

突起リブを適用した SC デッキの耐荷力および耐疲労性に関する研究

～突起リブによる SC デッキの性能向上～

Study on Punching Shear Strength and Fatigue Durability of SC Deck Stiffened with Headed Ribs

藤野 大地^{*1}
Daichi FUJINO

佐々木 秀智^{*2}
Hidetomo SASAKI

森下 弘行^{*3}
Hiroyuki MORISHITA

小笠原 照夫^{*4}
Teruo OGASAWARA

街道 浩^{*5}
Hiroshi KAIDO

鋼コンクリート合成床版は、耐疲労性や施工性に優れていることから、橋梁分野以外にも採用されてきている。著者らは、SCデッキ（ロビンソン型鋼コンクリート合成床版）を長支間のシールドトンネル中床版に適用することを考え、底鋼板の補剛材に端部を厚くした突起リブを用いることとした。突起リブは、上端の突起がコンクリートとの鉛直ずれを拘束するもので、コンクリートとの一体性を高められる。すなわち、突起リブと底鋼板で囲まれるコンクリートが突起部の拘束により、鉛直ずれを拘束して鋼殻とコンクリートとの合成作用を向上させるので、床版の耐荷力および耐疲労性が向上すると考えられる。本稿では、静的載荷試験を実施して破壊メカニズムの検証と終局耐力の確認および、輪荷重走行試験と有限要素解析を実施して耐疲労性の確認をしたので、その研究成果を報告する。

キーワード：ロビンソン型鋼コンクリート合成床版、突起リブ、破壊メカニズム、耐疲労性

1. はじめに

近年、首都圏の自動車専用道路にシールドトンネルの採用が比較的多く、走行部となる中床版^{なかしょうばん}には鋼コンクリート合成床版が適用される場合がある(図1)。これは、シールドトンネルの施工において、セグメント等の建設資材の搬入や掘削土の排出など、施工中のトンネル内における物資輸送路の確保が必要であり、その長支間の中床版の建設を急速で行うとともに、床版下側の広い空間を輸送路として確保するためである。

著者らは、橋梁床版に多くの採用実績のあるロビンソン型鋼コンクリート合成床版「SCデッキ」(底鋼板上面に頭付きスタッドを設け、従来は補剛材にプレートリブを使用。以下、プレートリブSCデッキと略す。)の長支間化と合理化を図るために、図2に示す端部を厚くしたリブ(以下、突起リブと略す。)を採用した。

突起リブは、端部の突起がコンクリートとの鉛直ずれを拘束するもので、コンクリートとの一体性を高められる。すなわち、突起リブと底鋼板で囲まれるコンクリートが突起により鉛直ずれを拘束して鋼殻とコンクリートとの合成作用を向上させるので、床版の耐荷力および耐疲労性が向上すると考えられる。

本論文では、鋼コンクリート合成床版の補剛材に、突起リブを適用したSCデッキ(以下、突起リブSCデッキと略す。)について、静的載荷試験により破壊メカニズムおよび終局耐力の検証を行うとともに、輪荷重走行試験を実施して耐疲労性の評価を行う。

