

報告 断面分割施工におけるプレキャストPC床版のフェールセーフ機能を有するせん断キーを用いた縦目地構造の性能確認試験

大谷 悟司*1・石井 智大*1・石沢 彩夏*2・浦野 悟*3

要旨: 高速道路において橋軸直角方向に断面分割されたプレキャストPC床版は、モルタル目地を有した縦目地部を設け、ポストテンション方式のPC鋼材によりプレストレスを導入し一体化される。縦目地部の位置やPC鋼材の状態によっては、輪荷重に対してフェールセーフ機能が必要になる場合がある。そこで、既に提案したこの機能を有するせん断キーを用いた縦目地構造に対し、輪荷重の繰返し载荷による曲げ疲労性能および、PC鋼材の状態による押抜きせん断耐荷性能を確認するため、実橋を模擬した試験体を用いて、前者は200万回繰返し試験を、後者は押抜きせん断試験を行った。本稿は両者の試験内容、結果について報告する。

キーワード: 高速道路, 断面分割, プレキャストPC床版, 縦目地構造, フェールセーフ機能

1. はじめに

近年、高速道路における鋼橋RC床版の老朽化に伴い、プレキャストPC床版への取替工事が数多く行われている。従来、高速道路における床版取替工事は、反対車線を対面通行としながら工事車線の通行止めを行い、全断面によるプレキャストPC床版への施工が実施されている。

しかし、工事箇所が、橋梁区間が多く土工区間が少ない場合やトンネル、インターチェンジやジャンクションが隣接している場合など、全断面施工に伴う工事車線の通行止めで、反対車線の対面通行が確保できない場合がある。このような場合、床版取替は工事車線の車線規制を行い断面分割施工により行われている。断面分割施工されるプレキャストPC床版は、橋軸直角方向にモルタル目地を有した接合(以下、「縦目地」という)部を設け、ポストテンション方式の横締めPC鋼材(以下、「ポステン鋼材」という)によりプレストレスを導入し、一体化が図られている(図-1)。

このような断面分割施工における橋軸直角方向の縦目地部は、主桁上あるいは、橋軸直角方向曲げモーメントが最小となる位置に設けるのが一般的である。後者の場合、縦目地部の直下には何もない状態であり、万が一、ポステン鋼材が破断した場合に、縦目地部において、輪荷重によるせん断力に抵抗させるためのフェールセーフ機能が必要になる場合がある。

そこで、既に提案したこの機能を有するせん断キーを用いた縦目地部¹⁾に対し、輪荷重の繰返し载荷による曲げ疲労性能および、ポステン鋼材の状態

による押抜きせん断耐荷性能を確認するため、実橋を模擬した試験体を用いて、前者は200万回繰返し試験を、後者は押抜きせん断試験を行った。また、200万回繰返し試験後の縦目地部の曲げ耐力を確認するため、破壊まで静的载荷試験を行った。本稿は両者の試験内容、結果について報告する。

2. 縦目地構造

提案したフェールセーフ機能を有するせん断キーを用いた縦目地部は、断面分割されたプレキャストPC床版を一体化するポステン鋼材を配置するシースに着目して、縦目地部を含むシース部分の一部を鋳鉄(材質:FCD450)の2重管構造(外側鋼管の内側および内側鋼管の外側にねじ切りを施した鋼管)とした¹⁾。図-2に図-1で示した縦目地部のせん断キーを含む構造の詳細を示す。

輪荷重によるせん断力は、全て縦目地部を跨ぐ内側鋼管(同図のピンク色着色部分)に負担させるものとして、この鋼管の形状寸法(鋼管外径:60mm,内径44mm,厚さ8mm)を決定した。また、縦目地部の施工は、お互いのプレキャストPC床版を敷設した後に行うため、内側鋼管を回転させることで移動し、所定の位置に配置できるように構造とした。

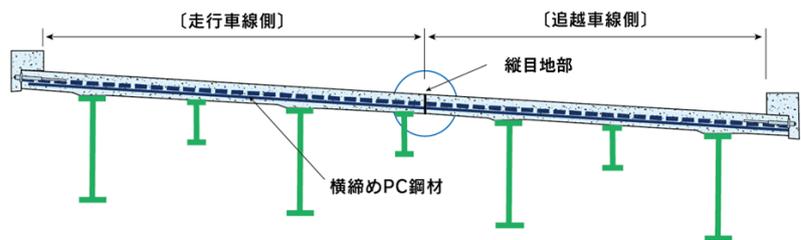


図-1 プレキャストPC床版の断面分割施工

*1 オリエンタル白石(株) 本社 技術本部 (正会員)

