

走行荷重下における鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性に関する研究
Fatigue of Steel-Concrete Composite Decks Subjected to A Moving Wheel Load

松井繁之・ 佐々木洋・ 福本湧士・ 梶川靖治

By Shigeyuki MATSUI, Hiroshi SASAKI, Yuushi FUKUMOTO and Yasuharu KAJIKAWA

When a composite deck is applied to highway bridges, fatigue strength of the deck has to be examined. The authors have been developing a composite deck composed of a thin steel plate and concrete slab which are connected by stud shear connectors. For such kind of decks, various types of fatigue failure can be presumed. Therefore, the authors have conducted a series of fatigue tests using a new fatigue testing machine in which load moves in the range of 2m length to simulate actual vehicle loads. Three typical fatigue failure modes were observed through the tests. The paper describes those fatigue failure phenomena and discusses the fatigue strengths.

1. まえがき

近年、道路橋RC床版のひびわれ損傷の経験から、高い耐久性を求めて他形式床版の開発が進められている。その中でも、基本的形式である鋼板とコンクリート床版との合成床版が、RC床版と鋼床版の特徴を合わせ持つとして活発に開発されている¹⁻³⁾。すなわち、RC床版と比較すると、・鋼板を型枠に兼用でき現場での型枠工が省略できる、・死荷重軽減が大きい、・疲労によるコンクリート塊の落下を防止できる等が挙げられる。また、鋼床版と比較した場合、・輪荷重の作用を直接受けないため板厚および補剛リブ数を極端に減少できる、・コンクリート床版との合成により鋼板を薄くできる等の利点がある。

しかし、この種の合成床版についてまだ未解決の点が多い。特に、鋼板とコンクリート床版とを一体化する“かなめ”のずれ止めの設計法がまだ確立されていない。現在、本床版の設計に関しては道路橋示方書（以下、道示と呼ぶ）の合成桁の項や、他国の示方書を準用している。また、道路橋床版は任意の位置を走行する輪荷重を担う。その結果、例えば、RC床版はコンクリートの抜け落ちという特有の疲労破壊を呈する。この破壊性状を一定点載荷法による実験で再現できないことは周知のことである。よって、この種の合成床版の疲労強度についても、走行荷重下のもことで確認しておかなければならない。

-
- ・ 工博 大阪大学助教授 工学部土木工学科（〒565 吹田市山田丘2-1）
 - ・ 大阪大学大学院 工学部土木工学科（〒565 吹田市山田丘2-1）
 - ・ 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科（〒565 吹田市山田丘2-1）
 - ・ 工博 川田建設株式会社開発室長（〒550 大阪市西区北堀江1-22-19）

そこで、筆者らは図1に示すような鋼板・コンクリート合成床版（以下、PI・C合成床版という）について、輪荷重走行試験機を用いて実物大供試体の実験を行い、疲労破壊特性および疲労強度について基礎的資料を得ることにした。そして、スタッドの長さ、スタッド間隔、支持条件、環境条件、鋼板の表面、床版厚 等の違いが、本床版の疲労特性にいかなる変化をもたらすかを実験的に研究した。

実験の結果、コンクリートの押し抜きせん断疲労破壊、スタッドの疲労破断などの既報のものと異なる破壊現象が現れた。これらの疲労強度について考察を加え、上記の各因子がPI・C合成床版の疲労破壊性状および疲労強度に大きく影響することを明らかにした。これまでに、本研究のような実験法が採用されておらず、本研究成果は、道路橋の合成床版を合理的に設計する場合の基礎資料となるであろう。

2. 実験方法

2.1 供試体の種類と実験条件

実験供試体の外形寸法を図2に示す。鋼板を6mmとし、コンクリ

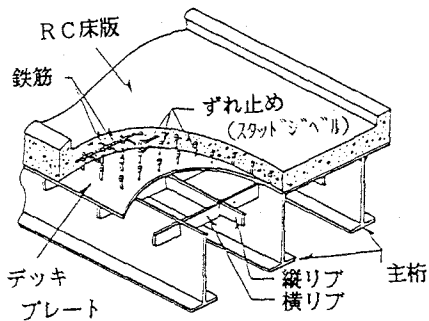


図1 鋼板・コンクリート合成床版

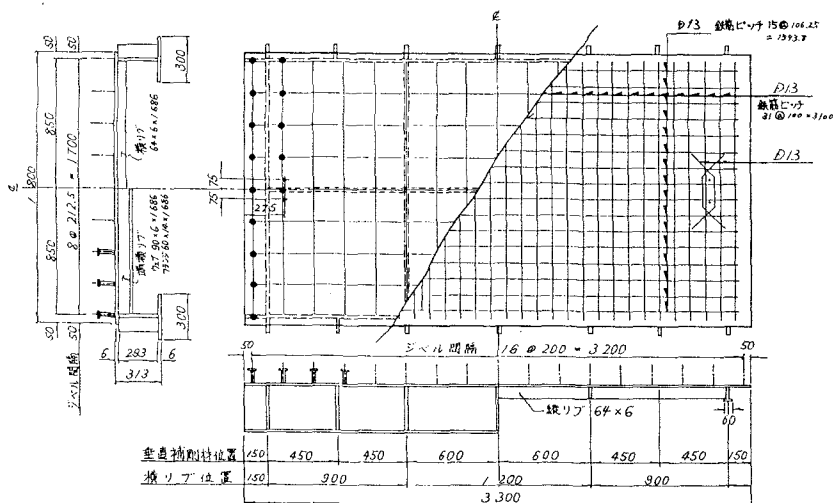


図2 供試体の形状・寸法

表1 供試体の種類

供試体	コンクリート厚	スタッド間隔	鋼板種別	支持条件	環境条件
グループ I	FB-1	12cm	10,20cm	平板	主桁沈下なし 乾燥
	FB-2	12cm	10,20cm	平板	主桁沈下なし 乾燥
グループ II	1A	12cm	10cm	平板	主桁沈下なし 乾燥
	1B	12cm	10cm	平板	主桁沈下なし 水張
	2A	12cm	20cm	平板	主桁沈下なし 乾燥
	2B	12cm	20cm	平板	主桁沈下可 乾燥
グループ III	2C	12cm	20cm	縞鋼板	主桁沈下なし 乾燥
	2T	15cm	20cm	平板	主桁沈下なし 乾燥

