

プレキャストブロック継目部における力の伝達機構とその設計法に関する研究報告

西川 和廣*1・神田 昌幸*2・内田 賢一*3・淵上 優子*4・清水 俊一*5

1. はじめに

建設業界における慢性的な労働力不足等の問題を背景に、施工の省力化・省人化に向けて種々の検討がなされている。これらの問題を解決する1つの有効な手段として、プレキャストブロック工法（道路橋示方書での名称、プレキャストセグメント工法と同義）が注目を集め、施工実績も増加している。

プレキャストブロック工法は、比較的古くから行われてきた工法ではあるが、急速施工を必要とする工事や急峻な地形下における特殊な工法として位置づけられてきたこと、本工法を道路橋に適用する場合、継目部の力の伝達機構に不明確な点が残されていたことから、設計・施工に関する基準類も十分に整備されていない現状であった。

そこで、建設省土木研究所と（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会は、プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋の合理的な設計法を整備する目的で共同研究を行った。共同研究では、鋼製接合キーまたはコンクリート製接合キーを配置した継目部をモデル化した供試体に、静的載荷によってせん断力またはねじりモーメントを作用させて力の伝達機構を明らかにした^{1)~3)}。

これらの成果は、図-1に示すように順次各種基準に反映されている。平成3年度に行ったポストテンションT桁橋を対象として鋼製接合キーを配置した継目部の純せん断試験結果は、（社）日本道路協会より発行された「プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリートTげた道路橋設計施工指針」^{4),5)}に反映されている。また、平成4年度に実施したポストテンション箱

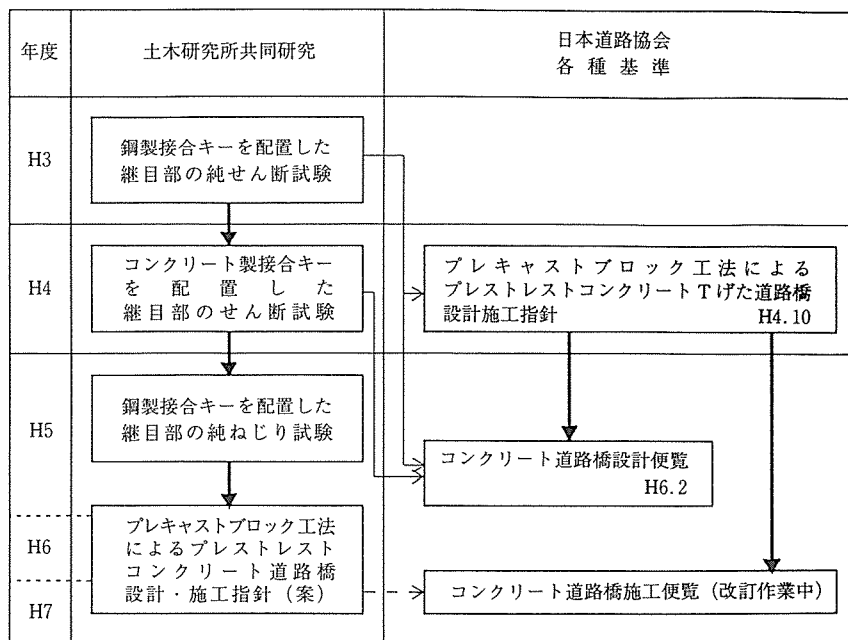


図-1 研究成果の基準類への反映

*1 Kazuhiro NISHIKAWA：建設省 土木研究所構造橋梁部橋梁研究室 室長
 *2 Masayuki KANDA：建設省 土木研究所構造橋梁部橋梁研究室 主任研究員
 *3 Ken-ichi UCHIDA：建設省 土木研究所構造橋梁部橋梁研究室 研究員
 *4 Yuko FUCHIGAMI：建設省 土木研究所構造橋梁部橋梁研究室
 *5 Toshikazu SHIMIZU：（社）プレストレスト・コンクリート建設業協会

桁橋を対象としてコンクリート製接合キーを配置した継目部のせん断試験より得られた結果は、同協会より刊行された「コンクリート道路橋設計便覧」^{6),7)}に反映された。また、平成5年度に行ったポストテンションT桁橋を対象として鋼製接合キーを配置した継目部の純ねじり試験より得られた結果より、ねじりに関する設計法を提案し、さらに先に述べた各基準および施工事例を参考にしてプレキャストブロック工法の設計・施工法を総括的にまとめた「プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋設計・施工指針(案)」⁸⁾をとりまとめた。この成果は、現在改訂中の「コンクリート道路橋施工便覧」⁹⁾に反映される予定である。

ここでは、模型供試体を用いた静的載荷試験の結果をまず報告し、続いて指針(案)の規定の背景について述べる。

2. 鋼製接合キーを配置した継目部の純せん断試験

2.1 供試体

本試験は、プレキャストブロック工法によるT桁橋

の継目部を想定し、静的に純せん断載荷試験を行ったものである。供試体は、T桁橋のウェブ部およびフランジ部を想定した2種類の形状とした。供試体は、継目部のせん断耐力に影響を与える①プレストレス導入量、②鋼製接合キーの有無および径、③接着剤の状態、④鋼製接合キーの配置位置、の要因の組合せで計19体製作した。供試体の諸元一覧および形状寸法をそれぞれ表-1および図-2に示す。供試体の継目部には、現在一般的に使用されているエポキシ樹脂系接着剤を塗布し、プレストレスを導入して一体化を図った。なお、接着剤が未硬化の供試体は、接着剤硬化前に架設を行った場合を想定したものであり、接着剤の主剤のみを塗布している。また、ひびわれ状態の供試体は、継目部のひびわれ発生後または接着剤の劣化による接着力の低下を想定した供試体であり、供試体の製作にあたっては、接着剤のゲル化開始後に分離し、接着剤の完全硬化後にプレストレスを導入して接合したものである。

本実験に使用した鋼製接合キーは、図-3に示すようなリング型鋼製接合キーであり、現在一般的に使用されている材質がFCD 450のものである。また、コンク

表-1 純せん断試験供試体の諸元一覧

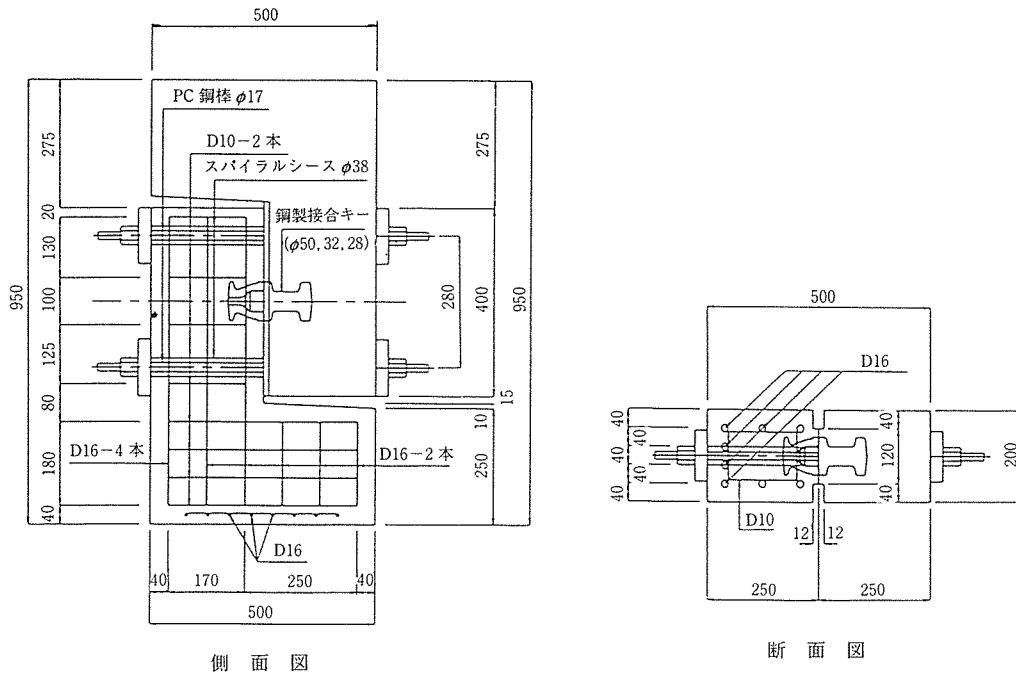
番号	供試体名	モデル種別	プレストレス (kgf/cm ²)	鋼製接合キーの有無および径 (径 (mm))	接着剤の状態	備 考
1	W-60-32-H	ウェブ部	60	有り (32)	完全接着	標準供試体：プレストレス導入量を変化させて挙動を調べる。
2	W-30-32-H		30			
3	W-0-32-H		0			
4	W-60-32-W	ウェブ部	60	有り (32)	未硬化	接着剤未硬化供試体：接着剤が硬化する前の挙動を調べる。
5	W-30-32-W		30			
6	W-0-32-W		0			
7	W-60-50-H	ウェブ部	60	有り (50)	完全接着	φ50 供試体：接合キーの径を変化させて標準供試体と比較。
8	W-0-50-H		0			
9	W-60-28-H	ウェブ部	60	有り (28)	完全接着	φ28 供試体：接合キーの径を変化させて標準供試体と比較。
10	W-0-28-H		0			
11	W-60-0-H	ウェブ部	60	無し	完全接着	接合キー無し供試体：接合キーを配置しないで標準供試体と比較。
12	W-30-0-H		30			
13	W-60-32-S	ウェブ部	60	有り (32)	ひびわれ	継目部ひびわれφ32 供試体：接合面を分離させて標準供試体と比較。
14	W-30-32-S		30			
15	W-60-0-S	ウェブ部	60	無し	ひびわれ	継目部ひびわれ接合キー無し供試体：接合面を分離させて標準供試体と比較。
16	W-30-0-S		30			
17	F-60-32-H	フランジ部	60	有り (32)	完全接着	フランジ供試体：フランジ断面を想定して標準供試体と比較。
18	F-30-32-H		30			
19	F-0-32-H		0			