*2 オリエンタル白石(株) 本社 技術本部

*3 中日本高速道路(株) 八王子支社 八王子保全サービスセンター (正会員)

3. 試験体

3.1 概要

試験体一覧を表-1に示す。No.1, 2は200万回繰返し試験および、その後の静的載荷試験の試験体であり、No.1は縦目地部が無い一体構造とし No.2と同じ値のプレストレスを導入した。No.2は図-2に示した縦目地構造とし、お互いの床版を一体化させるため、ポステン鋼材にて、3.2に示す試験設計にて決定するプレストレスを導入した。なお、配筋はNo.1, 2とも同じとした。

No.3, 4は押抜きせん断試験の試験体であり、No.3, 4とも図-2に示した縦目地構造とし、No.3はお互いの床版を一体化させるため、ポステン鋼材にて、3.2に示す試験設計にて決定するプレストレスを導入した。No.4はポステン鋼材を配置せずグラウトのみ充てんした。これは縦目地でPC鋼材が破断していることを想定した。なお、配筋はNo.3, 4とも同じとした。また、押抜きせん断破壊が先行するように、床版部にはプレテンション方式のPC鋼材（以下、「プレテン鋼材」という）にて、3.2に示す試験設計にて決定するプレストレスを導入し曲げ耐力を向上させた。

3.2 試験設計

まず、現在の高速道路における一般的な床版支間、既設RC床版から取替えに用いられるプレキャストPC床版の標準的な床版厚、断面分割施工における床版の活荷重の作用状態を用いて、モデル橋梁（4主桁を有する単純鋼板橋、床版支間：3.2m、床版厚：220mm）を設定し、道路橋示方書Ⅲ（平成29年11月）に従って床版の試験設計を行った。試験設計は、死荷重および活荷重（以下、「設計荷重」という）による曲げモーメントに対して、床版では限界状態1（コンクリートの設計基準強度70N/mm²より、コンクリートの曲げ引張応力度が

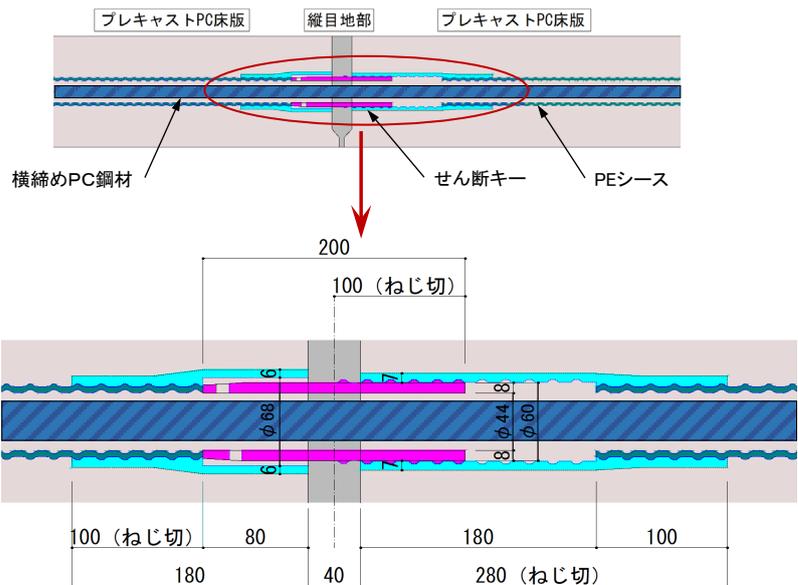


図-2 縦目地構造の詳細

3.5N/mm²以下) および、疲労に対する耐久性能（コンクリートの曲げ引張応力度が0.0N/mm²）を満足するように、縦目地部では全圧縮（最外縁の引張応力度がゼロ）となるように必要なプレストレス（プレテン鋼材およびポステン鋼材の種類、間隔）を決定した（表-1）。

次に、200万回繰返し試験体（No.1および2）は、試験設計にて決定したポステン鋼材の間隔および、200万回繰返し試験に用いる疲労試験機の幅から試験体の幅を決定し、この幅を用いて計算した設計荷重による曲げモーメントに対して、試験体の縦目地部が全圧縮となるようにポステン鋼材の緊張力を決定した。

