

鋼板・コンクリート合成床版中のスタッドの疲労破壊性状について

FATIGUE FAILURE MODE OF STUDS IN STEEL PLATE-CONCRETE COMPOSITE DECKS OF HIGHWAY BRIDGES

松井 繁之* 文 兌 景** 福本 勇士***

By Shigeyuki MATSUI, Taegyong MOON and Yuhshi FUKUMOTO

The authors have been developing a composite deck for highway bridges, which consists of a thin steel plate and a concrete slab connected by stud shear connectors. The typical fatigue failure of the deck under a moving load was shearing-off of studs due to rotating shear force on studs, which was quite different from the failure under the ordinary fixed pulsating loading. To verify the fatigue strength of studs, a new fatigue testing machine which gives rotating shear force on a stud was developed. As the results, two types of fatigue failure were detected. It was revealed that those failure mode of stud had influences on the fatigue strength of studs. The paper describes the fatigue test results and the relation between fatigue strength and failure mode of studs with the theoretical analysis.

1. まえがき

道路橋では、鉄筋コンクリート床版（以下RC床版と称する）の劣化損傷の経験から、それに代わる耐久性のある床版が望まれている。加えて、それには、近年の現場技術者の不足から現場施工の単純化、工期の短縮が可能で、かつ、施工精度の向上ならびに床版重量の軽量化なども達成できることが必要条件として要求される。このような条件を満たすものとして、鋼材とコンクリートとを合成させた合成床版の開発が活発である¹⁾。著者らも、現場での形枠作業を省略し、かつ耐久性のある床版として、図1に示すような鋼板・コンクリート合成床版、すなわちRC床版と鋼床版の折衷的なもので、鋼床版における縦リブ、横リブを極端に少なくしたデッキプレート上にずれ止めを配置してRC床版を現場施工し合成させた床版に着目し、床版で最も問題となる疲労を中心としてその強度、破壊性状について研究を実施してきた²⁾。本床版を構成する各要素をパラメーターにして供試体を順次

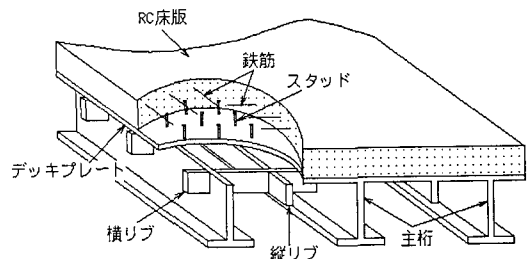


図1 鋼板・コンクリート合成床版

* 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)

** 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)

変更してゆき、走行荷重下での疲労特性を調べてきた。

そして、走行荷重下での本床版の疲労破壊現象はスタッドが根元部の溶接部で疲労破断することで、この原因は走行荷重による回転せん断力によるものであることを明らかにした³⁾。そして、回転せん断力を受けるスタッドの疲労強度をより明確にするため、1本スタッドを対象にして、回転せん断力を与える独自の疲労試験機も開発し疲労実験を行った⁴⁾。

本論文は、以上の床版供試体による疲労実験結果ならびに回転疲労試験結果の内、スタッドの破壊性状についてのみ整理し、スタッドの疲労破壊モードについては2種存在し、モードによって疲労強度が異なることを明らかにした。そして、床版内のスタッドの疲労寿命は1本のスタッドの疲労寿命よりも大きく延びることを示した。さらに、この2種の破壊性状が発生する原因を解析的に明らかにするとともに、スタッド径とデッキプレート厚との相関関係を求め、最適な組み合わせを論じた。本研究成果は本形式の合成床版だけに限定されるものではなく、各種合成構造におけるスタッドの設計に寄与するものと思われる。

2. 床版供試体による輪荷重走行試験機による疲労実験

2.1 供試体の種類と実験方法

本合成床版を構成するパラメーターは、コンクリートスラブ厚、デッキプレート厚、デッキプレートの種類、スタッドの直径、スタッド間隔、横リブ配置であり、これらを組み合わせて、四つのグループに分けて疲労実験を行った。供試体の基本的外形寸法、配筋図をはほとんど同じであり、図2に示す。

