

報告 フルプレキャスト鉄道ラーメン高架橋のかぶりの施工誤差

田畑 勝幸*1・堀 慎一*2・細口 光博*3・渡辺 健*4

要旨：本報告は、近年建設されたフルプレキャスト鉄道ラーメン高架橋を対象に、プレキャスト部材のかぶりの施工誤差について、既往の研究で示される場所打ちのかぶりの施工誤差と同様の分析を行った。その結果、プレキャスト部材の場合のかぶりの施工誤差は、機械式継手の有無や、製作時のかぶりの許容誤差に対する管理値といった工場の管理能力の影響を受けることが確認できた。また、設計時に見込むかぶりの施工誤差では、工場のかぶりに対する管理方法やその実績に応じて設計時のかぶりに考慮するかぶりの施工誤差を設定することが可能であることが推察された。

キーワード：プレキャスト部材, かぶりの施工誤差, フルプレキャスト鉄道ラーメン高架橋

1. はじめに

近年、生産性向上や工程短縮を目的としてプレキャストコンクリート（以下、PCa）の活用が進んできている。鉄道分野では、北陸新幹線金沢～敦賀間において、写真-1に示すように、既設の鉄道高架橋に挟まれた狭隘部や、営業線近接区間において、工程短縮を目的としたフルプレキャストラーメン高架橋が採用されている。

PCa部材は、工場において鋼製型枠や固定治具を用いた型枠組立や配筋が行われていることや、配筋後に鉄筋上を歩行することが無く、配置したスペーサに不具合が生じにくい等の理由から、場所打ちの場合と比較して、かぶりの施工誤差が小さい可能性がある。

場所打ちのかぶりの施工誤差は実態調査が行われ、柱や片持ちスラブで施工誤差が生じる要因や、設計時に見込むかぶりの施工誤差が定量的に示されている²⁾。一方で、PCa部材のかぶりの施工誤差に着目した調査は少ない。かぶりの設計値に考慮する施工誤差を、工場の品質管理に対する実績等に基づき設定することができれば、適切な照査を行うことができると考えられる^{3),4)}。

そこで、本報告では、フルプレキャストラーメン高架橋建設時の品質管理の一環で得られたかぶりのデータを基に、既往の研究²⁾で示される場所打ちの場合のかぶりの施工誤差と同様の分析を行うことで、PCa部材の場合のかぶりの施工誤差が生じる要因や、設計時に見込むかぶりの施工誤差について検討する。



写真-1 フルプレキャスト鉄道ラーメン高架橋

2. 調査の概要

2.1 調査の対象構造物

対象構造物は、図-1に示すように、杭、地中梁は場所打ちとし、柱、梁をPCa部材とした鉄道ラーメン高架橋である。杭と柱の鉄筋の干渉を避けるため、杭と柱の中心を一致させない設計を行っている。スラブは片持ちスラブと中間スラブを一体化したハーフプレキャストスラブであるが、かぶりを計測した面はPCa部であるため、本報告内では、PCa部材として扱うこととした。

本構造物は鉄道構造物等設計標準^{5),6),7)}が適用され、施工管理は西日本旅客鉄道株式会社の示方書^{8),9)}に基づいている。施工会社1社、PCa部材の製作工場3社（梁、柱2社（A、B工場とする）、スラブ1社）である。

表-1に対象構造物の諸元を、図-1に調査を実施した部材を赤枠にて示す。柱は、柱下部の部材、上層梁は接合部を除く中間部の部材、上層横梁は中央径間に配置される機械式継手（モルタルスリーブ継手）の無い部材である。また、スペーサは、モルタル製のスペーサが使用されており、製作時の側面となる面で2~4個/m²、下面となる面で4個/m²で管理されていた。なお、梁部材については構造上下面となる面が製作時の下面であった。

