

Post Rigid Systemの開発

～鋼とコンクリートの遅延合成構造～

Development of the "Post Rigid System" (PRS)

渡辺 滉

Hiroshi WATANABE

川田工業(株)橋梁事業部技術統括部長

橋 吉宏

Yoshihiro TACHIBANA

川田工業(株)橋梁事業部東京技術部
技術課課長

宮地 真一

Shinichi MIYACHI

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計二課課長

牛島 祥貴

Yoshitaka USHIJIMA

川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部
設計一課

北川 幸二

Koji KITAGAWA

川田工業(株)橋梁事業部東京技術部
技術課

居山 和徳

Kazunori IYAMA

川田工業(株)工事本部東京工事部
工事課

著者らは、遅延硬化性樹脂モルタルを使用して、一定期間は非常に柔なずれ止めとして働き、使用時には完全合成となるずれ止め（PRスタッド）の開発を試みた。このような構造があれば、乾燥収縮で鋼材の拘束により発生するコンクリートの引張力を低減できる合成構造や、PS導入時に非合成でその後合成となる合成構造など、合成構造物の自由度をさらに拡げることが期待できる。

本文は、PRスタッドに用いる樹脂モルタルやPRスタッド、PS導入時に非合成でその後合成へと変化するPRS梁（SCビーム）の試験結果について報告する。さらにPRSを用いた実橋「白鳥橋」の概要についても報告する。

キーワード：遅延合成構造、遅延硬化性樹脂モルタル、PRスタッド、SCビーム

1. まえがき

異種材料の組合せからなる合成構造は、合成の程度により完全合成、弾性合成、非合成に分けられるが、経時的に非合成から合成へと変化する構造形式は、いまだに考案されていない。もし、このような遅延合成構造（Post Rigid System, 以下「PRS」と称す）が可能であれば、乾燥収縮で鋼材の拘束により発生するコンクリートの引張力を低減できる合成構造や、鋼部材の存在を意識することなく、PC鋼材でコンクリートにプレストレスを与えることができる合成構造が実現し、PS導入時に非合成であり、その後合成となる構造が誕生するなど、合成構造物の自由度はさらに拡げられるものと期待できる。

そこで、通常のずれ止めに「遅延硬化性樹脂モルタル」を使用することにより、一定期間は非常に柔なずれ止めとして働き、供用時には完全合成となるような新しいずれ止め（Post Rigid Stud, 以下「PRスタッド」と称す）の開発を試みた。またPRスタッドにおいて樹脂モルタルの果たす役割が大きく、コンクリートと鋼のずれ止めとして供用されるには、硬化後の樹脂モルタルの強度がコンクリート以上であることと、ある程度のヤング率が必要である。また、硬化前については、樹脂モルタルの付着性状を確認しておく必要がある。

本文では、PRSに使用する樹脂モルタルやPRスタッド、

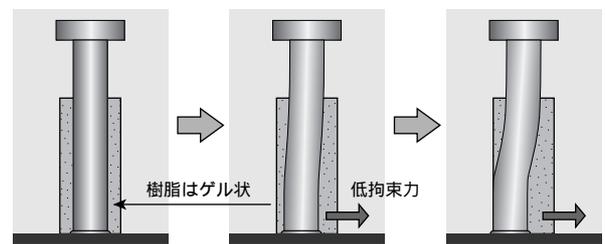
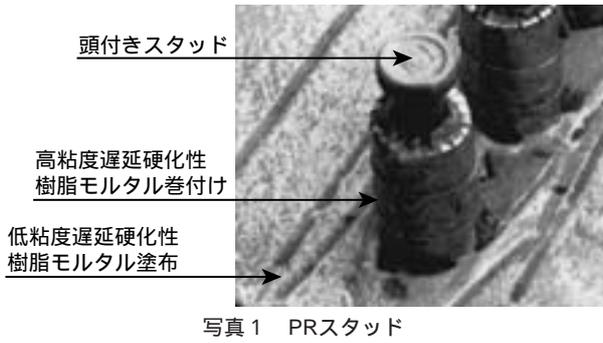