*：供試体名の記号は以下を表す。

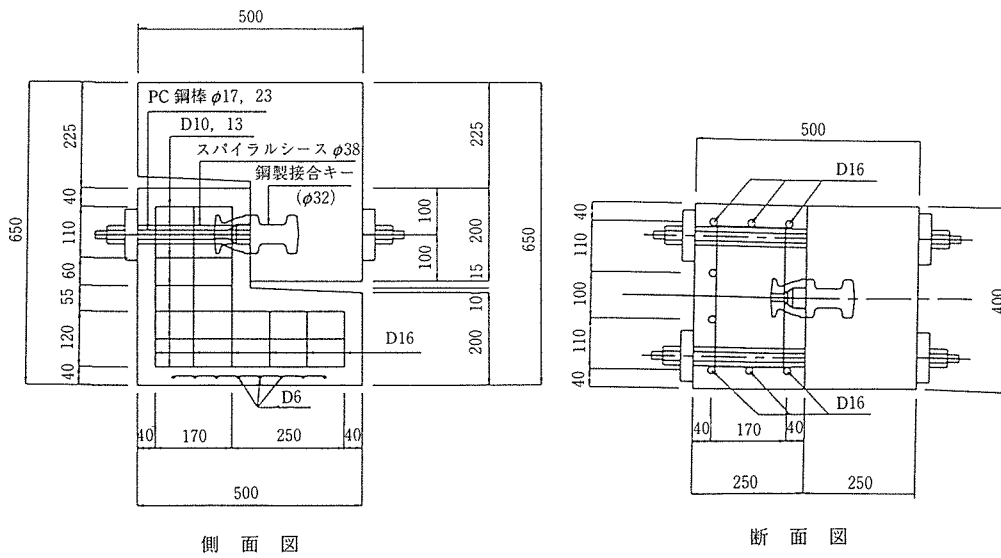
W-60-32-H

- 接着剤の状態 (H：完全接着，W：未硬化，S：ひびわれ)
- 鋼製接合キーの有無および径 (32：32 mm，50：50 mm，28：28 mm，0：無し)
- プレストレス (60：60 kgf/cm²，30：30 kgf/cm²，0：0 kgf/cm²)
- モデル種別 (W：ウェブ部モデル供試体，F：フランジ部モデル供試体)

*：接着剤の状態における「完全接着」は健全な状態、「未硬化」は架設時を想定した状態、「ひびわれ」は継目部にひびわれが発生した状態または接着剤の劣化によって接着力が失われた状態を想定したものである。「未硬化」と「ひびわれ」をあわせて不完全接着供試体と呼ぶ。

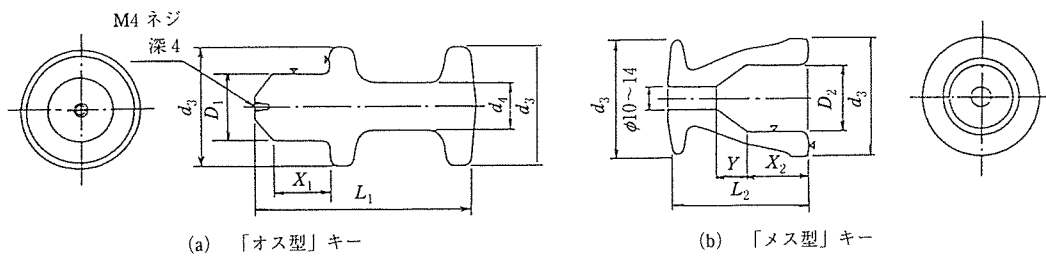


(a) ウェブモデル



(b) フランジモデル

図-2 供試体の形状・寸法および配筋状況



(a) 「オス型」キー

(b) 「メス型」キー

材質 FCD 450

型式	L_1	D_1	d_3	d_4	X_1	L_2	D_2	d_5	X_2	Y	備考
φ28	93	28	50	20	25	59	28.3	50	27	13	
φ32	105	32	60	30	30	55	32.3	60	32	11	
φ50	172	50	80	40	35	79	50.3	80	37	17	リブ付き

図-3 鋼製接合キーの形状・寸法

表-2 純せん断試験の硬化コンクリートの力学的特性

材 齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	ポアソン比	備 考
1 回目 打設 コンクリート	載荷前 σ_{26}	480	38.5	2.66	供試体番号 3, 6, 7, 9, 11, 12, 13, 14, 17
	載荷後 σ_{40}	511	41.9	2.79	
2 回目 打設 コンクリート	載荷前 σ_{13}	473	42.0	2.63	供試体番号 1, 2, 4, 5, 8, 10, 15, 16, 18
	載荷後 σ_{33}	505	39.1	2.78	
平 均		492	40.4	2.72	0.193

表-3 純せん断試験の硬化接着剤の力学的性質

圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	接着強さ (kgf/cm ²)	圧縮弾性係数 (×10 ⁴ kgf/cm ²)
789	279	75	2.93

注) 試験は、プレキャストコンクリート用エポキシ樹脂系接着剤(橋げた用)試験方法(案)……土木学会 1978 に準じる。

リートには、早強ポルトランドセメントを使用し、目標強度 400 kgf/cm²、スランプ 8 cm とした。

供試体製作に使用したコンクリートおよび接着剤の硬化後の力学的性質を表-2 および表-3 に示す。

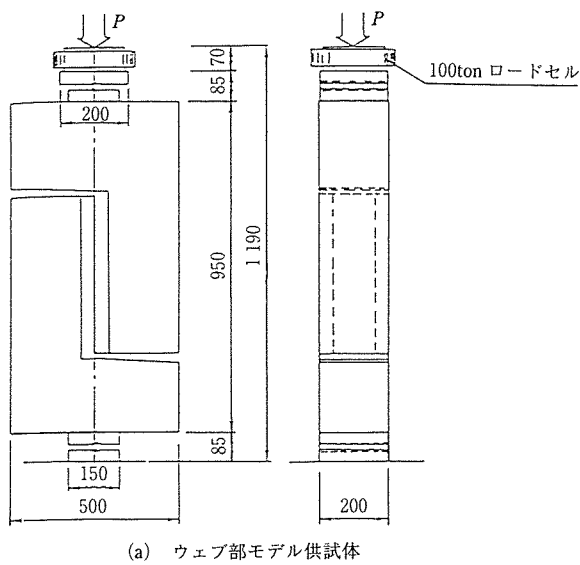


図-4 載荷方法

2.2 載荷方法および計測方法

載荷試験は、図-4 に示すように静的な一軸圧縮載荷で行った。載荷荷重は、ロードセルによって測定し、継目部の鉛直方向のずれを測定するために図-5 に示すようにカンチレバー型変位計を設置した。また、鋼製接合

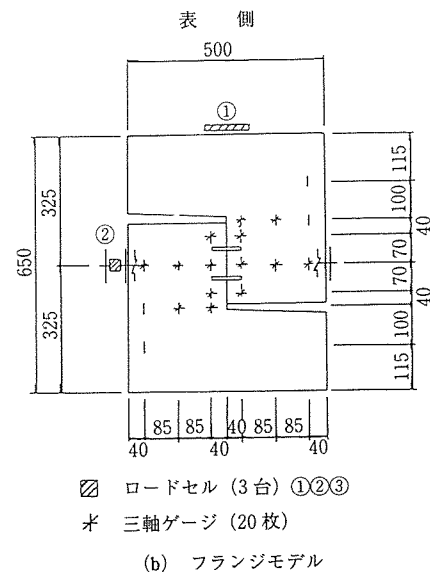
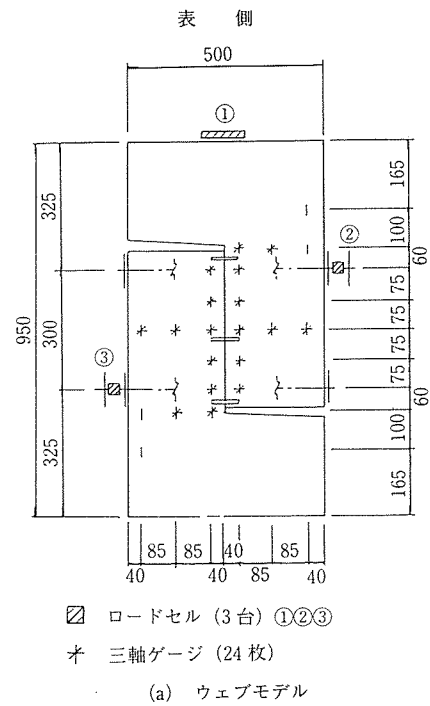
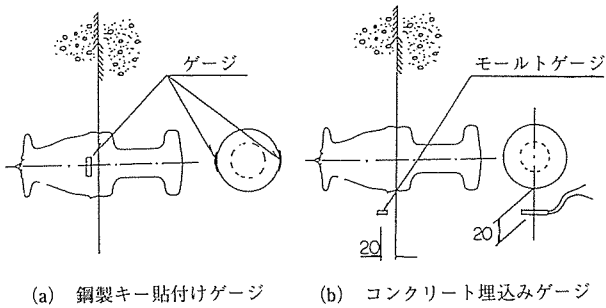


