

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

Study on Arch Effect for Fatigue Durability of Arch Shape Composite Deck

秦 裕彰*, 碓山 晴久**, 櫻井 孝***, 大西 弘志†, 松井 繁之††

Hiroaki HATA, Haruhisa IKARIYAMA, Takashi SAKURAI, Hiroshi ONISHI, Shigeyuki MATSUI

*工修 (株奥村組 秦 裕彰 (〒545-8555 大阪府大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

**工修 (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)

***工修 (株東京鐵骨橋梁 技術開発部 (〒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)

In this research, the author focused on a steel plate-concrete composite deck with curved steel plate. By the permanent curved forms, arch action can be expected during concrete casting and service states for live loads after concrete hardening. These forms can carry concrete self-weight as well as construction live load by the arch action. After concrete hardening, the whole deck becomes a composite structure consisting of the concrete and these forms and resists with the arch action, too. To verify its applicability on highway bridge decks, fatigue tests using a wheel running machine were carried out to certify the fatigue durability of the composite decks. In order to clarify the durability performance, the arch action and the composite effect between the concrete and these forms, several types of specimens different in the shape and the structural type were tested. The specimens for long spans were tested with eccentric loading to clearly distinguish the arch action and effects in the decks.

After these tests, based on the outcomes of the experiments and analyses, the author derived formulae to predict the punching shear capacities for these arch shape composite decks by considering the influences of arch action, eccentric loading and composite effect between the concrete and these forms. With that, the degrees of the fatigue durability improvement of these arch-shape composite decks were verified.

Key words: steel plate-concrete composite deck, curved steel plate, arch action, wheel running machine

1. はじめに

少数主桁橋梁の出現に相俟って、道路橋床版の高耐久性、現場施工の省力化および工期短縮を目指し、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、コンクリート硬化後の活荷重はコンクリートと鋼殻部材とが一体化した合成床版で受け持たせる床版構造を考案開発している(図-1参照)。本床版は床版内にアーチ効果を期待するものである。本論文では、主桁上で床版の回転と水平移動を拘束することによって、载荷点と支持点を結ぶ圧縮のストラットを形成させる効果をアーチ効果と称し、床版下面をアーチ形状にする効果は形状効果と称し、分離して評価することにする。アーチ効果を確保するためには支持点となる主桁の水平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(以後、ASCDと称する)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。

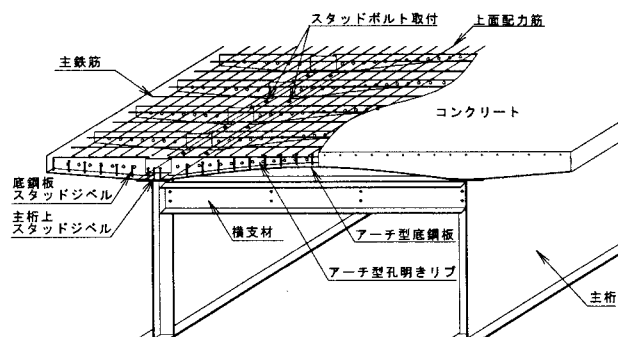


図-1 構造概要図

本床版において静的耐荷力試験が既に行われ、期待どおりの応力発生状況と非常に高い弾性限界荷重を有していること等が報告されている¹⁾。しかし、疲労寿命についてはアーチ効果により向上すると考えられるが、その向上するメカニズムや具体的な向上度は明らかにされていない。