図1 樹脂モルタル硬化前のPRスタッドの挙動

PRSを使用したSCビームの各種試験結果を報告するとともに、PRSを使用した初めての実橋「白鳥橋」の工事報告や今後のPRS利用方法を述べる。

2. PRスタッドの押抜き試験

PRスタッドは写真1に示すように、頭付きスタッドジベルの軸部根元近傍に高粘度遅延硬化性樹脂モルタルを巻き付けたずれ止めである。巻付け範囲はアップリフトに抵抗させるため幹基部からスタッド全高の2/3程度とし、樹脂厚はずれ止めに要求される自由な相対ずれ量に基づいて決めた。併せて鋼フランジ面の付着を低減するため、鋼板表面には低粘度遅延硬化性樹脂モルタルを塗布している。この結果、施工後初期のPRスタッドは図1のように水平せん断に対しては拘束力が低く、遅延硬化性樹脂モルタルが硬化した後は通常のスタッドと同等のせん断抵抗を有するものと期待される。



(1) 試験体と試験方法

表1に押抜き試験体の種類とコンクリート・樹脂モルタルの強度特性を示す。これら各3体×3種類の試験体で、樹脂モルタル硬化前後の挙動および強度変化を確認することにした。なお、比較のため通常のスタッドを用いた試験体も用意している。試験体の製作および試験方法は、JSSCの頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)に従った(図2参照)。なお、スタッドは19×110、高粘度樹脂モルタルは巻付け範囲を70mm、厚を8mmとし、低粘度樹脂モルタルは塗布厚を1.5mmとした。

(2) 試験結果

図3および表2に漸増繰り返し载荷による静的押抜き試験結果を示す。

表2 静的押抜きせん断試験結果

供試体種別	最大せん断耐力 Q_{max} (kN/stud)	各相対ずれにおけるずれ定数 K (kN/mm \cdot stud)					
		0.2mm	0.5mm	1.0mm	2.5mm	5.0mm	
通常のスタッド	1	140	778	235	205	192	169
	2	113	596	234	219	186	164
	3	111	345	207	169	147	121
	平均	121	573	225	198	175	151
PRスタッド 施工後1カ月 硬化前	1	132	56	27	20	18	19
	2	109	48	29	23	23	21
	3	131	94	38	22	21	21
	平均	124	66	31	22	21	20
PRスタッド 施工後1カ月 促進硬化	1	136	346	224	195	172	161
	2	118	457	223	176	117	104
	3	134	603	282	218	181	142
	平均	129	469	243	196	157	136

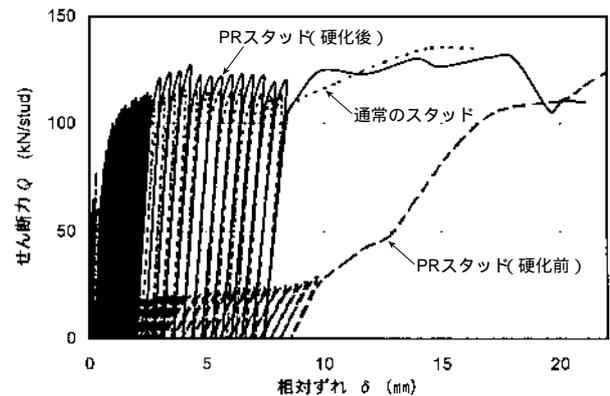


図3 荷重-相対ずれ関係

表1 供試体種類と材料強度特性

供試体種別	樹脂の巻付け	樹脂の硬化	コンクリートの強度特性	遅延硬化性樹脂モルタルの強度特性
通常のスタッド	無	-	$f'_c = 28.9\text{N/mm}^2$ $E_c = 23\,750\text{N/mm}^2$	高粘度: $f'_t = 115.0\text{N/mm}^2$ $E_t = 15\,750\text{N/mm}^2$
PRスタッド(硬化前)	有	1カ月後未硬化		低粘度: $f'_t = 101.0\text{N/mm}^2$ $E_t = 6\,200\text{N/mm}^2$
PRスタッド(硬化後)	有	加熱促進硬化		

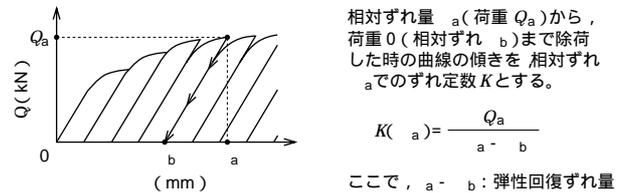


図4 ずれ定数の算出

a) 最大せん断耐力 (Q_{max})