押抜きせん断試験体（No.3および4）は、試験設計にて決定したプレテン鋼材、ポステン鋼材の間隔および、載荷試験における載荷フレームが耐えられる荷重を載荷できるスパンから試験体の幅を決定し、この幅を用いて試験設計に必要なプレストレスが、床版部および縦目地部で導入できるようにプレテン鋼材およびポステン鋼材の緊張力を決定した。

表-1 試験体一覧

No.	コンクリートの強度 N/mm ²	床版寸法		載荷方法	PC鋼材の種類および配置	
		厚さ	幅		床版部	縦目地部
		mm				
1	70	220	1,125	200万回繰返し載荷	φ28.6-3@375（ポステン鋼材）	—
2					φ28.6-3@375（ポステン鋼材）	
3			2,100	押抜きせん断載荷	φ15.2-2×10@187.5（プレテン鋼材）	φ28.65@375（ポステン鋼材）
4					φ28.6-5@375（ポステン鋼材）	
				φ15.2-2×10@187.5（プレテン鋼材）		

注) No.1は縦目地部がない一体構造、No4はポステン鋼材を配置せずグラウトのみ充てん

3.3 形状寸法および鋼材配置

試験体の長さは、No.1, 2 ではこれまでの試験²⁾を参考に 2,840mm と、No.3, 4 ではプレテン鋼材によるプレストレスが、支承位置で 100%有効となる距離 (65φ=65×15.2=988mm) を考慮して 3,900mm とした。図-3 にそれぞれの試験体の形状寸法および鋼材配置を示す。

4. 載荷試験

4.1 200万回繰返し試験

疲労試験機を用いて、2点載荷としスパンを 2400mm、等曲げ区間を 700mm とした。載荷方法を図-4 (a) に載荷試験状況の写真とともに示す。載荷荷重は活荷重による曲げモーメントが図-4 (a) で示したスパンで

