

## セラミックヘッドアンカーを用いた継手構造の界面形状に関する実験的検討

鹿島建設(株)	正会員		○高橋	周斗
鹿島建設(株)	正会員	博士(工学)	新井	崇裕
鹿島建設(株)	正会員	工修	斎藤	公生
鹿島建設(株)		博士(工学)	古市	耕輔

Abstract : A joint structure using a CHA (Ceramic Head Anchor) was developed for the purpose of improving the durability of the joint structure between precast prestressed concrete deck slabs for the replacement. Last year, we reported this structure has sufficient fatigue durability by cyclic loading test and the effect of reducing the joint opening of the corrugated interface. In this paper, first, optimal corrugated shape of the interface was decided by carrying out elemental test. Second, a beam member that has the joint part and CHA was made, and cyclic loading test was carried out to confirm the effect of reducing the aperture of the interface. As results, this joint structure has reducing joint opening by making shapes with an angle of 45 degrees and a height of 30 millimeters.

Key words : Precast deck slab , Joint , Ceramic , Durability

## 1. はじめに

床版の取替え工事において、品質向上および工期短縮の観点から、プレキャスト PC 床版（以下、PCa 床版と称す）が多く採用されている。PCa 床版の接合部では、交通荷重の繰返し载荷に対する耐疲労性と、経年劣化に対する耐久性を有する継手構造が求められる。これに対し、筆者らは、高い耐久性を有し、鉄筋の定着力を高めることができるセラミック製定着体（以下、セラミックヘッドアンカー、CHA と称す）を用いた CHA 継手を考案した。これまで、本継手構造に関する耐疲労性ならびに PCa 床版の接合部界面（以下、界面と称す）を波型形状にすることで、界面の目開き幅の低減効果が期待できることが明らかになっている<sup>1)</sup>。これに対し、本検討では、まず、同継手構造の波型界面による目開き幅の低減効果をさらに高めるため、要素試験により界面の最適な形状を検討した。次に、CHA 継手および最適化した界面形状を有する梁部材を対象に、定点疲労試験ならびに疲労試験後の静的漸増载荷試験により界面の目開き幅の低減効果を確認した。

## 2. CHA継手の概要

本継手構造は、写真-1に示すように、CHAを鉄筋の機械式定着体として用いた構造である。かぶりが鉄筋よりも相対的に小さくなる定着部に高耐久なCHAを使用するため、配筋などの設計の自由度が高くなる。CHAは、内部がねじ節鉄筋の形状に合わせたねじ形状となっており、CHAのねじ孔にエポキシ樹脂系接着剤を充填し、鉄筋先端にねじ嵌合することで、同鉄筋とCHAを一体化する。また、本継手構造は、既往技術の機械式定着体付き重ね継手<sup>2)</sup>と同様に、鉄筋の付着力と機械式定着体が受け持つ支圧抵抗力とで定着される構造であり、定着長は定着体の支圧面間の距離で定義した。

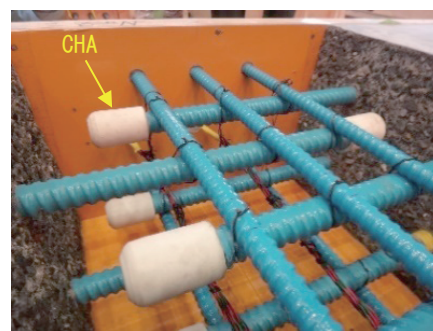


写真-1 CHA継手

### 3. 界面形状の最適化検討

既往の検討<sup>1)</sup>では、**図-1**に示すような波型の界面形状を検討しており、角度が45度、波高が20mmである波型界面の目開き幅の低減効果について検証した。本検討では、まず、上述の界面形状を基準とし、界面の角度および波高の異なるケースについて要素試験（試験Aと称す）を実施した。次に、試験Aの結果により選定したケースを対象に供試体数を増やして、同様の試験（試験Bと称す）を実施し、界面の最適な形状を検討した。

#### 3.1 要素試験概要

供試体は、**図-2**に示すようなPCa床版の接合部界面を模擬した無筋の角柱供試体（150×150×530mm）とし、**写真-2**に示す荷重装置により3等分曲げ荷重を行った。実施工を想定するため、床版コンクリートは一般的なコンクリート、間詰めコンクリートは高炉スラグ微粉末（比表面積6000cm<sup>2</sup>/g）を混和させ、いずれのコンクリートも試験時の圧縮強度が51~54N/mm<sup>2</sup>であった。また、コンクリート間の界面は洗出し表面処理材による打継目処理を行った。

