

セラミックヘッドアンカー継手及び床版接合部の界面形状に関する実験的検討

An Experimental Study on a Joint Structure Using a Ceramic Head Anchor and the Interface Shape between Deck Slabs

高橋 周斗 一宮 利通 新井 崇裕¹⁾
横田 祐起 小嶋 進太郎

要 約

既設 RC 床版をプレキャストプレストレストコンクリート床版 (PC 床版) へ取り替えるリニューアル工事において、床版間の接合部では、耐久性及び耐疲労性の高い継手構造が求められる。これに対し、高耐久で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 継手を考案している。本研究では、界面の目開きに対する抵抗性を向上させるための PC 床版と間詰めコンクリート間の界面を波型形状とした接合方法について検討した。まず、要素試験により界面目開きの抵抗性の効果が最も発揮される波型形状を検討した。次に、CHA 継手及び検討した波型界面を有する梁部材を対象に定点疲労試験を実施し、波型界面による目開き幅低減効果を確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. セラミックヘッドアンカー継手
- III. 波型界面形状の最適化検討
- IV. 界面の目開きに対する抵抗性の検証
- V. おわりに

I. はじめに

高度経済成長期に建設された道路橋の RC 床版は、重交通や老朽化に起因した劣化が顕在化しており、特に、重交通によって生じたひび割れから侵入する劣化因子が構造物の劣化速度を加速させていることが問題視されている。近年、これらの劣化した RC 床版を対象に、工期短縮と品質向上の観点から PC 床版に取り替える工事が進められている。

道路橋床版は、交通荷重に対する耐疲労性と、経年劣化に対する耐久性が求められる。特に、PC 床版同士の接合部では、鉄筋の継手と間詰めコンクリートにより断面力を確実に伝達するための一体性が重要である。また、PC 床版と間詰めコンクリートの界面は目開きが発生しやすいため、水や塩化物などの劣化因子の侵入に対して目開き幅を抑えることが重要である。

これらの点に着目し、耐久性が高く継手の定着力を高める

ことができる CHA 継手を考案している。本研究では、PC 床版と間詰めコンクリートの界面目開き幅を低減させるために界面を波型形状とした接合方法について検討した。本報では、本技術の概要、波型界面の検討結果、並びに CHA 継手を適用した梁の定点疲労試験の結果について報告する。

II. セラミックヘッドアンカー継手

1. 概 要

本継手構造は、Photo 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。セラミック製の機械式定着体を用いた構造の類似技術として、後施工セラミック定着

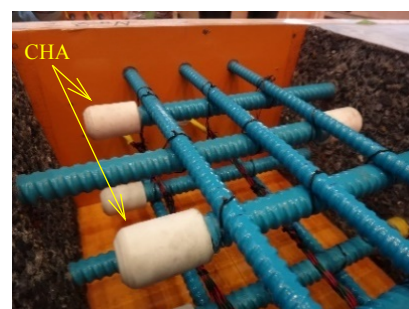


Photo 1 CHA 継手
(Joint Structure Using Ceramic Head Anchor)

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード: プレキャスト PC 床版, 継手, 波型界面, セラミック, 耐久性

Keywords: precast prestressed concrete deck slab, joint, corrugated interface, ceramic, durability

型せん断補強鉄筋¹⁾があり、定着長を低減できる機械式定着技術として実績がある。CHA 継手は、既往技術の機械式定着体付き重ね継手²⁾と同様に、鉄筋の付着力と定着体が受け持つ支圧抵抗力とで定着される構造である。

2. CHA 継手の特長

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。既往技術の機械式定着体付き重ね継手²⁾は、鋼製の定着体を工場で鉄筋に設置しておく必要があるのに対し、CHA は現場あるいはプレキャスト工場での設置も可能であるため、床版製作の自由度が高くなる。また、かぶりが鉄筋よりも相対的に小さくなる定着体にセラミックを使用するため、定着体の防錆処理が不要である。