表1に各グループの供試体種類と条件を示す。グループIは基本モデルであり、コンクリート床版厚を12cmとした。スタッド間隔と支持条件をパラメーターにしている。沈下なしとは床版を支持している主桁をたわまないように密に支持したもので、沈下ありとは主桁の両端に支承を設置し、主桁がたわむようにしたものである。グループIIはスタッドに作用するせん断力を低減させることを考え、縞鋼板をデッキプレートに用いたもの、コンクリート床版厚を15cmと厚くしたものを用意した。また、比較のためにグループIの2A-1と同じものを用意した。グループIIIはスタッドの疲労強度を向上させる別手段として、スタッドに作用する回転せん断力の回転角度を減少させるため、補剛横リブをデッキプレートの上に溶接したものの、スタッドの溶接法を変えたもの、および、デッキプレート厚、コンクリート床版厚を増厚した

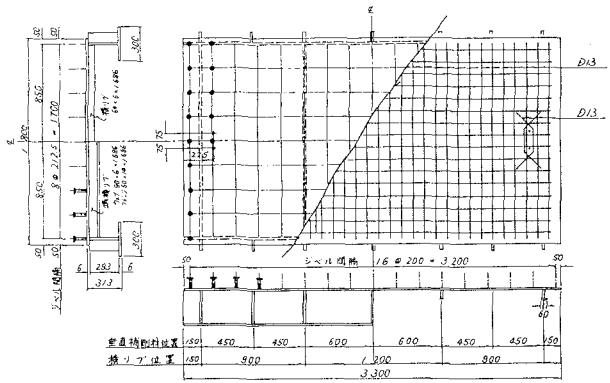


図2 供試体の基本的外形寸法・配筋図

表1 供試体の種類と条件

グループ	供試体	スラブ厚	鋼板厚・種類	スタッド径・間隔・溶接法	横リブ配置	支持条件	コンクリート強度
I	1A	12cm	6mm 平鋼板	φ13 10cm 20cm 従来法	下向き	沈下なし 沈下あり	406kg/cm ²
	2A-1 2B						
II	2C-1	12cm	6mm 縞鋼板	φ13 20cm 従来法	下向き	沈下なし	478kg/cm ²
	2C-2	12cm	6mm 縞鋼板				
	2T-1	15cm	6mm 平鋼板				
	2A-2	12cm	6mm 平鋼板				
III	2A-3	12cm	6mm 平鋼板	φ13 20cm 従来法 改良法 改良法	上向き	沈下なし	489kg/cm ²
	2A-4	12cm	6mm 平鋼板				
	2D	12cm	9mm 平鋼板				
	2T-2	15cm	9mm 平鋼板				
IV	2S-1	15cm	10mm 平鋼板	φ16 25cm 従来法	下向き	沈下なし	419kg/cm ²
	2S-2	15cm	10mm 平鋼板				
	2S-3	18cm	10mm 平鋼板				

ものを用意した。従来のスタッド溶接では、ガス抜き用のキャストレーションをつけたフェルールを用いるが、一般に、図3 に示すように余盛カラーにバリを形成し、余盛カラーと鋼板との溶着に欠陥を伴うことが見受けられる。また、スタッド幹部と余盛カラーとの溶着も不十分なものも見られる。そこで、疲労強度を高めるため、このような欠陥が入らないものとして、筆者の一人はキャストレーションを無くしたフェルールを使用すれば良いと考えた溶接法を考案した⁵⁾。この溶接法をこのグループで採用した。グループIVでは全ての供試体でスタッド径をφ16にした。そして、床版厚をパラメータにした。また、1 体については、橋軸直角方向の版端に側壁鋼板を取り付け、ずれを拘束させる構造を考えた。

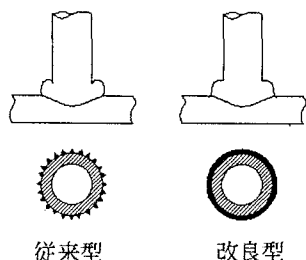


図3 スタッド溶接余盛形状

疲労試験装置は輪荷重走行試験機⁶⁾であり、床版支間中央で橋軸方向の中心から±1mの範囲で載荷荷重を往復させた。なお、輪荷重の載荷面積は12cm(橋軸方向)×30cm(床版支間方向)である。

2.2 実験結果とその考察

表2 載荷荷重と載荷回数 (万回)