試験ケースは、**表-1**に示すように、界面を持たないケース（Ref. 供試体）、界面形状が直線（以下、直型と称す）のケース（S-Type 供試体）、ならびに角度と波高をパラメータとした波型界面を有するケースの全7ケースとした。波型の角度は45度を基準として28度および76度に設定し、波高は実構造物における床版の製作を考慮して10mm~30mmの範囲で設定した。

#### 3.2 波型界面の角度および波高の違いが破壊形態および耐力に及ぼす影響

各ケース供試体数を3体として実施した曲げ試験の結果を**図-3**に、試験終了後の破壊形態の分類を**写真-3**に示す。破壊形態は、母材で破壊（母材破壊）したケース、界面位置から発生したひび割れが界面を沿うことなく進展して破壊（界面破壊）したケース、ならびに界面沿いにひび割れが進展して破壊（界面沿い破壊）したケースに大別された。S-Typeを除く各ケースにおいて、界面沿い破壊が生じた供試体は耐力が小さい値となり、界面破壊が生じた供試体は耐力がばらつき、安定しない結果となった。これらに対し、母材破壊が生じた供試体は界面破壊が生じた供試体とは異なり、安定して大きい耐力を示した。

波型界面の波高が同一で角度が異なるケース（W-28-20, W-45-20, およびW-76-20 供試体）の破壊形態を比較すると、W-28-20 供試体では供試体3体のうち2体で界面破壊、1体で**写真-3 (c)**に示すような界面沿い破壊が生じたのに対し、他の2ケースでは3体中1体が母

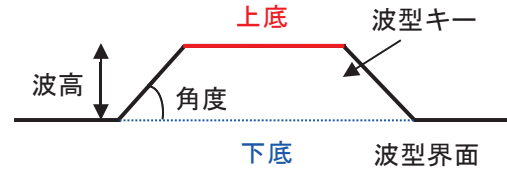


図-1 継手部の波型界面の形状

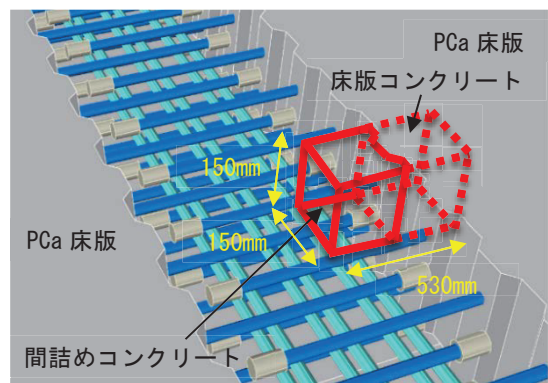


図-2 PCa 床版の接合部

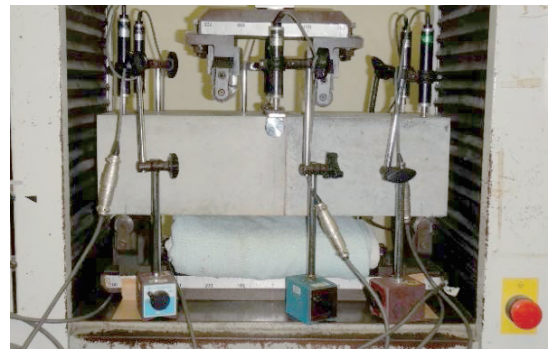


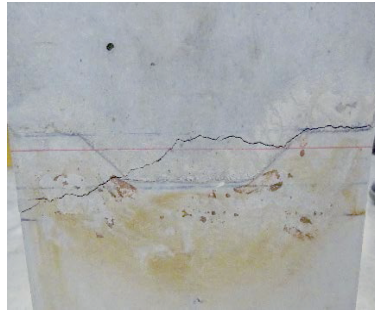
写真-2 要素試験の実施状況

表-1 試験ケース一覧（試験A）

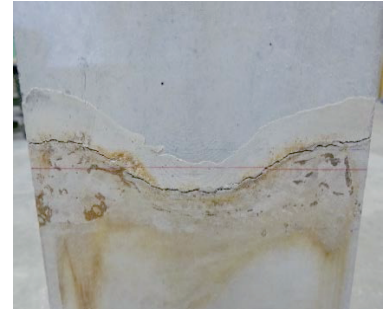
供試体名	界面形状	角度 (度)	波高 (mm)
Ref.	—	—	—
S-Type	直型	—	—
W-28-20	波型	28	20
W-45-20		45	
W-76-20		76	
W-45-10	波型	45	10
W-45-30			30