そこで、これらを解明すると共に、本床版について合理的な設計法を見つけ出すための基本試験として、輪荷重走行試験による疲労試験を実施することにした。

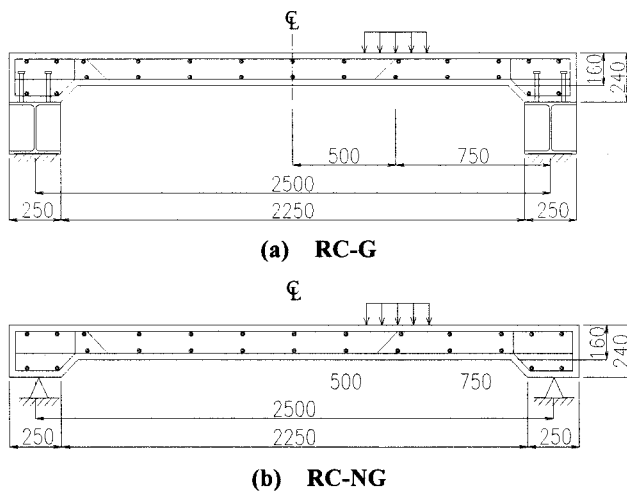


図 - 2 試験体概要図

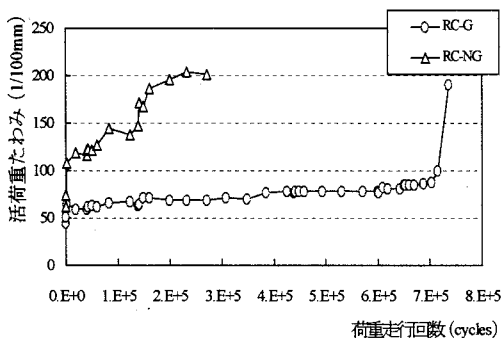


図 - 4 床版中央たわみの経時変化

まず一般的な RC 床版について疲労試験を実施し、床版支持点を拘束することで生じるアーチ効果が床版の疲労寿命に及ぼす影響を調べることにした。続いて、断面形状の異なる鋼-コンクリート合成床版について疲労試験を行い、床版下面をアーチ形状にする形状効果や鋼-コンクリートの合成効果について検討した。疲労試験後には FEM 解析によりアーチ効果を定性的に評価し、本形式の構造特性を考慮に入れた押抜きせん断耐荷力を算定することで、それぞれの効果が合成床版の疲労寿命をどれほど向上させるのかを調べた。本報告では、これらの実験概要と検討結果について述べることにする。

2. 床版支持点を固定する影響

(1) 試験体と試験方法

床版支持点の固定の影響を調べる試験では、図 - 2 に示すように、主桁上にスタッドを配置し、主桁と床版を剛結した RC 床版 (以後、RC-G と称す)、主桁と床版を剛結しない RC 床版 (以後、RC-NG) の 2 供試験体を製作し比較検討を行い、床版に与える桁との剛結の影響を調べた。供試験体の平面寸法は 3000mm×2750mm であり、床版厚はいずれの試験体も 160mm である。床版支間は 2500mm とし、道路橋示方書に従い主鉄筋 (D16) を圧縮側で 200mm 間隔、引張側では 100mm 間隔で配置した。配力筋 (D13) を圧縮側と引張側にそれぞれ 250mm 間隔

表 - 1 使用コンクリートの物性値

試験体	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	割裂強度 f_c (N/mm ²)
RC-G	33.0	32.5	3.24
RC-NG	25.6	24.7	2.05

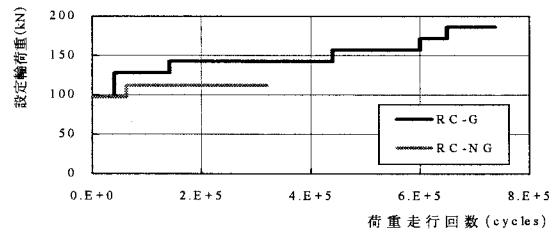
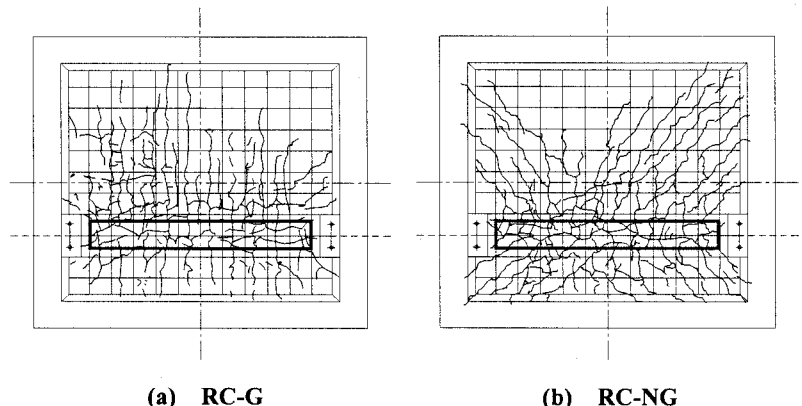