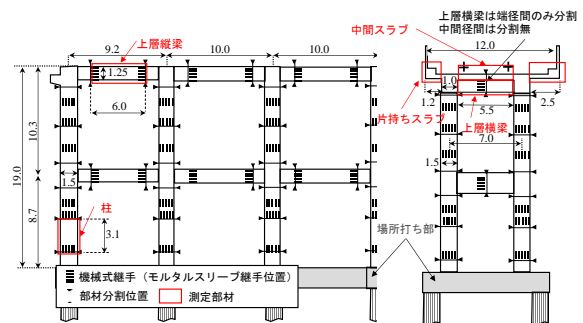


図-1 構造の概要図

*1 西日本旅客鉄道株式会社	大阪工事事務所	課員	修(工)	(正会員)
*2 西日本旅客鉄道株式会社	大阪工事事務所	広島工事事務所	副所長	(正会員)
*3 西日本旅客鉄道株式会社	大阪工事事務所	施設技術課	課長	
*4 鉄道総合技術研究所	構造物技術研究部	コンクリート構造	室長	博士(学術) (正会員)

2. 2 測定の方法

2. 2. 1 部材寸法の測定方法

かぶりの測定とともに、測定したかぶりに関連する部材寸法についても測定を行っている。図-2 (a) ~ (d) に、各部材における部材寸法の測定箇所を示す。

2. 2. 2 かぶりの測定方法

かぶりは電磁誘導法を用いて測定している。電磁誘導法は、かぶりが多い場合や直交鉄筋がある場合には測定誤差が生じやすいため、測定値に対する補正式¹⁰⁾が提案されている。これに基づき、測定値は補正を行っている。表-2に測定した部材数、測定面数、測定した鉄筋の本数を示す。測定箇所は、柱側面、上層縦梁の下面、側面、中間スラブの下面、片持ちスラブの下面である。表-1に測定対象の鉄筋を併せて示す。測定対象の鉄筋は、最外縁に配置された鉄筋である。なお、柱と上層縦梁の部材には、部材同士を接続するための機械式継手としてモルタルスリーブ継手が配置されているが、測定範囲の対象とはしていない。

図-2 (a) ~ (d) に、測定した部材の断面形状、配筋、かぶりと部材寸法の測定位置を併せて示す。柱、梁は部材軸方向に、スラブは線路方向に 1m²/面に 3 本の測定線を設定し、測定対象鉄筋の配筋ピッチごとに測定している。1 部材につき、柱は隣接する 2 面を、上層梁、上層横梁の側面は相対する 2 面と下面を測定している。

設計かぶりは、柱側面で 70mm、76mm、上層縦梁下面で 70mm、側面で 55mm、上層横梁下面で 70mm、側面で 55mm、中間スラブ、片持ちスラブで 55mm であった。PCa 部材は、図-3 に示すように、機械式継手部で設計上必要なかぶり (55mm) を確保するため、継手以外の箇所は、設計上必要なかぶりよりも大きな値がかぶりとなっていることが特徴である。

3. PCa 部材の工場製作時の管理内容

PCa 部材の製作の精度には、部材の製作方法、製作時の検査方法、検査時の管理値等が影響しているものと考えられる。本報告ではそれらの項目を、工場の管理能力として捉えることとし、各製作工場から提出される PCa 部材の製作要領書から、それらについて確認した。

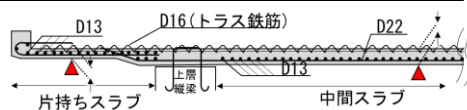
図-3 に PCa 部材製作時の断面を併せて示す。各工場とも、柱、梁の製作時は主鉄筋の吊り治具や、型枠の固定治具を用いていた。また、検査は、型枠の組立寸法、配筋の種類、径、位置、機械式継手等の種類、数、位置、配筋の状態 (かぶり)、コンクリートの物性検査、製品 (出来形) 検査となっており、検査工程に対する工場別の差はなかった。次に、表-3 に各検査時の許容誤差を示す。かぶり等の許容誤差では、工場によって管理値が異なっていることが確認できた。