III. 波型界面形状の最適化検討

1. 波型界面の特長

検討する PC 床版と間詰めコンクリートの波型界面は Fig.1 及び Fig.2 に示すような、角度と波高を有する波型キーが連続した形状である。界面を波型形状にすることにより、PC 床版と間詰めコンクリートとの界面の付着面積を相対的に大きくすることで界面の目開きに対する抵抗性の向上を図った。

2. 試験の概要

波型界面の形状について、床版接合部における界面の目開きの抵抗性が高くなる角度及び波高を決定するため、まず、これらをパラメータとした要素試験（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、同様の試験（試験 b と称す）を実施した。

供試体は、PC 床版（以下、床版部と称す）の接合部のうち Fig.2 に示す範囲を模擬した角柱供試体（150×150×530mm）とし、Photo 2 に示す載荷装置により 3 等分曲げ載荷を実施した。床版部に使用するコンクリートはプレキャスト床版に一般的に使用されるコンクリート、間詰めコンクリートは高炉スラグ微粉末（比表面積 6000cm²/g）を混和させたものを使用した。試験 a 及び試験 b の実施時において、いずれのコンクリートも圧縮強度が 51～54N/mm²であった。また、コンクリート間の界面は洗出し表面処理剤による打継目処理を行った。

試験ケースは、Table 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)、並びに角度と波高をパラメータとした波型形状の界面を有するケースの全 7 ケースとした。波型形状の角度は 45 度を基準として 28 度及び 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。

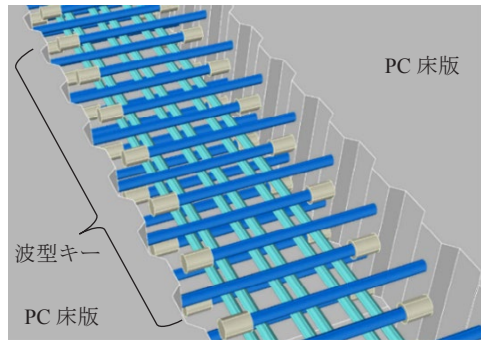


Fig.1 波型界面を有する PC 床版の接合部 (Joint between Precast Prestressed Concrete Deck Slabs with Corrugated Shape Interface)

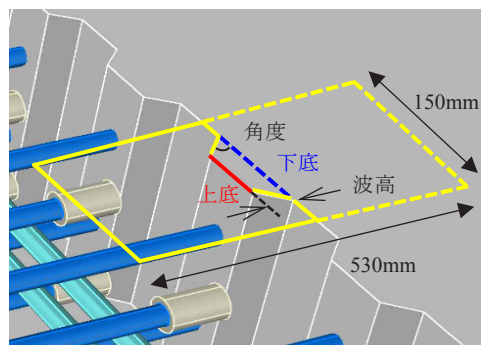


Fig.2 波型界面形状及び要素試験範囲 (Corrugated Shapes of the Interface and Elemental Test Area)

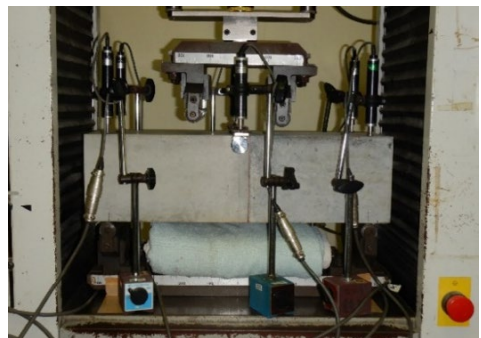


Photo 2 試験の実施状況 (Implementation Situation of the Test)

Table 1 試験ケース（試験 a） (Case of Test a)

供試体名	界面形状	角度 (度)	波高 (mm)	上底 (mm)	下底 (mm)
Ref.	—	—	—	—	—
S-Type	直型	—	—	—	—
W-28-20	波型	28	20	32	107
W-45-20		45		55	95
W-76-20		76		70	80
W-45-10		45	10	65	85
W-45-30			30	45	105