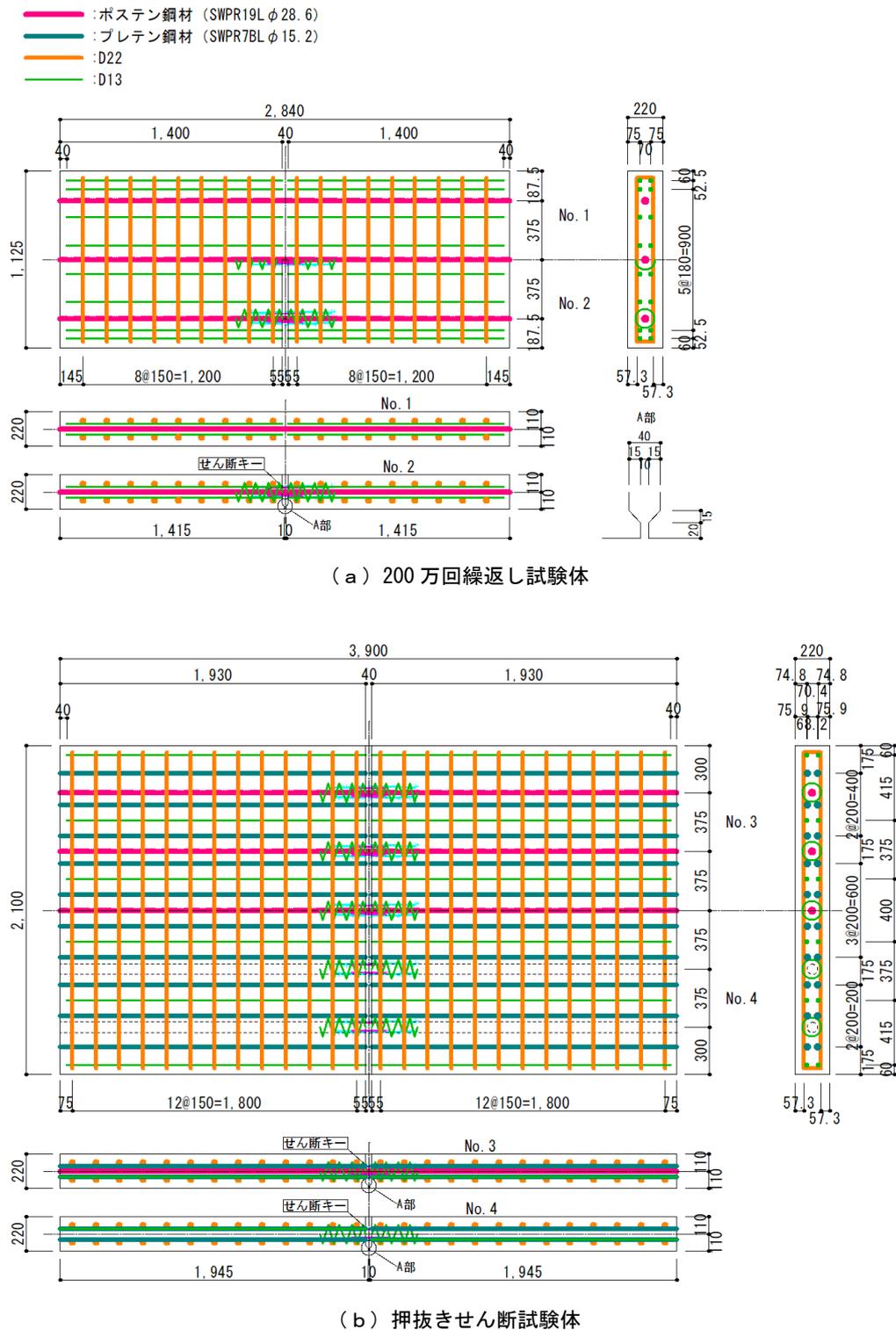
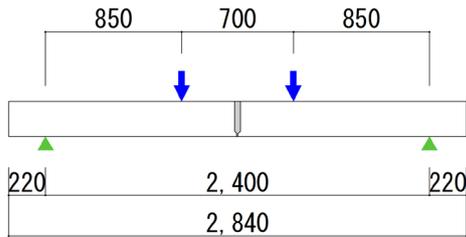
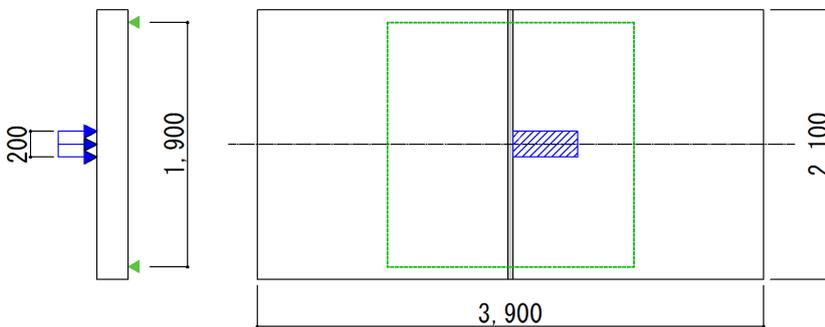
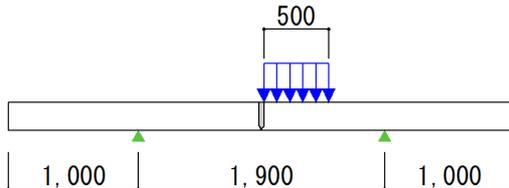


図-3 形状寸法および鋼材配置



(a) 200万回繰返し試験



(b) 押抜きせん断試験

図-4 荷重方法および荷重試験状況

得られる荷重を上限とした。また、下限荷重はこれまでの試験²⁾を参考に試験に支障のない最低荷重とした。上限および下限荷重はそれぞれ 92kN, 10kN である。繰返し回数は 200 万回とした。荷重速度は 3~8Hz の間で繰返し、試験途中で実施する静的荷重試験と、その後の繰返し荷重試験が連続的にできるように適切に設定した。繰返し試験途中の静的荷重試験は、繰返し回数が 1, 2, 3, 10³, 10⁴, 10⁵, 10⁶, 2×10⁶ 回 (以下、「各繰返し回数」という) において実施した。また、200 万回繰返し試験後の縦目地部の曲げ耐力を確認するため破壊まで単調荷重をした。測定は、変位、コンクリートひずみ、ひび割れ幅、せん断キーのひずみとした。変位計測の位置を図-5 (a) の上側の黒色矢印で、コンクリートひずみの計測位置を同図の水色四角で、ひび割れ幅の計測位置を同図の黒色線で、せん断キーのひずみ計測の位置を同図の下側の赤色四角で示す。

