次世代高性能床版の開発
～静的載荷試験と輪荷重走行試験～

Development of New System of Slab with Half Rigid Joint
～Static Loading Test and Wheel Load Running Test～

北　慎一郎　Shinichiro KITA
ソリューション共創センター
ソリューションビジネス部

中山　逸人　Hayato NAKAYAMA
ソリューション共創センター
ソリューションビジネス部

櫻井　信彰　Nobuaki SAKURAI
ソリューション共創センター
ソリューションビジネス部

抄　録

高速道路における床版取替工事に適用するため，プレキャストPC床版を充填材のみで橋軸方向に接合する，「半接合構造」を提案している．提案構造と比較対象であるループ継手の静的耐力と疲労耐久性を照査するために，静的載荷試験と輪荷重走行試験を実施した．静的載荷試験において，提案継手を有する床版は道路橋示方書に示す設計荷重に対して十分な静的耐力を示した．また，エポキシ樹脂モルタルで接合した床版は，ループ継手と同様に押抜きせん断破壊に至った．輪荷重走行試験では，提案継手構造は平成８年版道路橋示方書で設計した，連続したRC床版より高い疲労耐久性を示した．

Abstract

Our company is developing “Half Rigid Connection”, that precast pre-stressed slabs are connected with only filler in bridge axial direction for slab replacement work in highways. Static loading tests and fatigue test（wheel load running test）have been conducted with full-sized slabs with “Half Rigid Connection” and loop joint. According to the results of static loading tests, slabs connected with only filler showed enough static resistance. And as is the case with loop joint, epoxy resin mortar, applied as filler, showed punching shear failure. According to the results of fatigue test, proposed joints showed enough fatigue durability compared to Continuous RC slab designed with Specifications for Highway Bridges, Japan Road Association, in 1996.

1 緒言

我が国の高速道路は，その40％が供用後30年経過し，重交通による疲労や環境因子による劣化が顕著になっており，東・中・西日本高速道路(以下，NEXCO各社)では大規模更新・大規模修繕が計画[1)]され，現在実行されている．

大規模更新の中で過半を占めるのが床版取替工事であり延べ224kmの工事が計画されている．床版取替工事では，工事渋滞による経済損失を可能な限り少なくするため，急速施工が要求されることから，プレキャストPC床版の適用が一般的である．プレキャストPC床版は陸上輸送する都合上2.5m以下の幅に分割輸送されて，ループ継手に代表される鉄筋継手で現場接合される．

我々は，NEXCO各社など道路管理者へのヒアリングや，床版取替工事例から分析し，かつ将来の熟練労働者の不足にも鑑みて，安全性・耐久性を損なうことなく，より簡単に施工できる構造が必要と考えた．そして，プレキャストPC床版本体のコンク

リートよりヤング係数が小さく，付着強度・引張強度はコンクリートのそれらと同等程度の充填材料で構成する新形式継手構造を考案した．図１に継手概要図を示す．

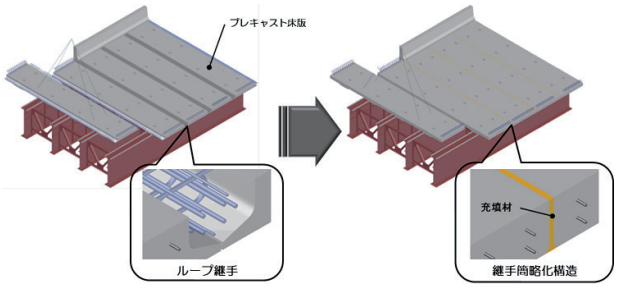

図１　継手概要図
Fig. 1　Concept of Half Rigid Connection

これまで様々な解析検討や要素試験，構造試験により，構造詳細や材料諸元の検証を進めてきた．継手幅はプレキャストPC床版のパネル幅に比して十分小さく，輪荷重が継手に単独で載荷されない幅(20～30mm)程度に設定している．また，充填材料はプレキャスト床版本体の１/３～１/50程度のヤング係数で，引張強度や付着強度が床版本体と同等程度のものであれば．道路橋床版として構成できることを確認している．これらの詳細については文献２)から文献７)を参照されたい．本稿では，静的耐力試験と輪荷重走行試験の試験方法や手順を中心に報告する．