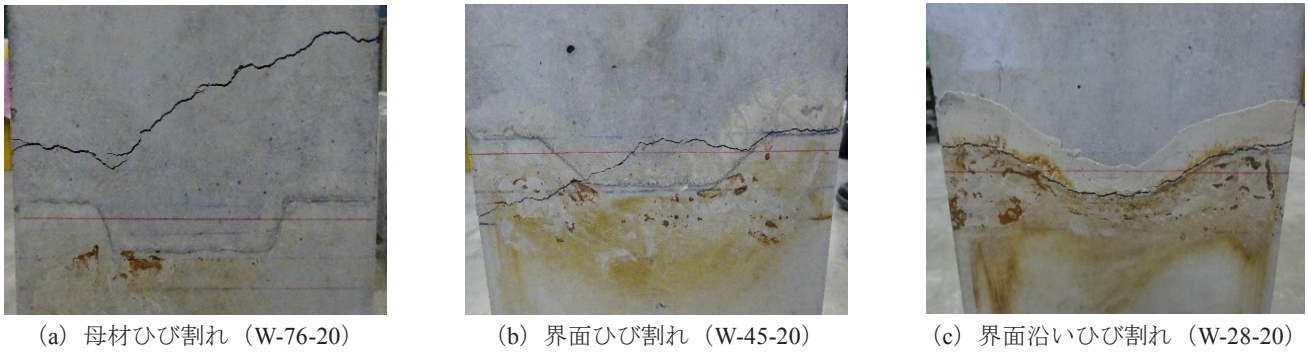


Photo 3 供試体引張作用側に発生したひび割れの種類
(Classification of Crack on the Tensile Side of Specimens)

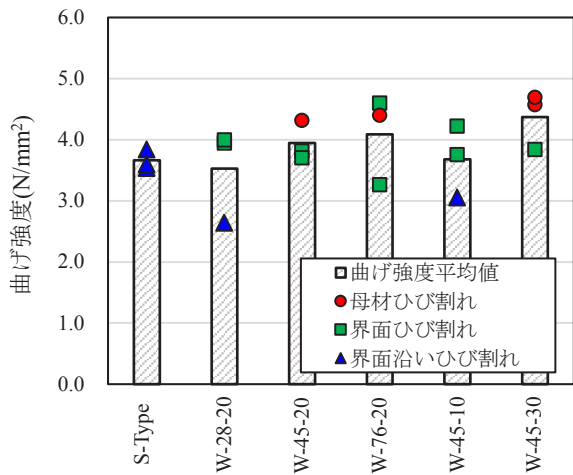


Fig.3 曲げ強度とひび割れ性状 (試験 a)
(Bending Strength and Cracking Property of Test a)

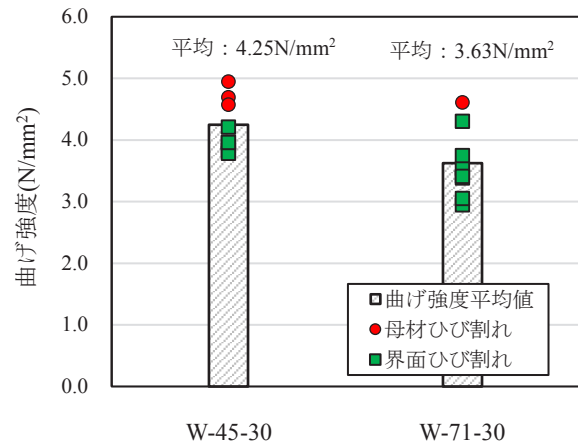


Fig.4 曲げ強度とひび割れ性状 (試験 b)
(Bending Strength and Cracking Property of Test b)

3. 波型形状の角度及び波高の選定 (試験 a)

(1) ひび割れ性状の分類

各ケース供試体数を 3 体として実施した曲げ試験において、試験終了後のひび割れ性状の分類を Photo 3 に示す。ひび割れ性状は、母材でひび割れが生じたケース (母材ひび割れ)、界面位置から発生した後に界面を沿うことなく進展したケース (界面ひび割れ)、並びに界面沿いにひび割れが進展したケース (界面沿いひび割れ) に大別された。