(a) 母材破壊 (W-76-20)



(b) 界面破壊 (W-45-20)



(c) 界面沿い破壊 (W-28-20)

写真-3 供試体引張力作用側に発生した破壊形態の分類

材破壊, 2体が界面破壊であった。この結果から, 角度が小さいと, 界面沿い破壊が生じやすくなる傾向が見られた。

波型界面の角度が同一で波高が異なるケース (W-45-10 および W-45-30 供試体) を比較すると, W-45-10 供試体では界面沿い破壊が生じたケースがあったのに対し, W-45-30 供試体では3体のうち2体が母材破壊し, 安定して大きい耐力を示した。これは, 波高が大きくなることで, コンクリート間の付着面積が相対的に大きくなり, 界面の付着力が向上したためと考えられる。

### 3.3 界面形状の最適化に関する検討

試験Aの結果から, 波型界面の角度は界面沿い破壊を防ぐといった観点から45度以上, 波高は安定して大きな耐力を示す30mmとし, 供試体数を8体として3.2と同様の試験(試験B)を実施した。なお, W-45-30 供試体は試験Aで検証した3体に加えて5体, W-71-30 供試体(波高を30mmとして, 図-1に示す波型キーの上底および下底が区切りの良い値となるように設定し, 角度を71度とした)は新たに8体製作した。

試験Bの結果を図-4に示す。W-71-30 供試体では1体を除いたすべての供試体で界面破壊が生じ, 耐力にばらつきが生じた。これに対し, W-45-30 供試体では, 供試体8体のうち3体で母材破壊が生じ, W-71-30 供試体と比べて耐力が大きい結果となった。また, W-45-30 供試体の界面破壊が生じたケースでは, W-71-30 供試体の界面破壊したケースと比べて耐力が安定する結果となった。これは, 界面破壊が生じる場合において, ひび割れが界面に沿って進展しようとするのに対し, 角度が大きいことにより波型界面の角に引張応力が集中しやすくなったためと考えられる。

以上の結果より, 波型界面の角度が小さいと界面沿い破壊が生じやすくなること, ならびに角度が大きいと波型界面の角に引張応力が集中することによる耐力の低下が懸念されることから, 角度を45度に決定した。また, 波高を高くすることで界面の付着力を向上させる効果があることから, 波高を30mmに決定した。

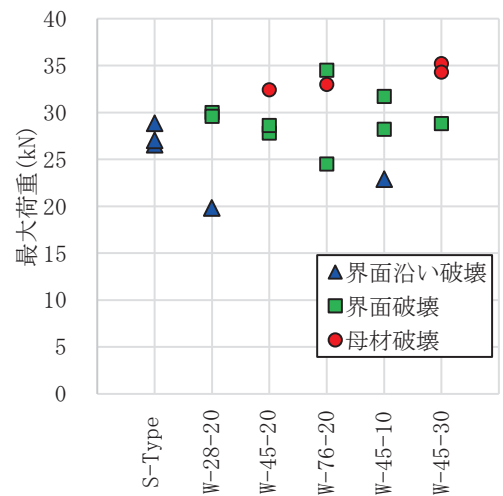


図-3 試験結果 (試験A)

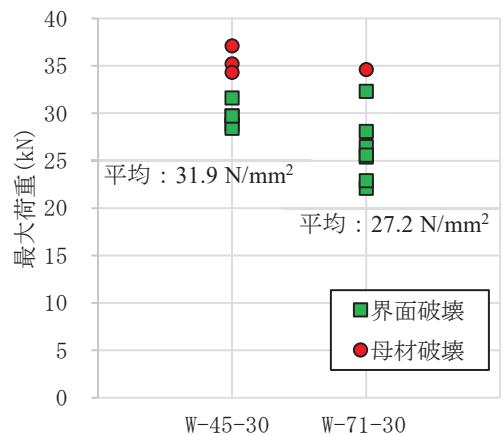


図-4 試験結果 (試験B)