ート厚を12cmとした。横リブおよび縦リブは死荷重を担うものであり、両者の交点は溶接により連結した。厚さの決定について、まず、鋼板厚をスタッドが溶植できる最小厚とした。そして現在ほぼ最大と思われる3m支間にも適用できる最小コンクリ

ート床版厚を決定することにした。コンクリートの設計強度を 270kg/cm^2 とし、道示の床版設計曲げモーメントに対してコンクリート厚を変化させると、各応力度は図3のようになり、コンクリートの許容応力度（ $\sigma_{ck}/3$ ）で決まる12cmとした。コンクリート床版圧縮側には負のモーメントにも抵抗できるよう、D16の

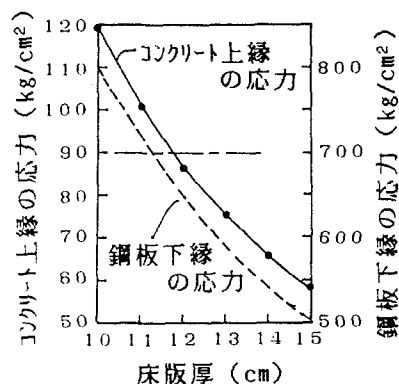


図3 床版厚と応力の関係

鉄筋を10cm間隔で縦横に配置した。主鉄筋を車両進行方向に対し直角に配置し、かぶりを3cmとした。配力鉄筋は主鉄筋の下側に配置した。スタッド径は13mmで、間隔については道示の最小間隔である10cmを基本とし、比較用として20cmを選んだ。

研究は表1に示す3つのグループに分けて進めた。グループⅠは本形式床版の基本疲労挙動を見る基礎的実験である。供試体2体(FB-1, FB-2)を用意した。これらの供試体では、スタッド上部のかぶりを4cmにすると考えてスタッドの長さを80mmとし、1体で床版中央横断面を境にして、スタッド間隔を10cmと20cmに変えた。なお、鋼板下側に図2に示したように横リブ・縦リブを溶接した。

グループⅡでは、1つの供試体内でスタッド間隔を一定にした。ただし、後述するようにグループⅠのスタッドはコンクリートのせん断に対する補強効果がないと判断し、スタッド長を11cmとした。スタッド間隔10cmのもの2体(1A, 1B)と、20cmのもの2体(2A, 2B)を用意した。さらに、これらの供試体では縦リブの効果は少ないと判断し省略した。1Bでは床版に対する水の影響を評価するため、図6に示す範囲で上面にプールを作り、水を張って実験した。2Bでは主桁沈下の影響を見るため主桁の両端に回転可能な沓を設置した。

グループⅢはグループⅡで判明した疲労破壊性状および疲労寿命を改善する工夫を加えたものである。すなわち、鋼板の表面に突起を付けるのが望ましいと考え、図4のような形状の縞鋼板を用いたもの1体(2C)、床版厚を厚くしたものの1体(2T)について実験した。

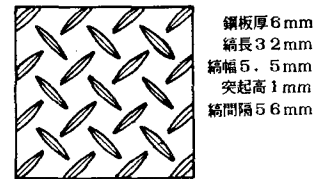


図4 縞鋼板の形状

2.2 実験方法

使用した載荷装置は、実橋における輪荷重の走行を再現させるよう筆者らが開発した輪荷重走行試験機⁴⁾である。その概要を図5、6に示す。輪荷重の走行範囲は床版中央から前後1mの範囲である。輪荷重の下に12×30cmの鋼製ブロックを敷き詰めた軌道を置き、道示の輪荷重載荷面積と相似な載荷面を確保した。輪荷重の走行中心は床版の中央縦断面である。

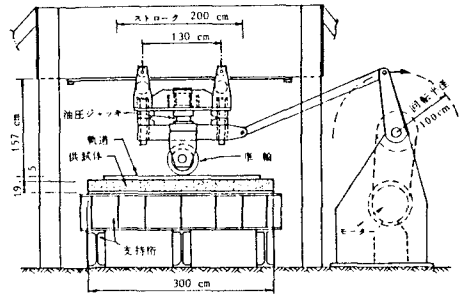


図5 輪荷重走行試験装置

疲労試験途中で試験機を適宜停止させ、静的載荷によって各種の測定を行った。主な載荷位置は床版中央である。測定項目は、原則として鋼板下面でのたわみ、鋼板上下面のひずみ、供試体側面での鋼板とコンクリート床版間の相対ずれである。ただし、ひずみ測定に関して、後述するようにスタッドに作用するせん断力を実験的に評価することと、スタッドの破壊時期の推定のため、主要なスタッドについてその中心より ±2cm離れた点の鋼板下面にひずみゲージを計4枚貼付したのが特徴である。また、床版上面におけるコンクリートのひびわれ観察、および、鋼板とコンクリート床版との剝離に対するハンマーによるたたき点検を走行載荷中に行った。

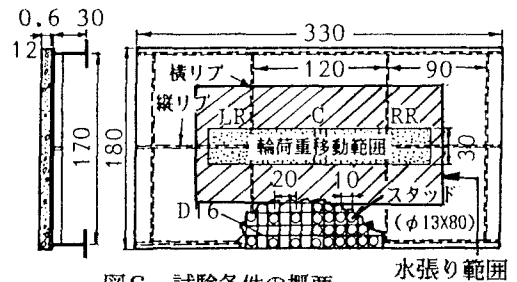


図6 試験条件の概要

2.3 載荷荷重の決定

供試体断面は支間3mの床版としても抵抗できるものであるが、図2のように床版支間を1.7mとした。単純板解析によると、この支間で輪荷重が2mの範囲を走行する場合、床版中央点における橋軸方向の断面に作用する曲げモーメント(Mx)で評価した等価荷重振幅は載荷荷重の約65%で、橋軸直角方向の断面に作用する曲