供試体別の載荷荷重と載荷回数を表2 に示す。載荷荷重が2 種以上あるものは順次荷重を上げて実験を継続したものである。そして、最終の荷重において、変形が大きくなり、スタッドの疲労破壊が多数あると判断して載荷を終了した。ただし、グループIVでは200 万回でも外観上では異常がなく、耐久性は十分であると判断して実験を終了した。

各供試体のスタッドの破壊状況を把握するために実験終了後、床版コンクリートをはつって検査した。その結果を図4 に示す。図の中で、●印はコンクリートはつり時にコンクリートとともにはずれたもので、完全に疲労破壊していたものと考えられるものである。○印はコンクリートはつり後もデッキプレートについていたが、曲げを加えると簡単に取れたもので、疲労亀裂が深く入っていたものである。その他のスタッドは健全であった。

グループ	供試体	10ton	12ton	15ton	18ton	21ton
I	1A	100.6		35.0		
	2A-1	45.4				
	2B	53.4				
II	2C-1	100.0		60.0		
	2C-2				37.0	
	2T-1	20.0	10.0	10.0	50.0	20.0
	2A-2	10.0		30.0		
III	2A-3			29.0		
	2A-4			36.0		
	2D	100.0		26.4		
	2T-2	100.0		79.6		
IV	2S-1			200.0		
	2S-2			200.0		
	2S-3			200.0		

図4の結果と表2を併せて、スタッドの破壊傾向について実験結果をまとめると次のようであった。

- ①φ13mmのスタッドでは、横リブをデッキプレート下面に溶接した場合、スタッドの破断は横リブ上とその周辺で起こりやすい。これは横リブにより、スタッド根元部の拘束度が大きくなり、応力が高くなったためである。
- ②縞鋼板を使用すると疲労寿命は向上した。
- ③コンクリート厚を大きくすると、スタッドに作用するせん断力は軽減され、疲労寿命は長くなった。
- ④横リブをデッキプレート上面に溶接すると、そのリブ位置においてコンクリートにひびわれが早期に発生し、橋軸方向の連続性が低下し、結果的に荷重分配が低下して、スタッドの疲労寿命は短くなった。かつ、多数のスタッドが疲労破断した。
- ⑤グループIVのφ16mmのスタッドを用い、コンクリート厚を15cm以上にした場合には、スタッドの疲労破断数は極端に減少し、疲労耐久性が向上した。18cm厚の床版では十分に実用に耐えるものである。