試験結果を Fig.3 に示す。S-Type 供試体は全て界面沿いひび割れが生じ、曲げ強度の平均値が 3.66N/mm^2 であった。これに対し、波型界面のケースのうち W-45-20, W-76-20, 及び W-45-30 供試体の曲げ強度の平均値は、S-Type 供試体の曲げ強度の平均値を 1 割程度上回った。また、S-Type を除く各ケースにおいて、界面沿いひび割れが生じた供試体は曲げ強度が小さい値となり、界面ひび割れが生じた供試体は曲げ強度がばらつき、安定しない結果となった。これらに対し、母材ひび割れが生じた供試体は界面ひび割れが生じた供試体とは異なり、安定して大きい曲げ強度を示した。

(2) 角度がひび割れ性状及び曲げ強度に及ぼす影響

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, 及び W-76-20 供試体) のひび割れ性状を比較すると、W-28-20 供試体では供試体 3 体のうち 2 体で界面ひび割れが生じたのに対し、ほかの 2 ケースでは 3 体中 1 体で母材ひび割れが生じ、2 体で界面ひび割れが生じる結果となった。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あると考えられる。

(3) 波高がひび割れ性状及び曲げ強度に及ぼす影響

波型界面の角度が同一で波高が異なるケース (W-45-10, W-45-20, 及び W-45-30 供試体) を比較すると、W-45-10 供試体では母材ひび割れが生じたケースが 1 体もなかったのに対し、W-45-20 供試体では 3 体のうち 1 体で、W-45-30 供試体では 2 体で母材ひび割れが生じ、安定して大きい曲げ強度を示した。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。

4. 波型形状の最適化検討 (試験 b)

試験 a の結果から、波型界面の角度は界面沿いひび割れを抑制する観点で 45 度以上、波高は安定して大きな曲げ強度を示した 30mm とし、試験 a 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 (Fig.2 に示す波型キーの中心間隔を 150mm、波高を 30mm として、上底及び下底をそれぞれ 65mm 及び 85mm とし、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 Fig.4 に示す。なお、W-45-30 供試体の試験結果は、試験 a の結果を含んだ全 8 体の試験結果である。W-71-30 供試体では 1 体を除いたすべての供試体で界面ひび割れが生じた。これに対し、W-45-30 供試体では、供試体 8 体のうち 3 体で母材ひび割れが生じ、W-71-30 供試体と比べて曲げ強度の平均値が大きい結果となった。また、W-45-30 供試体の界面ひび割れが生じたケースでは、W-71-30 供試体の界面ひび割れが生じたケースと比べて曲げ強度のばらつきが小さくなった。これは、界面ひび割れ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、W-71-30 供試体のような角度が大きい場合は波型界面の屈折部に引張応力が集中しやすくなったためと考えられる。

5. 要素試験による界面形状の選定

2 つの要素試験の結果から、界面の波型形状における角度が小さいと界面沿い破壊が生じやすくなること、並びに角度が大きいと波型界面の屈折部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ため、角度を 45 度に決定した。また、試験 a の結果より、波高を高くすることで界面の付着面積を相対的に大きくすることにより、界面の付着力を向上させる効果があることから、波高は 20mm 以上が望ましいと考えられる。

IV. 界面の目開きに対する抵抗性の検証

1. 定点疲労試験の概要

(1) 試験体概要及び試験ケース

試験ケースを Table 2 に、試験体図を Fig.5 に示す。試験体は、2 体の床版を CHA 継手及び間詰めコンクリートにより接合した梁試験体とし、橋軸方向に SD345, D19 のねじ筋鉄筋を、橋軸直角方向に SD345, D13 のねじ筋鉄筋を配置した。また、床版と間詰めコンクリートとの界面は、前章の要素試験で選定した界面形状による目開きの抵抗性の向上効果を確認するため、直型 (ケース A)、角度 45 度/波高 20mm の波型 (ケース B)、及び角度 45 度/波高 30mm の波型 (ケース C) の 3 ケースとした。