図-5 計測装置取付け位置



(a) 鋼製キー貼付けゲージ (b) コンクリート埋込みゲージ

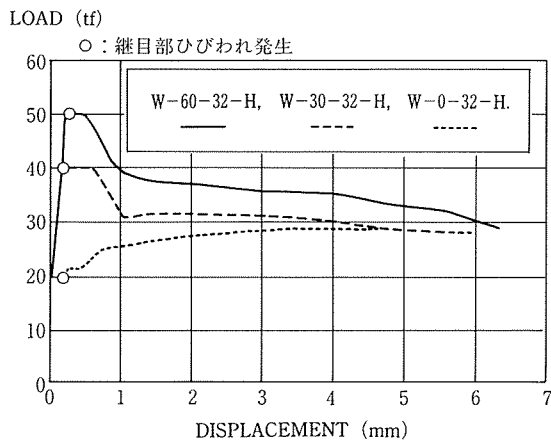
図-6 鋼製接合キーおよび周辺コンクリートのゲージ貼付け位置

キーおよびその周辺のコンクリートに生じるひずみを計測するために、図-6に示すようにひずみゲージおよび埋込みゲージを配置した。

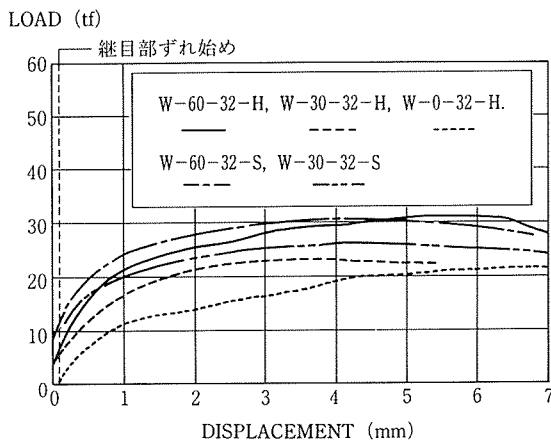
2.3 試験結果

(1) プレストレスの効果

図-7にプレストレスの大きさが異なる完全接着供試体と不完全接着供試体（接着剤未硬化およびひびわれ状態）の荷重と変位の関係を示す。完全接着供試体の場合



(a) 完全接着供試体



(b) 接着剤未硬化およびひびわれ状態供試体

図-7 荷重と変位の関係

の継目部のひびわれ発生荷重は、プレストレスの導入量が多くなるに従って大きくなっている。これは、プレストレスが継目部のひびわれおおよびずれ発生の抑制に対して有効に作用しているためと考えられる。完全接着供試体でプレストレスを導入した場合は、継目部にひびわれが発生すると荷重は低下している。これは、継目部のひびわれ発生までは、接着剤およびプレストレスによってせん断力が伝達されるが、継目部でのひびわれ発生によってモルタル部の耐力が低下し、鋼製接合キーおよびプレストレスによって荷重が伝達されることによるためと考えられる。一方、不完全接着の場合は、継目部のずれ発生荷重はプレストレスの導入量によって大きくなるものの、完全接着ほど顕著な差とはならず、ずれ発生後の荷重の低下も認められなかった。これは、不完全接着供試体では、接着剤の接着効果が期待できず、接合キーによるせん断抵抗のみによるためと考えられる。

図-8に継目部のずれ（ひびわれ）発生応力度とプレストレスの関係を示す。プレストレスにより、継目部の耐力がほぼ直線的に向上する傾向があると理解される。図中において一次関数で近似した場合の切片は、継目部自体の耐力を示し、直線の傾きは、プレストレスによって生じる継目部耐力の増加割合（プレストレスによる摩擦係数）を示す。また、道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編¹⁰⁾（以下「道示Ⅲ」と略記）2.4.2に規定されたコンクリートのせん断応力度の最大値を道示Ⅲによる上限値として併せて図中に示す。ここで、完全接着の継目部自体の耐力は47.8 kgf/cm²、プレストレスによる摩擦係数は0.92となった。一方、不完全接着供試体の場合は、継目部自体の耐力は1.2 kgf/cm²、プレストレスによる摩擦係数は0.34程度となった。これより、接着剤が硬化する前や、接着剤の劣化等により継目部の接着力が低下した場合は、継目部自体の耐力はほとんど期待できず、プレストレスによる摩擦係数も小さくなることが理解された。

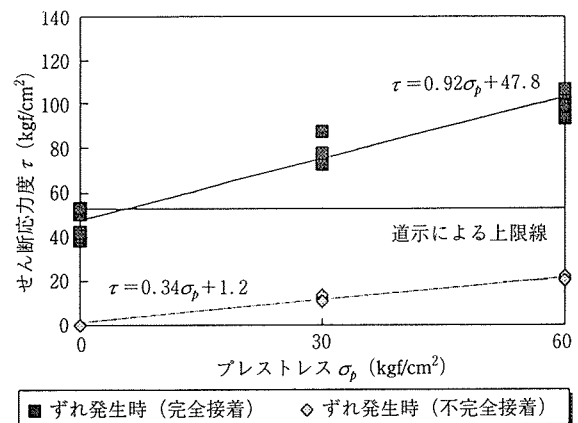


図-8 ずれ発生時のせん断応力度とプレストレスの関係

(2) 鋼製接合キーの効果

図-9に完全接着供試体と不完全接着供試体の代表的な鋼製接合キーおよびその周辺のコンクリート内部のひずみと荷重の関係を示す。継目部にひびわれが生じた時点より鋼製接合キーのひずみが増加していることがわかる。メカニズムとしては、鋼製接合キーに荷重が作用すると鋼製接合キー近傍のコンクリート部分の支圧応力度

が増加し、最終的にこの部分のコンクリートの圧縮破壊によって耐力を失ったと考えることができる。鋼製接合キー自体は、埋込み部分の付着抵抗をよくするような構造となっているが、埋込み長が短いためか回転した形跡が見られた。

ここで、鋼製接合キー近傍のコンクリートの支圧応力度の分布を図-10に示すようにモデル化すると、コンク

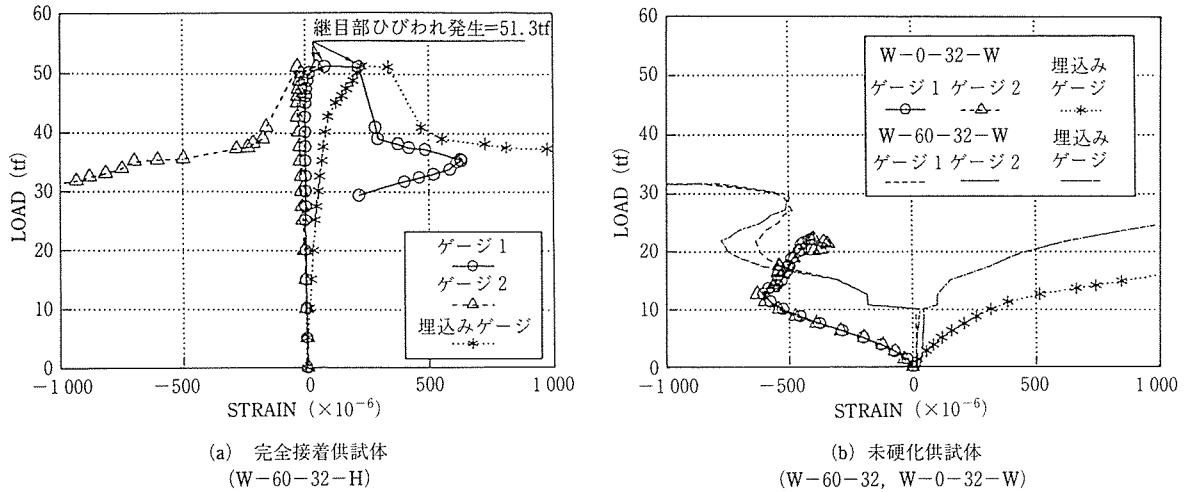


図-9 鋼製接合キーと周辺コンクリートのひずみと荷重の関係

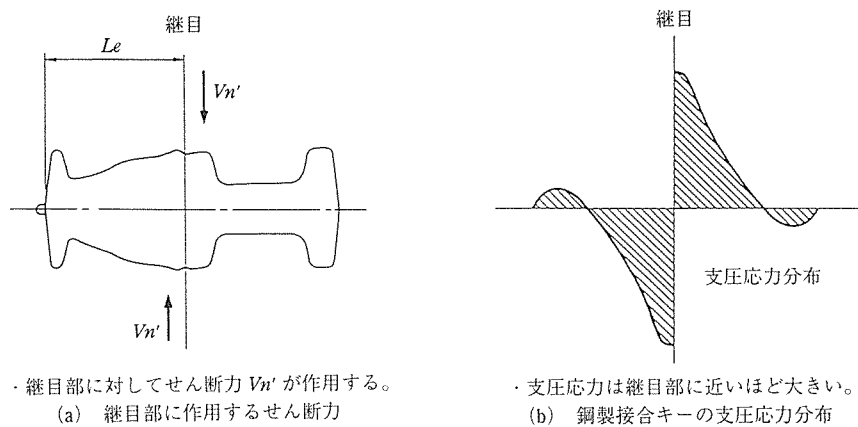


図-10 支圧応力分布モデル

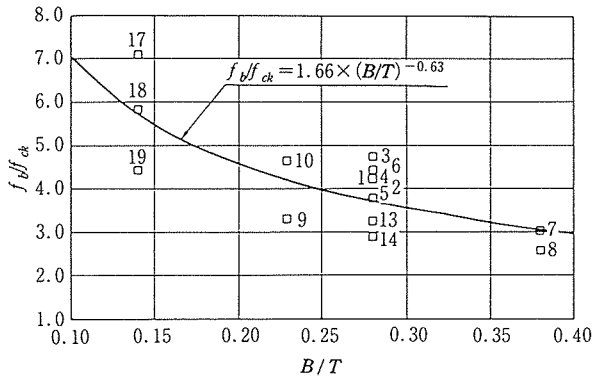


図-11 コンクリート強度・支圧応力度比と B/T の関係

りートの支圧応力度は次式で求められる。

$$f_b = \frac{V_n'}{B \cdot (L_e/3)} \dots\dots\dots(式-1)$$

- ここに、 f_b : コンクリートの支圧応力度
- V_n' : 作用せん断力
- B : 換算支圧幅
- L_e : 接合キーの埋込み長さ

図-11 に、式-1 より算出したコンクリートの支圧応力度 f_b をコンクリートの圧縮強度 f_{ck} で除した値と鋼製接合キーの換算支圧幅 B をコンクリートの抵抗幅 T で除した値の関係を示す。本実験では、コンクリートの支圧応力度の限界値は、コンクリート強度の 2.5~7.1 倍

程度であり、 B/T が小さいほど大きくなる傾向が見られた。

3. 鋼製接合キーを配置した継目部の純ねじり試験

3.1 供試体

プレキャストブロック継目部のねじり伝達機構を把握するために、鋼製接合キーを配置したポストテンション T 桁橋のウェブ継目部をモデル化して供試体を製作した。供試体は、継目部のねじり伝達機構に影響を及ぼす ①プレストレス導入量、②接合状態、③軸方向鉄筋およびスターラップ量、④鋼製接合キーの有無および配置位置、の要因の組合せで計 16 本製作した。供試体の諸元一覧および代表的な供試体の形状寸法と配筋状況を表-4 および図-12 にそれぞれ示す。接合状態の一体構造とは、継目部を設けずコンクリートを一体打設した供試体であり、完全接着および劣化想定は純せん断試験における完全接着およびひびわれと同様である。