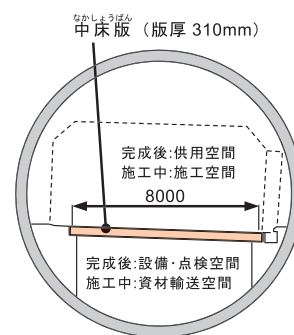


図1 シールドトンネル断面模式図

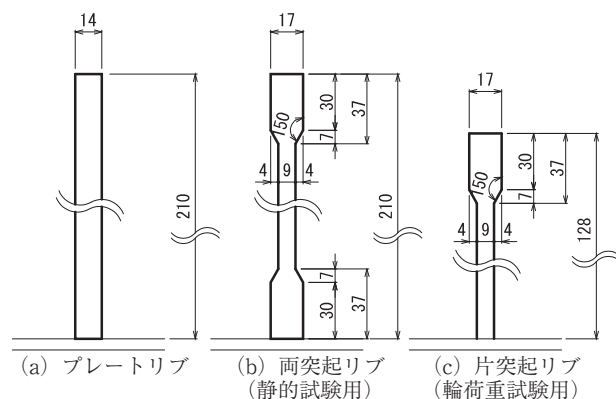


図2 補剛材形状

*1 川田工業(株)鋼構造事業部技術部東京技術課
*2 川田工業(株)鋼構造事業部調達部調達課 課長
*3 川田工業(株)鋼構造事業部技術部東京技術課

*4 川田工業(株)鋼構造事業部技術部 部長
*5 川田工業(株)鋼構造事業部技術部 部長

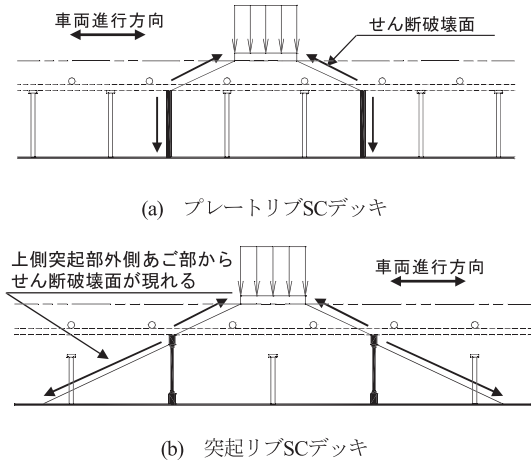


図3 補剛材形状の違いによる想定破壊メカニズム

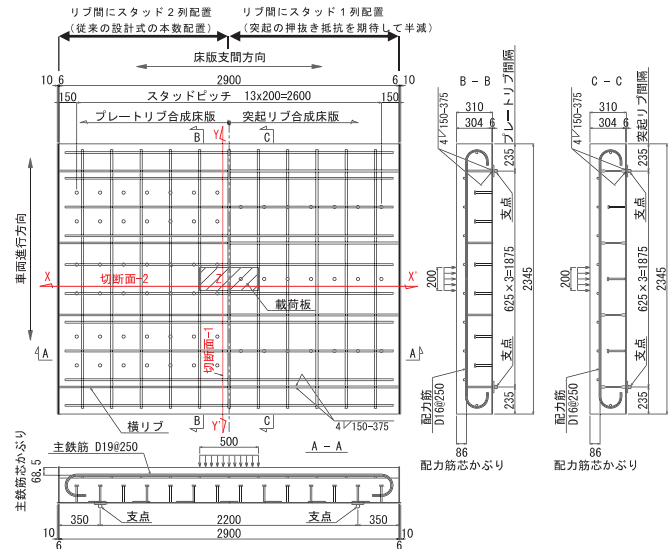


図4 試験体形状

2. 突起リブの特徴

(1) 突起リブの形状

本研究で採用する突起リブは、JISG3106の溶接構造用圧延鋼材の平鋼と同等品であり、その形状は端部と中間部に板厚差を設け、端部の突起に鋼材とコンクリートとの鉛直ずれの拘束を期待したものである。

(2) 突起リブ SC デッキの破壊メカニズム

SCデッキの破壊メカニズムは、補剛材形状・間隔により異なる。そこで、輪荷重載荷に対して補剛材のせん断抵抗が最も小さくなる補剛材間中央に荷重を載荷した場合について、破壊メカニズムを説明する。プレートリブSCデッキのせん断破壊面を図3(a)に示す。プレートリブ上端から荷重の縁端を結ぶ面でコンクリートがせん断破壊し、その後プレートリブの外側とコンクリートの接触面が鉛直ずれを起こし、片面すべりが起こる。一方、突起リブSCデッキのせん断破壊面は図3(b)に示すように、プレートリブSCデッキと同様、突起リブ上端から荷重載荷板の縁端を結ぶ面でのせん断破壊に加え、上側突起部外側のおご部によってコンクリート接触面の鉛直ずれが拘束され、ここを起点として斜め方向にせん断破壊を誘発すると考えた。

