

論文 繰返し荷重下における鉄筋付鋼製型枠床版の底鋼板の剥落防止に関する研究

古澤 貴治^{*1}・佐野 洋次^{*2}・藤原 育^{*3}・綾野 克紀^{*4}

要旨：非合成床版における鉄筋付鋼製型枠床版は、力学的には底鋼板は荷重を受け持たないものとして設計される。しかし現実には、鉄筋付鋼製型枠床版を形成する底鋼板と床版は、リベットにより接合されており、繰返し荷重が載荷され、リベットが破断した場合には、鉄筋付鋼製型枠床版の底鋼板が連結箇所において剥がれ落ちる可能性がある。そこで本研究では、繰返し荷重による鋼板の剥がれに対する対策として底鋼板を折り曲げ床版内部に入れ込む方法と底鋼板にボルトを設置する方法の検討を行った。動的載荷試験にて 200 万回の繰返し荷重を載荷した結果、中立軸位置程度までボルトを埋め込む方法が、最も有効であることが明らかとなった。

キーワード：鉄筋付鋼製型枠床版、繰返し荷重、底鋼板、鉄筋ひずみ、たわみ、ひび割れ

1. はじめに

鉄筋付鋼製型枠床版とは、鋼製の型枠を吊り金具で主鉄筋に固定した床版である。鉄筋付鋼製型枠床版の施工方法は、写真 - 1 に示す鉄筋付鋼製型枠を工場で作製し、現場に搬入して設置したのちに、コンクリートを打設して、床版を架設するものである。鉄筋付鋼製型枠床版内部においては、主鉄筋と鋼製型枠が吊り金具により連結されており、上下の主鉄筋および鋼製型枠を吊り金具を用いて一体化させることで、コンクリート打設時の荷重を支持し、支保工組が不要な構造となっている。この支保工組を省略できることにより、工期の短縮や工費縮減を可能としている。また、主鉄筋の加工および配筋を工場内で行うため、施工精度が向上すること、コンクリート打設後も型枠を取り外さないことで、コンクリートの養生が十分に行われ、床版自体の品質も向上することが期待されている。

従来の鉄筋付鋼製型枠床版は、吊り金具と底鋼板がリベットによって一体化されている。底鋼板は、工場での製作上および車両運搬上の問題により分割されたものをつなぎ合わせる必要があり、吊り金具と同様に底鋼板同士もリベットによりつなぎ合わされている。繰返し荷重が載荷され、リベットが破断した場合には、鉄筋付鋼製型枠床版の底鋼板が連結箇所において剥がれ落ちる可能性が懸念される。本研究では、まず、鉄筋付鋼製型枠床版の静的載荷曲げ試験を行い、底鋼板および吊り金具が鉄筋付鋼製型枠床版の変形挙動に及ぼす影響を通常の RC 床版と比較し検討を行った。次に、鉄筋付鋼製型枠床版の底鋼板継手箇所への動的載荷試験を行い、繰返し荷重の載荷によるリベットの疲労によ

る破断対策について、実験的な検証を行った。

2. 実験概要

2.1 鉄筋付鋼製型枠床版の静的載荷試験

(1) 床版の寸法および配筋

試験には、図 - 1 に示す長さ 2,800mm × 幅 1,125mm × 高さ 250mm の鉄筋付鋼製型枠床版および RC 床版を用いた。上部主鉄筋および下部主鉄筋には、SD345 の D19 の鉄筋をそれぞれ、5 本および 9 本用いた。配力筋には、SD345 の D16 の鉄筋を上部と下部にそれぞれ 11 本用いた。鉄筋付鋼製型枠床版では、主鉄筋の固定に写真 - 2 に示す鉄板の厚さが 1.6mm の吊り金具を用いている。鉄筋付鋼製型枠床版の底鋼板には、厚さ 1.6mm の鉄板を用いた。吊り金具と底鋼板は、φ4mm のステンレス製リベットで固定されている。実験では、底鋼板の有無の影響を検討するために、上下主鉄筋の固定には吊り金具を用い、底鋼板は用いない床版（以下、吊り金具のみを用いた床版と呼ぶ）も実験に用いた。