鋼製接合キーには純せん断試験で使用した径が $\phi 28$ mm のものと同様の接合キーを使用した。また、コンクリートには早強ポルトランドセメントを使用し、目標強度 500 kgf/cm²、スランプ 8 cm、継目部の接着にはエポキシ樹脂系接着剤を使用した。コンクリートおよび接

表-4 純ねじり供試体の諸元一覧

番号	供試体名	接合状態	接合キー		プレストレス (kgf/cm ²)	鉄筋	備考
			径	アーム (mm)			
1	MC-N-0-13	一体構造・軸方向鉄筋連続	無し	-	0	D 13	継目部の影響およびプレストレスの効果の把握
2	MC-N-30-13				30		
3	MC-N-60-13				60		
4	MD-N-60-13	一体構造・軸方向鉄筋不連続	無し	-	60	D 13	軸方向鉄筋の効果の把握
5	BP-N-0-13	ブロック構造・完全接着	無し	-	0	D 13	プレストレスおよび接合キーの効果の把握
6	BP-N-60-13				60		
7	BP-K-0-13	ブロック構造・完全接着	$\phi 28$	300	0	D 13	標準供試体 プレストレスの効果の把握
8	BP-K-30-13				30		
9	BP-K-60-13				60		
10	BP-S-0-16	ブロック構造・完全接着	$\phi 28$	200	0	D 16	接合キーの配置位置による影響および継目部の破壊形態の把握
11	BP-S-30-16				30		
12	BP-S-60-16				60		
13	BP-K-E-13	ブロック構造・完全接着	$\phi 28$	300	偏心分布	D 13	プレストレス偏心の影響
14	BS-K-0-13	ブロック構造・劣化想定	$\phi 28$	300	0	D 13	接着剤の効果の把握
15	BS-K-30-13				30		
16	BS-K-60-13				60		

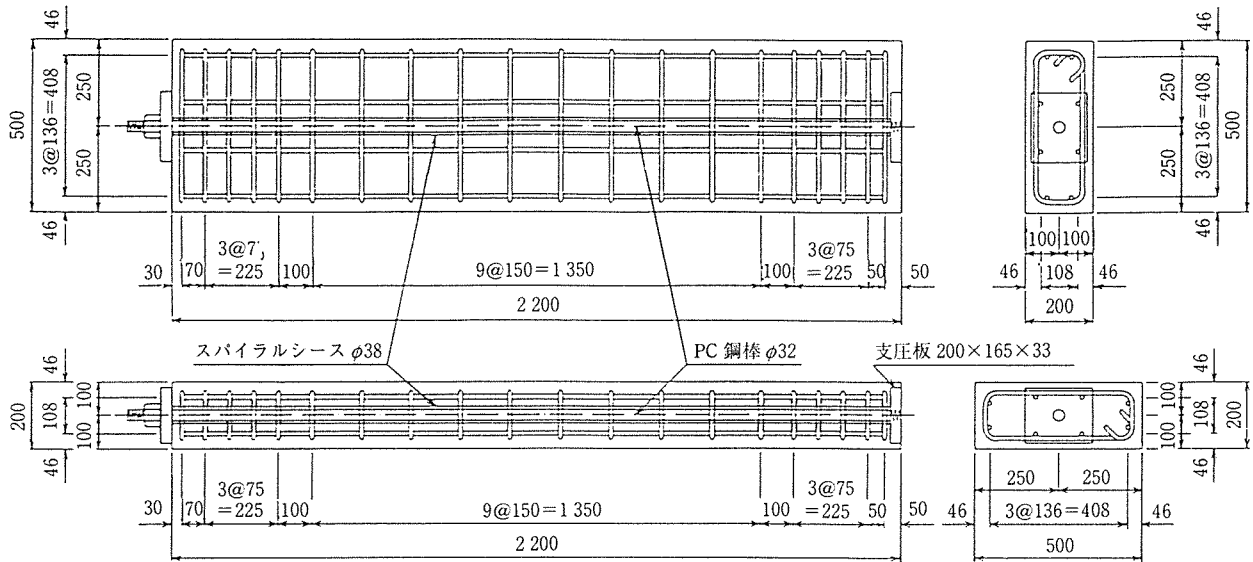
*: 供試体名の記号は以下を表す。

BP-K-60-13

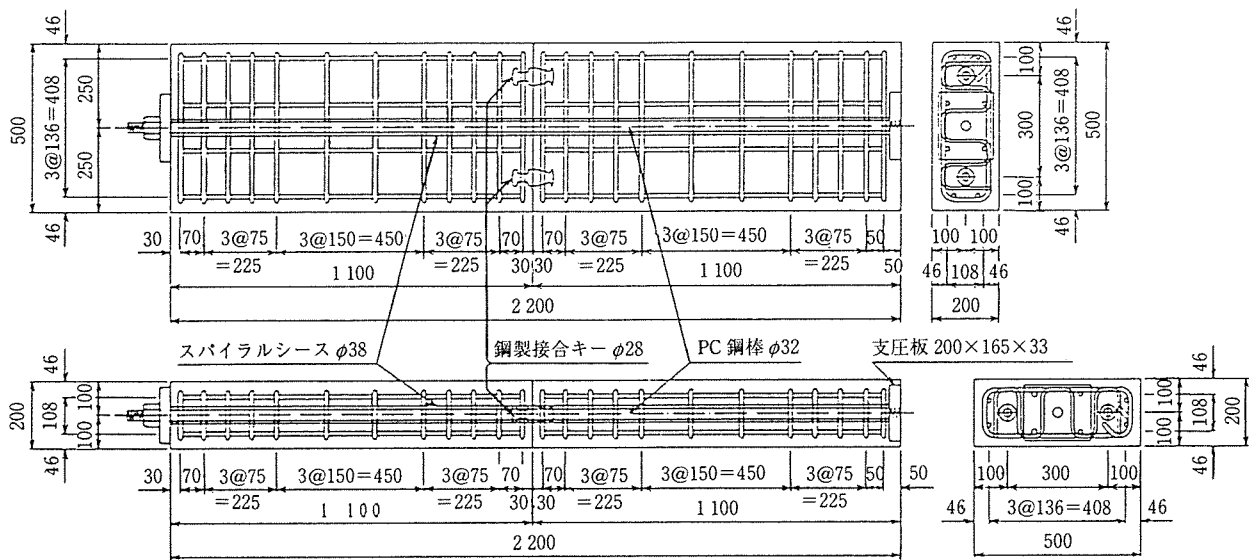
- └─ 軸方向鉄筋およびスターラップの径 (13 : D 13, 16 : D 16)
- └─ プレストレス (0 : 0 kgf/cm², 30 : 30 kgf/cm², 60 : 60 kgf/cm², E : 上縁 10 kgf/cm², 下縁 50 kgf/cm²)
- └─ 接合キーの有無および配置位置 (N : 無し, K : $\phi 28$ ・アーム 300 mm, S : $\phi 28$ ・アーム 200 mm)

└─ 接合状態 (MC : 一体構造・軸方向鉄筋連続, MD : 一体構造・軸方向鉄筋不連続, BP : ブロック構造・完全接着, BS : ブロック構造・劣化想定)

*: 接合状態における「完全接着」は健全な状態、「劣化想定」は接着剤の劣化により接着力が失われた場合を想定したものである。



(a) 一体供試体



(b) ブロック供試体

図-12 供試体の形状・寸法および配筋状況

表-5 純ねじり試験の硬化コンクリートの力学的性質

材 齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾 性 係 数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)	ポアソン比
載荷前 σ_{25}	529	43.7	3.65	0.198
載荷後 σ_{51}	635	46.0	3.88	0.218
平 均	582	44.9	3.77	0.208

表-6 純ねじり試験の硬化接着剤の力学的性質

圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	接着強さ (kgf/cm ²)	圧縮弾性係数 (×10 ⁴ kgf/cm ²)
781	250	81	1.51