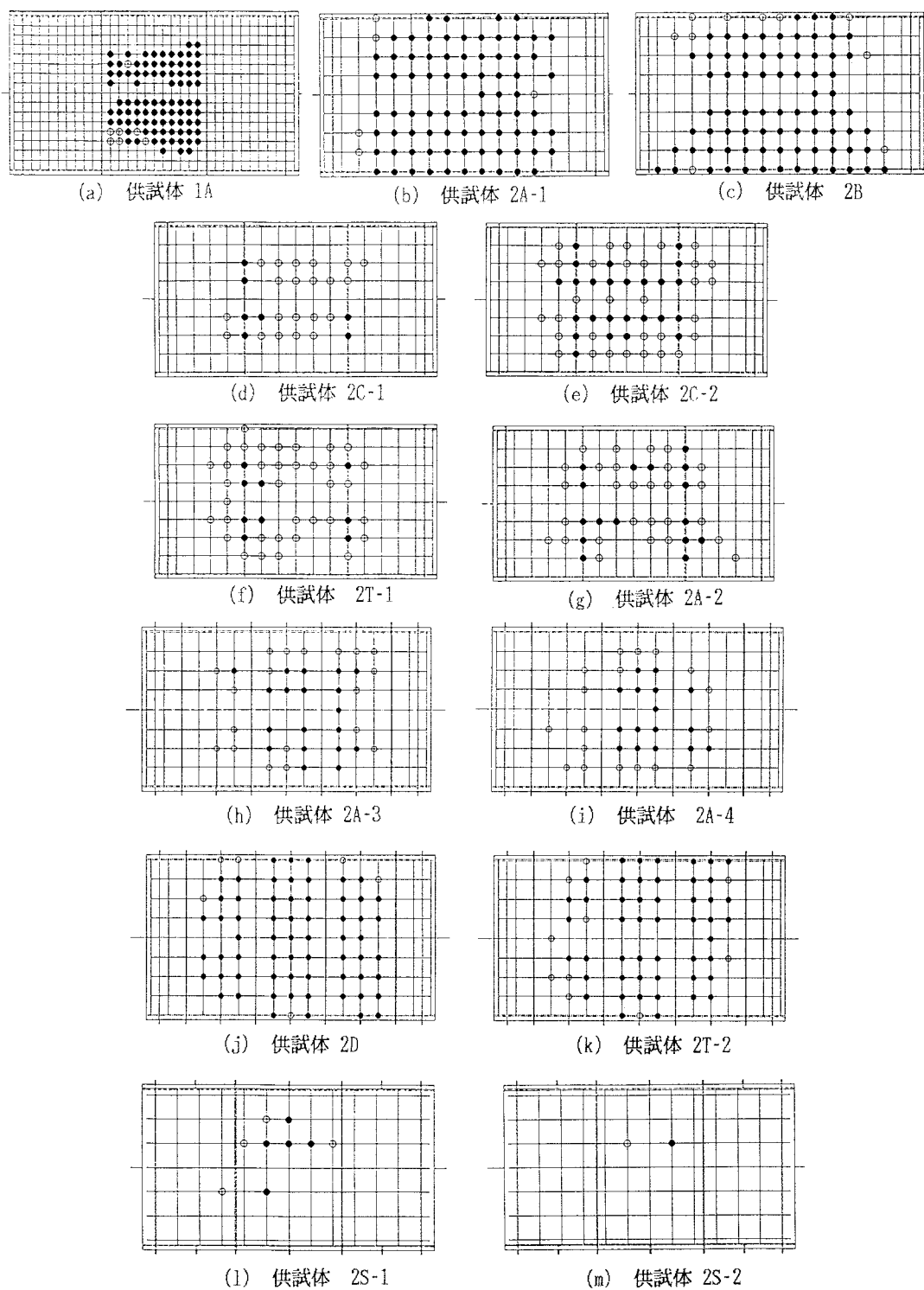
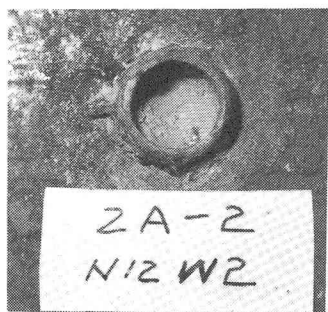
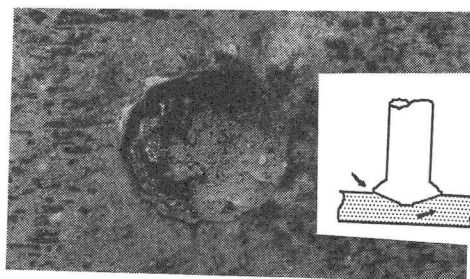
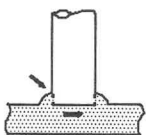


図4 各供試体におけるスタッドの破壊状況



(a) 破壊タイプ①



(b) 破壊タイプ②

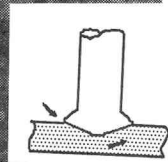


写真1 破壊性状

さて、スタッドの疲労破断状況を詳細に調べてみると、2つのタイプが存在することが分かった。すなわち、スタッド幹部が熱影響部で破断し、溶接カラーを残し、抜け落ちるようなもの（タイプ①）と、溶接のカラー部も一緒にえぐり取るように破断しているもの（タイプ②）である。

写真1 にそれらの代表的なものを示す。前者のスタッドでは写真2 に示すようにスタッド幹部と余盛カラー部との付着が不十分なためである。グループⅠではこの観察はしなかったが、グループⅡ、Ⅲ、Ⅳで観察した結果を表3 に示す。グループⅡについて完全破断したものとは不完全破断のスタッド破壊性状を調べてみた結果、完全破断していたものはタイプ①が卓越しており、不完全破断のものはタイプ②が多いことがわかった。タイプ①が②より疲労強度が少ないため、早期に疲労破断したと判断される。特に、載荷荷重が大きく、スタッドに作用するせん断力大きい2C-2と2A-2の破壊性状はタイプ①が多い傾向がある。グループⅢのスタッド溶接法を変えた2A-4、2Dと2T-2では、完全破断したもののでもほとんどがタイプ②で発生するようになった。かつ、改良溶接法を用いた2A-4では2A-1より疲労寿命が向上した。グループⅣのスタッド径16mmの場合は、数量は少ないがタイプ②で破断するのが支配的であった。φ16mmの溶接法は従来法であるが、溶接カラーが高くなって、この部分で分担するせん断力が大きくなったためと考えられる。