2 静的載荷試験の概要

2.1　試験体

試験体の寸法を図２に示す．No. 0試験体はループ継手を，No. 1およびNo. 2試験体は提案継手構造を有したプレキャストPC床版(長さ4500mm，幅2800mm)である．また，国土技術政策総合研究所で輪荷重走行試験用に製作されたPC８試験体[8]に従って，床版厚180mm，床版支間2.5mとして設計した．継手長さはNo. 0試験体が300mmである一方，No. 1およびNo. 2試験体は25mmであり，界面には凝結遅延材による目粗しを施すとともに，下端部を45度に面取りすることで，剥離強さの向上を図った．鉄筋は，支間方向はD13 ctc 250mmで上下に配置して，橋軸方向はD16 ctc 100mmで上下に配置した．なお，ループ継手における曲げ半径を確保するために，鉄筋のかぶりは上下面ともに29mmとしている[9]．

本体コンクリートはPC鋼線を用いてプレテンションで緊張した．これは実際に製作するプレキャスト床版に極力近づけるためであり，ポストテンションにおけるシース管などが耐力に与える影響が，少なくないと判断したためである．プレストレス量は設計荷重時に全断面有効となるように計算して，有効プレストレス量4.3N/mm^{2}となるように緊張力を導入した．

本体コンクリートの特性を表１に示す．NEXCO各社で標準とされる，呼び強度50のコンクリートを使用した．継手部に使用した充填材料の種類を表２に示す．提案継手構造における充填材料にはポリマーセメントモルタル(以下，PCM)とエポキシ樹脂モルタル(以下，ERM)を使用した．コンクリートにおける物性試験方法[10),11),12)]を適用した場合の各種物性値は表３に示す通りであった．各充填材料の特性を比較するため，圧縮試験時の応力ひずみ曲線の例を図３に示す．PCMはコンクリートと同様

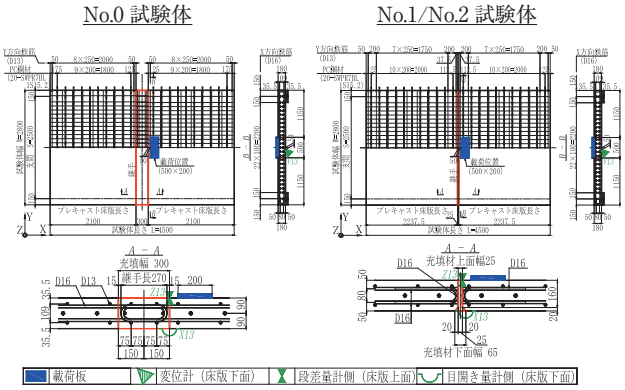

図２　試験体概要
Fig. 2　Outline of Specimen

表１　本体コンクリートの特性
Table 1　Concrete Properties of Slab

試験体 No.	ヤング係数 (kN/mm^2)	ポアソン比	強度(N/mm^2)	
			圧縮	割裂引張
0	44.5	0.20	69.4	3.17
1	43.7	0.20	69.1	2.94
2	49.0	0.24	69.2	3.29

表２　継手部の充填材料
Table 2　Filler Materials for Connection

試験 No.	充填材料種類
0	充填コンクリート
1	ポリマーセメントモルタル(PCM)
2	エポキシ樹脂モルタル(ERM)

に最大荷重の1/3に相当する応力まで線形性を保っている．一方でERMは低い応力においても非線形な挙動が見られ，コンクリートの材料特性とは異なることが示されている．本体コンクリートのヤング係数と比較して，PCMは約1/3，ERMは約1/100であった．

2.2　試験設備，および試験体の接合状況

試験は大阪工業大学，八幡工学実験場が有する載荷試験機にて実施した．図2に載荷面および計測機器の位置を示す．接合したPC床版を架台に2辺単純支持となるように設置した．また静的設計荷重を載荷した際の鉛直変位量が，実橋で想定している無限連続版と同等となるように，H200×200の弾性支持材を橋軸方向の床版端部に設けた．

図4に提案継手部における接合作業の様子を示す．提案継手部は25mmと狭いことから，ループ継手と比較して簡易な型枠で済ませることができる．また特にERMは流動性・自己充填性が高いため，締固めが不要である．1日の養生期間の後に脱型して，充填不良がないことを確認した．

表3　充填コンクリートおよび充填材料の特性
Table 3　Properties of Filler Materials

試験体 No.	ヤング係数 (kN/mm²)	ポアソン比	強度 (N/mm²)	
			圧縮	割裂引張
0	32.1	0.20	56.0	3.59
1	13.0	0.24	29.7	3.75
2	0.50	0.38	17.1	4.07