4.2 押抜きせん断試験

荷重フレームを用いて、荷重幅を 500mm×200mm の長方形とし、荷重位置は縦目地部と床版の境界から縦目地直角方向に 500mm とした。支承間は 1,900mm とし、4 辺単純支持とした。荷重方法を図-4 (b) に荷重試験

状況の写真とともに示す。荷重はまず、活荷重の 100kN を 3 回繰返し荷重し、その後、破壊まで単調荷重を行った。測定は、変位、せん断キーのひずみとした。変位計測の位置を図-5 (b) の上側の黒色矢印で、せん断キーのひずみ計測の位置を同図の下側の赤色四角で示す。

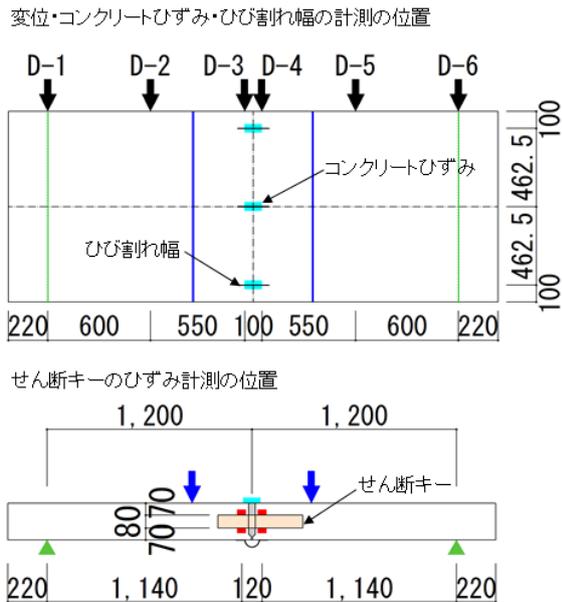
5. 試験結果

5.1 200万回繰返し試験

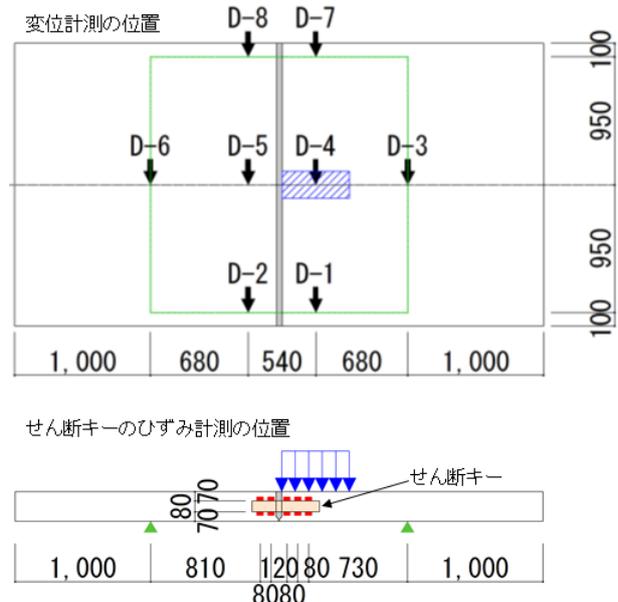
図-6 に No.1, 2 の 200 万回繰返し荷重時に実施した各繰返し回数における、下限荷重および上限荷重の変位の推移を示す。

変位は図-5 (a) に示した中央付近に設置した D-3 の値を用いた。なお、図-5 (a) の変位は、各繰返し回数における荷重試験時の支点変位を用いて補正した値 (図-5 (a) の D-1 と D-6 の平均値を D-3 の計測値から差し引いた値) とした。また、図-6 には、下限荷重および上限荷重におけるコンクリート断面のみの剛性を用いて計算した変位を破線で示す。

図-6 より、上限荷重における変位のバラツキはあるが、概ね一定で推移していることから、No.1, 2 とともに弾性挙動を示し、活荷重の 200 万回繰返しによる大きな変



(a) 200万回繰返し試験



(b) 押抜きせん断試験

図-5 測定項目および測定位置

位の変動がなく、剛性の低下は見られない。上限荷重における No.1, No.2 の変位は、コンクリート断面のみの剛性を用いて計算した変位より小さい値である。特に、No.2 の変位は No.1 に比べて小さく、提案したせん断キーを配置し、グラウトを充てんすることで、せん断キーが曲げ剛性の向上に寄与していると考えられる。

