

論文 床版接合目地の使用材料およびせん断耐力の検討

吉次 優祐*1・島山 繁忠*2・山口 光俊*2・左東 有次*3

要旨: 近年、床版取替工事において、供用しながら部分的に床版を取り替える半断面施工の必要性が増している。筆者らは床版の安全性確保の観点から、橋軸直角方向の接合部にはせん断キーを有する目地を設けることを提案しているが、速やかな交通開放のためには、目地部に用いる充填材の早強性と施工性が求められる。本研究では、適切な充填材料の選定を目的に、7号砕石を混入した無収縮モルタルの材料特性を比較し、提案するせん断キーを有する試験体のせん断耐力を検証した。その結果、7号砕石の混入量が増えると圧縮強度が低下すること、無収縮モルタルで充填したせん断キーは、所定のせん断力を有することが確認された。

キーワード: 床版取替, 半断面施工, 接合目地, 無収縮モルタル, せん断キー, せん断耐力

1. はじめに

近年、床版取替工事では車線規制のみで実施できる半断面床版施工が各地で行われている。半断面床版は橋軸方向にも目地構造を有する床版となっているため、現場で橋軸直角方向の接合が必須となる。また、現場では道路を速やかに交通開放できるよう、早期のプレストレス導入のため、目地部に早強性の充填材を使用することが求められ、超速硬型無収縮モルタルの使用が考えられる。通常、プレミックス型の無収縮モルタルには粗骨材は入っていないため、無収縮モルタルを接合目地の充填材に使用する場合には、プレキャストPC床版のコンクリートと同等の材料強度を有することを求められる場合がある。さらに、半断面床版にはせん断キーを設ける必要があり、施工性や耐荷性を考慮したせん断キーの選定が必要である。

本研究ではまず、PC床版間の狭隘な目地においてコンクリートと同等の充填材料の適用可能性を検討することを目的に、無収縮モルタルに7号砕石（粒径2.5-5mm）を混入した材料（以下、提案材料）の、材料特性の検討を行った。次に、上記検討結果を踏まえて目地の二面せん断試験に使用する材料を選定し、提案するせん断キーを有する試験体を用いてせん断耐力を検証した。

2. 予備試験

無収縮モルタルに混入する7号砕石の混入割合の変化による強度増進の確認を目的に予備試験を実施して混入量を決定した。なお、半断面床版の目地幅が30mmであることを考慮して粒径2.5-5mmの7号砕石を採用した。

2.1 試験方法

使用材料および配合を表-1、表-2に示す。結合材の種類の違いによる影響を確認するため、2種類の結合材

表-1 使用材料

材料	記号	備考
超速硬型無収縮モルタル	C1	A社
	C2	B社
水	W	—
7号砕石 (硬質砂岩)	G	表乾密度: 2.62g/cm ³ 吸水率: 1.73% 粒径: 2.5-5.0mm
凝結遅延剤	D1	クエン酸系 (C1)
	D2	有機カルボン酸系 (C2)

表-2 配合

配合名	7号砕石混入率	単位量 (kg/m ³)					
		C1	C2	W	G	D1	D2
C1+G	30%	1524	—	268	457	1.8	—
	40%	1445	—	254	578	1.7	—
	50%	1366	—	240	683	1.6	—
C2+G	30%	—	1504	256	451	—	3.8
	40%	—	1418	241	567	—	3.5
	50%	—	1351	230	676	—	3.4

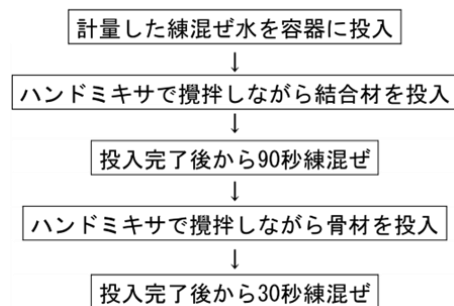


図-1 練混ぜフロー

*1 (株) 富士ピー・エス 技術センター いわき研究所 修士 (工学) (正会員)
 *2 (株) 富士ピー・エス 技術センター いわき研究所 博士 (工学) (正会員)
 *3 (株) 富士ピー・エス 技術センター センター長 博士 (工学) (正会員)