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及び耐久性の観点から膨張材 (添加量 30kg/m³) 及び高炉スラグ微粉末 (比表面積 6000cm²/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。

(2) 試験方法

載荷位置及び計測位置を Fig.5 に示す。Photo 4 に示す載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 点で載荷した。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繰返し作用する活荷重に対する鉄筋の許容引張応力³⁾ (120N/mm²) が生じる荷重である 57.1kN まで静的な載荷を 3 回実施し、その後に疲労試験を開始した。疲労試験では、上限荷重を前述の載荷時と等しい荷重である

Table 2 定点疲労試験における試験ケース (Case of the Cyclic Loading Test)

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)

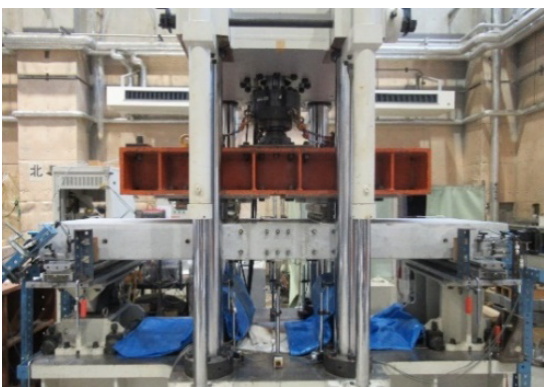


Photo 4 定点疲労試験の試験実施状況 (Situation of the Cyclic Load Test)

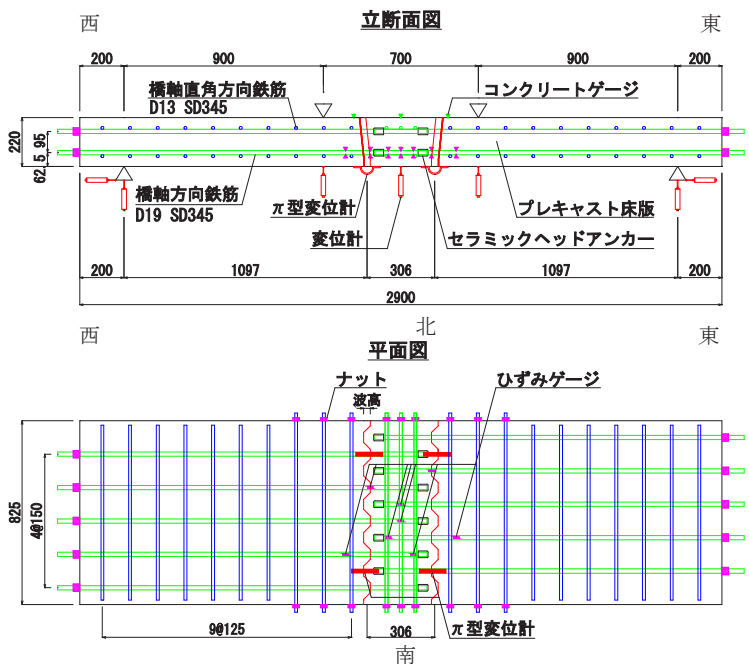


Fig.5 試験体概要及び載荷・計測位置 (Loading and Measurement Position of a Beam Specimen)

57.1kN に、下限荷重を同鉄筋に 40N/mm² 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、並びに床版-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。計測は、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及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 型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。

2. 試験結果

(1) 疲労試験前後の界面目開き幅

疲労試験中の下限荷重時における界面の目開き幅と繰返し回数との関係を Fig.6 に、疲労試験前後の下限荷重時（18.6kN 载荷時）での目開き幅を Table 3 に示す。目開き幅は、南北に設置した π 型変位計の計測値の平均値である。なお、Table 3 に示す東西の π 型変位計の計測値に大きな差が見られなかったため、Fig.6 では西側の計測値のみを示す。