4. 定点疲労試験および静的漸増载荷試験

前述の検討により決定した角度45度、波高30mmの波型界面およびCHA継手を有する梁部材を対象に、定点疲労試験ならびに疲労試験後の静的漸増载荷試験を行い、界面形状が異なるケースと比較することで、決定した波型界面による目開き幅の低減効果を確認した。

4.1 試験体概要

試験ケースを表-2に示す。ケースAおよびBは、これまでに検証した試験体<sup>1)</sup>であり、ケースCは、要素試験により最適化した波型界面を有する試験体である。

試験体図を図-5に示す。試験体は、2体のPCa床版をCHA継手および間詰めコンクリートで接合した梁試験体とし、橋軸方向にSD345, D19のねじ鉄筋を、橋軸直角方向にSD345, D13のねじ鉄筋を配置した。継手部における橋軸方向鉄筋の先端には、前述した方法によりCHAを設置した。

また、PCa床版には要素試験と同配合のコンクリートを、間詰めコンクリートにはひび割れ発生防止および耐久性の観点から膨張材（添加量30kg/m<sup>3</sup>）および高炉スラグ微粉末（比表面積6000cm<sup>2</sup>/g）を混和させたコンクリートを使用し、両コンクリートの界面は要素試験と同様の方法で打継目処理をした。

4.2 試験方法

载荷位置を図-5に示す。写真-4に示す载荷装置に試験体を設置し、等曲げ区間700mm、せん断スパン900mmとして、2点で载荷した。試験は、曲げひび割れが発生するまでの挙動を確認するため、定点疲労試験前に、引張側橋軸方向鉄筋に許容引張応力（120N/mm<sup>2</sup>）が生じる荷重である57.1kNまで静的な载荷を3回実施し、その後に疲労試験を開始した。ここで、設定した荷重は、道路橋示方書<sup>3)</sup>で定められた、繰り返し作用する活荷重に対する鉄筋の引張応力度の制限値に基づいて設定した。疲労試験では、上限荷重を前述の载荷時と等しい荷重である57.1kNに、下限荷重を同鉄筋に40N/mm<sup>2</sup>の引張応力が生じる荷重である18.6kNに設定し、200万回繰返し载荷を行った。また、疲労試験後、終局までの挙動、ならびにPCa床版-間詰めコンクリート間の界面付近における破壊形態を確認するため、静的漸増载荷を行った。

計測位置を図-5に示す。変位計によりスパン中央鉛直変位を、ひずみゲージによりコンクリート圧縮側表面および橋軸方向鉄筋のひずみを計測した。また、界面の目開きについては、π形変位計を東西それぞれの界面の南北方向に2か所ずつ設置した。

表-2 試験ケース\*

ケース名	界面形状
ケース A	直型（界面が直線）
ケース B	波型(角度 45 度, 波高 20mm)
ケース C	波型(角度 45 度, 波高 30mm)