表-1 構造物の諸元

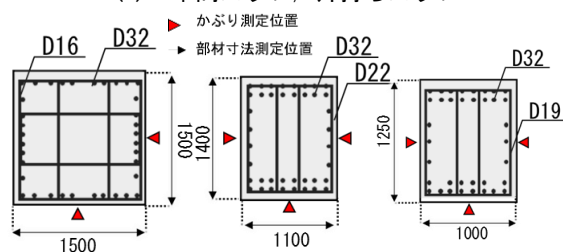
線路方向スパン	9.2~10.0m*5~6 径間		
線路直角方向スパン	7.0m*1 径間		
片持ちスラブ長さ	1.3~2.0m		
高架橋高さ	19.0m程度		
基礎形式	杭基礎		
上段： 測定鉄筋	柱	D16@100mm	機械式 継手有
		D32@100~256mm	継手有
下段： 直交鉄筋	上層縦梁	D19@100mm	機械式 継手有
		D32@94~102mm	継手有
	上層横梁	D22@100mm	-
		D32@110~123mm	-
スラブ	D22@200mm	-	
	D13@125mm	-	

表-2 調査対象とした Pca 部材数、かぶりの測定数

部材数	柱	上層縦梁		上層横梁		中間スラブ	片持ちスラブ
	側面	下面	側面	下面	側面	下面	下面
部材数	50	21		17		21	
部材数の合計							109
測定面数	100	42	21	34	17	21	42
測定面数の合計							214
測定本数	3000	630	1260	750	1020	687	702
測定数の合計							8019



(a) 中間スラブ、片持ちスラブ



(b) 柱 (c) 上層横梁 (d) 上層縦梁

図-2 各部材の部材寸法、かぶりの測定位置

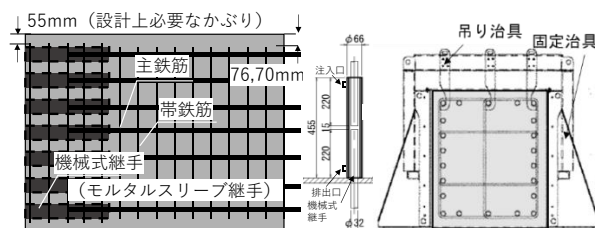


図-3 かぶりの概要と製作図 (柱の場合)

表-3 検査時の許容誤差の管理値

管理項目	A 工場	B 工場
鉄筋加工時	0~5mm	±15(D25 以下) ±20(D29~32)
型枠寸法	±5mm	±3mm
配筋間隔	±10mm	±20mm
かぶり	0~5mm	0~20mm

4. 調査結果

4. 1 部材寸法

表-4に各部材における部材寸法の測定結果を示す。誤差が正側のものは設計値より大きく、負の場合は設計値より小さいものを表す。なお、表中には、既往の研究²⁾による場所打ちの場合の部材寸法からの誤差の平均値、標準偏差も併せて示す。

場所打ちの場合は、部材寸法の誤差の平均値は3.0mm以上、標準偏差は3.0mm前後を示しているが、PCaの場合はそれらを下回っており、精度よく製作されていることが確認できる。なお、中間スラブ、片持ちスラブの高さの誤差の平均値、標準偏差は柱や上層縦梁、上層横梁と比較して1~2mm程度大きい結果であった。これは、スラブ部材のみハーフプレキャスト部材となっていることが要因と思われるが、設計値より大きく製作していることの原因は確認できなかった。

4. 2 PCa 部材のかぶりの施工誤差

かぶりの測定結果から、PCa 部材のかぶりの施工誤差について検討する。PCa 部材のかぶりの施工誤差は、測定されたかぶりの値と、設計値との差として整理する。

図-4に各部材のかぶりの施工誤差の分布を示す。

施工誤差が負の場合はかぶり不足となっていることを示す。図中には、既往の研究による場所打ちの場合のかぶりの施工誤差の平均値、標準偏差を併せて示す。いずれのPCa部材も、場所打ちの場合と比較して、かぶりの施工誤差の平均値、標準偏差が小さいことが確認できる。ここで、図-4(g)の上層梁側面は、図-4(h),(i)に製作工場別の結果も併せて示す。図より、A工場はかぶりの設計値に対して製作を行っているのに対し、B工場はかぶりを10mm程度増加させて製作していることが確認できる。標準偏差はB工場がA工場より大きいものの、両工場ともに場所打ちの場合と比較すると小さく、