げモーメント(My)からは載荷荷重の約105%となる。このことから、床版中央点において、直角2方向で同時に設計輪荷重8t（衝撃を含まず）に相当する荷重振幅を与えるのは困難である。平均して、8tの荷重振幅を発生させる載荷荷重は約10tとなる。この10tを基準荷重にして表2のように各供試体の荷重を決定した。

表2 各供試体の載荷荷重と繰返回数(万往復)

3. 実験結果とその考察

3.1 各供試体の載荷荷重と繰返回数

グループⅠでは基準の倍の荷重で実験を開始し、疲労破壊性状の観察に務めた。グループⅡでは基本荷重のもとで各種因子の影響程度を比較した。グループⅢではグループⅡとの比較の意味で、まずは基本荷重をかけ、破壊しない場合には荷重を徐々に上げることにした。

各荷重の載荷回数、試験終了時の状況についても表2にまとめた。

供試体	10 t	12 t	15 t	18 t	20 t	破壊状況
FB-1					0.55	5500往復で押し抜きせん断破壊
FB-2			6.77			6.77万往復で押し抜きせん断破壊
1A	50.0		15.5			スタッドの疲労破壊
1B	15.9					コンクリート表面のジャリ化
2A	22.7					スタッドの疲労破壊
2B	26.7					スタッドの疲労破壊
2C	50.0		30.0			破壊せず
2T	10.0	5.0	5.0	25.0		破壊せず

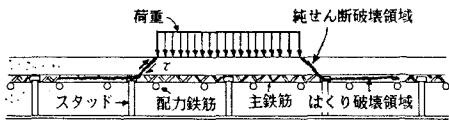


図7 押し抜きせん断破壊状況

3.2 グループⅠの実験結果と考察

FB-1では約5500往復で、スタッド間隔20cm側でコンクリート床版が押し抜きせん断破壊を呈した。参考のため、その後、荷重を11tに下げて載荷を続行すると、一方のリブ交差溶接部で疲労亀裂が発生し、8200往復で鋼板まで到達したので、この時点で実験を終了した。FB-2では荷重を15tと小さくしたが、約6万往復でリブ交差部に亀裂が発生した。そして、約6.77万往復で、やはりコンクリート床版が押し抜きせん断破壊した。実験後、押し抜きせん断破壊部を観察すると、図7に示したように、床版上面から主鉄筋位置まで純せん断破壊し、続いて、主鉄筋位置ではくり破壊していた。筆者らはRC床版において同様な破壊性状を多く観察しているが、RC床版と異なる点は、この主鉄筋は引張側コンクリート無視の中立軸よりも上に存在していることである。本供試体ではかぶりを4cm確保したため、スタッドの頭と主鉄筋がほぼ同じ高さとなり、これらが上下のコンクリートの連続性を阻害し、上記のようにはくり破壊したものと考えられる。

本グループの実験から改良すべき点として次のことが指摘できる。

- ① 長さ80mmのスタッドにははくり破壊に対するアンカー効果がなく、スタッドをもう少し長くし、コンクリートのせん断破壊に対する補強効果を発揮させるべきである。
- ② 縦リブは死荷重を分散させる役目を期待するが、その効果は少ない。逆に、横リブとの交差部はリブ十字継手になり、リブおよび鋼板の疲労強度の低下をもたらすので、疲労の観点から省略してよい。

3.3 グループⅡの実験結果と考察

図8～10にグループⅡとⅢの、床版中央点の荷重-たわみ関係の変化状況、同点の荷重振幅10tに対応する活荷重たわみと総たわみ（いずれも床版だけの相対たわみ）の繰返回数に対する変化状況、および、床版側面で計測した最大ずれの繰返回数に対する変化状況を示す。

1A：載荷荷重10tでは50万往復後もきわだった変化は発生しなかった。荷重を15tに上げると、15.5万往復後にコンクリート床版が押し抜きせん断破壊した。

1B：16万往復で輪荷重移動範囲下のコンクリートが完全に破碎し、変位が急増したため実験を終了した。

2A，2B：図8、9で明らかなように、1Aに比較して早い時期からたわみ・ずれが漸増し、合成効果

の低下が顕著であつた。そして、それぞれ22.7万往復、26.7万往復で一部のスタッド上部のコンクリートが円錐上に抜け上がった。この現象はスタッドの繰返し曲げ変形により、かぶりコンクリートに繰返し押し上げ力が作用したためと思われる。

さて、PI・C合成床版には初期静的载荷の間ではコンクリートと鋼板との付着が存在しているため、スタッドには大きなせん断力が作用せず、鋼板のひずみ分布は滑らかである。しかし、走行载荷をするとすぐにこの付着がきれ、境界面のせん断力はすべてスタッドに集中する。さらに、そのせん断力に伴う曲げが加わり、鋼板に局部曲げが発生し、スタッド列下の鋼板のひずみ分布は図11に示すようにジグザグになる⁹⁾。しかし、荷重の繰返しが進むと再びこのジグザグの凹凸が減少する。この減少によってスタッドが疲労破壊したことが推定できる。鋼板のたたき点検を併用するとスタッドの破断が確信できた。この破断の実状を正確に観察するため、実験後にコンクリートを除去した。一例を写真1に示したが、スタッドはその根元からせん断破壊していた。1A, 2A, 2Bの3体で、図12に示した多数のスタッドにこのような破壊が発生していたことが明確になった。

図8、9に、不完全合成理論による理論計算値3本(理①、理②、理③)を併記した。これらはスタッドのバネ定数とコンクリートの

有効断面を変化させたものである。すなわち、理①はコンクリートが全断面有効で、スタッドのバネ定数を押し抜き試験結果から推定されている $1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ と仮定した計算値、理②は引張側コンクリートを無視し、バネ定数に $1.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}$ を与えた計算値、そして、理③は引張側コンクリートを無視し、バネ定数を $3 \times 10^4 \text{ kg/cm}$ とした計算値である。この理③のバネ定数は繰返し载荷が進み、コンクリートのひびわれ進展が停留し、たわみの増加傾向が安定した時点において、実測たわみと理論たわみが一致するように試

