版中央横断面の底鋼板応力分布

以上のことから、ASCDではコンクリートのひび割れ発生後もアーチ効果によって床版の剛性低下が抑制されていることが分かる。しかし、まだ供試体は2体程度であるので、定量的評価は難しい。今後もパラメータを変化させて実験および解析を追加する必要があるといえる。

5. おわりに

アーチ型合成床版の静的試験結果と輪荷重走行試験による疲労実験結果、ならびに、走行後の挙動を同定する立体FEM解析を行い、大略の性能が評価できた。合成床版下面をアーチ状に湾曲させた底鋼板を用いることによってアーチ効果が発揮していることが認められ、メリットとして利用できることが確認できた。疲労実験においてはスタッドの有無に関わらず、最大で荷重24tf下で40万往復走行し、大きな損傷もなく十分に疲労耐久性を備えていることが確認できた。しかし、定量的評価はまだ困難であり、今後もデータ蓄積が必要と考えている。

【参考文献】

- 1) 土木学会：合成床版設計・施工基準（案），道路橋床版の新技術と性能照査型設計，平成12年
- 2) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物
- 3) 「アーチ型合成床版の静的耐荷力、定点疲労試験」、土木学会第57回年次学術講演会、2002
- 4) 「アーチ型合成床版の疲労耐久性に関する研究」、土木学会第57回年次学術講演会、2002
- 5) 「アーチ型合成床版の力学特性」、土木学会第56回年次学術講演会、2001
- 6) 頭つ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、平成2年