写真2 スタッド幹部の不溶着状況

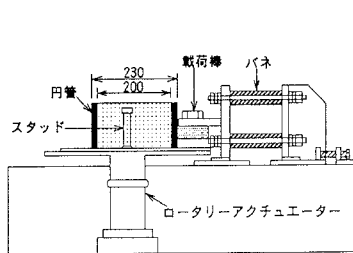
表3 スタッドの破壊タイプの比率

グループ	供試体	完全破断		不完全破断	
		タイプ①	タイプ②	タイプ①	タイプ②
Ⅱ	2C-1	3 (43%)	4 (57%)	5 (24%)	16 (76%)
	2C-2	21 (84%)	4 (16%)	3 (9%)	30 (91%)
	2T-1	6 (67%)	3 (33%)	13 (39%)	20 (61%)
	2A-2	11 (92%)	1 (8%)	9 (31%)	20 (69%)
Ⅲ	2A-3	4 (21%)	15 (79%)		
	2A-4	0 (0%)	16 (100%)		
	2D	7 (11%)	56 (89%)		
	2T-2	3 (6%)	46 (94%)		
Ⅳ	2S-1	1 (20%)	4 (80%)		
	2S-2	0 (0%)	1 (100%)		
	2S-3	0	0		

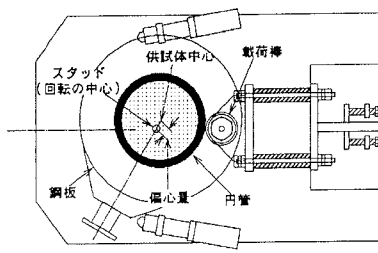
3. 回転せん断力を受けるスタッドの疲労強度

3.1 回転疲労試験

図5に開発したスタッド専用の回転疲労試験機の概要を示す。主要構造は円形供試体を回転テーブルの上に固定し、それをロータリーアクチュエーターで約160度回転させる部分と、バネ力を利用してせん断荷重を与



(a) 側面図



(b) 平面図

図5 回転疲労試験機

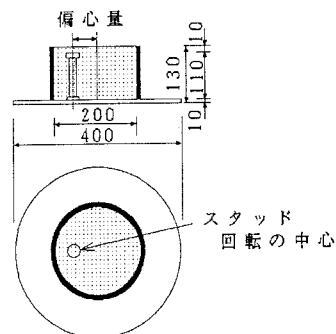


図6 代表的供試体形状

える載荷部である。載荷部は、耐力250kgのバネ4本をサンドイッチ状に装着した2枚の厚板からなり、一端は固定され、他部は可動である。その可動端側に供試体に荷重を伝えるローラー状の荷重伝達部になっている。バネの縮み量に比例した荷重が作用する。供試体の回転によって、スタッドに回転せん断力を与えることができる。代表的な供試体の形状を図6に示す。スタッドを直径400mmの鋼製円盤中心から48mm離れたところに溶接し、このスタッドの回りに直径200mm、高さ120mmのコンクリートを打設した。スタッドをロータリーアクチュエーターの回転中心上におき、スタッドのまわりのコンクリートの偏心量を変えることによって最大せん断力、および、せん断力振幅の大きさを変えることができる。

実験は床版供試体で用いた床版構成パラメーターを参考し、デッキプレートの種類、スタッド直径と溶接法をパラメーターとし、大きく3つのグループに分けて行った。各グループで、荷重振幅は実物大供試体におけるスタッドのせん断力の評価から、1ton、800、600、500、400kgの5種類と、回転のみの影響を調べるため一定のせん断力作用させ、せん断力振幅を0kgにした合計6種類を用意した。