図-7 に 200 万回繰返し試験後に破壊まで静的荷重した No.1, 2 の荷重と変位の関係を示す。図-7 には、No.1, 2 のそれぞれの最大荷重を、荷重と変位の関係の曲線上に同じ色の丸点で、また設計値を用いて計算した No.1 の限界状態 3 の制限値を破線で示す。

図-7 より、No.1 と No.2 は同様な挙動を示しており、No.2 では縦目地部を有しているが、プレストレスを導入し、グラウトを充てんすることにより一体構造となっていることが分かる。No.2 は No.1 の約 1.2 倍 ($582.50/487.80=1.19$) の曲げ耐力を有している。これは、グラウトの充てんにより、せん断キーが曲げ耐力の向上に寄与していると考えられる。これは、図-6 で示した 200 万回繰返し試験における No.2 の上限荷重の変位が No.1 よりも小さかった結果からも同様な傾向であると言える。

No.1, 2 のそれぞれの破壊荷重は、道路橋示方書Ⅲに示されている No.1 の限界状態 3 の制限値を上回っていた。

5.2 押抜きせん断試験

図-8 に荷重と載荷点直下位置の変位の関係を示す。変位は図-5 (b) で示した載荷点直下の D-4 の値である。なお、図-8 の変位は、載荷試験時の支点変位を用いて補正した値 (図-5 (b) の D-3 および D-6 の平均

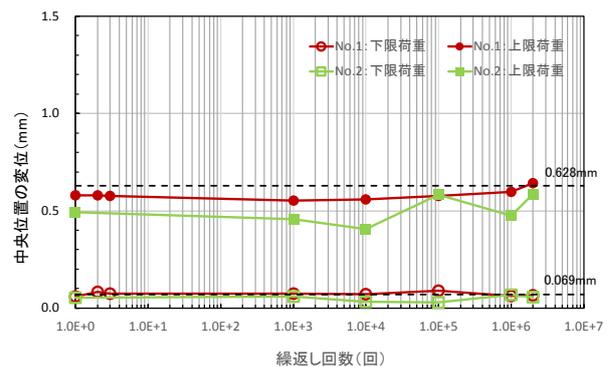


図-6 変位と繰返し回数との関係

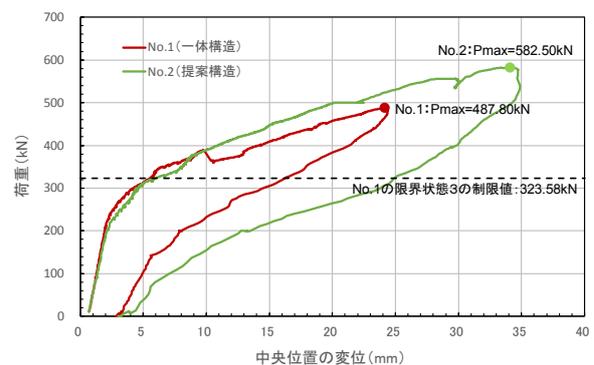


図-7 荷重と変位の関係

値を D-4 から差し引いた値)とした。また同図には、No.3, 4 のそれぞれの最大荷重を、荷重と変位の関係の曲線上に同じ色の丸点で、また設計値を用いて計算した押抜きせん断力の制限値を破線で示す。

図-8 より、No.3, 4 とも荷重の増加とともに変位が

増加し、No.3 は最大荷重 1,407.4kN で変位 4.84mm、試験体 No.4 は最大荷重 1,064.6kN で変位 8.83mm であった。最大荷重に達した後は、No.3 は荷重が急激に減少し、No.4 は緩やかに荷重が減少し、両者とも押抜きせん断により破壊した。また、いずれの試験体の破壊荷重は、道路橋示方書Ⅲに示されている押抜きせん断力の制限値を上回っていた。

破壊までの荷重の前に、活荷重 100kN で 3 回の繰返し荷重を行った。No.3, 4 とも変位やせん断キーのひずみが急激に変化するような現象は確認されなかった。また、縦目地部および床版本体のひび割れや、縦目地部のずれの発生も確認されなかった。

図-9 に活荷重時におけるせん断キーのひずみ分布を示す。ひずみの符号はプラスが引張を、マイナスが圧縮を示す。また、せん断キーと載荷位置の関係が分かるようにせん断キーの模式図と載荷位置（図中の黒色矢印部）を示す。