(2) 静的載荷試験におけるひずみの測定位置

静的載荷試験では、上下の主鉄筋、コンクリートおよび吊り金具のひずみとスパン中央のたわみを測定した。上下の主鉄筋のひずみの測定は、床版中央で行った。図 - 1 および図 - 2 に示すように、スパン中央の床版上面および床版上面から 20mm（上部鉄筋のかぶりの中央）、40mm（上部鉄筋位置）、90mm（設計上の中立軸付近）、125mm（床版厚の中央）、210mm（下部鉄筋位置）の 6 箇所主鉄筋方向のひずみを測定した。吊り金具の鉄筋かしめ部と、鉄筋との変形を比較するために、図 - 1 に示すように載荷点付近の 4 箇所の吊り金具において、吊

*1 岡山大学大学院 環境学研究所資源循環学専攻博士後期課程（学生会員）

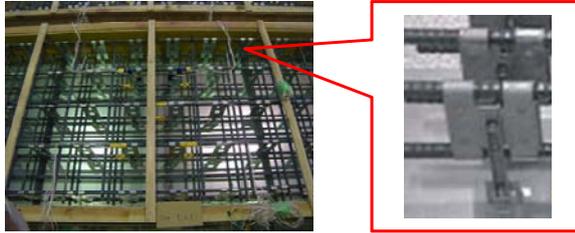
*2 (株)アイ・テックストラクチャー 製造部組立課課長（非会員）

*3 但南建設(株) 土木部課長（非会員）

*4 岡山大学大学院 環境生命科学研究科環境科学専攻教授 工博（正会員）



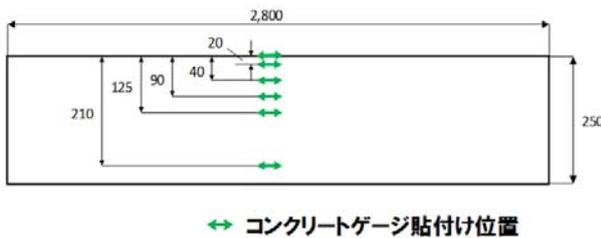
写真 - 1 鉄筋付鋼製型枠床版



鉄筋付鋼製型枠床版型枠内

吊り金具

写真 - 2 鉄筋付鋼製型枠の内部と吊り金具



↔ コンクリートゲージ貼付け位置

図 - 2 床版側面におけるひずみゲージの貼付け位置

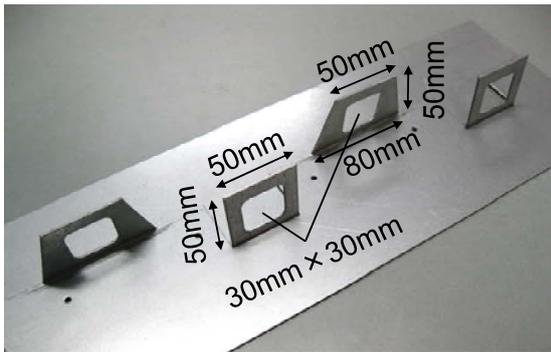


写真 - 3 鋼板折り曲げ部の詳細

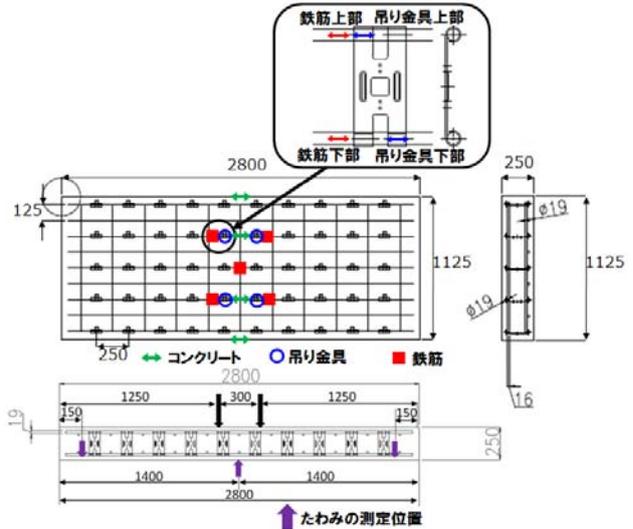
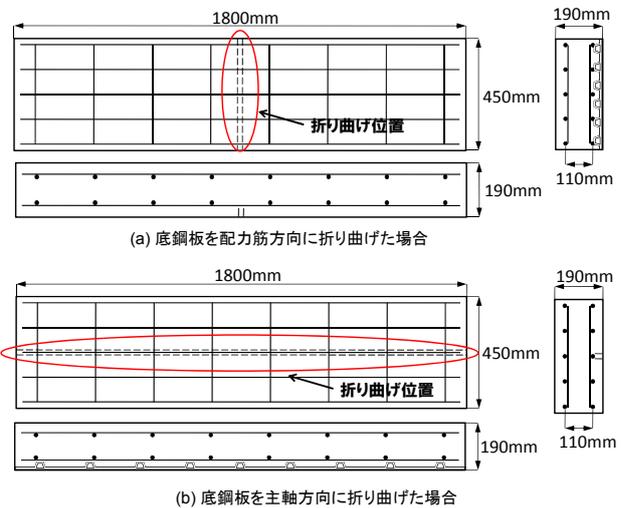