表2から明らかなように、いずれも Q_{max} はほぼ同一であった。これにより、PRスタッドは樹脂モルタルの硬化前後にかかわらず、通常のスタッドと同等の強度を有することが確認された。

b) ずれ性状

図3から、樹脂モルタルの硬化前後でPRスタッドのずれ性状が大きく変化していることがわかる。まず、樹脂モルタル硬化前のPRスタッドは、相対ずれが8mm付近までほぼ一定のせん断力を保持した。このずれ量は樹脂巻付け厚8mmと一致しており、必要となる自由相対ずれ量分の巻付け厚を確保すれば良いことが確認された。また、樹脂モルタル硬化後のPRスタッドは、通常のスタッドとほぼ同様のずれ性状を示した。相対ずれが10mm程度まで通常のスタッドより大きなせん断力を示しているのは、硬化後の樹脂モルタルがスタッド根元部

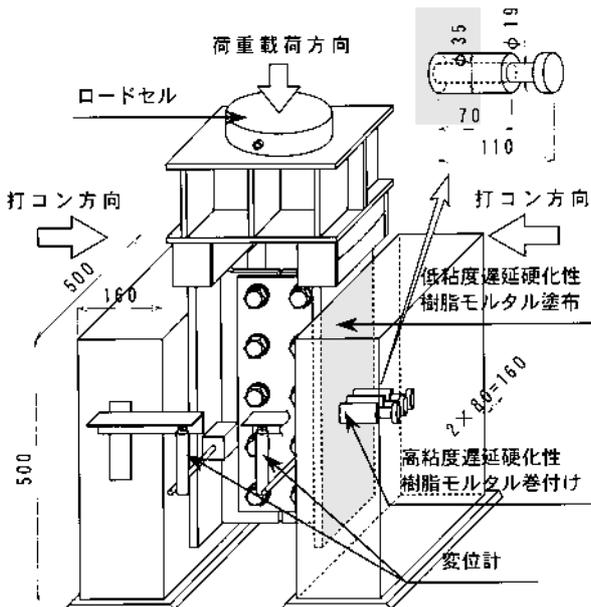


図2 押抜き試験供試体および試験方法

を太くし、コンクリートの支圧面積を増加させていることに起因しているためと考えられる。

c) ずれ定数 (K)

図3の各相対ずれにおける除荷曲線の傾きをずれ定数として算出し(図4),表2に示した。樹脂モルタル硬化後のPRスタッドと通常のスタッドは、いずれの相対ずれについてもほぼ同一のずれ定数である。つまり、PRスタッドの弾性回復ずれ量は、通常のスタッドのものと同じであることが立証された。樹脂モルタル硬化前のPRスタッドは他と比べてそれぞれ1/10程度のずれ定数を有している。このことから、PRスタッドは大きな相対ずれを生じつつも、弾性回復ずれ量が極めて大きく、復元性が保証されていることが明らかである。

(3) 考察

PRスタッドの押抜き試験にて確認されたことをまとめる。

樹脂モルタル硬化前のPRスタッドは拘束力が低く、巻付け厚で自由相対ずれ量を調整できる。

樹脂モルタル硬化後のPRスタッドは通常のスタッドと同等のせん断耐力を有する。

硬化後の高粘度樹脂モルタルはスタッド幹の一部として寄与する。

以上の結果から、PRスタッドは樹脂硬化前には非常に柔なずれ止めとして働き、硬化後は通常のスタッドと同等な性能を有していることが確認でき、実橋への適用は可能であることがわかった。なお、硬化前のずれ定数や保持できる限界せん断力の調整については、スタッド径や樹脂モルタルの巻付け範囲に関係するので、その関係については今後の課題である。

3. 遅延硬化性樹脂モルタルの物性試験

PRSに使用する遅延硬化性樹脂は、常温硬化型のエポキシ樹脂であり、硬化剤の添加量によって硬化期間を1~12カ月に、フィラーの配合量によって樹脂自体の粘度を調整することが可能である。樹脂は未硬化時にはゲル状であり、ずれ性状に対して拘束力を示さず、硬化後は圧縮強度が発現するため、ずれに対して拘束力を発揮する。しかし、樹脂であるがために、ヤング率はコンクリートに比べて小さいことが懸念される。そこで、ヤング率を向上させ、かつ施工性を高めるため、樹脂の粘度を調整する必要がある。そのため、樹脂に5号ケイ砂を配合して誕生したものが遅延硬化性樹脂モルタルである。