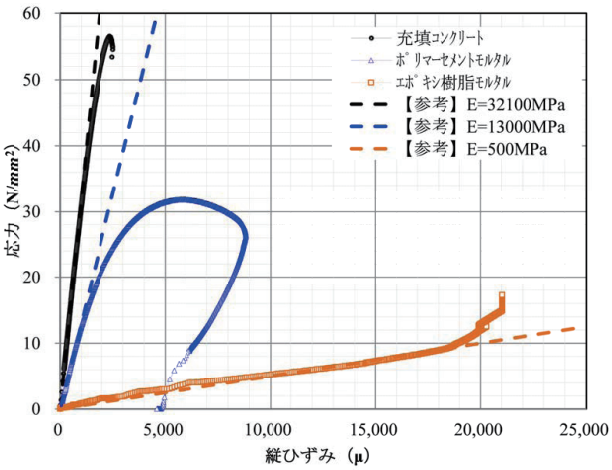

図3　充填材料の圧縮試験時における応力とひずみの関係
Fig. 3　Stress-Strain Diagrams in Compressive Strength Tests for Filler Materials

2.3　載荷方法，および計測項目

200mm×500mmの載荷板は，提案継手構造においてせん断力が作用する位置が耐荷力に対して最も厳しいと予想して，継手部界面近傍に載荷板縁端が位置するようにセットした．静的設計荷重PsdはT荷重に衝撃係数を考慮した138kNとした．Psd x 1.0で載荷・除荷を3回繰返した後に，Psd x 約2.5 (350kN)で載荷・除荷を1回実施し，最後に終局状態まで載荷を行った．計測項目として段差量，目開き量，および鉄筋ひずみ量なども計測したが，本稿では，変位量，段差量，およびひび割れ状況についてのみ紹介する．

なお，試験は図5に示す通りNEXCO各社やPCメーカー各社に公開して，多くの関係者の立会の元で実施した．

図4　充填作業の様子
Fig. 4　Situation of Filling Joints

図5　載荷試験時の様子
Fig. 5　Situation of Static Loading Tests

2.4　静的載荷試験の結果

各試験体の破壊荷重を表４に示す．No. 0およびNo. 2試験体は押抜きせん断破壊，No. 1試験体は界面近傍の本体コンクリートにおけるせん断破壊であった．いずれも設計荷重 Psd の４倍以上であり，十分な耐力を有することが確認できた．

表４　最大耐力試験値
Table 4　Results of Static Loading Tests

試験体 No.	試験値 (kN)	試験値 / P_{sd}	破壊モード
0	767	5. 6	押抜きせん断破壊
1	580	4. 2	界面近傍の本体コンクリートにおけるせん断破壊
2	718	5. 2	押抜きせん断破壊

各試験体の荷重変位関係を図６に示す．No. 2試験体はやや変位量が大きいものの，450kN 程度まではいずれの試験体も同様の傾向を示す．それ以降は，まず No. 1試験体において変位量が大きくなり，終局破壊に至る．No. 0および No. 2試験体はいずれも押抜きせん断破壊であったが，No. 2試験体は継手部において局所的なせん断変形が発生するため，変位量が大きい．

図７に上面段差量を示す．No. 0試験体は破壊直前まで値に大きな変化がない．No. 1試験体は530 kN 程度から急激に段差量が大きくなっており，また下面では継手部内部のひび割れが確認できたことから，継手におけるせん断伝達機能を失って，版として機能しなくなったものと思われる．No. 2試験体は局所的なせん断変形により，設計荷重レベルで 0. 1mm 以上の段差が発生している．このような段差は，防水層および舗装にとって有害である可能性があり，充填材料の配合を変更してヤング係数を大きくする必要があると考える．

試験体の破壊状況を図８および図９に示す．No. 0試験体は一般的な押抜きせん断破壊によるひび割れ状況を示している．支間方向切断面においてはひび割れが45度よりも小さい角度で進展しており，プレストレスの影響が確認できた．しかし，ひび割れは直線的でなく，PC 鋼線の位置で角度が変化している箇所がある．橋軸方向切断面においては，ループ継手部においては鉄筋が密に配置されていることから，水平方向にひび割れが進展している．