図 - 3 載荷荷重履歴



(a) RC-G

(b) RC-NG

図 - 5 ひび割れ概要図

で配置した。製作した試験体における使用コンクリートの材料試験結果を表 - 1 に示す。

本試験では、輪荷重走行試験機 (Gongoro 号) を使用した。今回実施した載荷荷重履歴を図 - 3 に示す。RC-NG については、主桁を有しておらず、かつ、床版厚が 160mm と比較的薄いことを考慮し、荷重の漸増は RC-G の半分程度にした。また、床版に与える主桁との剛結の影響をより顕著にするために、床版中央から橋軸直角方向に 500mm 離れた位置での偏心載荷とした。

(2) たわみ発生状況

床版中央から橋軸直角方向に 500mm 移動した点での所定回数毎の活荷重たわみ経時変化を図 - 4 に示す。RC-NG では試験開始直後にたわみが急増し、10,000 回後も安定することなく増加し続け、120 kN 以下の 341,000 回で押し抜きせん断破壊に至った。一方、RC-G では 40% 大きい走行荷重 167kN でも 700,000 回まで緩やかな漸増の傾向しか示さなかった。そこで荷重を 186kN に上昇したところ、たわみが急増し 736,000 回にて押し抜きせん断破壊を呈した。図 - 5 の床版下面におけるひび割れ発生状況を見ると、RC-G では輪荷重直下から近い方の主桁までの範囲では橋軸方向ひび割れが全く観察されなかった。このことから、RC-G では床版内に固定支持によるアーチ効果が生じていたと推定できる。

(3) アーチ効果の定性的評価

床版内に生じるアーチ効果を定性的に評価するために FEM 解析 (Sofistik) を行った。床版部は Solid 要素、主桁は Shell 要素を用い、材料特製は等方性材料とし、全断面が有効な状態を再現した。本解析より得られた床版内の橋軸直角方向応力の分布を 図 - 6 に示す。RC-G の床版下面における引張領域は RC-NG よりも格段に狭い範囲である。さらに RC-G では、支持点の水平移動を拘束することで、主桁上で負の曲げモーメントが発生し、輪荷重作用位置と支持点を結ぶ圧縮のストラットが形成されていることがわかる。

輪荷重のエッジから 45° 方向の純せん断破壊線を考えた時、偏心側領域におけるせん断抵抗領域の深さ x_r (以後、有効せん断抵抗深さと称する) が RC-G では深化していることがわかる。この有効せん断抵抗深さが深化することで、床版の耐荷力が向上したと考えられる。

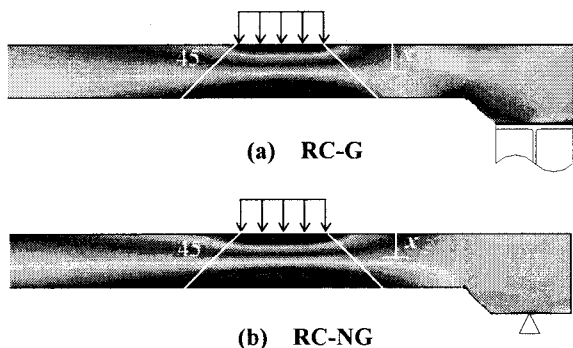


図 - 6 橋軸直角方向応力分布

(4) 有効せん断抵抗深さの深化

輪荷重の作用位置により、偏心側領域におけるコンクリートの有効せん断抵抗深さがどのような影響を受けるかを 2 次元非線形解析ソフト ATENA を用いて検討を行った。図 - 7 に有効せん断抵抗深さと輪荷重の偏心距離の関係を示す。

解析から、載荷位置が主桁に近づくにつれ有効せん断抵抗深さが大きくなる結果を得た。特に、 $e/L=0.14$ を超えると、有効せん断抵抗深さは引張側主鉄筋の有効高さと同程度になったため、偏心距離が $e/L=0.14$ より大きい場合は、引張側主鉄筋の有効高さが有効せん断抵抗深さに相当するとした。