注) 試験は、プレキャストコンクリート用エポキシ樹脂系接着剤(橋げた用)試験方法(案)……土木学会 1978 に準じる。

着剤の硬化後の力学的性質を表-5 および表-6 に示す。

3.2 載荷方法および計測方法

載荷実験は、図-13 に示すように、供試体の一端を固定、他端をピン構造としてピン構造側に静的純ねじり

モーメントを作用させた。載荷荷重はロードセルによって計測し、図-14 に示すように変位とねじれ角測定用として変位計と傾斜計を配置した。

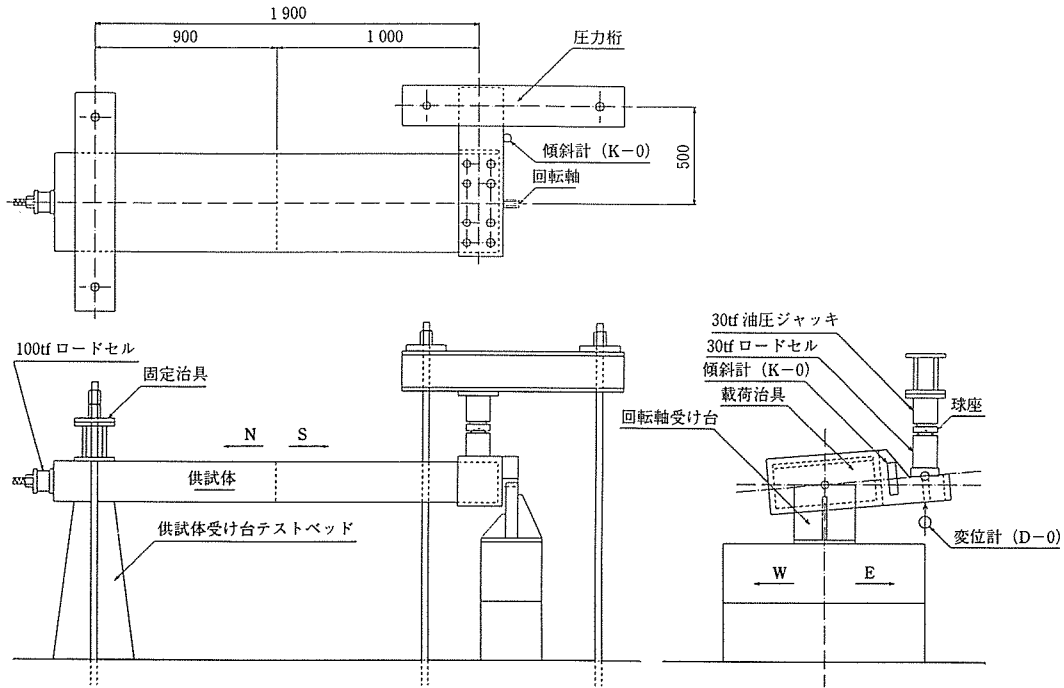


図-13 載荷方法

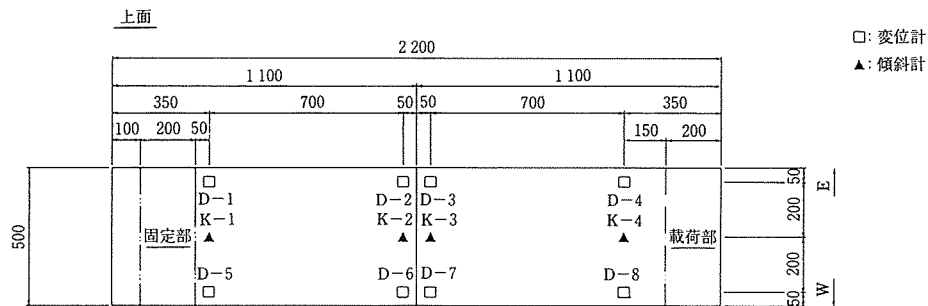


図-14 計測装置の配置位置

3.3 試験結果

(1) プレストレスの効果

図-15 に継目部のずれ発生時および最大耐力時のねじりによるせん断応力度とプレストレスの関係を示す。図より、プレストレスが継目部のずれ発生および最大耐力の向上に対して有効に作用し、ほぼ直線的に耐力が増加していることがわかる。ずれ発生時より得られる継目部自体の耐力は 40.9 kgf/cm^2 、プレストレスによる摩擦係数は 1.03 となった。また、図中のずれ発生時とずれが発生した場合の最大耐力時の比較より、継目部にずれが生じると、ずれ発生後の耐力の向上がほとんど期待できないことが理解された。さらに、継目部にずれが生じない場合の最大耐力時とずれが発生した場合の最大耐力時の比較より、継目部にずれが生じた場合の耐力は、大幅に低下することが明らかとなった。また、継目部にずれが生じない場合のプレストレスによる耐力向上の効果は、直線の傾きで 0.64 程度となった。

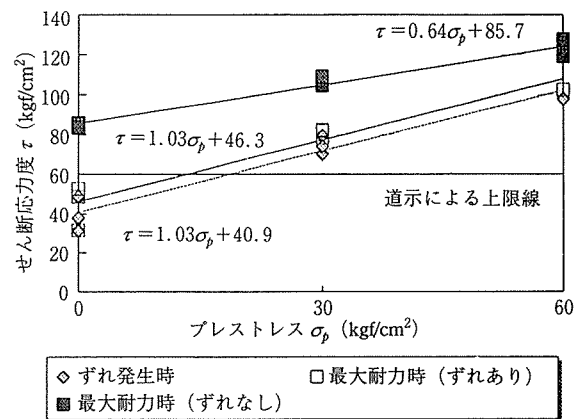


図-15 ねじりモーメントによるせん断応力度とプレストレスの関係

(2) 軸方向鉄筋の効果

図-16 にプレストレスを 60 kgf/cm^2 導入して接合状態のみを変えた4ケースの供試体のねじりモーメントと

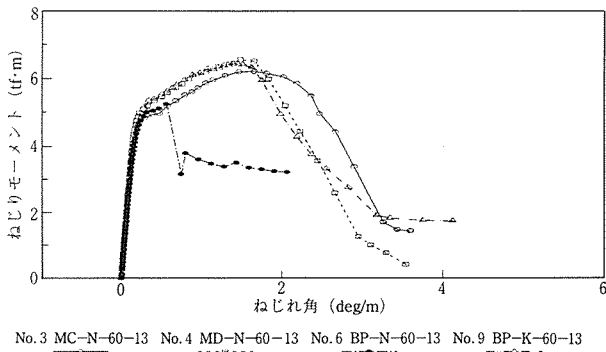


図-16 ねじりモーメントとねじれ角の関係

ねじれ角の関係を示す。ここでは、コンクリートを一体打設して軸方向鉄筋を連続とした No. 3 (MC-N-60-13)、コンクリートを一体打設して継目部の軸方向鉄筋をブロック構造の供試体と同様に不連続とした No. 4 (MD-N-60-13)、継目部を完全接着して接合キーを配置しない No. 6 (BP-N-60-13) および継目部を完全接着して接合キーを配置した No. 9 (BP-K-60-13) について比較を行った。完全接着で接合キーを配置しない No. 6 供試体は、継目部のずれによって耐力が低下したのに

対し、これ以外の供試体はほぼ同様の挙動を示しており、継目部の存在および軸方向鉄筋の分離による影響はほとんど見られない。これより、接着剤、接合キーおよびプレストレスを適切に用いることによって、ねじりに対する継目部および軸方向鉄筋の分離の影響は少なくなり、最大耐力に達するまで一体構造と同様と考えることが可能であることが理解された。

4. コンクリート製接合キーを配置した継目部のせん断試験

4.1 供試体

実験では、接合キー部分をモデル化した矩形断面の小型供試体と、箱桁橋のウェブ継目部をモデル化した大型供試体を製作した。小型供試体では、大きなせん断力が卓越して作用した場合の継目部の挙動を把握し、大型供試体では、大きなせん断力と曲げモーメントが同時に作用した場合の挙動を把握することを目的とした。接合キーの種類は、台形接合キー、多段接合キーおよび波形接合キーの3種類とした。供試体の諸元一覧および形状寸法と配筋状況を表-7 および図-17 に示す。供試体製

表-7 せん断試験供試体の諸元一覧

種別	番号	供試体名	キー形状	キー角度	キー寸法	補強鉄筋 A_e	プレストレス (kgf/cm ²)	接着剤の状態	備考
大型供試体	1	B-C 45 T-20-H	台形	45°	10-30/10	①2-D 19 ②2-D 13	20	完全接着	検討断面①, ②で補強鉄筋量を変化させる。
小型供試体	1	S-C 45 N-40-H	台形	45°	10-30/10	2-D 19	40	完全接着	台形標準供試体：プレストレス導入量を変化させる。
	2	S-C 45 N-20-H					20		
	3	S-C 45 N-0-H					0		
	4	S-C 45 N-20-W				20	未硬化	接着剤未硬化供試体	
	5	S-C 45 L-40-H				4-D 19	完全接着	補強鉄筋多供試体	
	6	S-C 45 -40-H				-		補強鉄筋無供試体	
	7	S-C 60 N-40-H		60°	10-30/18	2-D 19	40	完全接着	キー角度 60°供試体
	8	S-N-40-H	無し	-	-	-	40	完全接着	キー無し供試体
	9	S-M 3-40-H	多段	45°	3-9/3	-	40	完全接着	多段標準供試体：プレストレス導入量を変化させる。
	10	S-M 3-20-H				-	20		
	11	S-M 3-0-H				-	0		
	12	S-M 3-20-W				-	20	未硬化	接着剤未硬化供試体
	13	S-M 5-40-H				-	40	完全接着	キー高 5 cm 供試体
	14	S-W-40-H	波形	-	5-15	-	40	完全接着	波形供試体

*：供試体名の記号は以下を表す。

B-C 45 T-20-H

——接着剤の状態 (H：完全接着, W：未硬化)

——プレストレス (40：40 kgf/cm², 20：20 kgf/cm², 0：0 kgf/cm²)

——キーの形状 (C 45 T：台形 45°補強 2 タイプ, C 45 N：台形 45°補強標準, C 45 L：台形 45°補強多, C 45：台形 45°補強無し, C 60 N：台形 60°補強標準, N：キー無し, M 3：多段キー高 3 cm, M 5：多段キー高 5 cm, W：波形)

——種別 (B：大型供試体, S：小型供試体)

*：キー寸法の記号は以下を表す。

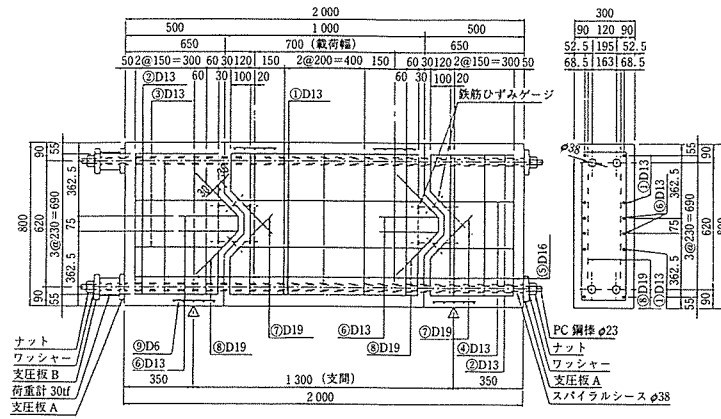
10-30/10

——キーの短辺の長さ (cm)

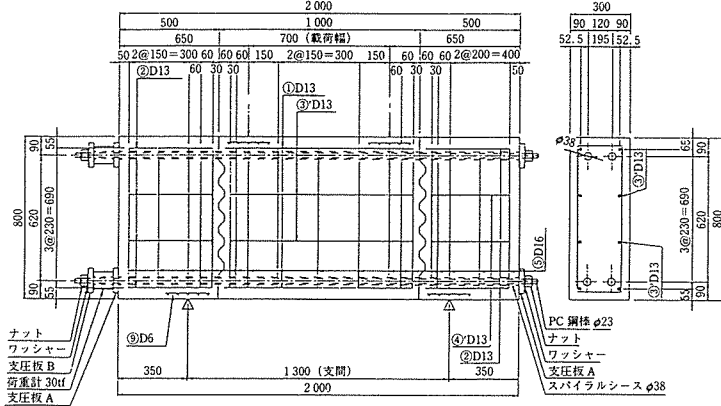
——キーの長辺の長さまたは波形キーの周期 (cm)