これにより、プレートリブSCデッキに比較して、せん断破壊面の範囲が車両進行方向に広がり、耐荷力が向上することが期待できる。

そこで、想定した破壊メカニズムの検証を行うため、床版モデル試験体による押抜きせん断試験を実施した。

3. 床版モデルの試験体による静的載荷試験

(1) 試験体の種類と諸元

突起リブSCデッキでの破壊メカニズムと押抜きせん断耐力を検証するため床版モデル試験体での静的載荷試験を実施した。

ここで、プレートリブSCデッキについても試験を実施して、突起リブSCデッキとの比較を行った。試験体を使用した補剛材形状を図2に示す。

床版厚は過去の実績¹⁾から床版支間を8mとし、式(1)²⁾の計算結果から310mm(コンクリート厚304mm、底鋼板厚6mm)とした。

$$hc = 25L + 110 \quad \dots\dots (1)$$

hc: 床版最小厚 (mm) で、コンクリート厚+底鋼板厚 (10mm単位で四捨五入)

L: 床版支間 (m)

試験体形状を図4に示す。

底鋼板および補剛材に用いた鋼材はSM490材を、床版鉄筋にはSD345を採用し、主鉄筋はD19を、配力筋はD16をそれぞれ250mm間隔で配置した。降伏強度および引張強度の試験結果を表1に示す。

また、床版部に用いたコンクリートは設計基準強度を $\sigma_{ck}=27\text{N/mm}^2$ とし、膨張材 20kg/m^3 を添加した。コンクリートの配合計画を表2に、材料試験結果を表3に示す。

(2) 荷重載荷要領

押抜きせん断試験の荷重載荷要領を図5に示す。なお、荷重載荷サイクルは、各試験体の押抜きせん断耐力 $V_{pcd}^{2)}$ を算出し、その荷重を3段階に分けた荷重の載荷とした。

(3) 押抜きせん断試験体における試験結果

a) 載荷荷重とたわみの関係

床版支間を2.2m、車両進行方向の支間を1.875mとし、4辺を単純支持した床版モデルでの押抜きせん断試験体における載荷荷重に対するたわみの推移を図6に示す。なお、図6には輪荷重(100kN)に衝撃を考慮した設計荷重(138kN)を併記する。プレートリブSCデッキは、載荷荷重690kN付近でたわみの傾きが変化し緩やかに

表1 鋼材の物性値

部材名	断面	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
底鋼板	t=6	SM490A	432	557
突起リブ	h=210, t ₁ =17, t ₂ =9	SM490A	374	561
プレートリブ	h=210, t=14	SM490A	378	534
配力筋	D16	SD345	399	579
主鉄筋	D19	SD345	398	536

表2 コンクリートの配合計画

(a) 配合の設計条件

呼び強度	粗骨材の最大寸法	スランプ	水結合比	空気量	細骨材率
27N/mm ²	25mm	8cm	52.4%	4.5%	42.9%

(b) 配合表

単位量 (kg/m ³)					
水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	AE減水剤
149	265	20	795	1,065	2.85

表3 コンクリートの材料試験結果

標準養生		現場養生 (封緘養生)	
材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
28	32.6	28.2	25