3.2 実験結果と考察

実験の結果、床版供試体で見られた破壊形式と同じくスタッドがシャーフされた。ただし、この試験では、疲労亀裂がスタッド断面積の半分程度まで進行した段階で脆性破壊した。疲労亀裂の進展によって抵抗断面積が減少し、せん断応力が徐々に大きくなっていくためである。一方、床版では1つのスタッドに疲労亀裂が進展すると、そのスタッドの剛性が低下し、他のスタッドに荷重が再配分され、荷重が減少しながら疲労亀裂が全断面にわたって進展するようである。

さて、回転疲労試験の全結果と床版供試体の全結果（床版では最初の疲労破壊した列のみを評価の対象にしている）をS-N図にプロットすると、図7に示すようになった。非常にバラツキが大きいものとなった。そこで、破壊パターン別に区別すると、図8に示すように明瞭に分離できた。

回転疲労試験のタイプ①の結果だけを用い最小自乗法でS-N線を求めると実線のようなになる。タイプ②

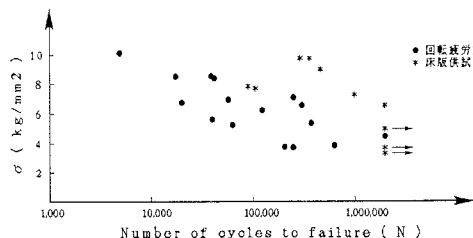


図7 S-N図へのプロット

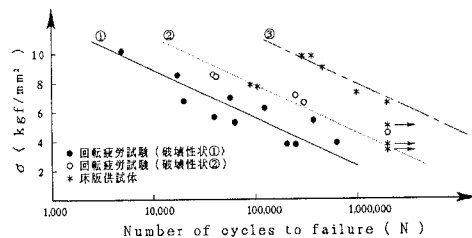


図8 タイプ別S-N関係

のもの、および、床版供試体の結果について、このS-N線に並行にして、S-N線をもとめると、それぞれ破線、一点鎖線のようになった。タイプ②で破壊する場合の疲労寿命はタイプ①のものの約5倍に延びることが明らかになった。よって、スタッドの破壊が必ずタイプ②で起こるような設計・製作が必要であると考えられる。溶接方法としては、筆者らが考案した改良法が望ましいと言えるであろう。設計に関しては次節で述べる。

床版供試体の疲労寿命は回転疲労試験のタイプ②のものよりさらに10倍程度のびていることが理解できる。この原因の1つとして、床版内では荷重の再配分が発生し、スタッドの破断が徐々に起こり、かつ、亀裂が全断面にわたり進展するためであると考えられる。一方、1本スタッドの回転疲労試験では荷重の作用点がデッキプレート面より2cm上側となっており、この偏心によってスタッドに上向きの引張力が若干作用している。この引張力の有無もこの違いに影響しているものと思われる。床版試験結果の2つがタイプ②のS-N線付近にプロットされていることを勘案すると、床版中のスタッドの疲労照査、疲労設計にはこのタイプ②のS-N線で考えるとほぼ安全側であると言える。

4. スタッド周辺の応力解析と疲労破壊機構の考察

床版中のスタッドの破壊性状には2種あることを示したが、この2種の発現機構を明確にするためスタッド根部の応力性状を3次的に調べることにした。共役勾配法を採用した3次元有限要素法解析⁷⁾を用いた。ここで、すでに示した写真2のようにスタッド幹部と余盛カラーとの付着が不完全な場合(CASE-2)と完全な場合(CASE-1)の2種を考えた。着目する位置は、図9に示したように、CASE-1では疲労亀裂発生点であるポイントbと上側余盛止端のポイントcとし、CASE-2ではスタッド幹部の最下端のポイントaおよびポイントbとした。

解析モデルはスタッド間隔と同等の大きさのコンクリートを付けたもので、対称性を考慮し、全体の2分の1にした。要素分割は疲労亀裂の発生位置である荷重方向の余盛部でできるだけ細かく行った。要素分割図を図10に示す。デッキプレート厚を合成床版で用いられる4.5mm、6.0mm、9.0mmと比較のため12mmに変化させた。デッキプレート厚12mmはH鋼のフランジ厚を想定したものである。スタッド径はφ13mmとφ16mmの2種を考え、長さは80mmの一定値とした。スタッド頭部に相当する節点は剛なリンク要素でコンクリート節点に接合されている。CASE-2ではスタッド幹部の側面と余盛カラーとの付着を切るため、ダブル節点とした。CASE-1では連続させている。