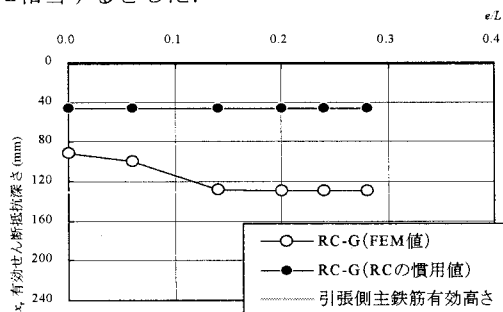


図 - 7 有効せん断抵抗深さ - 輪荷重偏心距離関係

(5) アーチ効果を考慮した押抜きせん断耐荷力

RC 床版について精度良くせん断耐荷力を推定することができるとされる松井の破壊モデル²⁾に、アーチ効果によって偏心側領域の有効せん断抵抗深さが深化することを考慮し、修正を加えた。図 - 8 にアーチ効果を考慮した RC 床版の破壊モデルを示す。さらに、走行する輪荷重を受けた場合、床版はある有効幅 B をもつ主鉄筋断面で外力に抵抗する (梁状化)。このことを考慮すると、床版の押抜きせん断耐荷力は次式のように表現できる。

$$P_{sx} = B \{ \tau_{smax} (x_m + x_r) + \sigma_{tmax} C_m \} \quad (1)$$

ここに、 x_m は主鉄筋断面の引張側コンクリートを無視した時の中立軸、 x_r は主桁固定の影響を受けた有効せん断抵抗深さ、 C_m は引張側主鉄筋のかぶり深さ、 τ_{smax} はコンクリートの最大せん断強度、 σ_{tmax} はコンクリートの最大引張強度である。

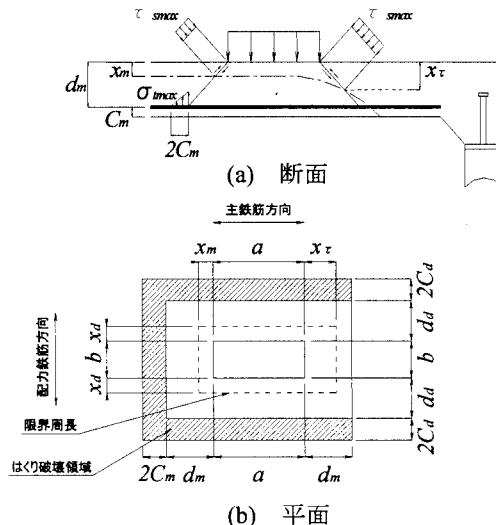


図 - 8 押抜きせん断破壊モデル

偏心荷重による偏心側車輪エッジで発生する最大せん断力の増加率を作用荷重 P に乗じ、式 (1) を用いて、RC-G のせん断耐荷力を誘導し、RC 床版の終局状態を示す松井の S-N 曲線式³⁾より破壊回数を算定すると表 - 2 のとおりである。RC-NG に関しては、偏心の影響のみを考慮し、アーチ効果を考慮していない松井式を用いてせん断耐荷力を誘導し、破壊回数を算定した。

RC-G における算定破壊回数と実験による破壊回数との比 N_{eq}/N はオーダー的に 1 に近いことから、提案した破壊モデルに基づく梁状化後の押抜きせん断耐荷力算定式 (1) は、アーチ効果が生じる床版の疲労寿命を安全側に推定できるといえる。

表 - 2 マイナー則による換算回数と破壊回数

試験体	N : 算定値	N_{eq} : 実験値	N_{eq}/N
RC-G	245,400,000*	474,800,000	1.93
RC-NG	1,111,000*	1,731,000	1.56

*: 偏心の影響により作用荷重を $k \cdot P$ として算出
注) 破壊回数は全て 100kN 換算回数

3. アーチ形状の床版下面、鋼板を有する影響

(1) 試験体と試験方法

本試験に用いる試験体は、図-9に示すように(a)横繫材を有するアーチ状合成床版（以後、ASCD）、(b)横繫材を有さないアーチ状合成床版（以後、ASCD-NS）、(c)鋼構造物設計指針 Part B に準じて設計した通常の平面形状の合成床版（以後、FCD）、(d)アーチ状 RC 床版（以後、ASRC）の4つの試験体である。