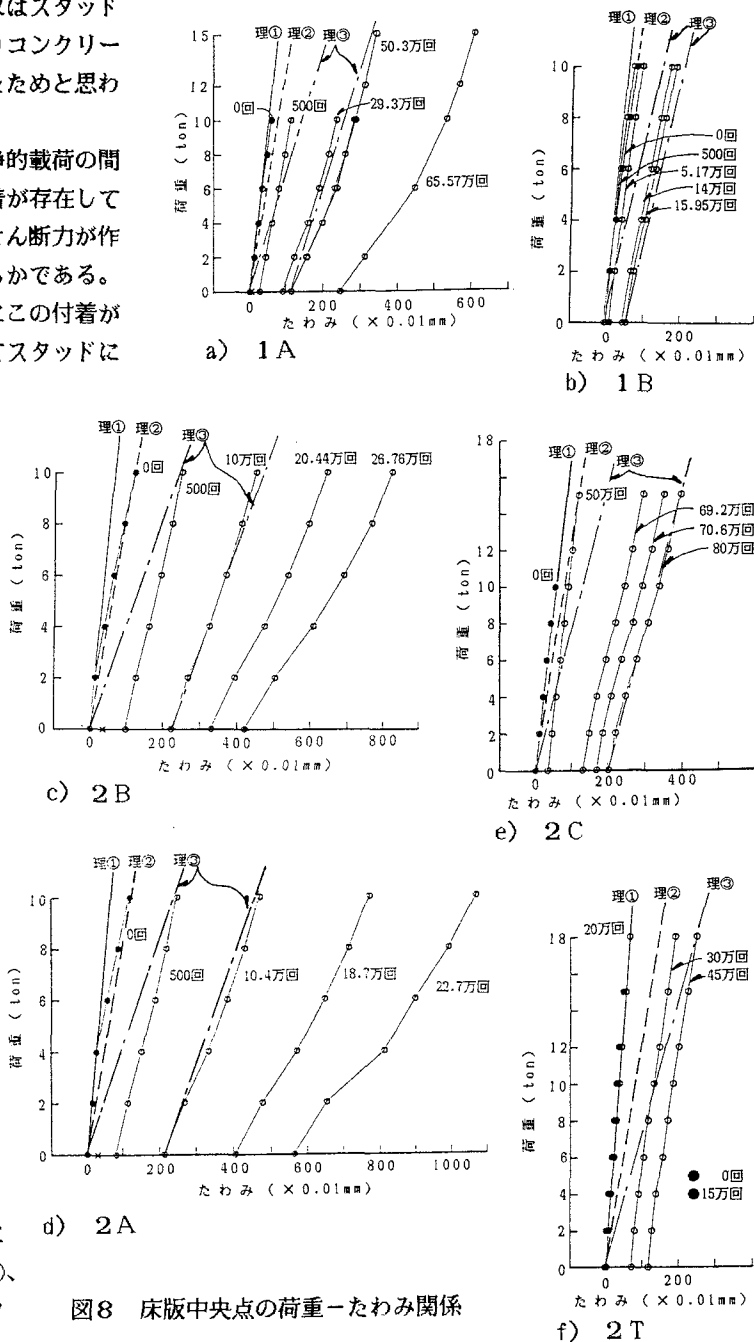
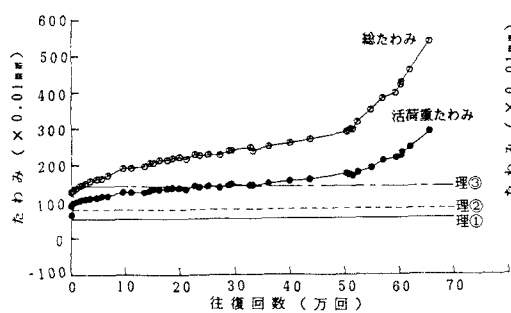
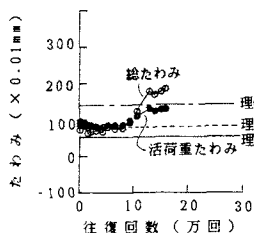