(1) 硬化後のヤング率および強度

樹脂は、ずれ止めなどに巻き付けて使用する場合は高粘度型、鋼板面に塗布して使用する場合は低粘度型と、2種類のを準備した。それぞれ施工上、適当な粘度となる樹脂(ケイ砂の重量配合率)にて、硬化後の樹脂

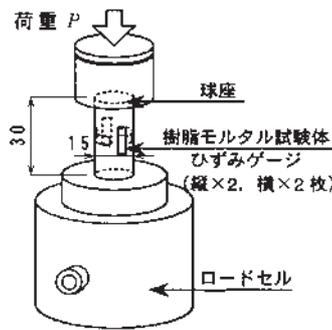


図5 試験体および試験方法

表3 圧縮試験体の種類

試験体種類	樹脂の種類	樹脂重量	ケイ砂重量
高1	高粘度	1	0
高2		1	0.7
高3		1	0.8
低1	低粘度	1	0
低2		1	0.3

比重: 高粘度樹脂 1.47
 低粘度樹脂 1.17
 ケイ砂 2.99

モルタルのヤング率および圧縮強度を測定した。

a) 試験体および試験方法

試験方法を図5に示す。試験体の種類は表3に示すように、高粘度、低粘度それぞれのベースとなる樹脂自身の物性を確認するため樹脂のみを使用した試験体に加え、ケイ砂を配合した試験体の物性を確認するためケイ砂配合樹脂モルタル試験体も準備した。

b) 試験結果

試験結果を表4および図6に示す。圧縮強度は、コンクリートの圧縮強度に比べて大きく上回り、いずれも100 N/mm²を超えていた。しかしながら、ケイ砂の配合比にかかわらず、圧縮強度はほぼ一定であることが確認された。また、図6から明らかなように、ケイ砂配合量の増加に伴いヤング率は向上し、高粘度樹脂にケイ砂を80%配合したものがコンクリートのほぼ1/2程度となっている。ポアソン比については0.35程度であり、圧縮強度と同様に、ケイ砂配合量による違いは見られない。

(2) 硬化前後の付着特性について

鋼板表面に塗布して使用する低粘度樹脂モルタルの付着特性を確認した。結果を、すでに試験されている標準

表4 圧縮結果一覧

試験体種類	圧縮強度 f_p (N/mm ²)	ヤング率 E (N/mm ²)	ポアソン比 μ
高1	103	0.68×10^4	0.37
高2	121	1.30×10^4	0.29
高3	134	1.53×10^4	0.32
低1	130	0.41×10^4	0.38
低2	131	0.65×10^4	0.35

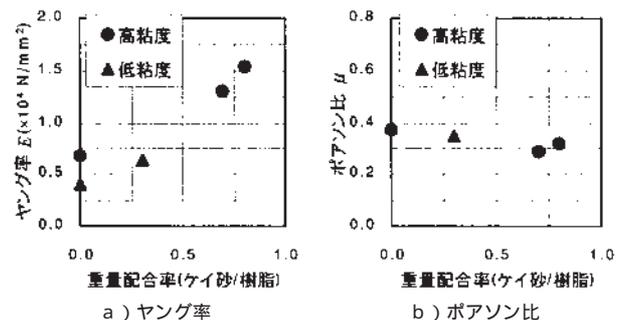


図6 ケイ砂配合率と諸係数の関係

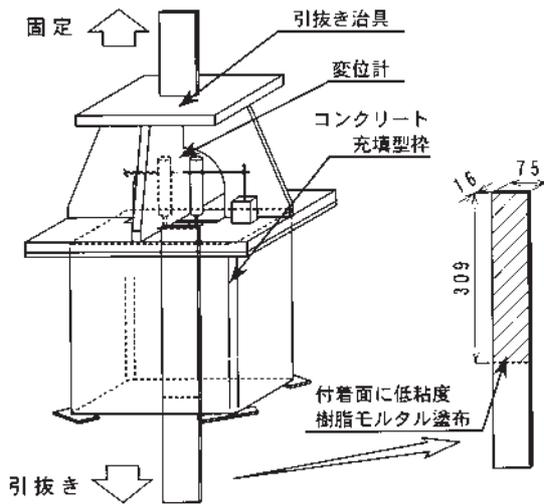


図7 付着試験体および試験方法

的な鋼板表面処理と比較する。

a) 試験体および試験方法

試験は図7のように、ケイ砂30%配合の低粘度樹脂モルタルを塗布した鋼片をコンクリート体から引き抜くものとした。試験体は樹脂硬化前と硬化後の2種類で、各3体を準備し、硬化前後の付着作用の変化を確認した。なお、試験時の気温は5℃であり、樹脂は温度が上昇するにつれて粘性が小さくなる傾向を示す。