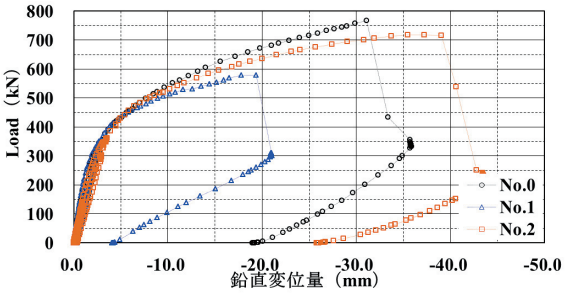

図６　荷重変位関係
Fig. 6　Load-Replacement Curve

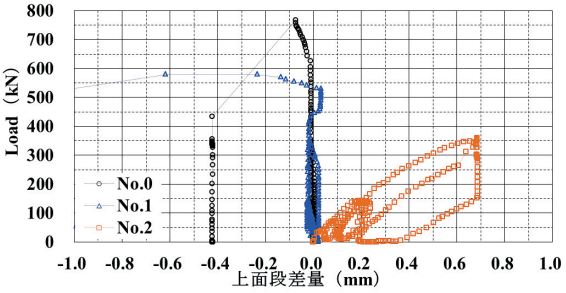

図７　荷重段差関係
Fig. 7　Load Vertical Gap at Joint Relationship

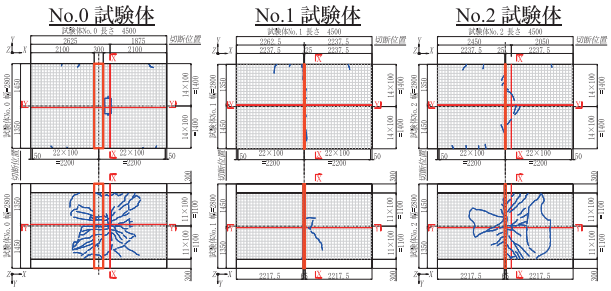

図８　試験体ひび割れ状況
Fig. 8　Cross-Sectional Observation of Cracks

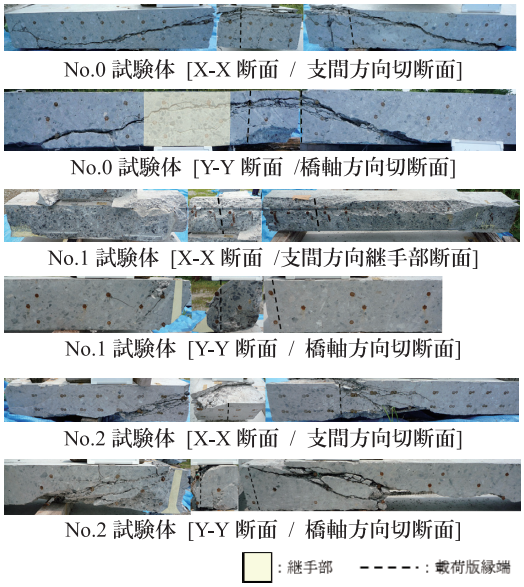

図９　試験体ひび割れ状況
Fig. 9　Surface Cracks Observation

No. 1試験体はひび割れが界面近傍に集中しており，床版本体における損傷はほとんど見られなかった．また界面を観察すると載荷版中心から500mm程度離れた位置まで上側主鉄筋が露出しており，載荷版縁端からこの鉄筋の方向にひび割れが進展したことがわかる．また支点周辺では本体コンクリートの骨材が露出しており，本体コンクリート内での引張破壊による貫通ひび割れが発生したものと思われる．

No. 2試験体は床版本体に多数のひび割れが発生しており，押抜きせん断破壊のひび割れ状況に似ている．しかしながら破壊面が左右の床版で非対称性が見られる上に，載荷側の床版においては下側かぶりコンクリートの割裂破壊範囲が広い．充填材料および近傍の本体コンクリートは部分的に損傷していたが，押抜き破壊面が継手部をまたいで進展しているため，破壊直前においても荷重の伝達機能は失われていなかったと思われる．

3 輪荷重走行試験の概要

3.1 試験体

各物性値を表５から表７に，試験体の寸法を図10に示す．試験体は５箇所の継手で接合したプレキャストPC床版（長さ7000mm，幅2800mm）であり，静的載荷試験と同様にPC８試験体に従って床版厚180mm，床版支間2.5mの２辺単純支持として設計した．各継手部には表６に示す提案継手構造やループ継手を適用した．2.4で示した通り，充填材料のヤング係数を床版本体に比べて小さく設定すると静的耐力が向上したことから，疲労耐久性についても同様に向上することが予想された．そこで継手No. 3およびNo. 5にはPCMをベースに，より低弾性に配合を見直したものを適用した．ただし，PCMを低弾性に配合見直しすると，強度低下することが予想された．そのため界面の付着せん断強度を補うために，継手No. 3では先端に40mmφの定着金具を溶接した鉄筋（アンカーバー）を突出させて界面剥離後におけるせん断抵抗力を向上させた．なお，アンカーバーの寸法はフィンガージョイントの設計方法を参照して決定し，載荷位置直下および近傍にのみ配置した．また継手No. 5では界面にエポキシ樹脂プライマーを塗布してからPCMを充填した．結果として，本体コンクリートに対して，PCMは１/３程度，低弾性PCMは１/４程度，ERMは１/10程度のヤング係数となった．