全てのケースにおいて疲労試験前の静的载荷時に、界面で曲げひび割れが発生した。疲労試験前の静的载荷時における下限荷重時の界面目開き幅は、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、繰返し载荷中に全ケースで目開き幅の進展が見られたが、疲労試験終了後にはケース 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、0.07mm 程度の目開き幅低減効果が見られた。これは、Ⅲの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、直型界面あるいは波高の小さい波型界面に比べて、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、接合部の付着面積が大きくなることで、界面の付着力を高め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 の繰返し载荷中において、波型キーの下底部をひび割れ（界面ひび割れ）が進展した箇所が見られた。これに対し、ケース B では、界面に沿って目開き（界面沿いひび割れ）が生じたことから、波型界面の波高を大きくすることが、界面の破壊形態に影響することを確認した。

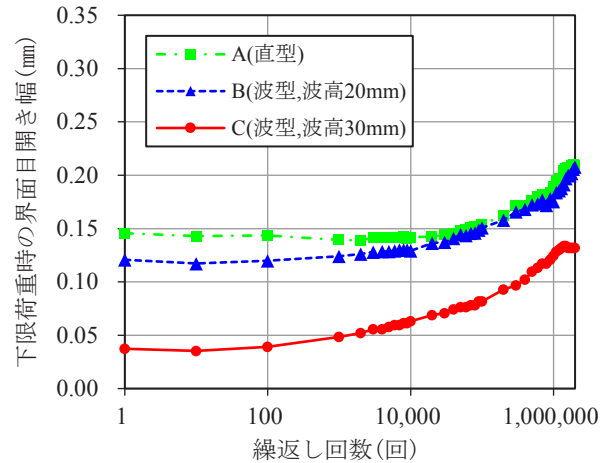
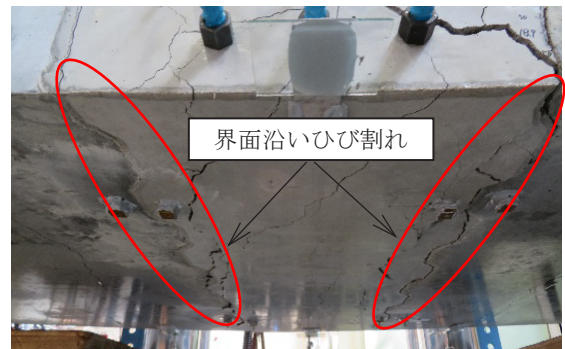
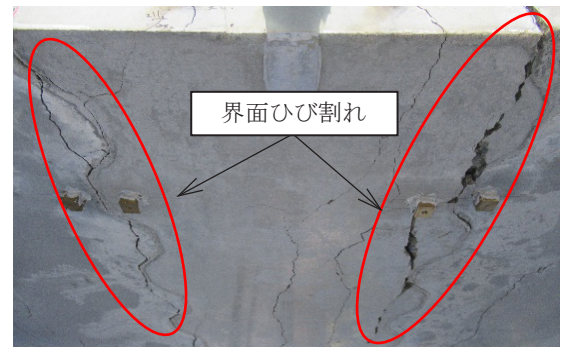


Fig.6 下限荷重時の目開き幅の推移（西側）
(Transition of the Joints Opening at Lower Limit of Load)



(a) ケース B（波高 20mm）



(b) ケース C（波高 30mm）

Photo 5 载荷終了時の試験体下面のひび割れ発生状況
(Crack Occurrence Situation at the end of the Static Loading)

Table 3 試験時のコンクリート圧縮強度及び試験結果
(Compression Strength of Concrete and Measurement Result at the Time of Examination)

ケース	試験時のコンクリート 圧縮強度(N/mm ²)		最大荷重 (kN)		試験値 計算値	継手部界面の残留目開き幅(mm)			
	床版	継手部	試験値	計算値		疲労試験前		疲労試験後	
						西側	東側	西側	東側
A (直型)	51.7	50.5	248	234	1.06	0.15	0.15	0.21	0.21
B (波型,波高 20mm)	53.5	58.9	249	235	1.06	0.12	0.12	0.21	0.20
C (波型,波高 30mm)	56.6	67.4	261	243	1.07	0.04	0.03	0.13	0.14