ASCD、ASCD-NS、FCD、ASRCの平面寸法は3500mm×2800mmである。これらの床版については、疲労寿命を把握することを目的としているため、100万回以内で床版が破壊に至るように、中央床版厚を160mm、底鋼板厚を4.5mmとやや小さめに設定した。合成床版試験体に用いた鉄筋はD16であり、主鉄筋および配力筋方向に125mm間隔で配置した。ASRCの主鉄筋断面における鉄筋量は、ASCDの底鋼板を鉄筋量に換算し、それと等価な鉄筋量となるようにD22の鉄筋を主鉄筋方向に100mm間隔で配置した。製作した試験体における使用コンクリートの材料試験結果を表-3に示す。

本試験にて実施した載荷荷重履歴を図-10に示す。また、床版に与える主桁との剛結の影響をより顕著にするために、床版中央から橋軸直角方向に500mm離れた位置に偏心載荷を実施した。

(2) たわみ発生状況

本試験より得られた載荷点直下の活荷重たわみ経時変化を図-11に示す。ただし、全て100kN換算したデータを用いている。実験初期におけるASCD-NSとFCDのたわみ発生量を比較すると、ASCD-NSのたわみはFCDの75%程度であった。ASCD-NSの床版下面はアーチ形状であり、支持点に近づくにつれ厚い床版厚が確保されているため、床版は変形しにくいようである。次にASCDとASCD-NSを比較すると、ASCDにはASCD-NSの70%程度のたわみ量しか発生していない。また、RC床版であるASRCの実験初期におけるたわみ量は合成床版のASCD-NSとほぼ同程度である。ASCDとASRCは横繫材を有することで支持点の水平移動が拘束され、床版の変形量は大幅に抑制されることがわかる。

各試験体の試験終了時までのたわみ経時変化を比較すると、たわみがほぼ線形的に漸増する寿命期間は、ASCDが最も長く、次いでASRCの順に長かった。横繫材が床版の変形を抑制するのに加え、ASCDはずれ止めスタッドにより、コンクリートと連続した鋼板とが一体化しているため、コンクリート部におけるひび割れの発生・進展が抑制されていると考えられる。

(3) 有効せん断抵抗深さの深化

合成床版においてもアーチ効果により偏心側領域の有効せん断抵抗深さが深化すると考えられるため、2次元非線型解析ソフト(ATENA)にて検討した。図-12に

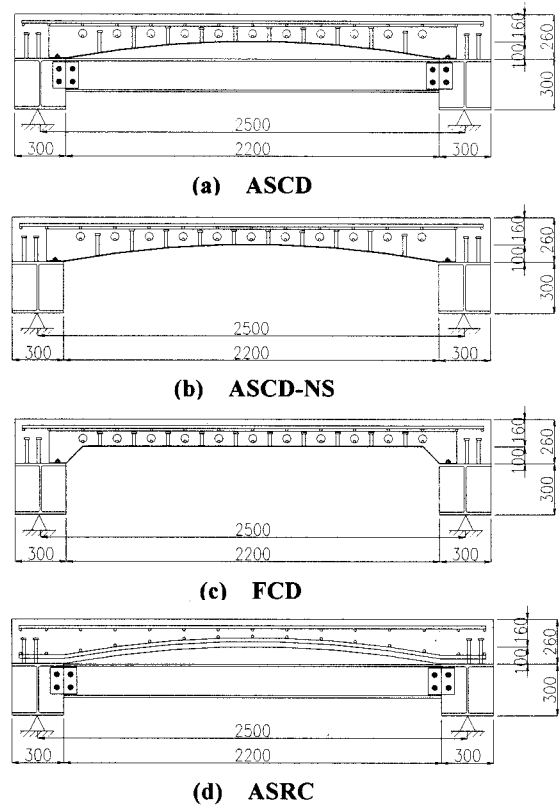


図-9 試験体断面図

表-3 使用コンクリートの物性値

試験体	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	弾性係数 E_c (kN/mm ²)	割裂強度 f_c (N/mm ²)
ASCD	38.8	35.1	2.22
ASCD-NS	33.5	33.7	1.82
FCD	39.8	34.0	2.26
ASRC	36.7	30.3	2.08