——キーの高さ (cm)

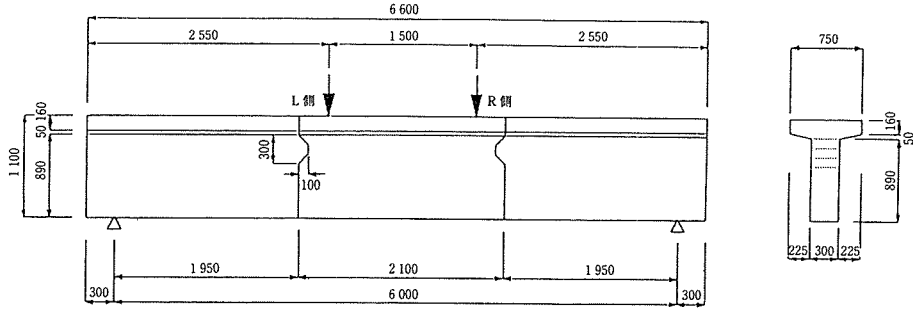
*：接着剤の状態において「完全接着」は健全な状態、「未硬化」は架設時を想定したものである。



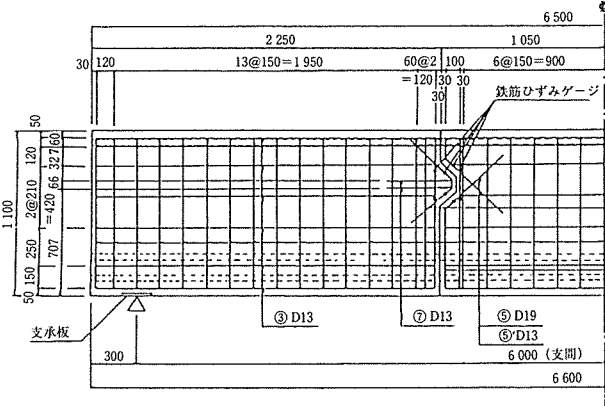
(a) 小型供試体 (台形接合キー)



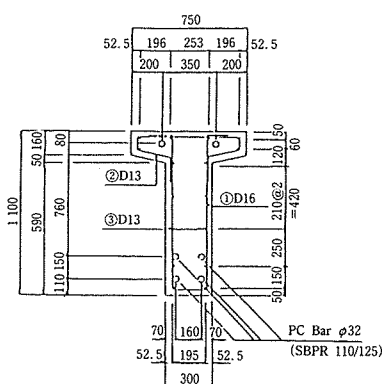
(b) 小型供試体 (多段接合キー)



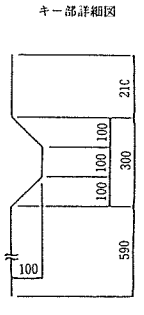
(c) 大型供試体



注) ④⑤は L 鋼
⑥⑦は R 鋼



PC Bar φ32 (SBPR 110/125)



キー部詳細図

図-17 供試体の形状・寸法および配筋状況

表-8 せん断試験供試体の硬化コンクリートの力学的性質

(a) 小型供試体番号 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13

材	齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	ポアソン比
1 回目打設 コンクリート	載荷前 σ_{77}	444	32.8	2.54	0.175
	載荷後 σ_{112}	484	35.2	2.53	0.184
2 回目打設 コンクリート	載荷前 σ_{75}	499	36.2	2.53	0.209
	載荷後 σ_{110}	493	37.4	2.70	0.194
平均		480	35.4	2.57	0.191

(b) 小型供試体番号 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14

材	齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	ポアソン比
1 回目打設 コンクリート	載荷前 σ_{70}	536	38.6	2.65	0.162
	載荷後 σ_{105}	547	35.7	2.64	0.186
2 回目打設 コンクリート	載荷前 σ_{68}	472	38.6	2.57	0.186
	載荷後 σ_{103}	539	38.3	2.72	0.218
平均		524	37.8	2.65	0.188

(c) 大型供試体

材	齢	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)	ポアソン比
1 回目打設	載荷時 σ_{42}	524	44.8	3.19	0.164
2 回目打設	載荷時 σ_{39}	521	41.2	3.20	0.169
3 回目打設	載荷時 σ_{35}	460	38.2	3.03	0.154
平均		502	41.4	3.14	0.162

表-9 せん断試験供試体の硬化接着剤の力学的性質

圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	接着強さ (kgf/cm ²)	圧縮弾性係数 ($\times 10^4$ kgf/cm ²)
820	235	78	1.48

注) 試験は、プレキャストコンクリート用エポキシ樹脂系接着剤(橋げた用)試験方法(案)……土木学会 1978 に準じる。

作には早強ポルトランドセメントを使用し、コンクリートの配合は、目標強度 400 kgf/cm²、スランプ 8 cm とした。コンクリートおよび接着剤の硬化後の力学的性質を表-8 および表-9 に示す。

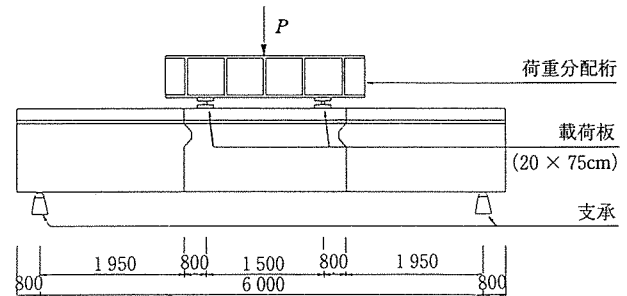
4.2 載荷方法および計測方法

図-18 に示す載荷装置を使用して、供試体に静的載荷を行った。載荷荷重はロードセルによって計測し、また、継目部のずれと開口幅の測定および台形接合キーの補強鉄筋のひずみ計測用として図-19 に示すようにカンチレバー型変位計、 π 型変位計、変位計およびひずみゲージを設置した。また、継目部の力の流れを把握するために、コンクリート表面に三軸ゲージも貼付した。

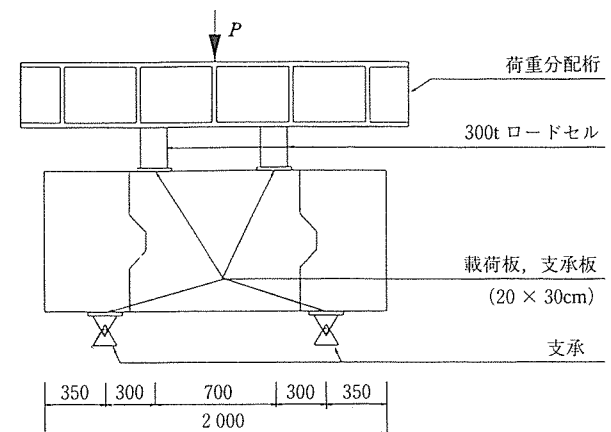
4.3 試験結果

(1) プレストレスの効果

図-20 に台形接合キーおよび多段接合キーを配置した継目部のずれ発生時のせん断応力度とプレストレスの関係を示す。コンクリート製接合キーも鋼製接合キーを配置した場合と同様に、プレストレスの導入量が増加する



(a) 小型供試体

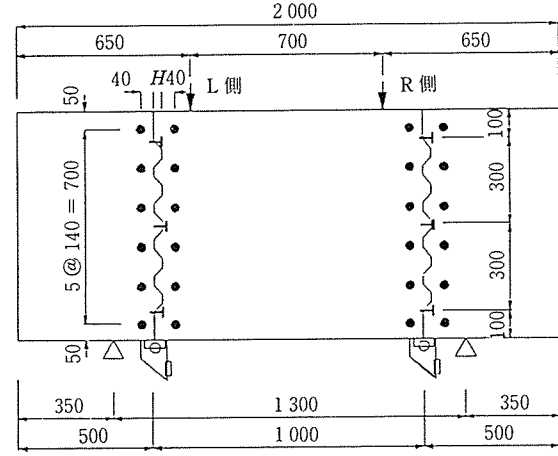
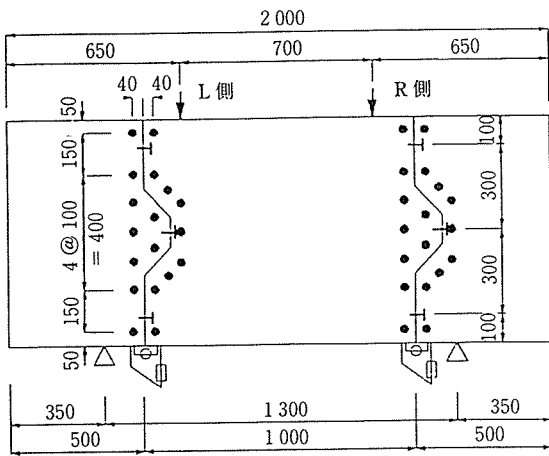