b) 試験結果

試験結果を表5および図8に示す。表5には、一般の鋼板表面処理としてプラスト処理、鉛系塗装の付着試験結果も併記している。ここで樹脂モルタルの硬化後の付着強度はプラスト処理を上回り、硬化前の付着強度は鉛系塗装を下回っている。すなわち、硬化前の樹脂モルタル

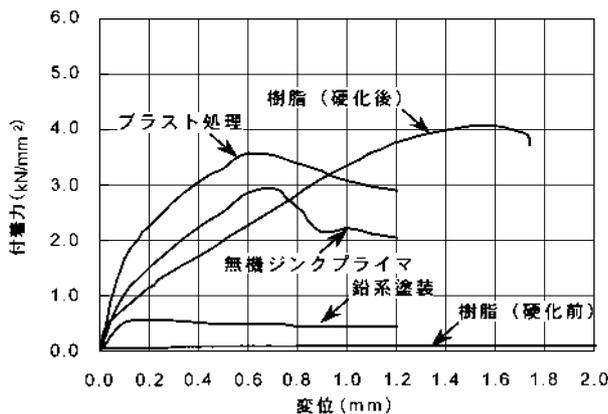


図8 付着力と変位の関係

表5 付着試験結果一覧

表面処理	平均付着強度 t_p (N/mm ²)	備考	
遅延硬化性樹脂モルタル塗布	硬化前	0.09	樹脂の粘着
	硬化後	5.03	コンクリート破壊
鉛系塗料塗布	0.63	比較のため参考文献4)より引用	
無機ジंकプライマ塗布	2.92		
プラスト処理	3.51		

ルの付着切り作用、ならびに硬化後の樹脂モルタルの付着作用が既存の表面処理よりも高いことが確認された。なお、図8から明らかなように硬化前の樹脂は発生変位に関係なく、5℃の条件では0.09 N/mm²で一定である。これは、硬化前の樹脂が粘着作用を有しているためである。

(3) 考察

本研究にて、PRスタッドに使用する遅延硬化性樹脂モルタルが要求される物性を有することが確認された。したがって、遅延合成構造 (Post Rigid System) が実橋で適用可能であることを裏付けたと言える。なお、本研究にて利用した遅延硬化性樹脂は、温度により粘度や硬化時期が変化するため、今後さらに検討を進める予定である。

4. 「白鳥橋」の施工概要

PRSのひとつの利用方法として、PC鋼材によるプレストレス導入時は非合成であり、供用時には合成構造となる構造が挙げられる。この構造のメリットは、鋼材の付着および摩擦による拘束で生じるプレストレスのロスが最小限に抑えることが可能であり、その結果、コンクリートおよび鋼断面を効率よく利用できることである。PRSを用いた「白鳥橋」は、この方法により設計・施工を行った千葉県内のゴルフ場の連絡橋であり、その概要について報告する。

(1) 白鳥橋の諸元

一般図を図9に、橋梁諸元を表6に示す。幅員×橋長は4.400m×18.700m、設計荷重として群集およびカートを想定した歩道橋である。2本の主桁はPRスタッドと低粘度遅延硬化性樹脂モルタルを介して鋼桁とプレストレスウェブコンクリートが合成された桁 (SCビーム) を、床版は短期施工を目的としてプレキャストRC床版を使用した。床版と桁とはスタッドにより合成した合成桁構造である。なお、SCビームの設計方法については、現状では確立されたものはないので、国土開発技術センター「プレビーム合成げた橋設計施工指針」を参考にした。