表-4 部材寸法の測定結果

調査部位	設計値からの誤差の平均値(mm)	標準偏差(mm)
柱側面	0.2 (3.5) [*]	0.5 (3.0)
上層縦梁	下面	0.0 (3.2)
	高さ	0.1
上層横梁	下面	0.0
	高さ	-0.1
中間スラブ高さ	2.0	1.4
片持ちスラブ高さ	1.9	1.0

() 内は既往の研究²⁾

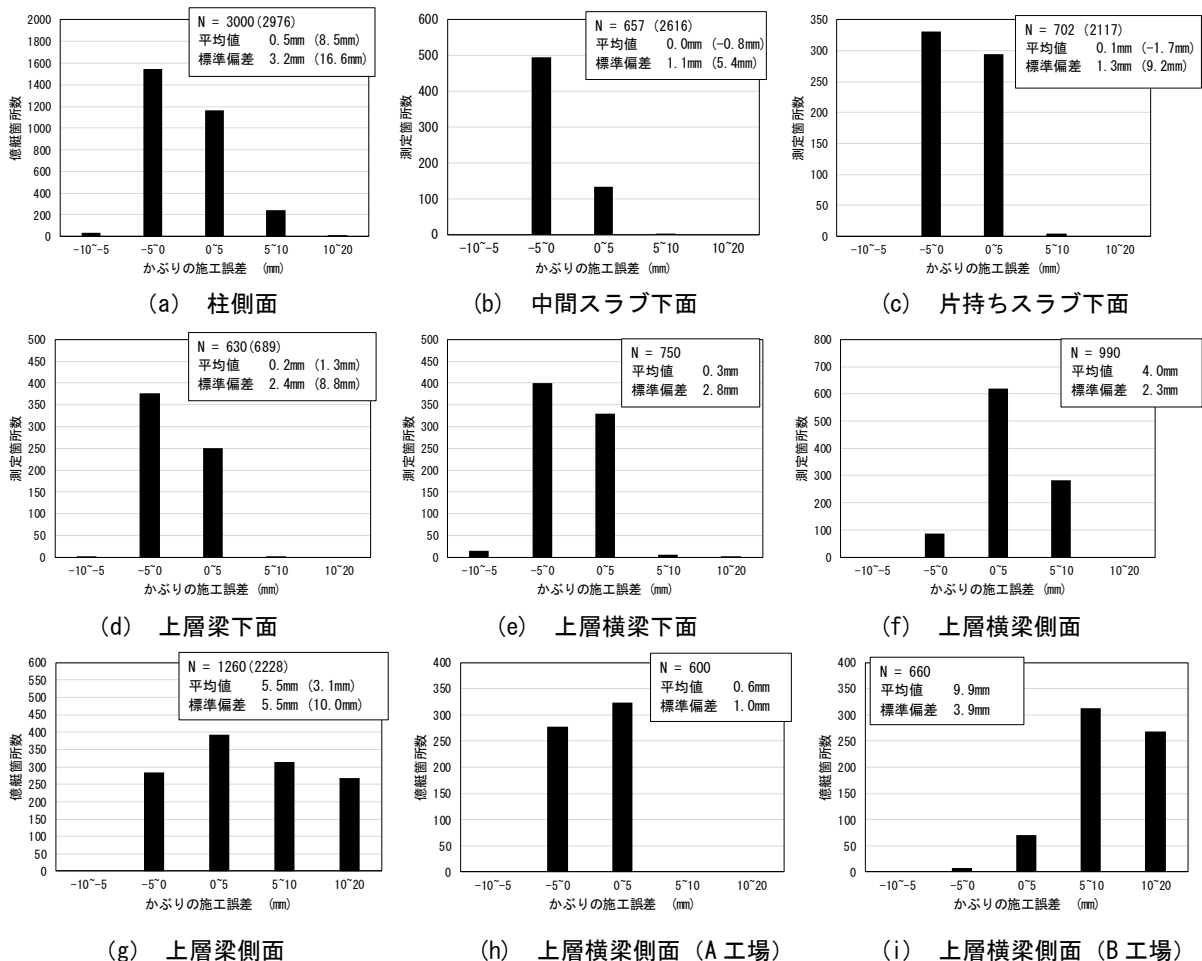


図-4 部材別のかぶりの施工誤差 () 内は既往の研究²⁾

設定したかぶりに対しては概ね精度よく製作されている。このような傾向が確認できたのは、上層梁側面だけであった。表-5に、柱、上層縦梁、上層横梁の工場別のかぶりの施工誤差の平均値と、標準偏差を示す。上層縦梁側面を除くと、3mm以上の差異は見られなかったが、工場別に多少のばらつきが確認された。

4.3 中間スラブ、片持ちスラブ下面の施工誤差

図-4 (b), (c) より、中間スラブ下面、片持ちスラブ下面のかぶりの施工誤差の平均値、標準偏差は非常に小さいことが確認できる。

場所打ちの場合、片持ちスラブは、支持部付近で所要のかぶりが確保されていても、先端付近でかぶり不足が多く生じる傾向があり、この要因は、部材の形状が、片持ち形状であるために部材の先端付近で鉄筋がたれ下がるためとされている²⁾。これにより、場所打ちの場合の片持ちスラブのかぶりの施工誤差の標準偏差(9.2mm)は中間スラブの値(5.4mm)より大きい値となっている。