(b) 大型供試体

図-18 載荷方法

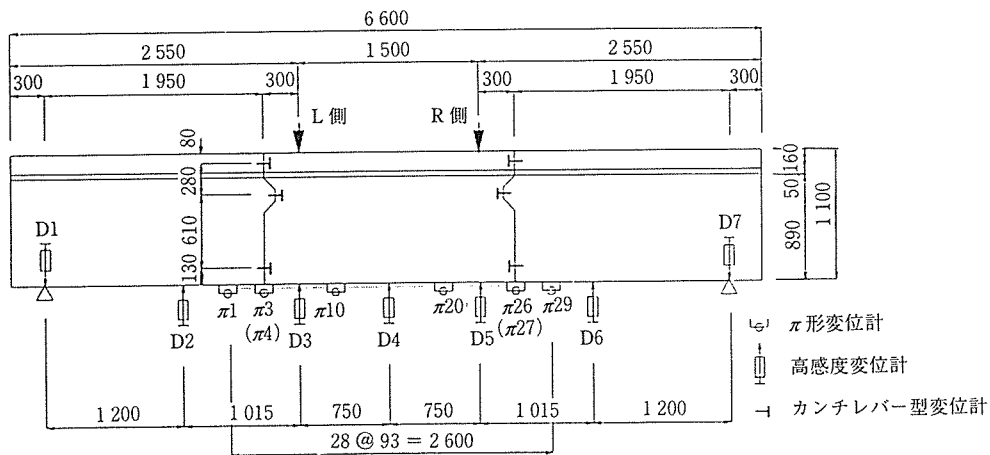
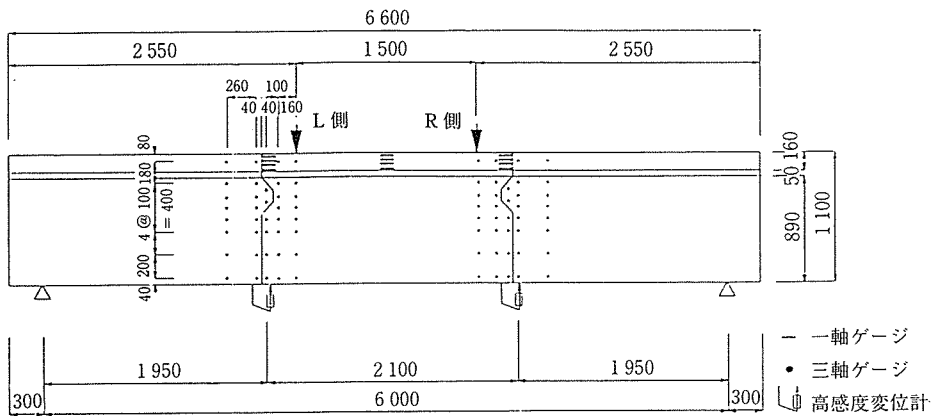
- 三軸ゲージ
- ┌ カンチレバー型変位計
- π π形変位計
- ⊥ 高感度変位計

H : 接合キーの高さ



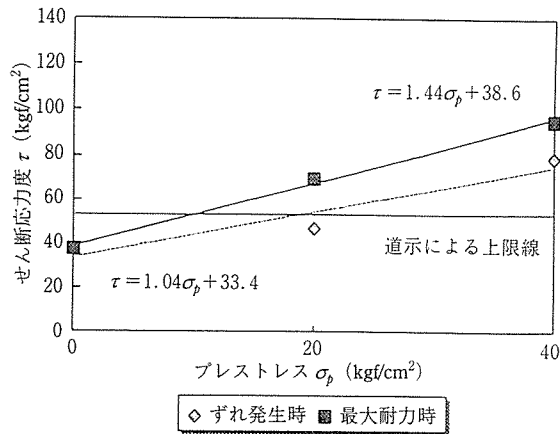
(a) 供試体 No. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

(b) 供試体 No. 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14

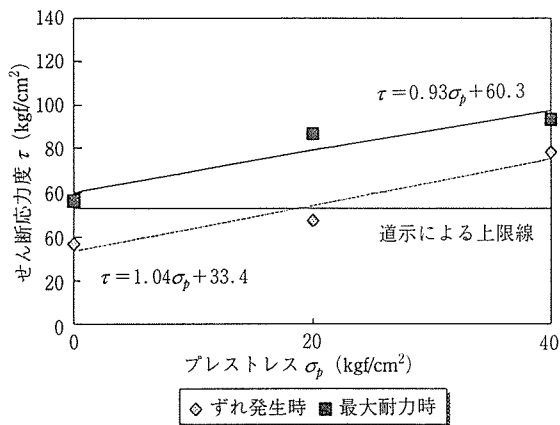


(c) 大型供試体

図-19 計測装置取付け位置



(a) 台形接合キー



(b) 多段接合キー

図-20 せん断応力度とプレストレスの関係

に従って継目部のずれ発生応力および最大耐力が増加しており、プレストレスが耐力向上に有効に作用していることがわかる。台形および多段接合キーともずれ発生時の継目部自体の耐力は 33.4 kgf/cm^2 程度、プレストレスによる摩擦係数は 1.04 程度となった。また、最大耐力時のプレストレスによる耐力向上の割合（傾き）は、台形接合キーで 1.44 、多段接合キーで 0.93 程度であった。

(2) 台形接合キーの補強鉄筋の効果

図-21 に完全接着でプレストレスの導入量が 40 kgf/cm^2 で、台形接合キー内に配置した鉄筋量が異なる供試体の補強鉄筋量とせん断耐力の関係を示す。図より、補強鉄筋量が変わってもせん断耐力にはほとんど差がなく、ほぼ一定の 220 tf 程度の値となった。これは、供試体の最大耐力がコンクリートの圧縮強度によって決定されていることから、補強鉄筋量の影響が少なかったものと考えられる。

(3) 曲げモーメントおよびせん断力の影響

大型供試体を用いて行った継目部に曲げモーメントおよびせん断力を作用させた場合の破壊性状を図-22 に示

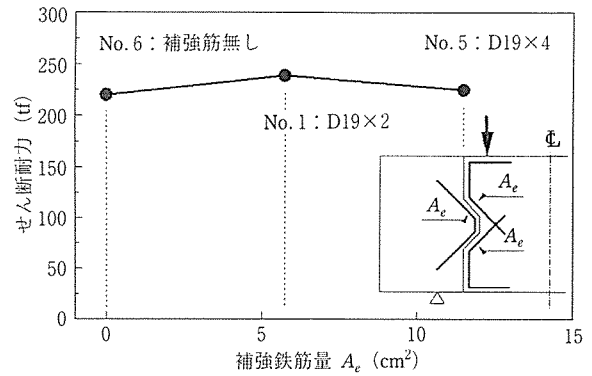


図-21 補強鉄筋量とせん断耐力の関係

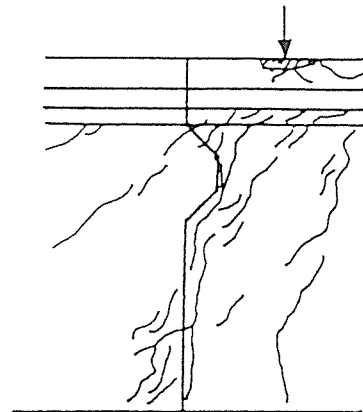


図-22 大型供試体の破壊性状

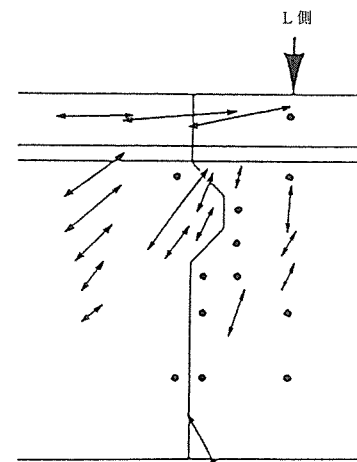


図-23 継目部の力の流れ

す。ひびわれは、継目部に沿ったものと支間中央部の曲げひびわれがほぼ同時に発生したが、ひびわれの進展は継目部に沿ったものの方が速い傾向にあった。また、曲げひびわれ発生後に生じたせん断ひびわれは、台形接合キーを貫通して進展しており、接合キーがせん断力を十分に伝達しているものと考えられる。接合キーがせん断力を伝達していることを確認するために、最大耐力に至る直前のコンクリート表面の力の流れを図-23 に示す。ここで、ひびわれ発生によりゲージが断線した地点のデータは省かれている。この圧縮主応力分布より、接合

キーは破壊直前まで荷重を伝達していたものと考えられる。

5. プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋設計・施工指針(案)

プレキャストブロック継目部のずれ発生に対して、プレストレスが有効に作用することは一般に理解されていた。しかし、これを定量的に規定した基準はなく、プレキャストブロック継目部の設計においてプレストレスの効果は考慮されていなかった。このため、接合キーの設計は安全側となっていた。また、今後増加が予測される波形および多段接合キーの設計法を規定する必要があった。

これらの設計上の課題に対して、本共同研究におけるプレキャストブロック継目部をモデル化した模型供試体を用いた実験より得られた知見に基づき、「プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋設計・施工指針(案)」において以下のような提案を行った。なお、これらの基準に関する提案は、順次基準類^{5),6)}に反映されている内容である。

① コンクリート強度について

道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編 3.2.2 の規定によると、ポストテンション方式のプレストレストコンクリート部材としての設計基準は、原則として 300 kgf/cm² 以上となっている。しかし、プレキャストブロック工法に用いる主桁のコンクリートは、接合キー周辺の局所的な応力や、プレストレス導入前の移動、取扱い上の安全性を考慮して、原則として設計基準強度が 400 kgf/cm² 以上と規定した。

② プレストレスの効果について

本試験より、継目部のずれ発生抑制および最大耐力の向上に対して、プレストレスが有効に作用することが理解された。その効果は、図-7、図-15 および図-20 に示したとおりである。

これより、終局荷重作用時の接合キーの設計において、接合キーに作用するせん断力またはねじりモーメントを算出する際にプレストレス力の摩擦によるせん断抵抗係数を安全率も考慮して 0.3 とし、接合キー 1 箇所あたりに作用するせん断力およびねじりモーメントは以下の式で算出してもよいものとした。ただしせん断力とねじりモーメントが同時に作用した場合は、プレストレスによって緩和される接合キーに作用するねじりモーメントには係数 α (通常は 0.5) を乗じるものとした。

せん断力

$$S = S_k - S_{pf} \dots\dots\dots(式-2)$$

ここに、 S : 終局荷重作用時の接合キー 1 箇所あ

たりの設計せん断力 (kgf)

S_k : 終局荷重作用時の接合キー 1 箇所あたりのせん断力 (kgf)

S_{pf} : 接合キー 1 箇所あたりのプレストレス力の摩擦によるせん断抵抗力 (kgf)

$$S_{pf} = 0.3 \cdot P_e \cdot \cos \theta / N \dots\dots\dots(式-3)$$

$P_e \cdot \cos \theta$: 全 PC 鋼材の引張力の軸方向分力 (kgf)