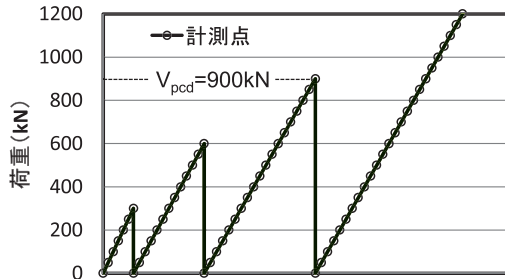


図5 荷重載荷要領

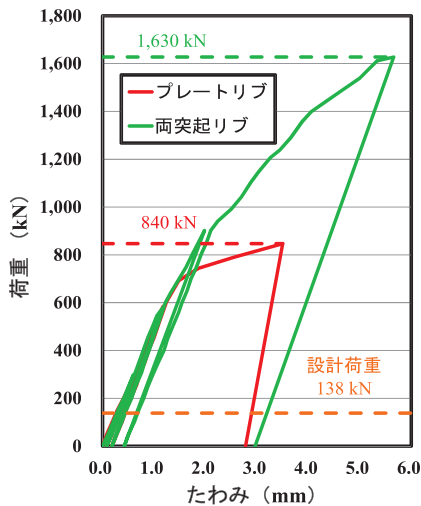


図6 押抜きせん断試験 試験体中央のたわみ

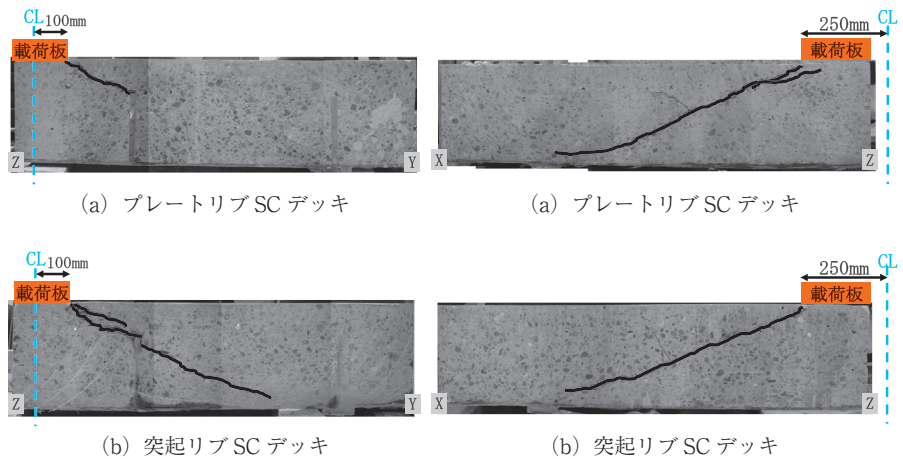


写真1 押抜きせん断試験終了状況 (試験体-①: 車両進行方向, Z-Y断面)

写真2 押抜きせん断試験終了状況 (試験体-②: 床版支間方向, X-Z断面)

なっている。その後、荷重増加によりたわみとひび割れ長さが増加し、840kNで荷重が上がらなくなり、床版上面コンクリートが陥没したため試験終了とした。

突起リブSCデッキは、載荷荷重690kN付近までプレートリブSCデッキとほぼ同じたわみの推移を示し、900kNまではその傾きを維持している。その後、900kNを超えて傾きが緩くなるが、1400kNまでは線形性を維持したままたわみが増加し、1630kNで床版上面コンクリートが陥没したため試験を終了した。

b) 押抜きせん断試験体切断面のひび割れ状況確認

試験終了後、試験体内部のひび割れ状況を確認するため、図4に示す車両進行方向の切断面-1 (Z-Y断面) および床版支間方向の切断面-2 (Z-X断面) に沿って、試験体を切断した。状況を写真1および写真2に示す。

プレートリブSCデッキの車両進行方向の切断面-1 (Z-Y断面) を写真1(a)に示す。リブ先端から載荷板縁端に達するひび割れと、プレートリブ外側と底鋼板がコ

ンクリートと剥離している状況が確認された。床版支間方向の切断面-2 (Z-X断面) を写真2(a)に示す。載荷板縁端から斜め下方向の支点付近に達するひび割れを確認した。

突起リブSCデッキの車両進行方向の切断面-1 (Z-Y断面) を写真1(b)に示す。リブ先端から載荷板縁端に達するひび割れと、突起リブ外側のあご部より、底鋼板に伸びるひび割れが確認された。床版支間方向の切断面-2 (Z-X断面) を写真2(b)に示す。プレートリブSCデッキと同様の載荷板縁端から斜め下方向の支点付近に達するひび割れの発生を確認した。

この結果から両試験体とも、車両進行方向および床版支間方向の破壊形状から、押抜きせん断破壊したことが分かる。各試験体の押抜きせん断破壊荷重は、プレートリブで840kN、両突起リブで1630kNの結果となり、設計荷重138kNに対する押抜きせん断耐力は、プレートリブでは6.1倍、両突起リブでは11.8倍と、高い安全率を