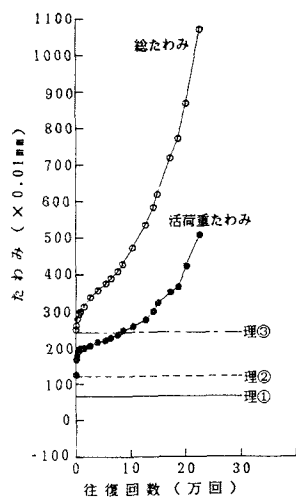
図8 床版中央点の荷重-たわみ関係



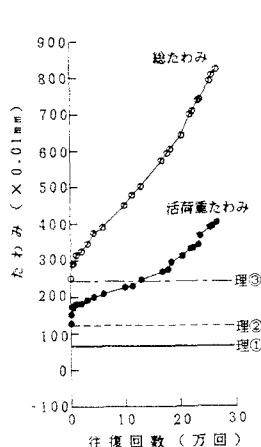
a) 1A



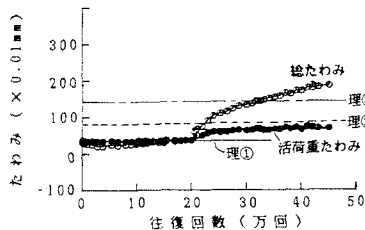
b) 1B



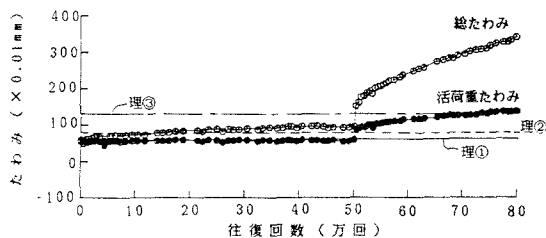
c) 2A



d) 2B

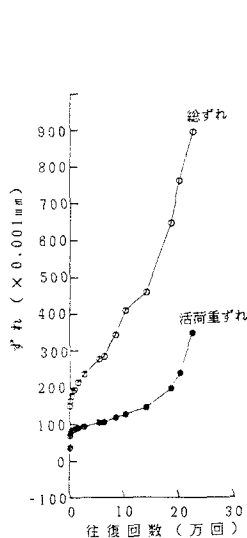


f) 2T

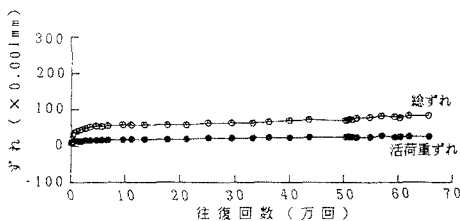


e) 2C

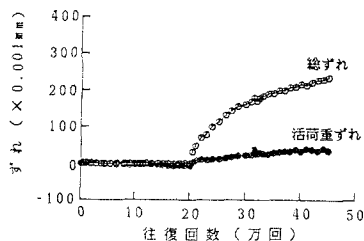
図9 床版中央点のたわみ変化状況



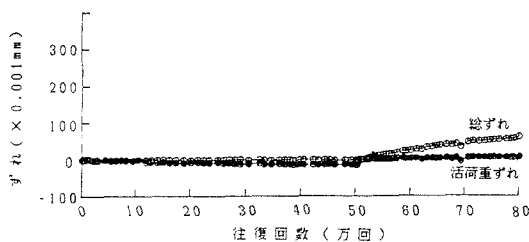
b) 2A



a) 1A



d) 2T



c) 2C

図10 床版中央側面のずれ変化状況

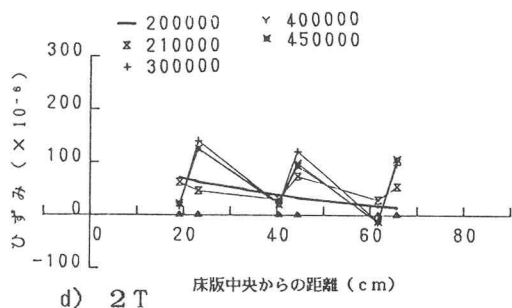
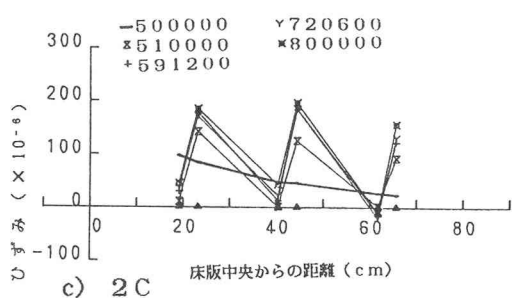
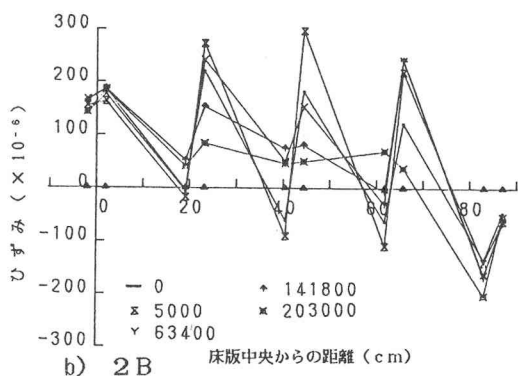
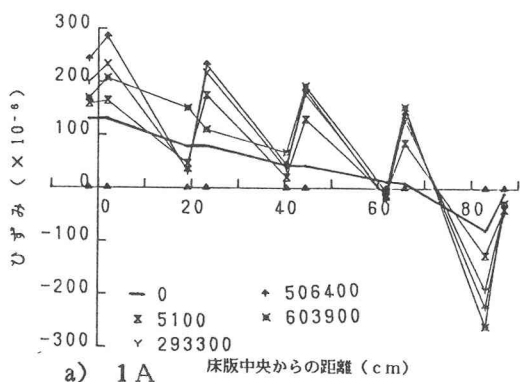


図11 床版中央のスタッド列断面における鋼板のひずみ分布状況

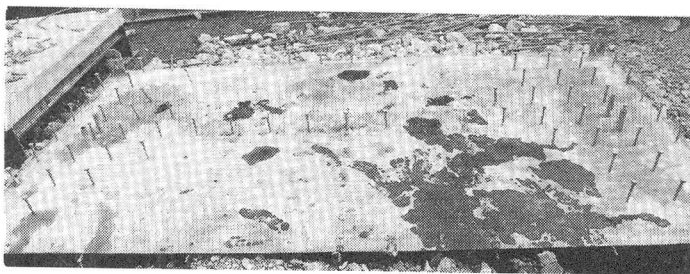
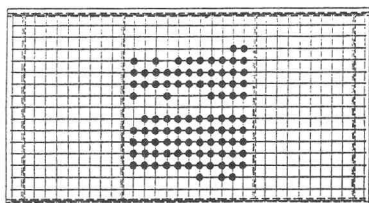


写真1 スタッドの破断状況 (2B)

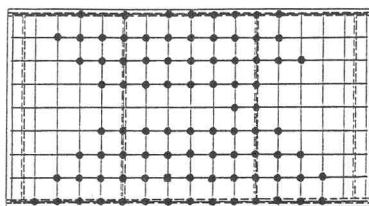
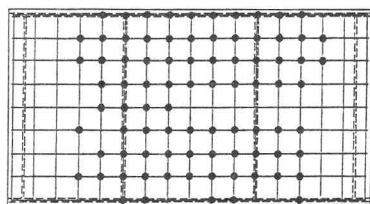