本報告におけるPCa部材の片持ちスラブの標準偏差(1.3mm)は、測定範囲が1m²内であり、既往の研究と測定範囲と多少異なることに留意する必要があるものの中間スラブと同程度の標準偏差(1.1mm)であった。

これらから、PCa部材の場合は、片持ち形状であることの影響は小さいことが考えられる。

4.4 柱、上層縦梁、上層横梁側面の施工誤差

図-4 (a), (f), (h), (i) より、柱側面、上層縦梁側面、上層横梁側面の標準偏差は、中間スラブや片持ちスラブの値と比較して、1~2mm程度大きい。

場所打ちの場合、柱のかぶりの施工誤差は、鉄筋の加工誤差や組立て誤差による位置ごとのばらつきによる誤差と、鉄筋全体と型枠の位置関係が全体的にずれる誤差の二つに大別されることが報告されている²⁾。このうち、後者は、図-5に示すように、回転によるものと、芯ずれによるもの、両方が同時に発生する場合とが考えられている。PCa部材の上層縦梁、上層横梁は、柱と同様に箱型形状で製作されるため、回転、芯ずれの影響を受ける可能性がある部材と考えられることから、上層縦梁、上層横梁、柱の部材について、それらの影響がないかを確認した。

表-5 工場別のかぶりの施工誤差の平均値、標準偏差

	柱		上層縦梁		上層横梁	
	側面	下面	側面	下面	側面	下面
全体	0.5	0.2	5.5	0.3	4.0	3.2
A工場	-1.4	-1.7	0.6	-1.3	2.5	2.1
	2.1	2.0	1.0	1.6	2.2	2.2
B工場	2.2	1.9	9.9	1.9	5.4	2.2
	3.2	2.0	3.9	2.8	1.3	3.2