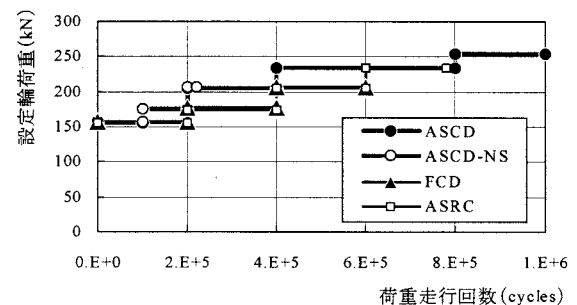


図-10 載荷荷重履歴

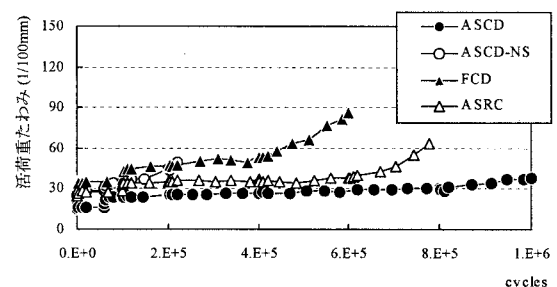


図-11 床版中央たわみの経時変化

有効せん断抵抗深さと輪荷重の偏心距離の関係を示す。

床版下面をアーチ形状にした ASCD, ASRC では有効せん断抵抗深さがコンクリートのほぼ全厚に相当することがわかった。従って, ASRC については有効せん断抵抗深さを引張側主鉄筋の有効高さに, ASCD については 45° 方向の純せん断破壊線が底鋼板に達した位置における床版厚を有効せん断抵抗深さとすることにした。

床版下面をアーチ形状にすることで, 輪荷重の偏心距離が大きくなるにつれ床版厚も増加するため, 有効せん断抵抗深さも増加し続けることがわかる。

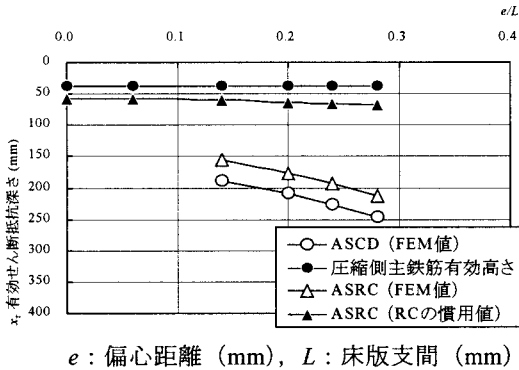


図 - 12 有効せん断抵抗深さ - 輪荷重偏心距離関係

(4) アーチ効果を考慮した鋼 - コンクリート合成床版の押抜きせん断耐荷力

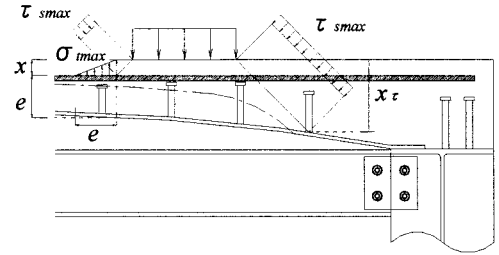
鋼 - コンクリート合成床版の場合, 純せん断力による破壊形式については RC 床版とほぼ同じであるが, はくり破壊部の破壊形態が若干異なっている。すなわち, RC 床版でははくり破壊により抜け落ちるのは引張側鉄筋より下側のかぶりの部分であるのに対し, 合成床版では圧縮側鉄筋の下側で, はくり面が形成されることが, 文らの研究により明らかになっている³⁾。

本試験にて, 観察された床版断面のひび割れ発生状況から文の破壊モデルにおけるはくり破壊領域を修正し, 床版の梁状化幅を横リブ内側面間の距離 (388mm) とすると, アーチ効果を考慮し, 梁状化した鋼 - コンクリート合成床版の破壊モデルは図 - 13 のように考えることができる。合成床版の場合, 主桁側領域でははくり破壊が生じる要因がないため, 主桁側領域のはくり破壊を無視することにした。以上から, 押抜きせん断耐荷力は次式で表せる。