を使用した。7号砕石の混入割合はフレッシュ性状を考慮して結合材重量の30%、40%、50%とした。水および凝結遅延剤の重量はカタログ値を参考に決定した。試験体の練混ぜフローを図-1に示す。無収縮モルタルの練混ぜ時間はカタログを参考に決定し、7号砕石混入後の練混ぜ時間は、無収縮モルタルの硬化時間、施工性を考慮して30秒とした。試験は、スランプフロー試験および圧縮強度試験（材齢3時間、1日）を実施した。

2.2 試験結果

スランプフロー試験および圧縮強度試験の結果を表-3、図-2にそれぞれ示す。スランプフロー試験では、配合C1+Gは7号砕石の混入率が高くなるにつれて、スランプフローが小さくなる結果となった。一方で配合C2+Gでは7号砕石の混入率の大小にかかわらずスランプフローは80cmオーバーとなった。圧縮強度試験は、どちらの充填材も7号砕石の混入率が大きくなるにつれて圧縮強度は低下した。既往の研究¹⁾でも骨材量が增加するほどコンクリート強度は低下すると報告されており、同様の傾向が認められた。以上の結果より、本試験では、流動性が高く、早期の強度発現が期待できる7号砕石の混入率30%を対象として材料試験を実施した。

3. 材料試験

3.1 試験項目

材料試験における試験項目を表-4に示す。材料試験では、「材料特性」および「充填性」を確認項目として材料試験を実施した。

3.2 材料および配合

材料試験における配合を表-5に示す。配合C1は超速硬型無収縮モルタルのみの配合、配合C1+Gおよび配合C2+Gは予備試験の7号砕石を30%の配合と同様である。

3.3 試験方法

(1) コンシステンシー試験

材料の練混ぜ後、J14 ロート流下時間、スランプフロー、材料温度を測定した。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験はそれぞれ JIS A 1108 および JIS A 1149 に準拠して行った。圧縮強度試験の材齢は3時間、1日、3日、5日、28日とし、実施工において、施工サイクルが短い場合を想定し、材齢初期の水準を多くした。静弾性係数試験の材齢は28日とした。養生条件は、いずれの材齢も気中養生とした。

(3) せん断強度試験

せん断強度試験は JSCE-G-553 を参考に、試験体寸法が100mm×100mm×400mmの角柱試験体を製作して実施した。せん断強度試験の概要図を図-3に示す。試験体は各3体とした。

表-3 スランプフロー試験結果

配合名	7号砕石混入率		
	30%	40%	50%
C1+G	62×64 (cm×cm)	58×58 (cm×cm)	53×52 (cm×cm)
C2+G	80cm オーバー	80cm オーバー	80cm オーバー

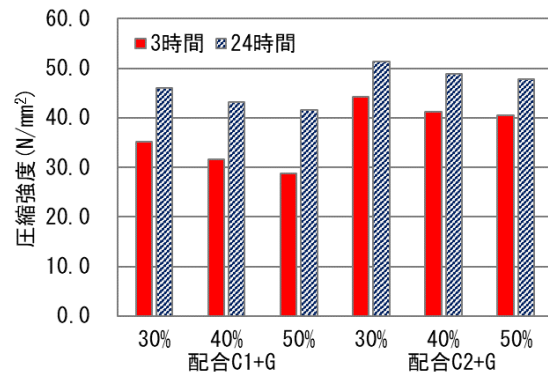


図-2 圧縮強度試験結果

表-4 試験項目

確認項目	試験方法
材料特性	コンシステンシー試験、圧縮強度試験、静弾性係数試験、せん断強度試験
充填性	目視

表-5 配合

配合名	単体量 (kg/m³)					
	C1	C2	W	G	D1	D2
C1	1850	—	326	—	2.2	—
C1+G	1524	—	268	457	1.8	—
C2+G	—	1504	256	451	—	3.8