継手長さはループ継手を適用した継手No. 4を300mmとした一方で，提案継手構造を適用した継手No. 1，No. 2，No. 5は25mmとした．継手No. 3はアンカーバー周りの充填性や定着を考えて継手長さを60mmとした．各継手部界面は静的載荷試験と同様に，凝結遅延剤による目粗しを施して，さらに提案継手においては下端部を45度の面取りを施した．

表５　本体コンクリートの特性
Table 5　Concrete Properties of Slab

ヤング係数 (kN/mm²)	ポアソン比	強度（N/mm²）	
		圧縮	割裂引張
3.93×10⁴	0.21	84.9	3.70

表６　継手部の構成
Table 6　Connection Method of Each Joint

継手 No.	継手部の構成
1	ポリマーセメントモルタル（PCM）による継手
2	エポキシ樹脂モルタル（ERM）による継手
3	アンカーバーを有する低弾性PCMによる継手
4	充填コンクリートによるループ継手
5	界面にプライマーを塗布した低弾性PCMによる継手

表７　充填コンクリートおよび充填材料の特性
Table 7　Properties of Filler Materials

継手 No.	ヤング係数 (kN/mm²)	ポアソン比	強度（N/mm²）	
			圧縮	割裂引張
1	1.33×10⁴	0.21	30.7	4.10
2	0.37×10⁴	0.35	44.9	8.30
3，5	0.89×10⁴	0.24	27.7	3.60
4	3.88×10⁴	0.21	80.2	3.80

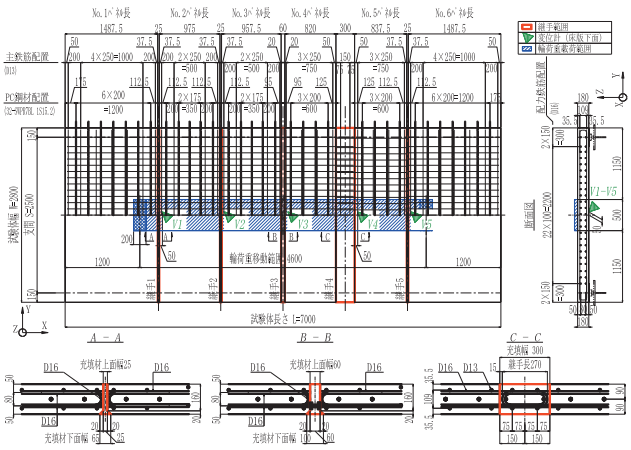

図10　試験体概要
Fig. 10　Outline of Specimen

3.2　試験設備，載荷方法，および計測項目

試験はG&U技術研究センターが所有する輪荷重走行試験機にて実施した(図11)．図10に載荷範囲および代表する鉛直変位計の設置位置を示す．接合したPC床版を，２辺単純支持となるように架台上に設置した．実橋と同様に無限連続版として挙動するように，橋軸方向における床版端部には弾性支持梁を設けた．また試験機の走行範囲において，200mm×500mmの載荷板を23ブロック設置して，その軌道上で試験機を走行させた．載荷方法には道路橋示方書に示される階段状載荷プログラムを適用した．実交通における最大荷重である157kNから19.6kNずつ４万回走行ごとに増加させることとした．各ステップで２回程度の静的載荷(157kN)を行って，大きな段差などが生じて連続性が失われていないかを確認した．