図 - 1 鉄筋付鋼製型枠床版の測定箇所



(a) 底鋼板を配力筋方向に折り曲げた場合

(b) 底鋼板を主軸方向に折り曲げた場合

図 - 3 鋼板の折り曲げ位置詳細図

り金具の上下の主鉄筋をかしめている部分と吊り金具直近の鉄筋のひずみも測定した。

(3) 床版の静的載荷試験

床版の静的載荷試験は、図 - 1 に示すように、2 線荷重載荷によって行った。スパン中央の下部主鉄筋の応力が 140 N/mm^2 となる使用限界荷重¹⁾は、 81 kN である。

2.2 鉄筋付鋼製型枠床版の動的載荷試験

(1) 床版の寸法および配筋

試験には、長さ $1,800 \text{ mm}$ × 幅 450 mm × 高さ 190 mm の鉄筋付鋼製型枠床版を用いた。上部主鉄筋および下部主鉄筋には SD345 の D19 の鉄筋を 5 本ずつ用いた。配力筋には、SD345 の D16 の鉄筋を上部と下部にそれぞれ 8 本用いた。スパン中央における床版上縁のコンクリートの圧縮応力が 10 N/mm^2 となる使用限界荷重¹⁾は、 37.5 kN である。主鉄筋の固定に用いた吊り金具および底鋼板は、鉄板の厚さが 1.6 mm の鉄板を用いた。吊り金具と底鋼板

とは、 $\phi 4 \text{ mm}$ のステンレス製リベットにより接合されている。リベットで接合されている部分では、厚さ 1.6 mm の鉄板が 2 枚重なっている。底鋼板の動的荷重に対する耐久性を向上させる手法として、写真 - 3 に示すような継手部の底鋼板を折り曲げて床版内部に入れ込み、継手箇所にて床版と鋼板を一体化させる方法およびボルトにより床版と鋼板を一体化させる方法を検討した。底鋼板を折り曲げる方法において、底鋼板の折り曲げ長さは、つなぎ合わせる際に鉄筋に支障にならないように高さ 50 mm の正方形および台形状として、内側を $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ にてほりぬく形状とした。折り曲げる方向は、図 - 3 に示すように、主軸方向および配力筋方向の両方を検討した。また、ボルトを用いる方法では、ボルトの長さおよびボルトの本数について検討を行った。図 - 4 および図 - 5 に、 $M10 \times 80 \text{ mm}$ のボルトを、8 本および 24 本設置した鉄筋付鋼製型枠床版の概略を示す。図中の

表 - 1 実験に用いたコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 (C×%)
				水	セメント	細骨材		粗骨材	
						海砂	砕砂		
20	48.0	4.5	44.9	173	361	536	230	1,001	0.2