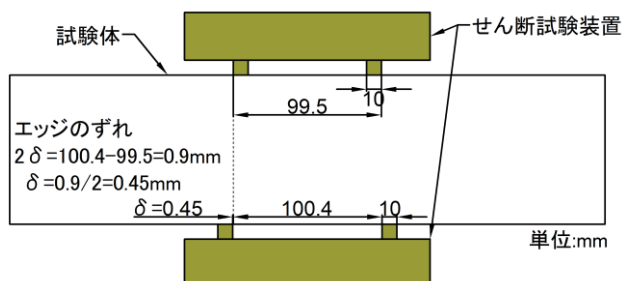


図-3 せん断強度試験概要図

(4) 充填性確認

せん断キーの形状を図-4に示す。せん断キーの形状は、後述するせん断耐力の設計により検討を行い決定した。充填性の確認では、写真-1のように、側枠の片面

をアクリル板とし、充填材の充填状況を確認した。なお、打設時は締固め作業を行わず、自己充填のみとした。試験体は各1体とした。

3.4 試験結果

(1) コンシステンシー試験

コンシステンシー試験の結果を表-6、スランプフロー試験状況を写真-2に示す。J14 ロート流下時間の目標値は6~10秒(カタログ値)であるため、いずれの充填材も目標値を満足する結果となった。スランプフロー試験は予備試験と同様の結果となった。

(2) 圧縮強度試験および静弾性係数試験

圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果を表-7に示す。(株)高速道路総合技術研究所の構造物施工管理要領²⁾では、無収縮モルタルの圧縮強度は材齢3日で25N/mm²以上、材齢28日で45N/mm²以上と規定されている。本試験で使用した材料は、いずれも約3時間で25N/mm²程度、材齢1日で40N/mm²に達しており、床版取替後、必要に応じて早期のプレストレス導入を行うことも可能であることが確認できた。また、材齢3日で、一般的なプレキャストPC床版の設計基準強度である50N/mm²以上の強度が発現し、材齢28日の静弾性係数もコンクリートの物性値に近いことを確認した。

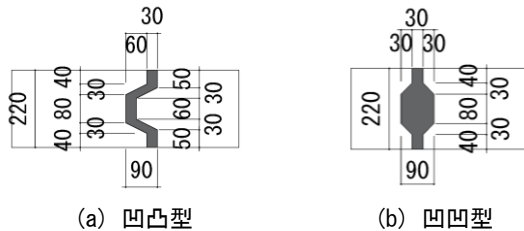


図-4 せん断キー形状



写真-1 型枠組立状況

表-6 試験結果

配合名	室温	J14 ロート	スランプ フロー	材料 温度
C1	26°C	9.99 秒	-	26°C
C1+G	23°C	9.69 秒	61.5cm× 64.1cm	27°C
C2+G	26°C	9.95 秒	80cm オーバー	25°C

(3) せん断強度試験

せん断強度試験の結果を図-5に示す。なお、参考値として、表-8に示す骨材を使用したコンクリート試験体(圧縮強度 57.9N/mm²)の試験結果もあわせて示す。図-5より、各充填材の平均せん断強度は、配合 C1 は 9.14N/mm²、配合 C1+G は 9.73N/mm²、配合 C2+G は 8.31N/mm² であり、コンクリートの平均せん断強度 9.16N/mm² とほぼ同等の試験結果を示した。また、設計上のコンクリートが負担できる平均せん断応力度³⁾は設計基準強度 50N/mm²の時に 0.65N/mm²であり、所定の応力度を満足する結果となった。

(4) 充填性確認

充填材打設後の断面状況を写真-3に示す。いずれの充填材も充填性に問題はなかったものの、配合 C2+G で

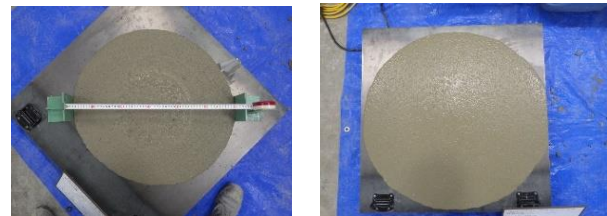


写真-2 スランプフロー試験状況

表-7 強度試験結果(単位: N/mm²)

配合名	平均圧縮強度				静弾性 係数
	3時間	1日	試験日 28日	28日	
C1	27.7	45.2	56.7(5日)	72.3	31,600
C1+G	23.9	41.3	55.5(3日)	74.8	32,100
C2+G	36.3	49.1	56.2(3日)	80.7	35,600