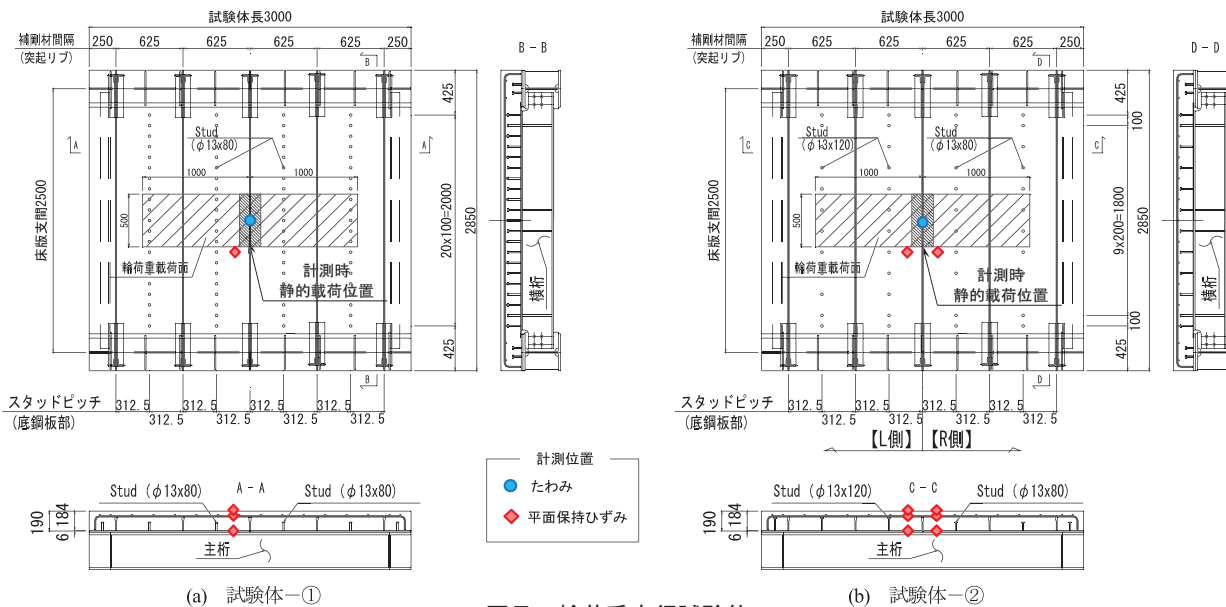


図7 輪荷重走行試験体

有することが分かった。また両突起リブは、プレートリブと比較して約2.0倍の耐荷力を有することも分かった。

以上のように、押抜きせん断試験結果と、2.(2)で想定した突起リブSCデッキの破壊メカニズムとの一致が確認され、突起部のあご部分がコンクリートとの鉛直方向のずれを拘束し、せん断破壊面の範囲が車両進行方向に広がるということが分かった。これに伴って、突起リブSCデッキでは、プレートリブSCデッキに比較して、2.0倍以上の荷重を載荷しても、たわみの変化はほぼ線形性を保っており、コンクリートにひび割れが発生しても断面剛性を維持していることが分かった。また突起リブSCデッキの押抜きせん断耐力は、プレートリブSCデッキと比較して約2.0倍向上した。

4. 輪荷重走行試験

(1) 試験体の寸法と材料諸元

突起リブSCデッキにおける耐疲労性を確認するため、実物大モデル試験体での輪荷重走行試験を実施した。ここで、輪荷重走行試験に用いる突起リブは、製鋼上の制約から突起リブの片側を切断して試験に用いることとした。図2(c)に突起リブの形状を示す。

輪荷重走行試験体の寸法は、試験機の諸元に合わせて図7に示す長さ3.0m、幅2.85m、床版支間2.5m(支間3mの連続版の正曲げ範囲に相当)とし、主桁フランジで固定支持し、横桁で弾性支持するものとした。なお、2辺で単純支持された等方性無限単純版を有限長の版試験体モデルで再現するため、床版の両端部は250×90の溝形鋼で弾性支持し、床版中央で発生する曲げモーメントが等方性無限単純版と等しくなるように調整している。

床版厚は、支間3mの連続版に適用する全厚190mm(コンクリート厚184mm、底鋼板厚6mm)とし、主鉄筋お

表4 鋼材の物性値

部材名	断面	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
底鋼板	t=6	SM490A	384	538
突起リブ	h=128, t ₁ =17, t ₂ =9	SM490A	317	531