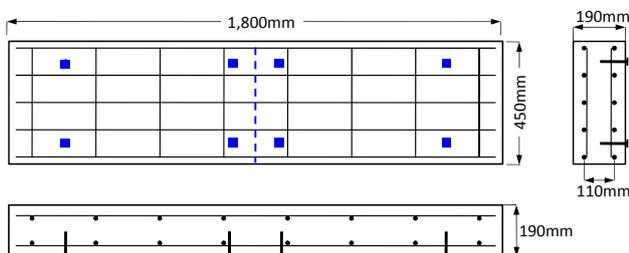


図 - 4 ボルトを 8 本配置した場合の詳細図

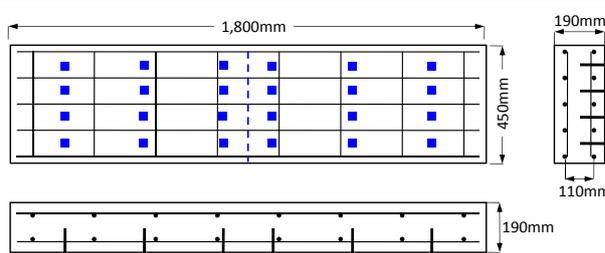


図 - 5 ボルトを 24 本配置した場合の詳細図

は、ボルトを設置した箇所を示している。実験には、M10 × 100mm のボルトも用いた。

(2) 床版の動的載荷試験方法

床版への動的載荷試験は、荷重を供試体中央に載荷する 1 点載荷とした。載荷面の大きさは、200mm × 200mm である。動的載荷試験では、最小荷重が 10kN、最大荷重が使用限界荷重の 2 倍の 75kN で、周波数が 5Hz のサイン波を載荷した。動的な荷重を 200 万回載荷した後、底鋼板および底鋼板と吊り金具を固定しているリベットの破断状況、ならびに床版側面のひび割れの発生状況を調べた。

2.3 実験に用いたコンクリート

コンクリートは、普通 30-10-20-N のレディーミクストコンクリートを用いた。コンクリートの配合を表 - 1 に示す。結合材には、普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³、ブレン値: 3,270cm²/g)を用いた。細骨材には、海砂(密度: 2.55g/cm³、吸水率: 1.59%、F.M.: 2.70)および砕砂(密度: 2.55g/cm³、吸水率: 1.59%、F.M.: 2.80)を用いた。粗骨材には、碎石(最大寸法 20mm、密度: 2.72g/cm³、吸水率: 0.37%、実積率: 59.0%)を用いた。練混ぜ水には地下水を用い、混和剤には、AE 減水剤標準形 I 種を用いた。コンクリートの強度試験結果は、材齢 28 日の圧縮強度が、現場養生で 32.5N/mm²、水中養生で 38.1 N/mm²、静弾性係数が、現場養生で 30.9 kN/mm²、水中養生で 32.8 kN/mm² である。

3. 実験結果及び考察

3.1 鉄筋付鋼製型枠床版の静的載荷試験結果

図 - 6 は鉄筋付型枠床版の床版中央の下部主鉄筋のひずみと荷重の関係を示したものである。図中の は鉄筋付型枠床版の結果を、 は、吊り金具のみを用いた床版の結果を、また、 は RC 床版の結果を示している。吊り金具のみを用いた床版の下部主鉄筋のひずみは、使

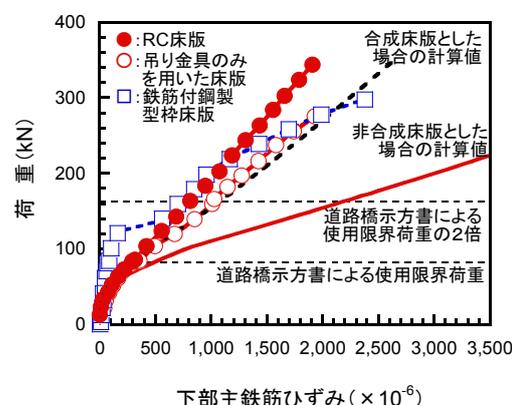


図 - 6 下部主鉄筋のひずみと載荷荷重の関係

用限界荷重の 2 倍程度までは、RC 床版のものと変わらないことが分かる。図中の実線および破線は、それぞれ、非合成床版および合成床版とした場合の計算値を示している。曲げ剛性は、2007 年制定土木学会コンクリート標準示方書[設計編]に示される部材全長にわたって一定とする場合の有効曲げ剛性²⁾を用いて計算した。いずれの場合でも、使用荷重程度までは、鉄筋ひずみの実験値は、計算値とほぼ同程度で、使用荷重を超えると、実験値は計算値より小さく、安全側になっていることが分かる。使用限界荷重の 2 倍以上の荷重が載荷されると、同じ荷重下では、底鋼板のない鉄筋付型枠床版の下部主鉄筋のひずみの方が RC 床版に比べて若干大きくなる傾向がある。一方、底鋼板の付いた鉄筋付鋼製型枠床版では、使用限界荷重の 1.5 倍程度の 120 kN までは、RC 床版に比べて、下部主鉄筋のひずみが小さくなっており、その後は、底鋼板の無いものと同じ挙動を示している。リベットの破断は、荷重が 120kN に達した時点で目視により確認されている。リベットが破断するまでは、非合成床版であっても底鋼板が荷重を受け持っているといえる。