図12 床版中のスタッドの破壊点

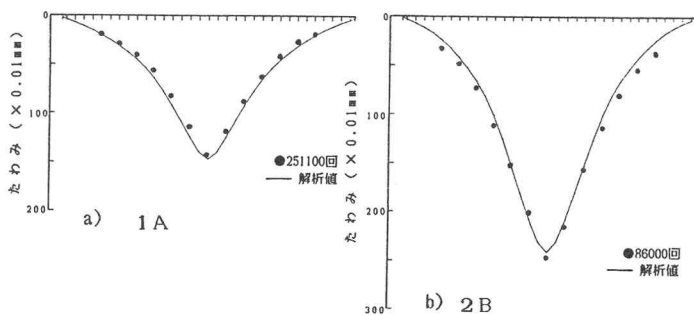


図13 実測たわみと解析たわみの比較

行錯誤的に決定したものである。図13に上記③のパネ定数とした時の実測たわみと理論たわみの一致状況を示す。3体ともほぼ一致しており、適切な評価結果であると考えられる。

さて、理①に一致するのは初期の静的荷重時だけである。スタッド間隔が大きくなるとコンクリートが早くひびわれ、一致する荷重範囲も低下する。理③に実測値が一致する時点を使用限界状態と考えられる。その後からたわみが大きくなり、スタッドの根元部に疲労亀裂が発生しだしたものと推定できる。

従来の一定点荷重における疲労実験ではスタッド溶接部において鋼板が疲労破断するのが特徴⁵⁾であったが、本試験のように走行荷重を受ける場合には、スタッドの破断が特有の疲労破壊現象と結論ずけてよいであろう。なお、グループⅡのいずれの試験体も、横リブおよび鋼板には異常は見られなかった。よって、縦リブを省略したことによる影響は無かったと言える。

3.4 グループⅢの実験結果と考察

グループⅡの破壊状況を観察して、スタッドは確かに合成効果を与えるが、反面、疲労に対して欠陥となったようである。この欠陥を除去あるいは和らげる方策として、鋼板上面に突起を付け、せん断力を分担させる方法と、床版厚を若干増加させてスタッドに作用するせん断力そのものを減少させることを考えた。これらの改良を加えた供試体2Cと2Tを製作し実験した。

2C：すでに図8～10に示したように、10tの荷重では50万往復後も初期荷重の状態と変わらず、コンクリートが全断面有効で完全合成床版として挙動した。縞鋼板の突起はわずか1mmであったが、コンクリート床版と鋼板間のずれを完全に抑え、かつ、コンクリートのひびわれを拘束しており、予想以上の改良となった。破壊性状を見るため、その後、荷重を15tに増加させて実験を続行したが、80万往復後もたわみ、ずれ、ひずみにわずかな増加しか見られないため縞鋼板の効果は大きいと評価して実験を終了した。

2T：10tで10万往復、12tで5万往復、15tで5万往復の荷重をしたが、図8～10に示したように、荷重10tにおける活荷重たわみ、ずれ、ひずみともほとんど変化はなく、コンクリートが全断面有効で完全合成のまま挙動した。そこで、再び荷重を18tに上げ、25万往復の荷重を加えたが、たわみ、ずれ、ひずみともわずかな変化しかなかった。やはりコンクリートの増厚の効果の大きいと評価し実験を終了した。

以上から、本グループのようにずれを発生させず、完全合成の床版とする工夫によって、走行荷重に対する疲労強度を大幅に改善できた。しかし、疲労強度の向上のためコンクリート床版厚を増加させることは、死荷重軽減が計れるという合成床版の利点を相殺するものであり、過度の増厚はさけるべきであろう。そのような場合には縞鋼板の併用を考えるのが得策である。

4. 各種疲労破壊現象に関する疲労強度の考察

輪荷重走行試験機による疲労実験によって、PI・C合成床版には種々の新しい疲労破壊現象が発現することが判明した。すなわち、重要なものとして、グループⅠからはコンクリートの押し抜きせん断破壊と、縦リブと横リブとの交差溶接部の疲労破壊が、グループⅡからはスタッド自身が溶接根元から疲労破壊する現象が見られた。本節ではこれらの疲労強度をS-N図上にプロットし既往のデータと比較検討する。

4.1 押し抜きせん断疲労強度

松井⁶⁾は道路橋RC床版の疲労強度に関して、図14に示すようなS-N曲線を合理的なものとして示している。このS-N図は縦軸の表現を「作用荷重／ある幅のはりのせん断耐荷力」(P/P_{sx})とし、横軸を走行往復数の2倍で表現したものである。グループⅠの破壊がRC床版の破壊と同じであることから、これらの結果も同様の表現を用いて整理し、RC床版の疲労強度と比較することにした。

さて、ある幅のはりのせん断耐荷力 P_{sx} はRC床版の場合、次式で計算できる。

$$P_{sx} = 2B (\tau_{smax} \cdot x_m + \sigma_{tmax} \cdot C_m) \quad (1)$$

ここに、 τ_{smax} ：コンクリートの純せん断強度で、
圧縮強度 σ_{ck} と次のような関係
がある、

$$\tau_{smax} = 0.252 \sigma_{ck} - 0.000242 \sigma_{ck}^2、$$

σ_{tmax} ：コンクリートの引張強度で、

$$\sigma_{tmax} = 0.583 \sigma_{ck}^{2/3}、$$

x_m ：主鉄筋断面における圧縮縁から
中立軸までの距離で、弾性計算
で求める、

C_m ：主鉄筋の下側かぶり厚さ、

B ：はり幅で、「載荷板の走行方向の幅+2×配力鉄筋
の有効高さ」。

さて、この式をグループ I の合成床版に適用する場合、上記の各変数の決定をしなければならない。本供試体では図7に示したような破壊をしたことから、表3のように各変数を決定できる。すなわち、計算による x_m は主鉄筋位置よりも下側となるが、破壊状況から主鉄筋位置に一致させる。下側かぶり C_m についてははくり破壊位置から、主鉄筋位置から下の全厚さとできる。はり幅 B は実際の配力鉄筋の有効高さを用いてよいので設計値を用いることにした。結果は図14に示したようにRC床版のS-N曲線の直上にプロットできた。以上から、グループ I のようにスタッドの高さが小さく、その頭の位置が主鉄筋位置と重なる場合には、上記のように構成変数を決定し、図14のRC床版のS-N曲線でPI・C合成床版の押し抜きせん断破壊強度が推定できると言えよう。