(2) 施工手順

鋼桁製作後、高粘度樹脂モルタルをスタッドに巻き付け (PRスタッド)、低粘度樹脂モルタルを付着面に塗布した。その後、コンクリートの打設を行い、コンクリート硬化後PC緊張した。本橋で使用した樹脂は、硬化に80℃で3日間の条件で配合しており、3日間の80℃蒸気養生により樹脂硬化を確認した後、現場に桁を運搬し架設、さらにプレキャストRC床版を合成した。

(3) 製作施工段階における性状

図11に施工時の荷重状態と抵抗断面を示した。右端の施工手順No.は図10に対応している。PC緊張時に樹脂モルタルは未硬化のため拘束力がなく、プレストレスによ

る軸力にはプレストレストウェブコンクリート断面のみで抵抗、曲げには鋼桁とその上下フランジに挟まれて鉛直変位を拘束されたウェブコンクリートの重ね梁として抵抗すると考えて計算を行った。ここで、1/4点における計算値と実測値の比較を図12に示したが、上述のとおり軸力と曲げ成分の応力抵抗断面を各々で考える必要が

あることを裏付けている。なお、計算値とひずみの実測値の差異は 5×10^{-6} (コンクリートの応力度に換算して 0.2 N/mm^2) 程度であった。また、荷重状態3はプレストレス導入時から床版荷重載荷までの乾燥収縮とクリープであり、樹脂の硬化条件によりこの期間に進行する乾燥収縮度とクリープ係数を調整できる。本橋では工期の制約

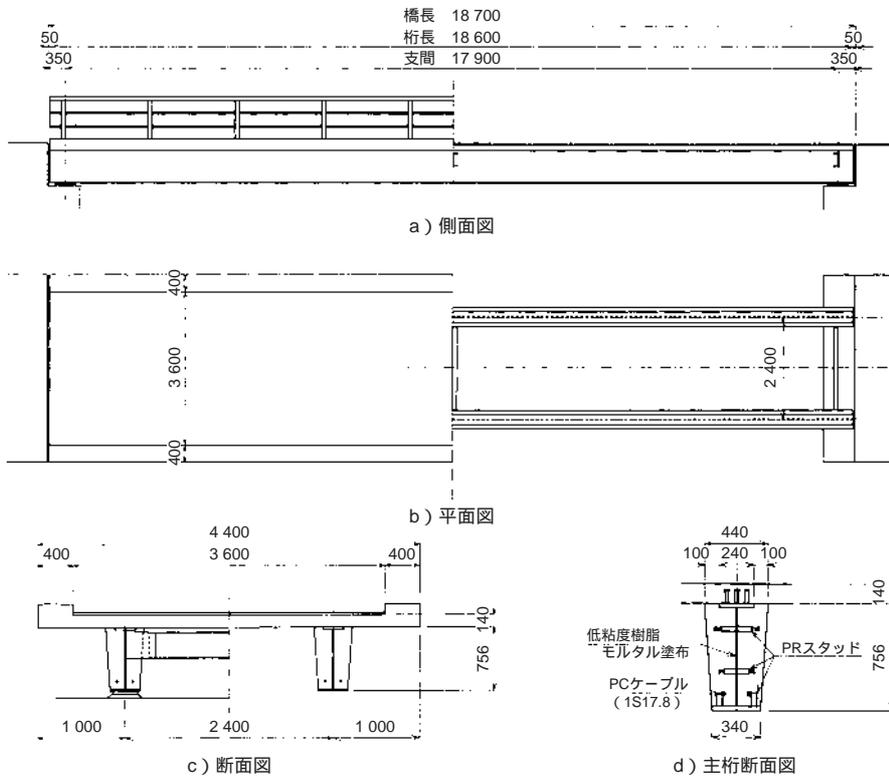


図9 一般図

表6 橋梁諸元

橋格	歩道橋
橋長	18.700 m
支間長	17.900 m
総幅員	4.400 m
斜角	90° 00
平面線形	R =
舗装	アスファルト舗装(30 mm厚)
床版	プレキャストRC床版(140 mm厚)
主要鋼材	SM400
コンクリート	床版: $c_k = 30 \text{ N/mm}^2$
	ウェブ: $c_k = 40 \text{ N/mm}^2$