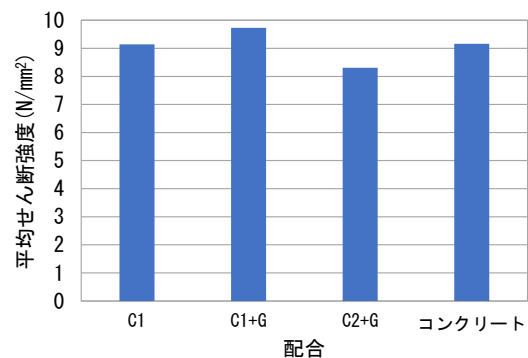


図-5 せん断強度試験結果

表-8 コンクリート使用骨材

種類	岩石名	表乾密度 (g/cm ³)
細骨材(砕砂)	硬質砂岩	2.60
粗骨材(砕石 2005)	硬質砂岩	2.73

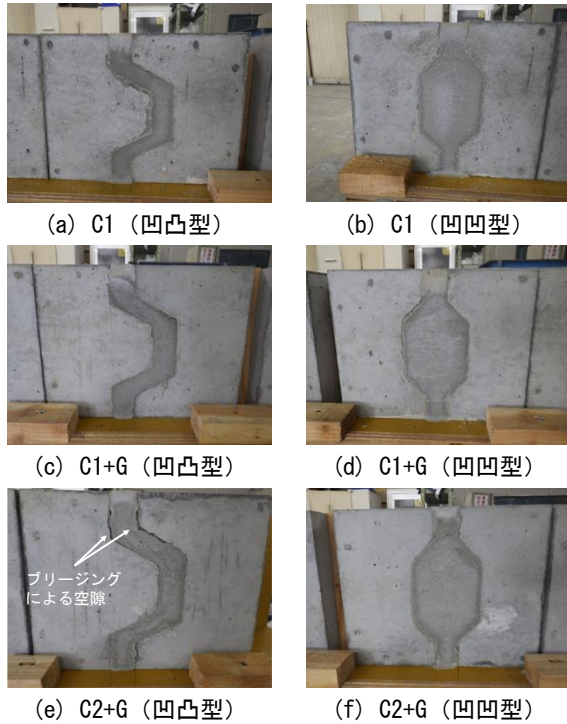


写真-3 充填後断面状況

はフリージングによる空隙の発生が確認された。

3.5 使用する配合の決定

以上の結果より、提案材料の配合 C1+G は、平均せん断強度において 配合 C1 よりも幾分向上が見られたが、いずれの配合も設計上の圧縮強度およびせん断強度を満足しており、現場において材料の取扱いが容易で施工性に優れていることから、本試験での充填材は超速硬型無収縮モルタル単体の配合 C1 を採用することとした。

4. 二面せん断試験

せん断キーを有する試験体を用いて、提案するせん断キーが所定のせん断耐力を有するかどうかを検証するため、二面せん断試験を実施した。

4.1 試験水準

二面せん断試験の試験水準を表-9 に示す。せん断キーの形状は凹凸型、凹凹型、キーなしの3水準とした。

4.2 試験体形状

試験体の形状を図-6 に示す。試験体は、施工条件から決定された目地幅 30mm を有するせん断キーを2箇所設けて製作した。試験は圧縮試験機を用いて行うこととした。そのため、試験環境の制約およびハンドリング性を考慮の上、実際のプレキャスト PC 床版の厚さ 220mm を想定して、試験体寸法は幅 460mm×高さ 220mm×奥行 100mm とした。試験体数は各3体とした。また、実施工を想定して、打継面は洗出し処理を行い、充填材打設の1日前に吸水調整剤（アクリル樹脂エマルション系）を打継面に塗布した。

表-9 試験水準

要因	項目
せん断キーの形状	凹凸型, 凹凹型, キーなし
充填材	超速硬型無収縮モルタル (配合 C1)