解析の結果、最大応力はやはり上記で示した点で発生している。表4にφ13mmのスタッドの結果を示す。最大応力集中点は、CASE-1ではポイントbで σ_x が卓越する。CASE-2でもポイントbで σ_x が卓越するが、ポイントaでは σ_z も卓越する。ただし、これらの発生応力度はデッキプレート厚が増加すると大きく変動する。CASE-1のポイントbとCASE-2のポイントaの変動の状況を図11に示す。図(a)がφ13mmのスタッドの場合で、(b)図は16mmの場合である。デッキプレート厚が厚くなるほど σ_x 方向の応力集中率は減少するが、z方向の応力

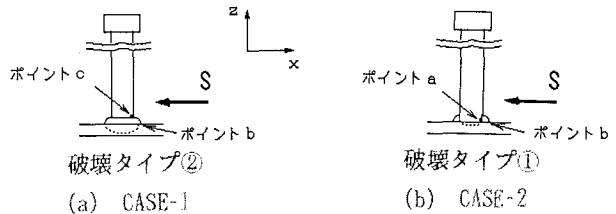


図9 解析ケースと着目点

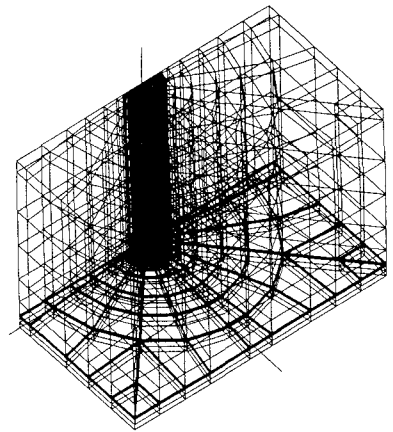


図10 要素分割状況

表4 スタッド溶接部の応力解析結果

Thickness	CASE - 1		CASE - 2	
	σ_{xb} (kgf/cm ²)	σ_{zc} (kgf/cm ²)	σ_{xb} (kgf/cm ²)	σ_{za} (kgf/cm ²)
4.5mm	2.514×10^3	1.500×10^2	2.305×10^3	1.630×10^3
6.0mm	2.326×10^3	2.500×10^2	2.139×10^3	1.821×10^3
9.0mm	2.019×10^3	4.220×10^2	1.997×10^3	2.309×10^3
H (12mm)	1.775×10^3	6.440×10^2	1.510×10^3	2.997×10^3