N : 同一形状の接合キーの個数

ねじりモーメント

$$M_{tu} = M_{tuo} - \alpha \cdot M_{tp} \dots\dots\dots(式-4)$$

M_{tu} : 終局荷重作用時の継目部のねじりモーメント (kgf·cm)

M_{tuo} : 終局荷重作用時の荷重による継目部のねじりモーメント (kgf·cm)

α : ねじりモーメントとせん断力が同時に作用した場合の低減係数。荷重の作用条件などで最大 1.0 の値となる。通常は 0.5 としてよい。

箱桁の場合

$$M_{tp} = 0.3 \cdot \sigma_{cp} \cdot K_t(\text{min}) \dots\dots\dots(式-5)$$

ここに、 σ_{cp} : 断面に導入されている平均プレストレス (kgf/cm²)

$K_t(\text{min})$: (=2 $A_m \cdot t(\text{min})$)

A_m : 道示Ⅲ表-解 2.4.1 参照

$t(\text{min})$: 箱形断面内で最も薄い部材厚さ (cm)

T 桁の場合

$$M_{tp} = 0.3 \cdot \sigma_{cp} \cdot \frac{\sum h_i \cdot b_i^3}{3.5 \cdot b(\text{min})} \dots\dots\dots(式-6)$$

ここに、 $\sum h_i \cdot b_i^3$: 道示Ⅲ表-解 2.4.1 参照

$b(\text{min})$: T 形断面の中の分割長方形で最も薄い短辺の幅 (cm)

③ 支圧応力度について

鋼製接合キーを配置した T 桁橋の場合、載荷試験より鋼製接合キー近傍のコンクリートに応力集中が生じ、コンクリートの圧縮破壊によって破壊に至ったことから、図-10 および図-11 に示したように、接合キー周辺のコンクリートに局所的に作用する支圧応力度について安全性を検討した。これより、接合キー周辺のコンクリートに作用する支圧応力度は、次式を満足するものとした。

架設時

$$\sigma_{tb} = \frac{S_T}{B \cdot (L/3)} \leq 1.5 \cdot \sigma_c \dots\dots\dots(式-7)$$

終局荷重作用時

$$\sigma_{ub} = \frac{S_k - S_{pf}}{B \cdot (L/3)} \leq 2.0 \cdot \sigma_{ck} \dots\dots\dots(式-8)$$

ここに、 σ_{lb} : 架設時にコンクリートに作用する支圧応力度 (kgf/cm²)

S_T : 架設時の接合キー 1 箇所あたりのせん断力 (kgf)

B : 接合キーの外径 (cm)

L : 接合キーの埋込み長さ (cm)

σ_c : 架設時のコンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)

σ_{ub} : 終局荷重作用時にコンクリートに作用する支圧応力度 (kgf/cm²)

S_k : 終局荷重作用時の接合キー 1 箇所あたりのせん断力 (kgf)

S_{pf} : 接合キー 1 箇所あたりのプレストレス力の摩擦によるせん断抵抗力 (kgf)

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)

④ 台形接合キーの補強鉄筋について

図-24 に台形接合キーの標準的な構造例を示す。図-21 に示したとおり、補強鉄筋量は最大耐力にほとんど影響を及ぼさなかったことから、接合キーに配置する補強鉄筋量は、道示Ⅲによる式と同様とし、架設時と終局荷重作用時について検討して多い方を配置するものとした。今回の規定を用いると、接合キーの補強鉄筋量算出時に終局荷重作用時のせん断力が支配的となる場合には、プレストレス力の摩擦による抵抗係数を考慮した分、鉄筋量が減少することになる。

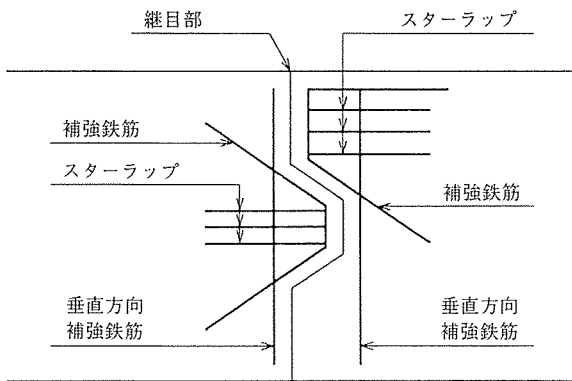
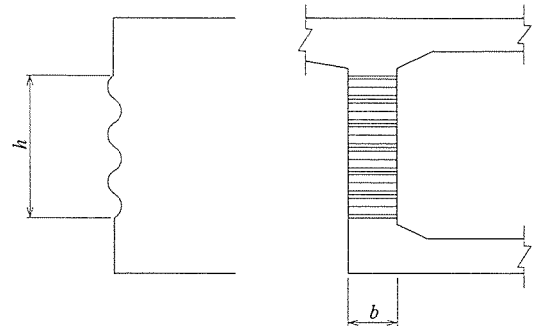


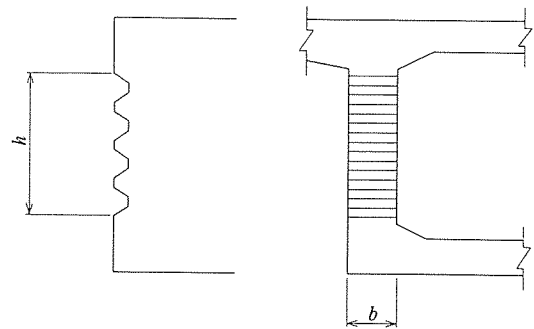
図-24 台形接合キーの構造例

⑤ 波形および多段接合キー

図-25 に波形および多段接合キーの標準的な形状を示す。この形式の接合キーは、凹凸部内部に補強鉄筋を配置することは困難であることから、接合キー面に作用するせん断応力度を規定するものとした。接合キー面のせん断応力度は、架設時をモデル化した供試体の接合キーのひびわれ発生が、せん断応力度に換算して 57 kgf/cm² 程度であったことより架設時には 15 kgf/cm²、多



(a) 波形接合キー



(b) 多段接合キー

図-25 波形および多段接合キーの構造例

段接合キーのプレストレスと荷重によるせん断応力度の関係(図-20)より、終局荷重作用時には 20 kgf/cm² 程度以下とするのが望ましいとした。このときのせん断応力度は、接合キー部のみがせん断力に抵抗するものとし、次式で求めるものとした。

$$\tau = \frac{S}{b \cdot h} \dots\dots\dots(式-9)$$

ここに、 τ : 接合キー面のせん断応力度 (kgf/cm²)

S : 接合キー 1 箇所あたりに作用するせん断力 (kgf)

b : 接合キー高さ (図-25 参照) (cm)

h : 接合キー幅 (図-25 参照) (cm)

なお、プレキャストブロック工法において、継目部の接着剤が劣化等によって接着力を失った場合、先に示したとおり耐力が低下するおそれがある。よって、本指針(案)では継目部自体の耐力は設計上考慮していない。さらに、接着剤の劣化に関しては、13 年間供用された後、路線変更によって撤去されたプレキャストブロック工法による T 桁橋の継目部からコア供試体を採用し、せん断試験を実施した。その結果³⁾、力学的には接着剤の劣化はなんら見られず、一体構造と同等のせん断耐力を有していた。

6. おわりに

プレキャストブロック工法は、比較的古くから行われ

てきた工法ではあるが、その位置づけが特殊であったため設計・施工に関する基準の整備が十分とはいえない状況にあった。今回、共同研究の成果によってせん断力およびねじりモーメントに対する継目部の設計法を含む統一的な設計・施工指針（案）が作成され、種々の基準類にその成果が反映され始めている。

プレキャストブロック工法は、国内外で年々施工実績が増加しており、将来的にもプレストレストコンクリートの特性を生かした技術として極めて有効であると思われる。本研究の成果が設計あるいは施工の現場において役立てられ、プレキャストブロック工法の発展の一助となれば、共同研究に携わった技術者の望外の喜びである。

謝 辞

本共同研究を実施するにあたり、その初動段階より終始適切にご指導を頂いた藤原稔前構造橋梁部長（現東北大学工学部教授）、箕作光一前橋梁研究室主任研究員（現関東地方建設局企画部建設専門官）、杉山純前橋梁研究室研究員（現関東地方建設局常陸国道工事事務所係長）らの尽力があった。これら諸兄のご努力がなければ本研究を世に問うものとはならなかった。ここに改めて感謝と尊敬の念を表すものであります。また、研究遂行にあたり、常に主導的な立場をとっていただいた宮地清氏をはじめ、プレストレスト・コンクリート建設業協会の共同研究担当の方々、特に、平成3年度および平成4年度の実験・解析を担当された渡辺浩良氏および井筒浩二氏に心より感謝の意を表すものであります。

参 考 文 献

- 1) 藤原，西川，箕作ほか：「プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書（Ⅰ）」建設省土木研究所共同研究報告書第69号，平成4年3月
- 2) 藤原，西川，神田ほか：「プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書（Ⅱ）」建設省土木研究所共同研究報告書第82号，平成5年3月
- 3) 藤原，西川，神田ほか：「プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書（Ⅲ）」建設省土木研究所共同研究報告書第98号，平成6年3月
- 4) 「プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリートTげた道路橋の設計施工指針」（社）日本道路協会，平成4年10月
- 5) 西川，神田，清水：「プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリートTげた道路橋設計施工指針について」土木技術資料35-10，1993年10月，pp. 2~3
- 6) 「コンクリート道路橋設計便覧」（社）日本道路協会，平成6年2月
- 7) 西川，神田，清水：「コンクリート道路橋設計便覧—プレキャストブロックについて—」土木技術資料37-2，1995年2月，pp. 2~3
- 8) 横山，西川，神田ほか：「プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋設計・施工指針（案）」建設省土木研究所共同研究報告書第130号，平成7年12月
- 9) 「コンクリート道路橋施工便覧」（社）日本道路協会，改訂作業中
- 10) 「道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編」（社）日本道路協会，平成6年2月

【1995年6月15日受付】