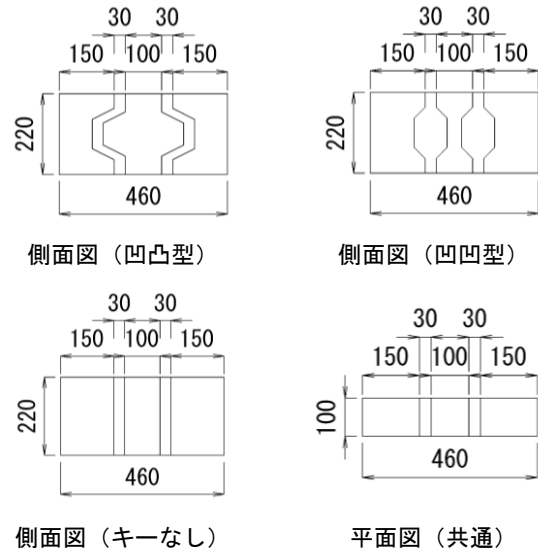


図-6 試験体形状

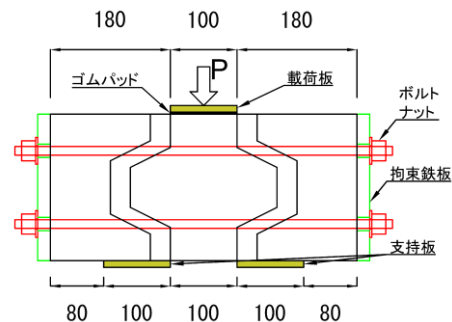


図-7 荷重および支持条件図



写真-4 試験状況写真

4.3 試験方法

試験は、せん断スパンを 0mm として、終局破壊に至るまで静的に単調荷重した。荷重および支持条件を図-7 に、試験状況を写真-4 に示す。すべての試験体において、図-7 に示す条件で試験を行った。なお、荷重時の横方向変位の影響を抑えるため、拘束器具を使用した。試験体の拘束は、荷重初期段階から拘束による圧縮作用

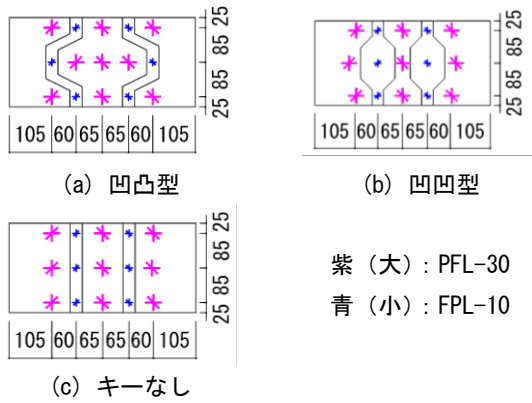


図-8 ひずみゲージ貼付図

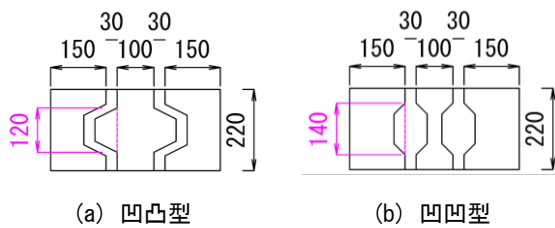


図-9 設計値着目部分

表-10 設計値計算結果

項目	単位	凹凸型	凹凹型
有効高さ h (図-9 破線)	mm	120	140
抵抗幅 b	mm	100	100
抵抗面	面	2	2
せん断応力度 τ^*	N/mm ²	9.16	9.14
抵抗面積 $A=b \times h$	mm ²	12000	14000
せん断耐力 $S=2 \times \tau \times A$	N	2.20×10^5	2.56×10^5

※せん断応力度は、3.4 (3) せん断試験の値を引用

によりせん断耐力が意図せず増加しないよう、手締めにより行い、試験体に軸力が作用しないように留意した。載荷荷重の増加とともに生じる軸力については、実構造物では鋼材で横方向の移動が同様に拘束されているものとみなし、軸力の調整は特段行わなかった。また、応力の伝達方向を確認するため、各試験体1体ずつ片面にひずみゲージ(3軸方向)を貼付して試験を実施した。ひずみゲージ貼付位置を図-8に示す。