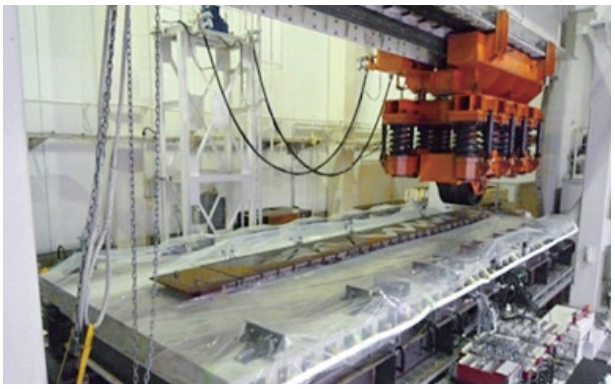

図11　輪荷重走行試験機
Fig. 11　Overview of Wheel Running Machine

3.3　継手が破壊した場合の対処方法

本試験では一度に複数の継手の疲労耐久性を検証することができるが，継手が破壊すると隣接する継手の性能にも影響を及ぼすだけでなく，走行不能となり試験が継続出来なくなる恐れがあった．静的載荷試験で確認された破壊モードから，本試験においても提案継手は継手部上面に段差が発生して，せん断破壊に至ることが予想された．そこで継手部上面に段差計を設置して，閾値を超えた場合は試験機を停止させて損傷程度を確認することとした(図12)．また継手部が破壊した場合には，弾性支持梁と高強度モルタルブロックによりバックアップをして(図13)，試験を継続することとした．挙動の確認のため，図14に示すように継手が健全な状態と，継手が破壊されて弾性支持梁を適用した状態のモデルを作成した．157kNの輪荷重を載荷した場合の弾性解析結果の例として，鉛直変位分布を図15に示す．弾性支持梁を適用することで，破壊された継手以外の継手位置における鉛直変位の変化を抑制できることが確認できた．

3.4　輪荷重走行試験の結果

図16に荷重－破壊回数と，静的載荷における活荷重たわみ量の履歴を示す．なお，活荷重たわみ量は各箇所における載荷前のたわみ量と最大たわみ量の差分である．破壊に至った荷重および載荷回数は，継手No.1が294kN/29.4万回，継手No.3が314kN/

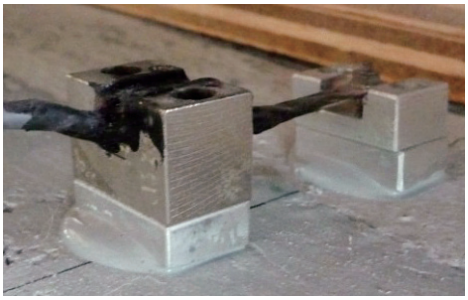

図12　継手部上面に設置された段差計
Fig. 12　Gauge to Measure Vertical Gap at Joint

図13　弾性支持梁設置状況
Fig. 13　Situation of Utilizd Support Beam

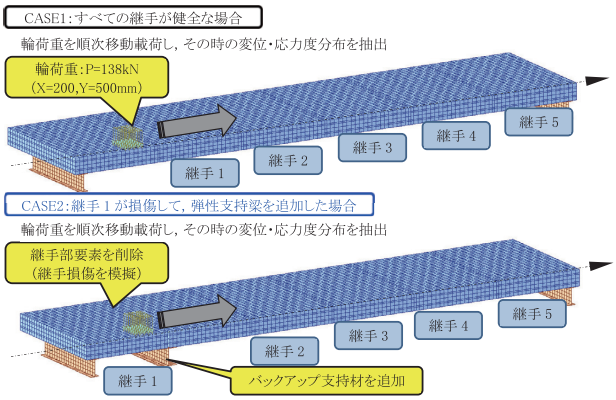

図14　解析モデル概要
Fig. 14　Outline of Analysis Model

32.3万回，継手No.5が314kN/33.4万回，継手No.2が333kN/40万回であり，充填材料のヤング係数が大きい継手から順に破壊した．提案継手構造の破壊モードは図17に示すように，いずれも界面近傍の本体コンクリートにおけるせん断破壊であった．継手No.4のループ継手は未破壊であったが，継手No.3の上部が圧縮疲労破壊したため走行継続できなくなり，353kNの載荷STEPの途中で試験終了とした．

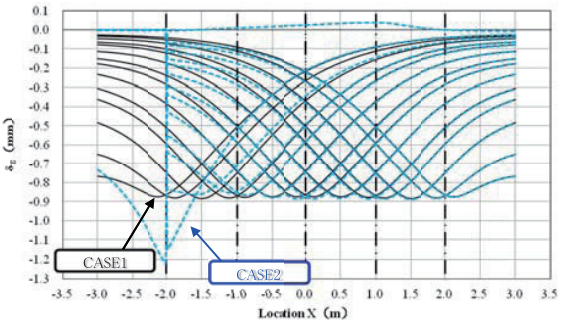

図15　橋軸方向における鉛直変位分布の比較
Fig. 15　Comparision of Deflections in the Bridge Axial Direction