表5 コンクリートの材料試験結果

	標準養生		現場養生 (封緘養生)	
	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
試験体-①	28	35.8	35.4	-
	46	-	37.7	28.6
試験体-②	28	32.2	31.3	-
	47	-	35.1	27.8

よび配力筋には、D13の異形鉄筋(SD345)を200mm間隔で配置した。この配筋については、既設のシールドトンネルに採用された合成床版の鉄筋比と、ほぼ等しくなるように設定している¹⁾。

底鋼板および突起リブの鋼材はSM490材を採用し、コンクリートは設計基準強度を $\sigma_{ck}=27\text{N/mm}^2$ として膨張材 20kg/m^3 を添加した。コンクリートの配合計画は静的載荷試験と同じとした。鋼材の物性値を表4に、コンクリートの材料試験結果を表5に示す。

(2) 試験体の種類

輪荷重走行試験は、図7に示す突起リブSCデッキの試験体2体で実施した。ここで、試験体-①は、従来のプレートリブSCデッキで用いる設計式でスタッドの本数と高さを設定した。また、スタッドの本数と高さが耐疲労性に与える影響を検討するために、試験体-②は、スタッドの本数を試験体-①の約半分に減らし、さらに試験体半面(図7のL側)のスタッドを上側鉄筋に届く高さが増した。

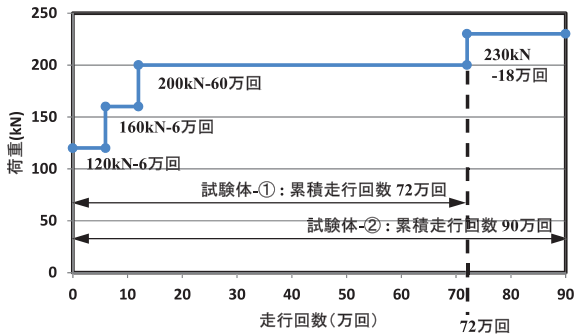


図8 荷重載荷要領

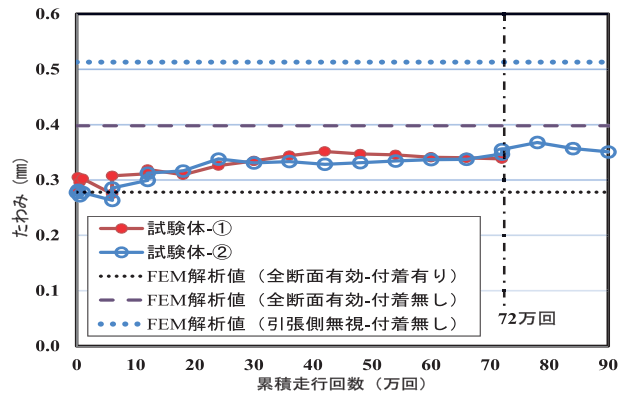
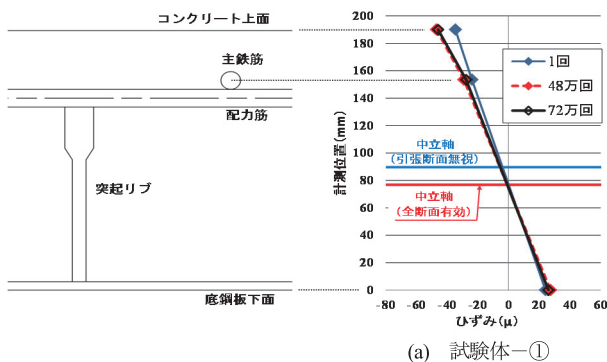
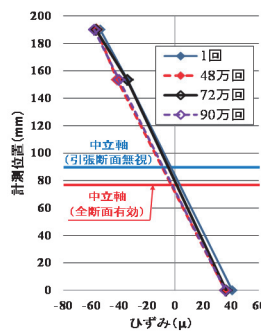


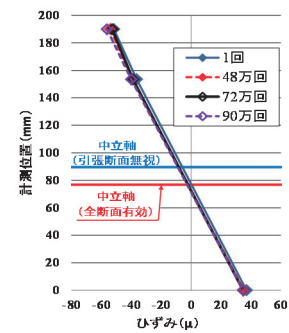
図9 試験体中央の活荷重たわみ (図6の●位置)