(3) 疲労試験後の静的漸増載荷試験における破壊性状
静的漸増載荷試験におけるケース B 及びケース C の試験体引張面側のひび割れ発生状況を Photo 5 に示す。ケース B の界面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、波型キーの下底部に界面ひび割れが生じた箇所が見られ、波型界面の波高による影響を確認した。

また、最大荷重並びに継手が無いものとしてコンクリート標準示方書⁴⁾に基づいて算定した計算値を Table 3 に、荷重とスパン中央変位との関係を Fig.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、本継手構造により床版接合部の一体性を確保できることを確認した。

V. おわりに

本研究では、まず、床版と間詰めコンクリート間の波型界面形状について、目開きに対する抵抗性の向上効果が最も発揮される形状を実験的に検討した。その結果、波型界面の角度が耐力及び破壊形態の安定性に影響することを確認した。また、波型界面の波高を大きくすることにより界面の延長を相対的に長くすると、付着強度が大きくなることを確認した。

次に、CHA 継手と要素試験により選定した波型界面を有する梁試験体を対象に、定点疲労試験及び疲労試験後の静的漸増載荷試験を実施し、波型界面の目開き幅低減効果を確認した。また、本継手構造を有する梁試験体の曲げ耐力は、継手が無いものとして算定した計算値をやや上回り、床版同士

の接合部における部材の一体性を満足することを確認した。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解明、並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による耐疲労性の評価を行い、本技術の実用化を目指す。

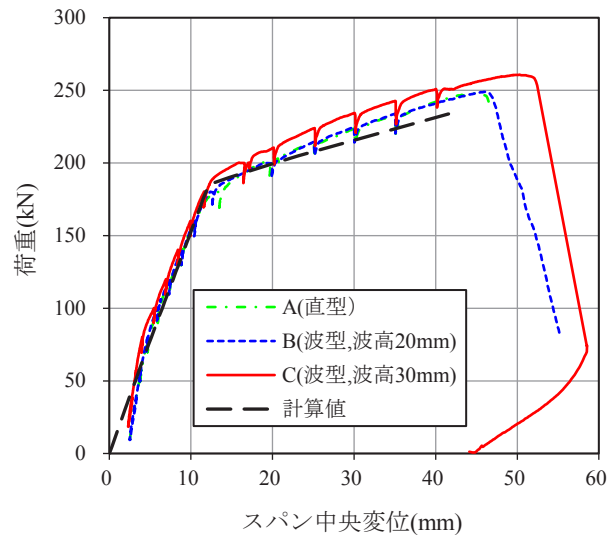


Fig.7 荷重—スパン中央変位関係
(Load—Displacement)

参考文献

- 1) (一財) 土木研究センター；後施工セラミック定着型せん断補強鉄筋「セラミックキャップバー (CCb)」, 建設技術審査証明報告書, 2014.8.
- 2) Marlon K Thompson et al. ; Anchorage Behavior of Headed Reinforcement, 2003.6, pp.34-36.
- 3) 日本道路協会；道路橋示方書 [Ⅲ コンクリート橋・コンクリート部材編], 2017. 11.
- 4) 土木学会；コンクリート標準示方書 [設計編], 2017.

An Experimental Study on a Joint Structure Using a Ceramic Head Anchor and the Interface Shape between Deck Slabs

*Shuto Takahashi, Toshimichi Ichinomiya, Takahiro Arai¹⁾,
Yuki Yokota and Shintaro Kojima*

When renewing RC deck slabs to precast prestressed concrete deck slabs, the joints between deck slabs require a structure that is highly durable and fatigue resistant. We have developed a joint structure using a ceramic head anchor (CHA) to improve the durability of the joint structure between precast prestressed concrete deck slabs for replacement. We also developed a corrugated interface to reduce the joint opening.

In this study, first, the optimal corrugated shape of the interface was decided by carrying out elemental tests. Second, a beam member containing a joint part and CHA was made, and a cyclic loading test for examining the fatigue characteristics was carried out to confirm the effects of reducing the aperture of the interface. The results showed that the joint structure has joint integrity and that making shapes with an angle of 45° and a height of 30 mm reduces the joint opening.