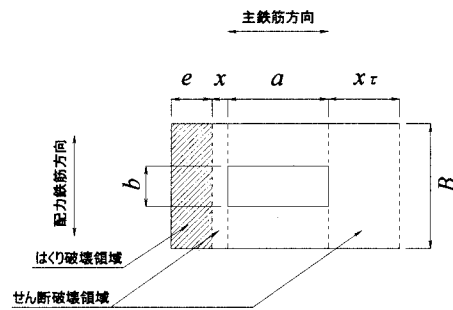
$$P_{sx} = B \left\{ \tau_{s \max} (x + x_{\tau}) + \frac{1}{2} \sigma_{t \max} S \right\} \quad (2)$$

ここに, S ははくり長さ ($S=e$), e は圧縮側鉄筋と 45° 方向の純せん断破壊線の交差部における, 圧縮側鉄筋上面から底鋼板と横リブの等価換算底鋼板厚下面までの距離, x はせん断破壊領域深さ, x_{τ} は偏心側有効せん断抵抗深さ, $\tau_{s \max}$ はコンクリートの最大せん断強度, $\sigma_{t \max}$

はコンクリートの最大引張強度である。 B は梁幅 ($B=l$), l_{r} は横リブ内側面間の距離である。



(a) 断面



(b) 平面

図 - 13 押抜きせん断破壊モデル

(5) アーチ効果による床版の疲労耐久性の向上度

輪荷重が床版中央を走行した場合の単純支持した一般的な形状の RC 床版の疲労寿命 N_0 を松井式より算定し, この N_0 と荷重が偏心した時の推定される床版の疲労寿命 N_k との比の対数値 α を偏心距離毎にプロットすると, 図 - 14 のように表せる。ASCD の疲労寿命は, 式 (2) より, ASCD-NS と FCD については文の提案式³⁾ から, ASRC については式 (1) を用いて推定した。

アーチ形状の床版下面を有し, 床版支持点の水平移動を拘束した ASCD においては, 偏心荷重によるせん断力の増加の影響はみられず, 疲労寿命はほぼ一定であることが確認できる。さらに, 他の供試体と比べ, 各段に高い疲労寿命を有していることがわかる。RC 床版である ASRC においても, 偏心荷重により床版の疲労寿命が減少する傾向はみられず, その疲労寿命は合成床版試験体の ASCD-NS, FCD より高いものである。

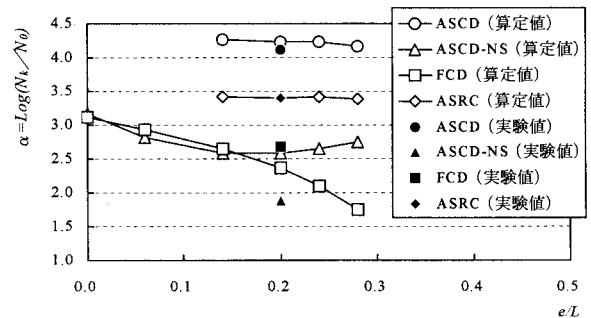


図 - 14 疲労寿命 - 輪荷重偏心距離関係

4. 床版の疲労寿命に及ぼす影響因子とその影響度

3 で示した床版の疲労寿命に影響を及ぼす因子として、以下の4つの因子を考え、床版の疲労寿命を次式のように表すことを提案する。

$$N = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot N_0 \quad (3)$$

ここに、 N_0 は床版中央を輪荷重が走行した場合の単純支持したRC床版の疲労寿命、 α 、 β 、 γ 、 δ は各因子の影響係数であり、各試験体間で疲労破壊回数の比を算出することにより求めた。

(1) 偏心荷重を受ける影響 (α)

単純支持した床版は、輪荷重の作用位置が偏心した場合、図-15に示すように、作用するせん断力が増加することにより、疲労寿命は係数 α 倍で低下する。

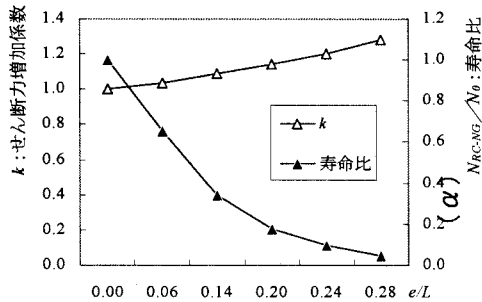


図-15 せん断力 - 疲労寿命関係

(2) 床版支持点の水平移動を拘束する影響 (β)