(a) 試験体-①



(b) 試験体-② (L側)



(c) 試験体-② (R側)

図10 床版支間方向断面ひずみ分布 (図7の◆位置)

(3) 測定項目および測定方法

試験体のたわみは変位計で、コンクリート、鉄筋および鋼材のひずみはひずみゲージで計測した。各試験体の主な計測位置を図7に示す。

(4) 荷重載荷要領

今回の輪荷重走行試験では、供用期間を100年と設定し、この期間内に実橋で受ける損傷と等価な損傷を与える荷重および載荷回数を選定した。選定には、過去に重交通路線の橋梁で計測した交通軸重の頻度分布³⁾を用い、実橋での交通荷重が100年間走行した場合の累積損傷度と等価な損傷度を試験体-①に与えるものとした。輪荷重走行試験の荷重載荷要領を図8に示す。

なお、試験体-②については、さらに、載荷荷重を230kNに上げ走行回数を18万回追加し、走行回数が90万回(供用期間278年に相当)となる輪荷重走行試験を実施した。

(5) 計測時の荷重載荷方法

荷重は、輪荷重走行範囲内の中央部に所定の輪荷重を載荷した。載荷面は道路橋示方書に示されるT荷重載荷面(500mm×200mm)とした。以降に示す計測結果は荷重100kNに換算した計測値で整理した。

(6) 輪荷重走行試験結果

a) 試験体のたわみの変化

図7に●で示す、試験体中央点の活荷重たわみの変化を、有限要素解析^{4), 5)}で得た活荷重たわみの結果も含

め図9に示す。試験開始から終了までの活荷重たわみの増加は、試験体-①は0.059mm、試験体-②は累積走行回数72万回で0.069mm、累積走行回数90万回で0.073mmと、両試験体とも小さく、劣化はほとんど進行していないと考えられる。

b) 平面保持

図7に◆で示す床版支間方向の、断面中央付近のひずみ分布を図10に示す、累積走行回数1回、48万回、72万回終了時の結果である。また、試験体-②については、累積走行回数90万回終了時の結果も併記する。底鋼板のひずみと同様、走行開始直後からのひずみの増加が僅かに見られるものの、試験開始から累積走行回数72万回および90万回終了時まで中立軸の位置は、全断面有効で平面保持を仮定した断面剛性の中立軸位置からほとんど変化していない状態で試験を終了していることが分かる。

(7) 試験体のひび割れ性状

a) 床版上面および床版切断面の損傷状況

試験終了後に試験体の内部のひび割れ状況を確認するため、図11に示す車両進行方向の切断面-1(Z-Y断面)および床版支間方向の切断面-2(Z-X断面)に沿って、縦横に試験体を切断した。試験体-①および②の切断面について、突起リブ上端部および鉄筋とコンクリートの境界面に対して、アセトンを用いたひび割れ調査を実施したが、写真3に示す切断面のように、全ての切断面においてひび割れは全く認められなかった。

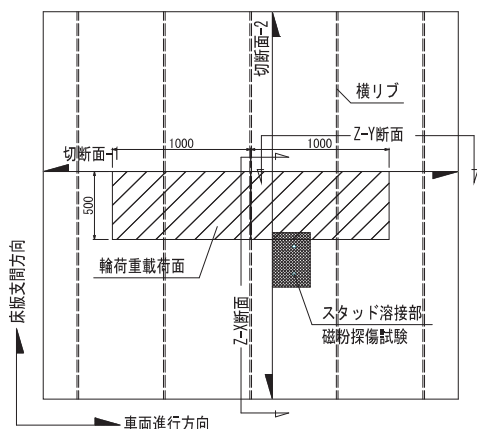


図 11 試験体切断位置

b) スタッド溶接部の損傷確認

試験体の切断後、コンクリート内のスタッド溶接部の状況を確認するため、コンクリートを除去して、目視確認と磁粉探傷試験を行った。対象箇所は、図 11 に示す作用せん断力が最大となるスタッド周辺とした。写真 4 に試験体-② R 側におけるコンクリート除去後のスタッドおよび、スタッド溶接部の磁粉探傷試験状況を示す。目視確認および試験の結果、底鋼板の変形やスタッドの曲がりや破断はなく、溶接部の疲労き裂も認められなかった。試験体-①と試験体-② L 側についても同様の目視確認および試験を行ったが、結果は試験体-② R 側と同様であった。