図-9 より、活荷重におけるせん断キーのひずみ分布は、バラツキはあるが No.3, 4 とも一様であり、局部的にひずみが集中するような現象は見られない。No.3, 4 のせん断キーのひずみは、載荷されていない箇所から徐々に載荷点側に行くほど引張側に大きくなっている。せん断キーにおけるフェールセーフとして機能するのは、図-2 で示した内側鋼管であり、図-9 のひずみ分布より、No.3, 4 のそれぞれの内側鋼管の活荷重時におけるひずみを推定すると 5μ 程度であり、設計値を用いてこの値から求めた応力度は 0.5N/mm^2 と小さい値である。

6. まとめ

プレキャスト PC 床版の断面分割施工における橋軸直角方向のモルタル目地を有した接合に対して、既に提案したフェールセーフ機能を有するせん断キーを用いた縦目地部に対し、その曲げ疲労性能および、押抜きせん断耐荷性能を確認するため実施した、200 万回繰返し試験およびその後の破壊までの静的荷重試験、押抜きせん断試験にて得られた知見は以下のとおりである。

(1) 200 万回繰返し試験および破壊までの静的荷重試験

- ・上限および下限荷重における変位のバラツキはあるが、弾性挙動を示しており活荷重の 200 万回の繰返し作用による剛性の低下は見られなかった。
- ・グラウトにて一体化されている場合には、せん断キーは曲げ剛性および曲げ耐力の向上に寄与する。
- ・提案した縦目地構造の破壊荷重は、一体構造の限界状態 3 の制限値を超えるものであった。

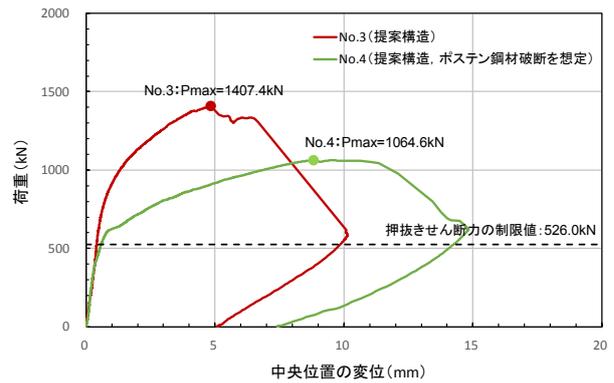


図-8 荷重と変位の関係

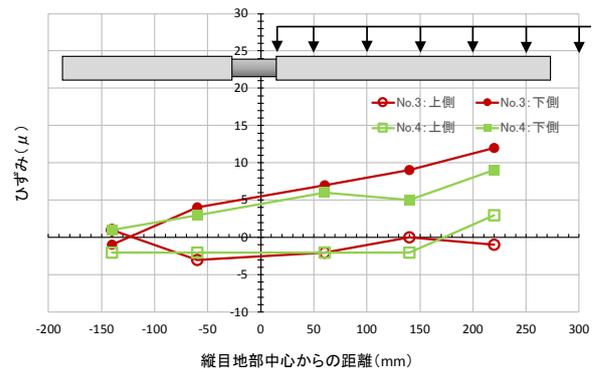


図-9 せん断キーのひずみ分布

(2) 押抜きせん断試験

- ・活荷重の 3 回の繰返し荷重においては、荷重や変位の急激な変化はなく、ひび割れや縦目地部のずれの発生はなかった。
- ・活荷重におけるせん断キーのひずみは弾性範囲内であり、引張応力度はほとんど発生していなかった。
- ・提案した縦目地構造の破壊荷重は押抜きせん断力の制限値を上回っていた。

以上より、提案したフェールセーフ機能を有するせん断キーを用いた縦目地構造は十分安全であり、有効なフェールセーフ機能を有することが確認できた。

最後に、まとめに際しご意見を賜った高速道路総合技術研究所橋梁研究室の長谷室長に感謝いたします。

参考文献

- 1) 齋藤ら、フェールセーフ機能を有する断面分割施工による床版取替工法の解析による検討、土木学会第 73 回年次学術講演会、VI-239, pp.477-478, 2018.8
- 2) 例えば阿部ら、新しい RC 接合構造を用いたプレキャスト PC 床版に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol.50, No.1, 2008.1