4.2 リブ交差部の疲労強度

グループ I のリブの交差部は横リブから見ると、リブ付き十字継手に相当する。そこで、横リブの作用応力度をもとに既往の同継手のS-N図⁷⁾上にプロットして比較することにした。図15に示したように本グループの結果は上記既往のS-N曲線で説明できることがわかる。よって、もしグループ I のように縦リブが必要な場合には、リブ交差部の溶接部の疲労強度をこのS-N曲線で照査する必要がある。ただし、一般にこの疲労強度は非常に低いので、できるだけ縦リブは省略したほうがよい。

4.3 スタッド自身の疲労強度

ここで問題となるのはスタッドに作用するせん断力の評価である。筆者らも、K.R.Moffatら⁸⁾と同様の考え方により、PI・C合成床版をコンクリート床版と鋼板の2層からなり、両者をスタッドのパネで結合していると考え、不完全合成板理論によって評価することにした。このせん断力評価法の妥当性についてはすでに文献9)で述べた。この際、問題となるのはスタッドにいくつあるパネ定数を与えてせん断力を計算するかである。これについては3節で述べたように、試行錯誤の計算によって実測たわみと理論たわみが一致するようにパネ定数を決定した。その結果、ある程度疲労荷重を受けて安定した状態においては $3 \times 10^4 \text{ kg/cm}$ として

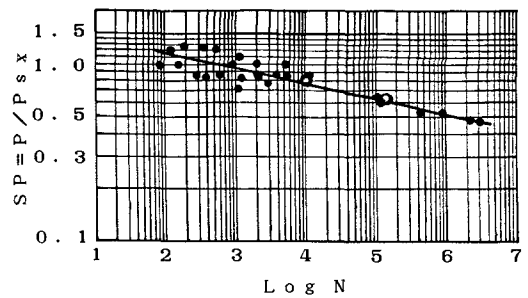


図14 RC床版のS-N曲線

表3 グループ I のPsx

	FB-1	FB-2
σ_{ck}	329kg/cm ²	339kg/cm ²
x_m	4.8cm	4.6cm
C_m	8.6cm	8.6cm
d_d	6.4cm	6.2cm
P_{sx}	25.249t	24.724t
P	20t	15t
N	5500往復	67000往復

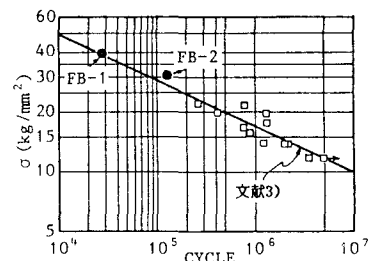


図15 リブ十字継手のS-N曲線

よいことがわかった。

さて、このバネ定数を用いて評価されたスタッドせん断応力度レンジで、既往の押し抜き疲労試験データ¹⁰⁾と比較する。ただし、既往のデータはスタッド径、長さおよびコンクリート強度をパラメーターにして求められているので、次式のような無次元化を行い再整理した。その結果、図16に示すように1本のS-N曲線で表すことができた。

$$S = Q / Q_u, \quad (2)$$

ここに、 $Q_u = 4.0 D H \sqrt{\sigma_{ck}}$ (スタッドの終局耐荷力)、
 D, H = スタッドの径、長さ、
 σ_{ck} = コンクリートの圧縮強度。

このS-N図に今回のデータも同様の無次元化を行い白丸でプロットし、比較することにした。図より明らかなように、今回のデータは非常に低いものとなった。この大幅な低下の原因として、鋼板の引張応力の影響、および、スタッドに作用するせん断力が回転することが考えられる。先の不完全合成板理論によるFEM解析によって載荷荷重の作用位置を変えてせん断力の解析をすると、図17のようにスタッドに作用するせん断力の大きさと作用方向が変化しているのがわかる。

一般的に、合成床版中にあるスタッドにはせん断力はその軸上に分布するため、スタッドは曲げ変形をする。そして鋼板には引張応力が同時に作用するため、スタッドの溶接余盛部は複合応力状態になる。

さらに、溶接余盛りの形状による応力集中が加わり、疲労強度が小さくなる。この現象について梶川は基礎的研究¹¹⁾を行っており、このような状態にあるスタッドの疲労データは、作用するせん断応力と鋼板の引張応力で表現した式(3)の相当応力振幅で整理すると図18のように1つのS-N曲線にまとめられることを示した。今回のグループIIのスタッドが疲労破壊したのもこのような応力状態にあるので、同様の応力を計算し、この疲労強度と比較を試みた。

$$\sigma_e = \sqrt{2.174 \sigma_a^2 + 5.834 \tau_a^2 + 6.521 \sigma_a \cdot \tau_a} \quad (3)$$