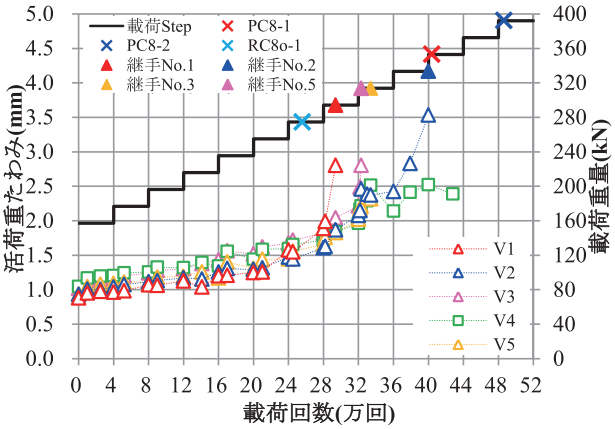

図16　荷重－破壊回数および活荷重たわみの履歴
Fig. 16　Resulting Plot and History Curve of Live Load Deflections of Each Joint

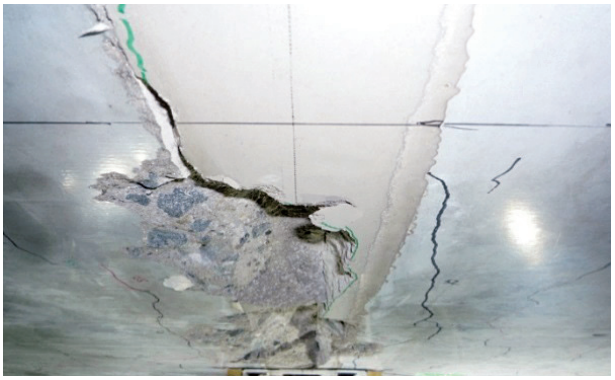

図17　継手No.1破壊状況
Fig. 17　Appearance of Fail in Joint No. 1

図16には比較対象として平成8年版の道路橋示方書で設計したRC床版(RC8o-1)とPC床版(PC8-1, 2)の試験結果[8]を掲載している．いずれの継手においてもRC8o-1より耐久性があるが，PC8-1, 2よりは劣る結果であった．ここでRC8o-1の疲労耐久性は供用年数100年相当と示されていることから，提案継手構造は十分な疲労耐久性を有するといえる．

活荷重たわみについて，継手No.1は275kN/28万回載荷後から，継手No.3，No.5は294kN/32万回載荷後から急増して破壊に至った．継手No.2は294kN/32万回載荷まで増加した後，313kN/36万回載荷終了までは変化せず，その後再び増加して破壊に至った．継手No.4は294kN/32万回載荷以降，試験終了まで変化しなかった．

図18に上面段差量の履歴を，図19にひび割れの推移を示す．継手No.1に着目するとSTEP 5の235kN載荷において，輪荷重走行位置直下で界面のひび割れが発生して，255kN/24万回載荷後ではひび割れは試験体全幅に達した．

その後上面段差量は急激に増加しており，STEP 8で充填材料の剥落に至った．他の提案継手においても継手No.1と同様に，界面のひび割れが試験体全幅に到達した後に，破壊に至っている．このことから載荷荷重が255kNを超えると，界面に静的な曲げ引張ひび割れが生じることで，早期に耐久性を失った可能性が考えられる．継手No.4ではSTEP 1においてループ筋に沿ったひび割れが発生して，STEP 6において界面に沿ったひび割れが発生した．以降はひび割れが密になっていったものの，剥