\*ケース A およびケース B は、先の検証で報告済み

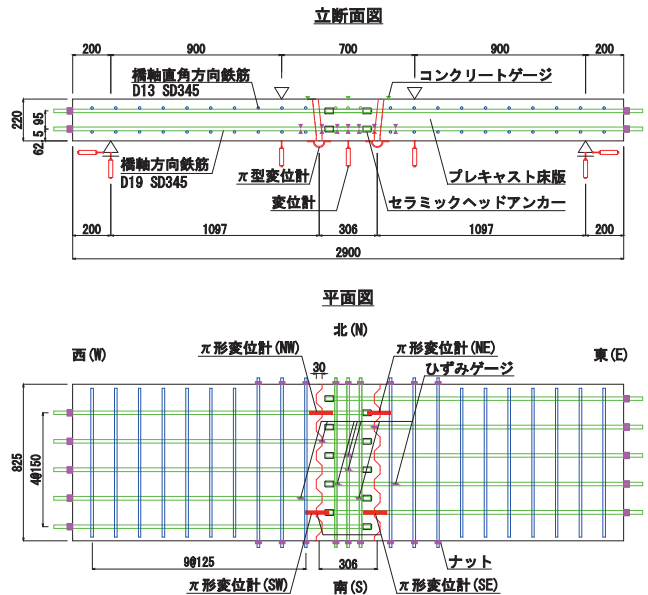


図-5 試験体概要および载荷・計測位置



写真-4 試験実施状況

4.3 試験結果

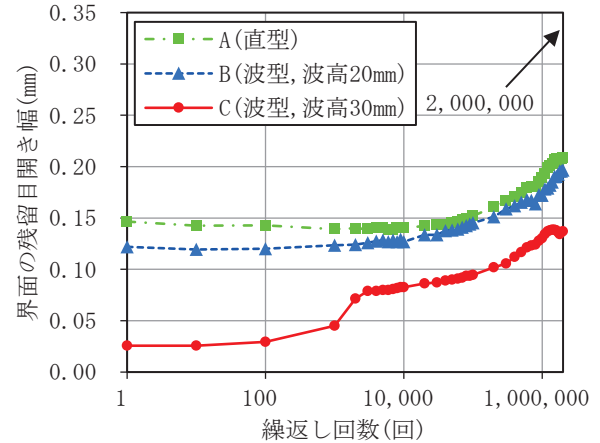
(1) 疲労試験前後の界面目開き幅

疲労試験前後の界面における残留(下限荷重18.6kN 載荷時での)目開き幅を表-3に、疲労試験中の界面の残留目開き幅と繰返し回数との関係を図-6に示す。目開き幅は、南北に設置したπ形変位計の計測値の平均値である。なお、図-6(b)中のケースCの界面目開き幅について、後述するように発生したひび割れが、設置したπ形変位計の設置位置を外れて進展したため、南側の計測値(SW)のみを示す。

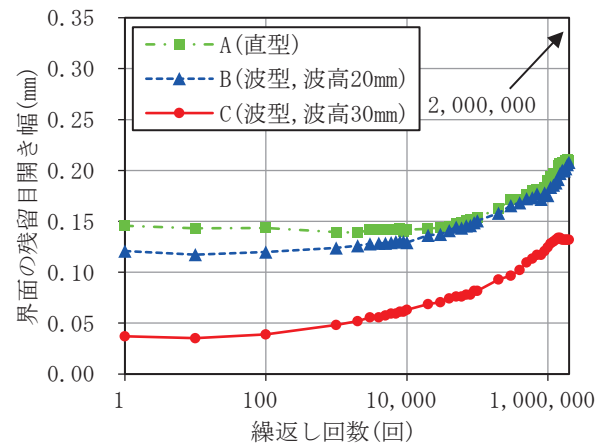
全てのケースにおいて疲労試験前の静的載荷時に、界面で曲げひび割れが発生した。疲労試験前の静的載荷終了時における界面の残留目開き幅は、ケースA(直型)が0.15mm程度であるのに対し、ケースB(波高20mm)で0.12mm程度、ケースC(波高30mm)で0.04mm程度となり、それぞれ0.03mm、0.11mmの目開き幅低減効果が見られた。また、繰返し載荷中に全ケースで目開き幅の進展が見られたが、疲労試験終了後のケースBの目開き幅が0.21mm程度であるのに対し、ケースCは0.14mm程度であり、界面を波高30mmの波型形状にすることで、繰返し載荷終了後における目開き幅が0.07mm程度低減することを確認した。これは、前述した要素試験で得られた結果と同様に、波型界面の波高を高くすることで、直型界面および波高の小さい波型界面に比べて、PCa床版と間詰めコンクリートとの界面の延長が相対的に長くなり、接合部の表面積が大きくなることで、界面の付着強度が向上したためと考えられる。

(2) 疲労試験中の界面目開きの進展

ケースCの繰返し載荷中において、ひび割れが界面に集中したものの、π形変位計(SE)付近では、写真-5に示すように波型キーの下底部をひび割れが進展した箇所が見られた。これに対し、ケースBでは、界面に沿ってひび割れが進展したことから、波高を大き



(a) 東側



(b) 西側

図-6 疲労試験中の残留目開き幅



写真-5 π形変位計(SE)付近のひび割れ発生状況

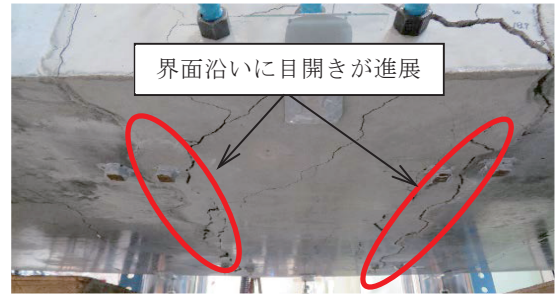
表-3 試験時のコンクリート圧縮強度および試験結果

ケース	試験時のコンクリート		最大荷重		試験値 計算値	継手部界面の残留目開き幅 (mm)			
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		(kN)			疲労試験前		疲労試験後	
	床版	継手部	試験値	計算値		西側	東側	西側	東側
A	51.7	50.5	248	234	1.06	0.15	0.15	0.21	0.21
B	53.5	58.9	249	235	1.06	0.12	0.12	0.21	0.20
C	56.6	67.4	261	243	1.07	0.04	0.03	0.13	0.14