4.4 せん断耐力の計算

せん断キーの形状は、床版に輪荷重が作用した時にせん断キー部に生じるせん断応力が、コンクリートが負担できる平均せん断応力度の制限値以下となるように設計している⁴⁾。設計時の着目部分を図-9、計算結果を表-10に示す。なお、せん断応力度は、3.4 (3) せん断試験の結果を引用した。また、表-10に示す有効高さ h は図-9に示す破線部、抵抗幅 b は図-6 平面図に示す試験体の奥行方向の長さとした。

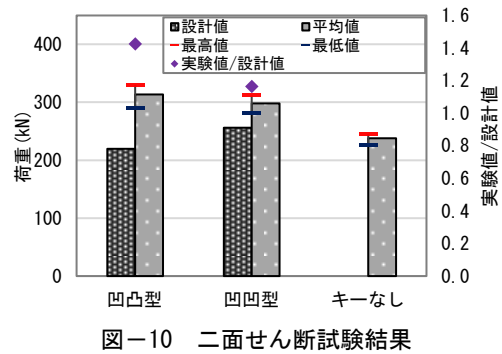


図-10 二面せん断試験結果

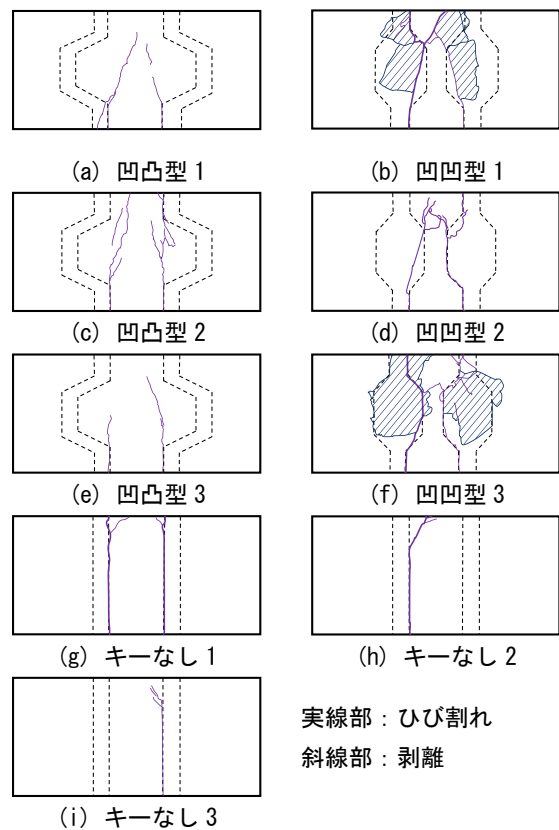


図-11 二面せん断試験ひび割れ図

4.5 試験結果

試験結果を図-10、各試験体のひび割れ図を図-11に示す。凹凸型試験体、凹凹型試験体ともに設計値以上のせん断耐力を有しており、設計値と実験値の比はそれぞれ1.43、1.16と、特に凹凸型試験体において設計値と比較して高いせん断耐力を有することが確認された。これは、継目部にひび割れ発生後、載荷板端部から鉛直にひび割れが進展すると予想されたが、図-11のひび割れ図を見るに、載荷板中央から支点端部に繋がるように斜めにひび割れが生じており、想定した抵抗断面よりも広い面積でせん断抵抗したことによると考えられる。