図 - 7 は、鉄筋付鋼製型枠床版における中立軸の位置と荷重の関係を示し、RC 床版と比較し示したものである。

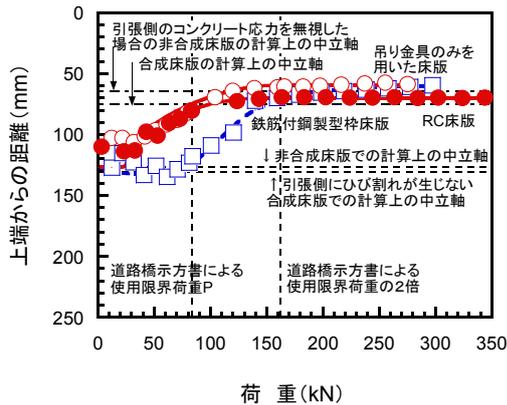


図 - 7 中立軸位置の変化

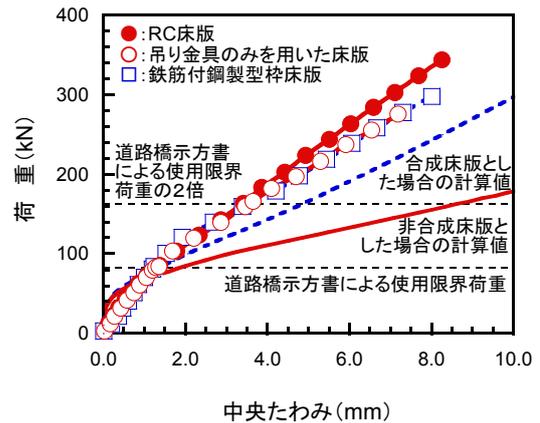


図 - 8 床版の荷重 - たわみ曲線

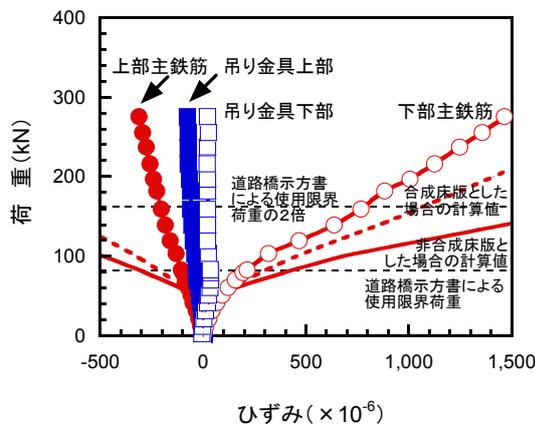


図 - 9 上下主鉄筋と吊り金具かしめ部のひずみ

吊り金具のみを用いた床版の中立軸の変化は、RC床版とほぼ同じであることが分かる。一方、底鋼板のある鉄筋付鋼製型枠床版では、使用荷重の81kN程度までは、RC床版よりも中立軸が下に位置しており、底鋼板が力を負担していることが分かる。また、底鋼板を固定しているリベットが破断した120~130kN以降の荷重下では、鉄筋付鋼製型枠床版の中立軸の位置は、RC床版のものと同じ挙動を示している。図中に、合成床版および非合成床版として計算した中立軸の計算値を示す。鉄筋付鋼製型枠床版の中立軸は、リベットが破断しひび割れが発生した後の挙動は、非合成床版として計算した計算値に近い挙動を示している。

図 - 8 は、スパン中央のたわみと載荷荷重の関係を示したものである。図中の および は、それぞれ鉄筋付鋼製型枠床版および吊り金具のみを用いた床版の結果で、 は、RC床版の結果である。この図より、鉄筋付鋼製型枠床版および吊り金具のみを用いた床版のスパン中央のたわみは、使用限界荷重の2倍までは、RC床版とほぼ同じであることが分かる。いずれの床版も、合成床版として計算した場合の計算値よりも実験値は小さく、安全側になっている。