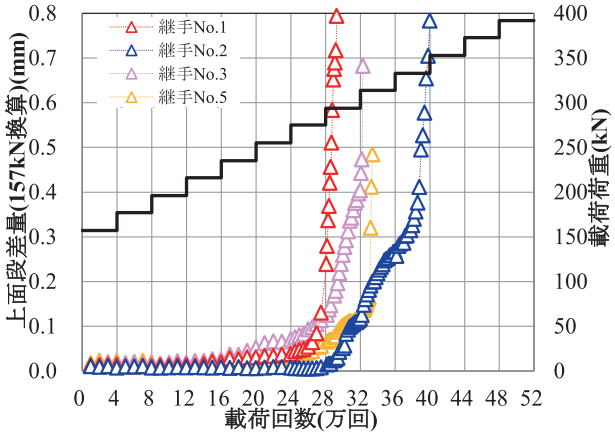

図18　上面段差量の履歴
Fig. 18　History Curve of Vertical Gap of Each Joint

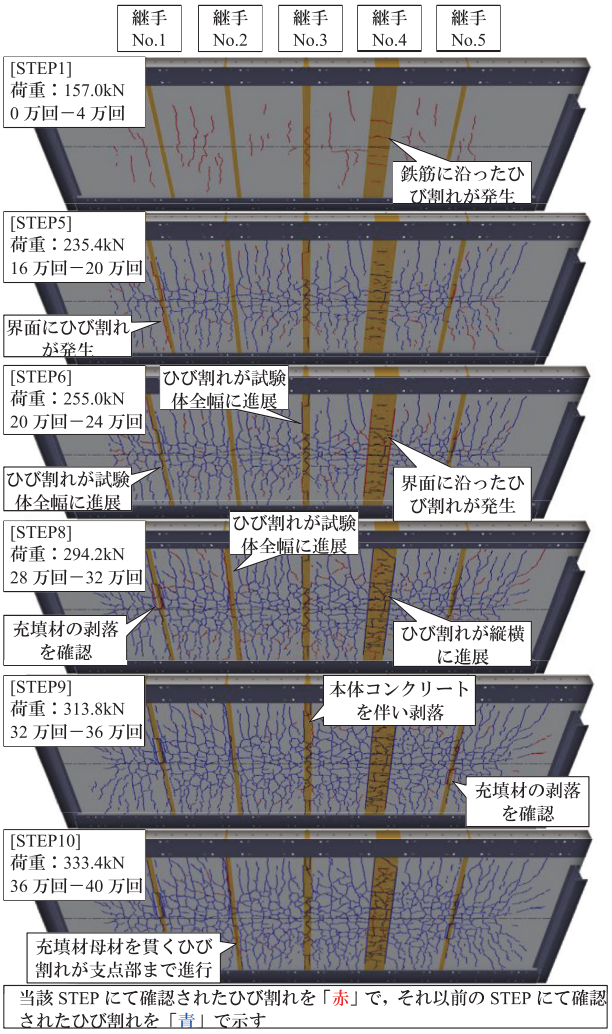

図19　ひび割れ発生推移
Fig. 19　Transition of Surface Cracks

落は見られなかった．

4 結言

本研究で得られた知見は以下の通りである．

（1）提案継手構造においても適切な充填材料を選定することで，十分な静的耐力と疲労耐久性を有した床版を構成することができる．

（2）静的載荷試験により，提案継手構造では充填材料の物性値により破壊モードを制御できる可能性が示された．本体コンクリートに対する充填材料のヤング係数比が1／3程度の場合は，界面剥離および充填材料内部の破壊が先行することで，版としての機能を失って界面近傍の本体コンクリートにおけるせん断破壊となる．また，1／100程度の場合は継手部近傍が破壊せず，充填材料のせん断変形により継手部におけるせん断伝達機能を維持して，最終的に押抜きせん断破壊となる．

（3）輪荷重走行試験により，提案継手構造では充填材料のヤング係数が小さいほど疲労耐久性が向上することが確認できた．また今回提案継手部に適用した充填材料の物性値では，いずれも界面近傍でのせん断破壊となった．

今後は材料耐久性の検証や，製作や施工における諸課題を解決することで実橋への適用を検討する予定である．

参考文献

1）高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会　報告書，2014. 1. 22
2）北慎一郎ほか：半連続プレキャスト床版に用いる充填材に関する実験的検討，土木学会第71回年次学術講演会講演概要集，I-346, 2016.
3）北慎一郎，中山逸人，櫻井信彰，前川宏一ほか：半連続プレキャスト床版における梁モデルを用いた継手構造の耐力評価検討，構造工学論文集，Vol. 63A，2017.
4）北慎一郎，中山逸人，櫻井信彰，松井繁之：半連続プレキャスト床版の継手部交番載荷試験，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39, No. 2, pp. 337-342, 2017.
5）北慎一郎，櫻井信彰，前川宏一：半連続プレキャストPC床版の静的載荷試験における再現解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40, No. 2, pp. 355-360, 2018.
6）北慎一郎，土屋智史，米津薫：PC床版の輪荷重走行試験再現解析，第45回土木学会関東支部技術研究発表会，2018.
7）北慎一郎，櫻井信彰，前川宏一：半連続プレキャストPC床版の輪荷重走行試験における解析による検証，第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2018.
8）国土交通省　国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性に関する試験，国総研資料第28号，2002. 3
9）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.
10）JIS A1108：2006. コンクリートの圧縮強度試験方法.
11）JIS A1149：2010. コンクリートの静弾性係数試験方法.
12）JIS A1113：2006. コンクリートの割裂引張強度試験方法.