5. 本稿のまとめ

本稿では、底鋼板の補剛材に突起リブを適用した SC デッキにおいて、静的載荷試験により破壊メカニズムおよび終局耐力の検証を行った。

また、輪荷重走行試験と有限要素解析を実施し、両者の比較に基づく耐疲労性の確認を行い、突起リブの適用性について検討を行った。

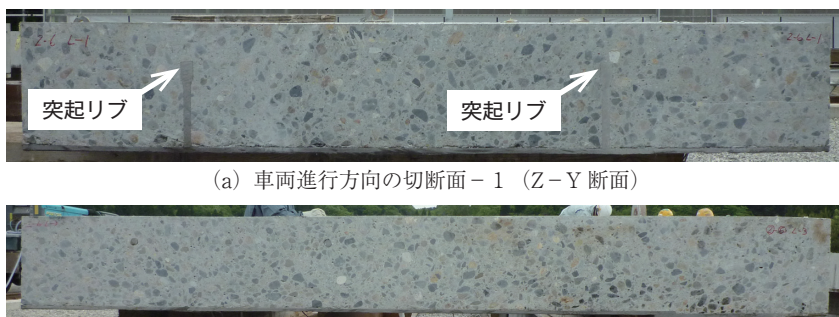
本論文において、得られた結果は以下のとおりである。

(1) 静的載荷試験結果

- ① 押抜きせん断耐力は、輪荷重 100kN に衝撃を考慮した設計荷重 138kN に対し、プレートリブ SC デッキでは 6.1 倍、両突起リブ SC デッキでは 11.8 倍と、高い安全率を有することが分かった。
- ② 突起リブ SC デッキは、プレートリブ SC デッキの約 2.0 倍の押抜きせん断耐力を発揮することが分かった。

(2) 輪荷重走行試験結果

- ① 実橋で供用期間 100 年に相当する損傷を与える輪荷重走行試験を行ったが、鉛直たわみの急増は見られず、コンクリート床版部におけるひび割れの発生も確認されなかった。



(a) 車両進行方向の切断面-1 (Z-Y 断面)

(b) 床版支間方向の切断面-2 (Z-X 断面)

写真 3 試験終了後の試験体切断状況 (試験体-②)



写真 4 スタッド溶接部の磁粉探傷試験 (試験体-②)

- ② 突起リブ間に配置するスタッドの間隔および高さを変えて輪荷重走行試験を実施したが、活荷重たわみや、鉄筋および底鋼板のひずみに大きな差異は見られず、載荷初期から載荷終了までコンクリートが全断面有効を保持しており、高い耐疲労性を有することが分かった。
- ③ 試験終了後に試験体を切断して内部の状況を確認した結果、底鋼板とコンクリートはスタッドから離れた範囲で部分的に付着が切れている状況を確認したが、コンクリート内部の曲げ・せん断ひび割れは全く確認されなかった。また、一部のコンクリートをはつり、スタッド溶接部を確認した結果、疲労き裂は確認されなかった。

参考文献

- 1) 住吉英勝, 青木敬幸, 米沢実, 中村康彦: 首都高速中央環状品川線シールドトンネルセグメント・床版の設計施工, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学, Vol.49 (2011), No.12, pp.43-44, 2011.
- 2) 土木学会: 鋼コンクリート合成床版設計・施工指針(案), 2016.
- 3) 松井繁之: 道路橋床版, 森北出版, 2007.
- 4) 佐々木秀智, 藤野大地, 森下弘行, 小笠原照夫, 街道浩, 松井繁之: 突起リブを適用した鋼コンクリート合成床版の耐荷力および疲労耐久性に関する研究, 構造工学論文集 A, Vol.63, pp.1282-1295, 2017.
- 5) 街道浩, 松井繁之: 鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のスタッドの疲労強度評価, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.765-777, 2008.