凹凸型試験体と凹凹型試験体の試験結果を比較すると、凹凸型試験体の方がせん断耐力は幾分高いものの、

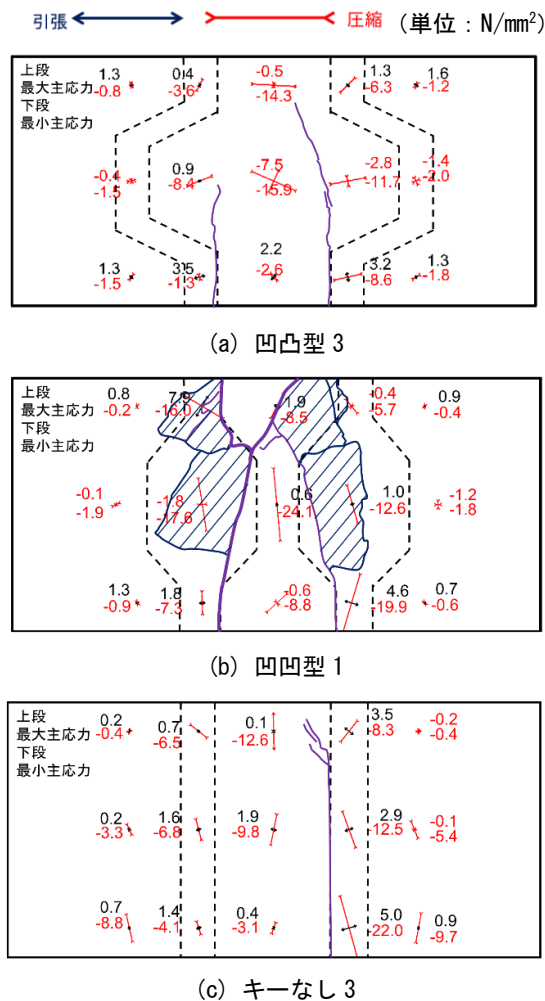


図-12 破壊直前の主応力と主応力方向

その差は約 5%であり、両者に明確な差はないものと考えられる。どちらも設計値より高いせん断耐力を有しており、今後、実施工に適用する場合、施工性も加味してせん断キーを選択することが望ましいと考えられる。また、比較用に製作したせん断キーのない試験体の実験値と比較すると、凹凸型試験体および凹凸型試験体の実験値の比はそれぞれ 1.32, 1.25 と、せん断キー設置によるせん断耐力の向上が確認された。

ひずみゲージ貼付位置における主応力度とひび割れ線をトレースした図を図-12に示す。最大主応力、最小主応力の算出はロゼット解析の計算方法⁵⁾を参考に行った。算出式を式(1)および式(2)に示す。なお、静弾性係数 E は、実験値を使用し、コンクリートを 33000N/mm^2 、無収縮モルタルを 29400N/mm^2 とした。また、ポアソン比 ν を 0.2 とした。

$$\sigma_{max} = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{max} + \nu\epsilon_{min}) \quad (1)$$

$$\sigma_{min} = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{min} + \nu\epsilon_{max}) \quad (2)$$

各図に示す数値および矢印方向は破壊直前の主応力度お

よびその作用方向であり、正の値を引張力、負の値を圧縮力として示している。図-12より、主応力度の数値を見ると、キーなし試験体では載荷点および支持点を結ぶひび割れ近傍において主応力度は大きくなっており、せん断に対して目地部界面におけるコンクリートとモルタルの摩擦力で抵抗していると考えられる。一方、凹凸型および凹凸型試験体では、キーなし試験体と比較して、試験体中央部の主応力度が大きくなる傾向を示している。これは、せん断キーのかみ合わせ作用により目地部の摩擦力のみならず、コンクリートおよびモルタル自身もせん断に抵抗したことから、試験体中央部に応力が集中する傾向を示したと推察される。

以上のことから、提案するせん断キーがどちらもせん断力に対して有効に抵抗していることがひずみからも確認できた。

5. まとめ

本試験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 材齢初期において、提案材料は、7号砕石の混入率が増えるにつれて圧縮強度が低下する傾向が確認された。
- (2) 材齢 28 日において、無収縮モルタルと提案材料は、圧縮強度およびせん断強度ともに同程度であり、コンクリートと比較して遜色ない材料特性を持つことが確認された。
- (3) 二面せん断試験の結果より、本試験で提案したせん断キーは、所定のせん断耐力を有し、どちらの形状も同程度のせん断耐力であった。
- (4) 主応力度を分析した結果、提案するせん断キーを設けることでコンクリートおよび無収縮モルタルもせん断に対して有効に抵抗していることが確認できた。

参考文献

- 1) 川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎研究（その 2），日本建築学会論文報告集 Vol.167, No.1, pp.7-11, 1970.1
- 2) 高速道路総合技術研究所，構造物施工要領，pp.II-238, 2020.9
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I・III, pp.155, 2012.3
- 4) 畠山繁忠ほか：半断面床版取替に対応可能なプレキャスト PC 床版の接合目地構造の検討，第 12 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.123-128, 2022.10
- 5) 園田佳巨，島田英樹：固体力学，共立出版，p.68, 2005.1