図 - 9 は、鉄筋付鋼製型枠床版において、上下の主鉄

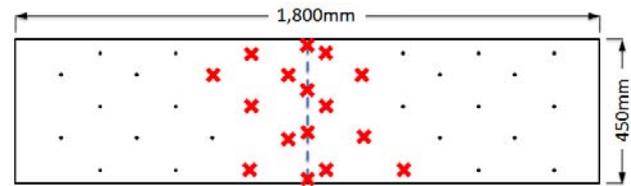


図 - 10 配力筋方向に鋼板を折り曲げた場合の200万回載荷後のリベット破断箇所

筋と吊り金具のかしめ部に生じるひずみを比較し、示したものである。図中の および は、それぞれ、上部鉄筋および下部鉄筋のひずみを示している。また、 および は、それぞれ、吊り金具の上部および下部のかしめ部のひずみを示している。上部鉄筋と吊り金具上部に生じるひずみにおいても、下部鉄筋と吊り金具下部において生じるひずみにおいても、鉄筋のひずみに比べて吊り金具のひずみは小さく、鉄筋と吊り金具には大きなずれが生じており、吊り金具が主鉄筋の応力に及ぼす影響は小さいことが分かる。

以上のことから、鉄筋付鋼製型枠床版は、非合成床版であってもリベットが破断するまでは、荷重を負担しているといえる。しかし、リベットが破断した後は、鋼製型枠床版は荷重を負担していないことから、設計において鉄筋付鋼製型枠床版を非合成床版と扱うことは、静的荷重下では安全側になっているといえる。一方、使用荷重の2倍を超える荷重が載荷された場合、スパン中央のたわみおよび下部主鉄筋のひずみが大きくなる傾向がある。吊り金具に大きな力は作用していないものの、本実験で行ったように、吊り金具を格子状に配列した場合には、設置した箇所と設置しない箇所での剛性の差ができ、過大な荷重が載荷された場合には、設置していない箇所ではひずみが大きくなっている可能性がある。

3.2 繰返し荷重によるリベットの疲労破断に対する対策

図 - 10 は、底鋼板を配力筋方向に折り曲げる方法によって一体化させた鉄筋付鋼製型枠床版の200万回繰返し載荷を行った後の、吊り金具と底鋼板を接合しているリ

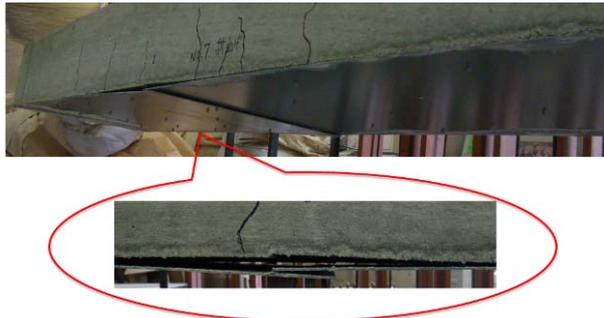


写真 - 4 鋼板折曲げの底鋼板の剥がれ (配力筋方向)