床版支持点の水平移動および回転変位を拘束することでアーチ効果が生じ、圧縮側コンクリートの有効せん断抵抗深さが深化し、床版のせん断耐荷力が増加する。従って、図-16のように単純支持した床版よりも遥かに高い疲労寿命を発揮する。しかし、平面形状の床版では、輪荷重の偏心載荷によって、有効せん断抵抗深さが深化し、せん断耐荷力は増大するが、作用せん断力も増加するため、疲労寿命は減少する。ある偏心距離に達すると、有効せん断抵抗深さが引張側主鉄筋の有効高さに到達するため、せん断耐荷力は最大値に達し、それ以上の場合、疲労寿命の減少率が大きくなる。

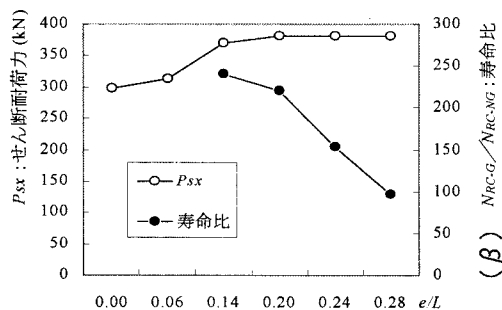


図-16 せん断耐荷力 - 疲労寿命関係

(3) アーチ形状床版下面を有することによる影響 (γ)

床版下面をアーチ形状にすることで、輪荷重の作用位置が偏心しても、主桁設置位置まで厚い床版厚が確保されるため、有効せん断抵抗深さは増加し続け、床版のせん断耐荷力も増大する。これにより、輪荷重の偏心距離が大きくなった場合、作用せん断力は増加するが、床版のせん断耐荷力も大きく増加するため、平面形状の床版と比べ図-17に示すように疲労寿命は増加する。

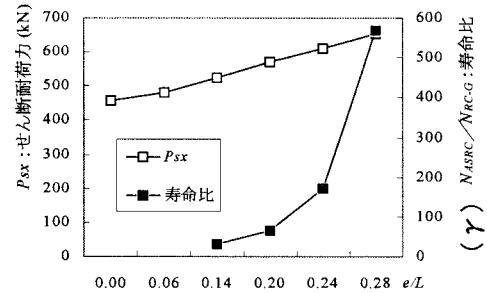


図-17 せん断耐荷力 - 疲労寿命関係

(4) 底鋼板を有することによる影響 (δ)

埋設型枠あるいは底鋼板等、曲げ強度の高い部材を床版下面に有することで、合成効果によりひび割れの発生・進展が抑制されるため、コンクリートの有効せん断抵抗深さが増加する。これにより床版の有するせん断耐荷力は増大し、床版の疲労寿命も向上する。

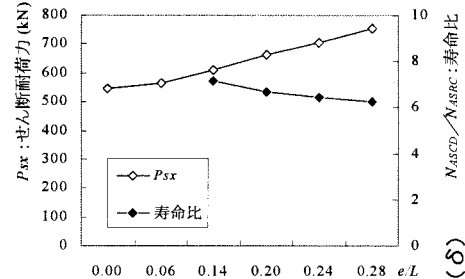


図-18 せん断耐荷力 - 疲労寿命関係

5. おわりに

アーチ形状合成床版の疲労試験結果から床版のせん断耐荷力を推定し、アーチ効果、アーチ形状の床版下面、鋼板を有することによる床版の疲労寿命向上度を評価し、設計の基礎式を確立することができた。しかし、ここで示した影響因子のより信頼性の高い定量的評価は、今後の床版支間を変えたデータの蓄積が必要がある。

参考文献

- 1) 加々良直樹他：「アーチ型合成床版の静的耐荷力，定點疲労試験」，土木学会第57回年次学術講演会，2002。
- 2) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，1985。
- 3) 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，1989。