図10 施工手順

荷重状態	施工状況図		応力抵抗断面	施工手順No.
	側面図	断面図		
0. 無応力 (多点支持)				1
				2
				3
				4
1. 桁自重			鋼桁とウェブコンの重ね梁	5
2. プレストレス				ウェブコンのみ
3. ウェブコンクリートの乾燥収縮・クリープ			鋼桁とウェブコンの合成桁	6
				7
4. 床版荷重載荷			鋼桁とウェブ、床版コンの合成桁	8
5. 合成後死荷重載荷				9
6. ウェブ・床版コンクリートの乾燥収縮・クリープ			鋼桁とウェブ、床版コンの合成桁	9~
7. 活荷重載荷				10

図11 施工性状



1. 鋼桁製作



3. SCビーム完成



5. プレキャストRC床版架設



2. PRスタッド・塗布樹脂モルタル施工



4. SCビーム架設



6. 完成

写真2 白鳥橋の工程写真

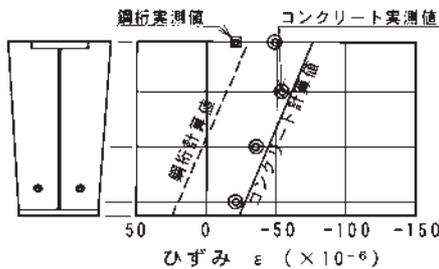


図12 PSによるひずみ(1/4点)

から、この期間は1週間であったが、条件によってはこの期間を長くしてクリープ・乾燥収縮の影響を小さくする構造も可能である。PC緊張後の樹脂モルタル硬化後は、鋼桁とウェブコンクリートは合成桁として扱い、樹脂モルタル硬化後についてたわみを測定した結果、完全合成であることを確認した。

5. Post Rigid Systemの利用

以上は、現在までに行われてきたPost Rigid Systemの開発経過であるが、現在も引き続き開発を進めており、今後の開発経過については追って報告する。

最後に、このPost Rigid Systemを実際に利用できる案として数例を紹介しておく。

a) SCビーム（鋼・コンクリート合成げた）

鋼桁にPCを合成した桁であり、下フランジコンクリートに効果的なプレストレスを導入できる。

b) PC床版を用いた桁に利用

床版のPC横締め時、鋼桁が床版コンクリートを拘束せず効果的なプレストレスを導入できる。

c) 連続合成桁の中間支点付近に利用

施工後しばらくは鋼桁が床版コンクリートを拘束しないため、床版コンクリートの初期クリープ・乾燥収縮などによる引張力・ひび割れを抑えることができる。

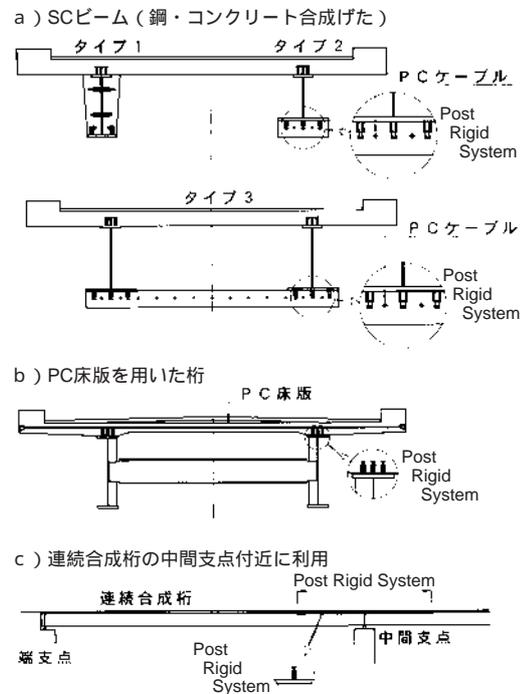


図13 Post Rigid Systemの利用例

参考文献

- 1) 北川・平城・渡辺・橋・牛島：遅延合成スタッド（PRスタッド）の押抜きせん断試験，土木学会第55回年次学術講演会（I），2000.9.
- 2) 須藤・平城・栗田・渡辺・橋・北川：合成構造に用いる遅延硬化性樹脂モルタルの物性試験，土木学会第55回年次学術講演会（I），2000.9.
- 3) 橋・平城・渡辺・北川：遅延合成構造橋（PRS橋）白鳥橋」の概要，土木学会第55回年次学術講演会（I），2000.9.
- 4) 武田・栗田・渡辺：各種防錆処理鋼鉄とコンクリートとの付着強度について，土木学会第43回年次学術講演会（I），1988.10.