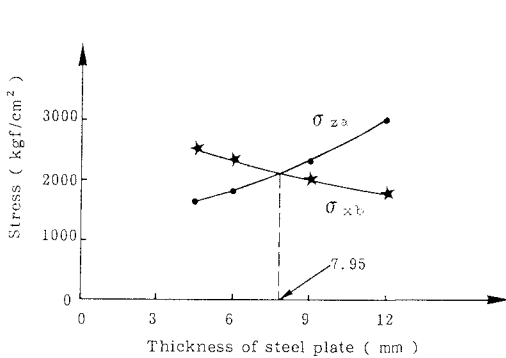


図11(a) φ13スタッドの応力と鋼板厚の関係

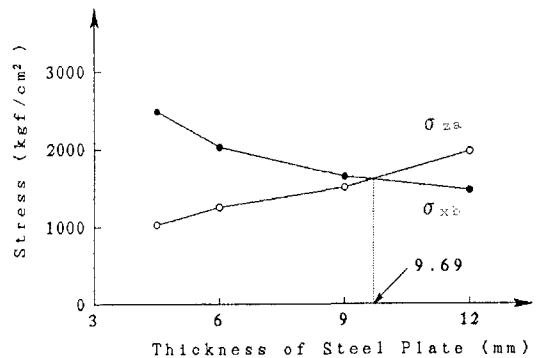


図11(b) φ16スタッドの応力と鋼板厚の関係

集中率は増加する。板厚の増加によってスタッド根元部の拘束度が上がり、 σ_z が増加する。床版供試体の実験結果において、デッキプレートが薄い場合には、載荷荷重が小さい場合、縞鋼板をデッキプレートに用いた場合、スタッドの改良型溶接法を用いた場合、あるいは、スタッド径16mmを用いた場合、タイプ②の破壊が卓越した。これはポイントbでの卓越した応力で疲労が進行したためである。しかし、スタッド直径13mm、デッキプレート6mmで、コンクリート床版厚が12cmの場合には、タイプ①が卓越した。解析結果との違いはコンクリートのひびわれの影響であると考えられる。コンクリートのひびわれによってせん断荷重の作用位置がスタッドの上方に移動し、スタッドに曲げが作用し、 σ_z がこの解析値より大きくなったものと推定できる。

最適デッキプレート厚は集中応力 σ_z をなるべく小さくしてタイプ②の疲労寿命を延ばす厚いものがよいが、あまり厚くなると、タイプ①の疲労破壊原因となる σ_z が卓越するようになる。よって、両タイプの疲労亀裂が同時に発生する厚さが最適と考えてよい。図11からスタッド直径13mmの場合には最適デッキプレート厚は約8mmであり、16mmの場合には10mm厚が推奨できる。

これより板厚が大きくなると、タイプ①の破壊が先行しやすくなるが、スタッド幹部と余盛カラーとの付着欠陥をなくす改良型フェルールを用いて一体化させると、ほぼ完全にタイプ②で破壊するようになり、疲労寿命の向上が期待できる。

5. 結 論

- (1) 本形式合成床版では、走行荷重を受ける場合の疲労破壊現象は回転せん断力によるスタッドのシャアオフである。ただし、破壊性状として2種観察された。
- (2) タイプ①で破壊したスタッドの破断面を詳細に調べると、スタッド幹部表面と余盛カラーは溶着しおらず、鋭いノッチとなり、スタッド幹の固定端で σ_z によって破壊しやすくなっていることがわかった。この欠陥を

防ぐにはここに紹介した改良フェルールを用いる溶接方法を採用するのが望ましい。

(3)1本スタッドに回転せん断力を与える独自の疲労試験を行い、回転せん断力を受けるスタッドの疲労強度関係を得たが、破壊タイプ②の方が①よりも疲労寿命が永くなることがわかった。

(4)床版内のスタッドの疲労寿命は回転疲労試験によって得られたタイプ②の疲労寿命の約10倍程度に延びている。ただし、設計にはタイプ②のS-N曲線を用いければ安全側となる。

(5)スタッド溶接余盛部周辺の応力を数値解析を行った結果、スタッド直径13mmと16mmに対する最適デッキプレート厚を8mmおよび10mmと提案した。

謝 辞

本論文は4年間にわたる疲労実験の成果をまとめたものであるが、この疲労実験では、川田工業株式会社の試験体製作等で多大の御助力・御支援を得たことをここに記し、感謝の意を表します。さらに、シリーズIVの研究に対しては、阪神高速道路公団の御支援を得た。関係各位に深く謝意を表します。なお、疲労実験では大阪大学工学部土木工学科の橋梁研究室の多数の学生の御助力を得ました。ここに御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 鋼・コンクリート合成構造小委員会：鋼板・コンクリート合成構造の設計ガイドライン、pp153-157、1983.
- 2) 松井繁之・佐々木洋・福本晴士・梶川靖治：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、構造工学論文集 Vol.34A、pp409-420、1988.
- 3) S.Matsui, T.Moon, Y.Fukumoto, H.Watanabe and Y.Kajikawa: Fatigue Strength of Steel Plate - Concrete Composite Deck, IABSE Symposium, Brussels, pp191-196, 1990.
- 4) 松井繁之・福本晴士・佐々木洋・文兌景：回転せん断力を受けるスタッドの疲労特性について、土木学会関西支部年次学術講演概要集、1-39、1988.
- 5) 平城弘一・松井繁之：頭付きスタッドの疲労強度に及ぼすスタッド余盛り形状の影響、構造工学論文集 Vol.34A、pp501-512、1988.
- 6) 前田幸雄・松井繁之：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、pp221-224、1984.
- 7) 梶川靖治：連続形式合成桁の疲労に対するずれ止め配置に関する研究、大阪大学学位論文、pp59-92、1984.

(1992年9月21日受付)