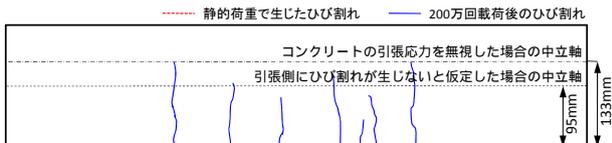


図 - 12 配力筋方向に鋼板を折り曲げた場合のひび割れ

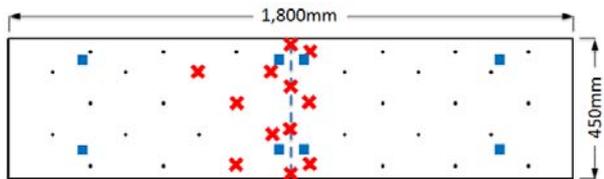


図 - 14 80mm のボルトを 8 本設置した床版のリベット破断箇所

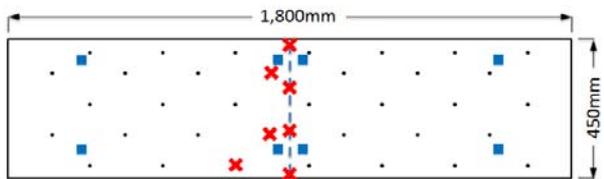


図 - 15 100mm のボルトを 8 本設置した床版のリベット破断箇所

ベットの破断箇所を記録したものである。図の×は、リベットが破断し、落下または手で容易に取れた箇所を示している。配力筋方向に折り曲げた場合は、繰返し荷重の荷重を開始すると、継手部分のリベットから破断が生じはじめ、折り曲げた底鋼板は、写真 - 4 に示すように、繰返し荷重を 70 万回載荷した頃、底鋼板が塑性疲労を起こし、底鋼板も破断する結果となった。最終的には、39 個のリベット中、16 個が破断していた。一方、図 - 11 は、底鋼板を主軸方向に折り曲げる方法によって一体化させた鉄筋付鋼製型枠床版の 200 万回繰返し荷重を行った後の、吊り金具と底鋼板を接合しているリベットの破断箇所を記録したものである。底鋼板を主軸方向に折り曲げた場合は、リベットの破断箇所は全く無い結果となった。底鋼板を折り曲げる方法は、折り曲げる方向によりリベットの破断数量が異なっており、折り曲げる方向によっては、繰返し荷重に対し極めて不利に働くことが明らかとなった。

図 - 12 は、底鋼板を配力筋方向に折り曲げた場合の

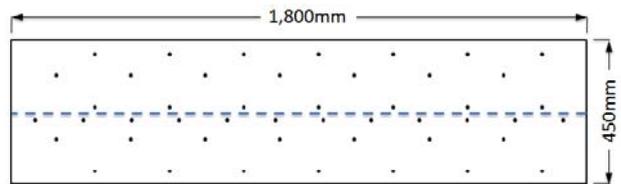


図 - 11 主鉄筋方向に鋼板を折り曲げた場合のリベット破断箇所

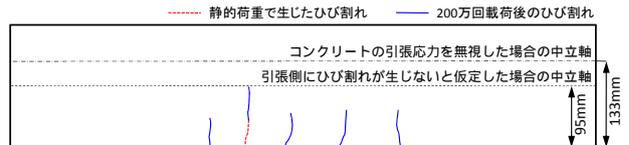


図 - 13 主鉄筋方向に鋼板を折り曲げた場合のひび割れ



写真 - 5 リベットの破断状況

200 万回の繰返し荷重を載荷した後の、床版側面に生じたひび割れを示したものである。一方、図 - 13 は、底鋼板を主軸方向に折り曲げた場合の 200 万回の繰返し荷重を載荷した後の、床版側面に生じたひび割れを示したものである。図中の点線は、繰返し荷重載荷前の静的載荷時に発生したひび割れで、実線は、200 万回の繰返し荷重によって進展したひび割れである。これらの図より、底鋼板が剥がれない場合においては、ひび割れが少ない結果となっており、底鋼板が剥がれない方がひび割れに対し有利に働くことが明らかである

図 - 14 は、底鋼板に M10 × 80mm のボルト 8 本を取り付けた鉄筋付鋼製型枠床版の 200 万回繰返し載荷後におけるリベットの破断箇所を記録したものである。ボルトを配置した場合は、底鋼板を折り曲げた場合と比較して、底鋼板の浮きは見られなかった。図の × は、ボルトの配置箇所を、× は、リベットの破断をそれぞれ示している。リベットは、39 個中 12 個が破断する結果となった。写真 - 5 に、破断したリベットの状況を示す。