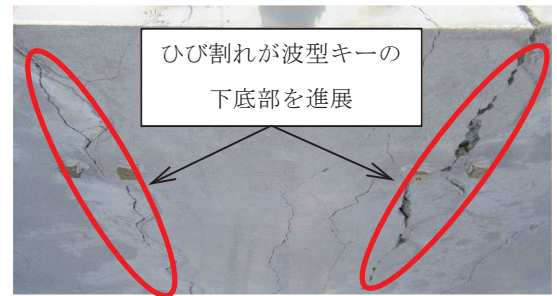
くすることで、ひび割れの進展に影響することを確認した。なお、**図-6 (a)**に示すケースCにおいて、繰返し回数が1000回を超えたあたりで界面目開き幅の値が急に上昇しているのは、その後の目開き幅の上昇が緩やかであることから、目開きの進展ではなく骨材の噛み合いによる一時的な上昇であると判断した。また、疲労試験中に疲労破壊が生じなかった。

**(3) 疲労試験後の静的漸増载荷試験における破壊性状**

静的漸増载荷試験における最大荷重ならびに継手が無いものとしてコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>に基づいて算定した計算値を**表-3**に、荷重とスパン中央変位との関係を**図-7**に示す。全てのケースにおいて、計算値をやや上回る曲げ耐力を示した。また、**写真-6**に示すように、ケースBの目開きが波型界面に沿って進展したのに対し、ケースCでは、波型キーの下底部をひび割れが進展した箇所が見られた。



(a) ケース B (波高 20mm)



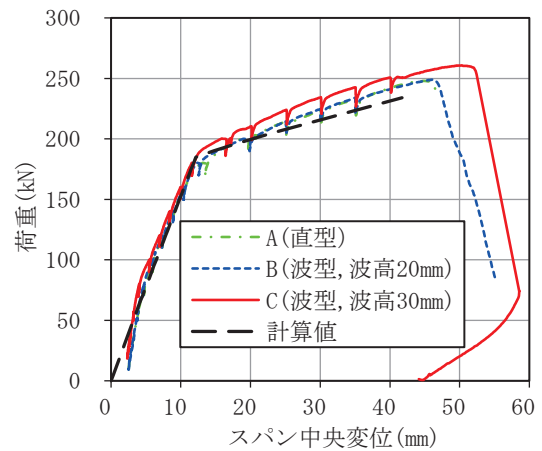
(b) ケース C (波高 30mm)

**写真-6 静的载荷終了時の試験体引張面側のひび割れ発生状況**

**5. おわりに**

本検討により得られた知見を以下に示す。

- (1) 要素試験により、接合部における波型界面の角度が小さい場合は界面沿い破壊が生じやすくなること、ならびに角度が大きい場合は耐力および安定性が低下することを確認した。
- (2) 要素試験により、波高を高くすることで界面の付着力が向上することを確認した。
- (3) 定点疲労試験により、PCa床版の接合部の界面を角度45度、波高30mmの波型形状にすることで目開き幅を低減できることを確認した。
- (4) 定点疲労試験および疲労試験後の静的载荷試験により、CHA継手を有する梁部材の一体性と曲げ耐力が十分であることを確認した。



**図-7 荷重-スパン中央変位関係**

本検討では、これまでの検討に加え、PCa床版の接合部における波型界面が目開き幅を低減させることを確認した。今後、FEM解析による波型界面の目開きに関する破壊メカニズムの検討、ならびに本継手構造を有する床版試験体を対象とした輪荷重走行試験を行い、本技術の実用化を目指す予定である。

**参考文献**

- 1) 新井崇裕ら：セラミックヘッドアンカーを用いたプレキャスト床版用の継手構造の開発，第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，pp. 383～386，2018年
- 2) M. K. Thompson, A. L. Ledesma, J. O. Jirsa, J. E. Breen, and R. E. Klingner : Anchorage Behavior of Headed Reinforcement, pp. 34～36, 2003年
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書 コンクリート橋・コンクリート部材編，2017年
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，2017年