ここに、 σ_a : 鋼板に作用する平均引張応力、
 τ_a : スタッド軸部断面に作用する平均せん断応力。

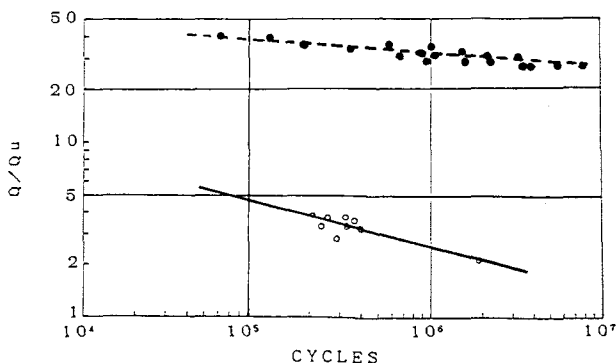


図16 スタッドの押し抜き疲労のS-N曲線

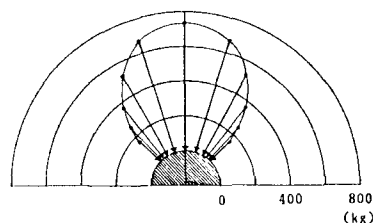


図17 走行荷重を受ける床版中のスタッドに作用するせん断力の方向変化

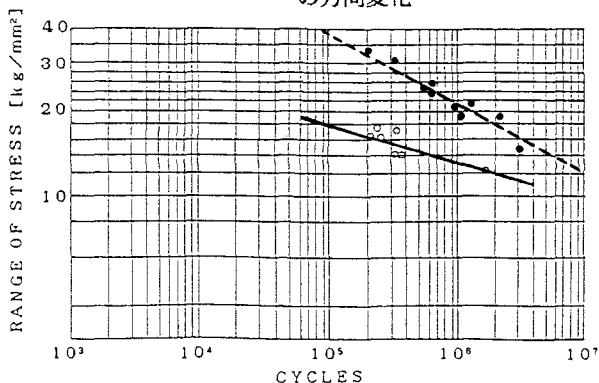


図18 組合せ応力を受けるスタッドの相当応力で整理したS-N曲線

今回の結果を白丸でプロットした。これらと梶川の結果を比較すると強度で6割、破壊回数ではほぼ10分の1に落ちた。この低下の原因は、破壊の状況が異なることに1つの原因がある。すなわち、梶川らの結果はスタッド付き鋼板の複合加力試験から得たもので、図19に示したように余盛止端から亀裂が鋼板側に進展し(B-type)、鋼板が破断したのに対し、今回のものはスタッドの熱影響部に沿って進展し(A-type)、スタッド自身が破壊した連いにある。さらに、スタッドせん断力が回転することが大きな違いである。

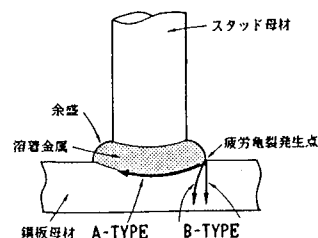


図19 疲労亀裂進展状況のタイプ

以上から、走行輪荷重を受けるスタッドに対しては、図18に示したような特有のS-N曲線を整備してそれによって疲労照査を行う必要がある。

5. 結 論

PI・C合成床版を道路橋に適用するには走行する輪荷重下での疲労照査が必要であると考え、3シリーズに分けて実験的研究を行った。本床版の静的耐荷力はコンクリート厚12cmでも100t程度あることを確認しているが、載荷荷重10t～15tで種々の疲労破壊現象が発生することがわかった。実験結果を総括すると次のような結論を述べることができる。

- ① スタッドの高さの違いによって、発生する疲労破壊性状が異なり、本合成床版を道路橋に適用するには、これらの疲労破壊に対して照査する必要がある。そのため、輪荷重走行荷重試験によるS-N曲線を求める必要がある。
- ② ずれ止めであるスタッドにはコンクリートに対するせん断補強の役割りもあることがわかった。スタッドを長くすることによってコンクリートの押し抜きせん断破壊を防止することができる。
- ③ 型枠としての剛性を付与するため鋼板に横リブと縦リブを付けることを考えたが、それらの交差部を溶接することによってリブ、ひいては、鋼板の疲労強度を低下させる可能性が大きくなった。疲労の観点からは縦リブを省略するのがよい。
- ④ 改良を加えたグループⅡの供試体では多数のスタッドが疲労破壊した。これらはスタッドに回転するせん断力が作用するためである。回転の影響のため、その疲労強度は非常に小さくなる。また、このようなスタッドの疲労破壊の発生は輪荷重走行試験機による疲労実験によって初めて確認ができた。
- ⑤ スタッドの疲労破壊を防ぐ方法として、鋼板に縞鋼板を使用するか、コンクリート厚を増加させるのが良策であろう。このような工夫によって、合成床版を大きな荷重下でもコンクリートが全断面有効で、かつ、完全合成で挙動させることが可能である。ただし、合成床版の開発の原点に立てば、コンクリート厚を増加させるのは望ましくなく、縞鋼板を用いるのが得策であろう。
- ⑥ 合成床版でもコンクリート上面にひびわれが発生し、水の浸透があると早期に劣化するので、防水工を施工する必要がある。

最後に本研究の共同研究者であった大阪大学卒業生の武藤和好氏（現酒井鉄工所）には実験で多大の御協力を得た、また、供試体作成には川田工業（株）富山工場長の渡辺 滉氏に多大の御支援をいただきました。ここに厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、土木学会：鋼・コンクリートの合成構造小委員会：鋼・コンクリートの合成床版に関する調査報告書、昭和60年3月。
- 2) 例えば、今金・太田・日野：立体トラス型ジベルを有する斜合成床版橋の構造特性、土木学会第42回年講概要集 1-157、1987。
- 3) 例えば、井上・渡辺・林川：CS橋の鋼パネル板のコンクリート打設時の変形と応力について、土木学会第42回年講概要集 1-183、1987。
- 4) 前田・松井：輪荷重動移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集 56、1984。
- 5) 前田・松井：コンクリートサンドイッチ鋼床版の実験的研究、複合材料シンポジウム論文集、昭和50年6月。
- 6) 松井：移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について コンクリート工学年次論文報告集 9-2、1987。
- 7) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説・鋼鉄道橋・鋼とコンクリートとの合成鉄道橋、技報堂、昭和58年5月。
- 8) Moffat,K.R. & Lim,P.T.K: Finite Element Analysis of Composite Box Gerder Bridges Having Complete or Incomplete Interaction, Proc. Instn. Civ. eng, Vol.61, Part2, March,1976.
- 9) 松井・岡本・前田・渡辺：鋼・コンクリート合成床版におけるスタッドの設計に関する基礎的研究、土木学会 合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集 15、1986年9月
- 10) 赤尾・栗田・平城：頭付スタッドの押し抜き挙動に及ぼすコンクリートの打込み方向の影響、土木学会論文集 第380号/1-7、1987年4月。
- 11) 梶川・前田：組合せ荷重下におけるスタッド溶接フランジの疲労強度の評価、土木学会論文集 第362号/1-4、1985年10月。

(1987年10月16日受付)