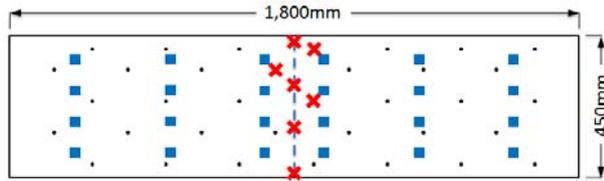


図 - 16 80mm のボルトを 24 本設置した床版のリベット破断箇所

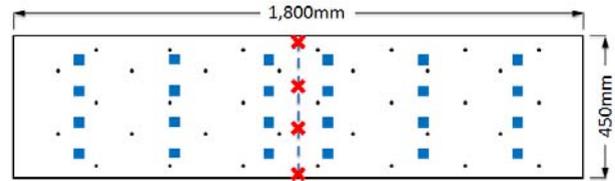


図 - 17 100mm のボルトを 24 本設置した床版のリベット破断箇所

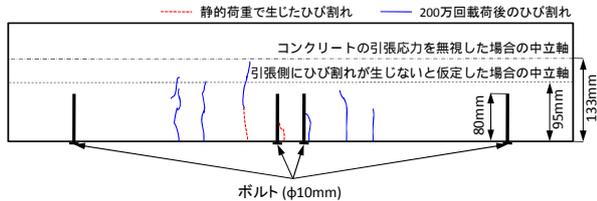


図 - 18 80mm のボルトを 8 本設置した床版のひび割れ

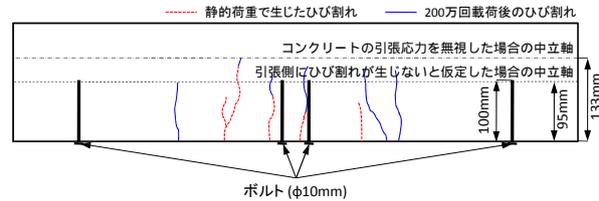


図 - 19 100mm のボルトを 8 本設置した床版のひび割れ

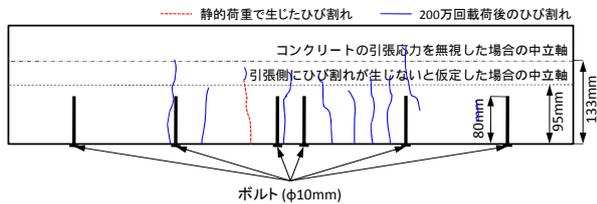


図 - 20 80mm のボルトを 24 本設置した床版のひび割れ

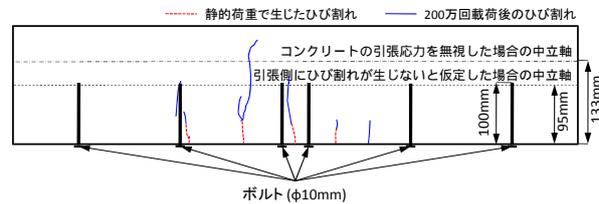


図 - 21 100mm のボルトを 24 本設置した床版のひび割れ

図 - 15 は、底鋼板に M10×100mm のボルト 8 本を取り付けた鉄筋付鋼製型枠床版の 200 万回繰返し荷重後におけるリベットの破断箇所を記録したものである。リベットは、7 個破断する結果となり、M10×80mm のボルト 8 本を配置した場合と比較するとボルト長を長くすることにより破断箇所が約半減していることが分かる。

図 - 16 は、底鋼板に M10×80mm のボルト 24 本を取り付けた鉄筋付鋼製型枠床版の 200 万回繰返し荷重後におけるリベットの破断箇所を記録したものである。リベットは、7 個破断する結果となり、M10×100mm のボルト 8 本を配置した場合と同程度の破断本数となった。一方、図 - 17 は、底鋼板に M10×100mm のボルト 24 本を取り付けた鉄筋付鋼製型枠床版の 200 万回繰返し荷重後におけるリベットの破断箇所を記録したものである。繰返し荷重によるリベットの破断を抑制する効果は、ボルトの本数よりも長さの影響の方が大きいことがいえる。

図 - 18 ~ 図 - 21 は、ボルトを埋め込んだ鉄筋付鋼製型枠床版に 200 万回の繰返し荷重を載荷した後に、床版側面に生じたひび割れを示したものである。静的載荷試験後のひび割れは、長いものが引張側にひび割れが生じないと仮定した場合の中立軸付近まで入っていることが分かる。また、いずれの場合も、繰返し荷重によるひび割れは、コンクリートの引張応力を無視すると仮定した場合の中立軸位置まで達しているものがあることが分

かる。短いボルトを数多く埋め込むよりも、ひび割れの長さと同様または長いボルトを埋め込むことの方が繰返し荷重によるリベットの破断を抑制する効果が高いことが分かる。

4. まとめ

鉄筋付鋼製型枠床版の底鋼板は、道路橋示方書に基づく使用限界荷重の 1.5 倍程度までは力を負担しており、底鋼板のリベットが破断した後の床版の変形挙動は、底鋼板の無いものと同様である。

底鋼板の継手箇所で、鋼板を折り曲げて、コンクリート内部に入れ込ませた場合、折り曲げ部で塑性疲労を生じ、底鋼板が破断する。一方、底鋼板にボルトを取り付けた場合では、200 万回の繰返し荷重を載荷した後も、大きな剥離を生じることはない。ボルトの本数は多いほど、また、長さは長いほど、繰返し荷重によるリベットの破断を抑制する効果は高い。また、ひび割れの長さと同程度または長いボルトを設置する方が、短いボルトを数多く配置するよりも効果が高いことが分かった。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書(I 共通編・III コンクリート橋編)・同解説，p.126，2002.3
- 2) 土木学会コンクリート委員会：2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，p.105，土木学会，2008.3