※上段は平均値、下段は標準偏差を示す

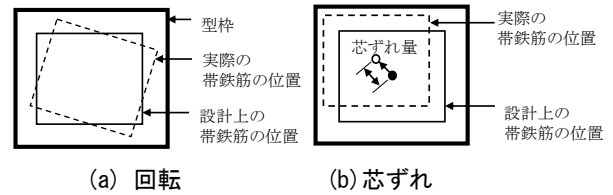


図-5 柱部材の施工誤差の要因

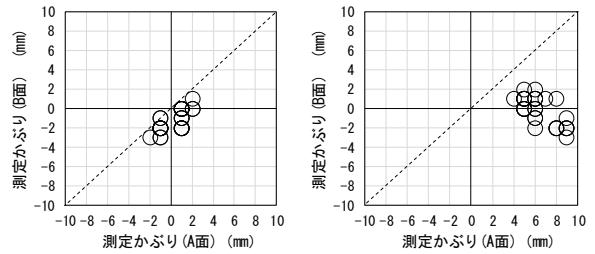


図-6 柱側面の回転・芯ずれの影響の有無

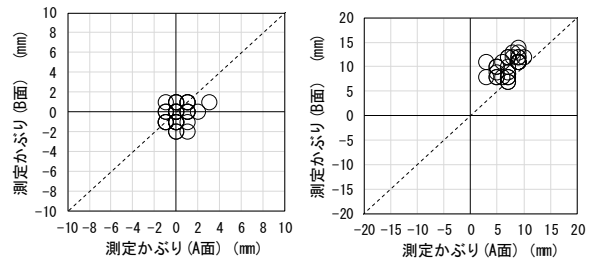


図-7 上層縦梁側面の回転・芯ずれの影響の有無

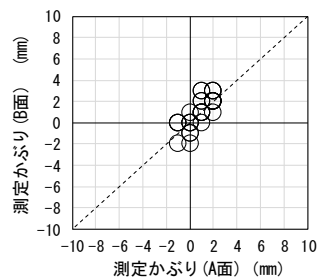


図-8 上層横梁側面の回転・芯ずれの影響の有無

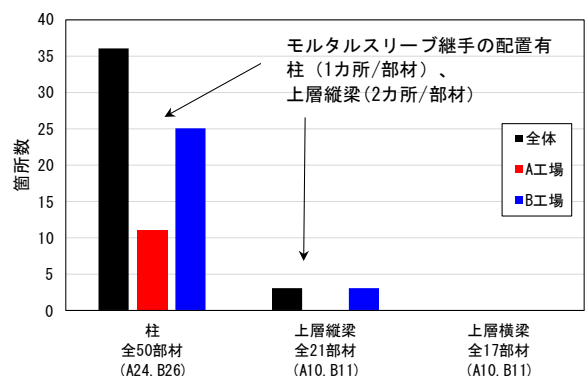


図-9 回転・芯ずれの影響部材数

前述したように、柱は隣接する2面、上層縦梁、上層横梁は相対する2面で計測しているため、既往の研究²⁾のように、回転、芯ずれどちらかの影響かを特定することは困難であるが、隣接、もしくは相対する面の測定値同士を比較することで、それらの影響がないかを推察した。なお、柱はいずれか1面を、上層縦梁、上層横梁は構造上、下面となる面を地面に面して製作していることを確認している。

図-6に、柱の1部材の隣接する面で取得されたかぶりの施工誤差の値を示す。回転、芯ずれの影響が無い場合には、図-6(a)のように図中の1:1の線上に概ね値が集中するはずであるが、図-6(b)のように、どちらかの面にかぶりが偏るような部材が確認された。A面の施工誤差の平均値と、B面の施工誤差の平均値の差が3mm以上見られたものを回転・芯ずれの影響ありとした場合、このような傾向が確認されたのは柱の部材数全50部材中36部材であった。

図-7に、上層縦梁側面の1部材の相対する2面のかぶりの値を示す。上層縦梁側面の場合も柱と同様の傾向が確認された部材が全21部材中、3部材で、いずれもB工場の部材でのみ見られた。

図-8に上層横梁側面の1部材の相対する2面のかぶりの値を示す。上層横梁側面は、上層縦梁側面と異なり、測定した部材全てにおいて、回転、芯ずれの影響は確認できなかった。

図-9に、回転・芯ずれの影響がある部材数について、工場別、部材別に示す。回転・芯ずれが発生している部材において、図-1に示すように、柱部材は機械式継手が部材の端部に配置され、上層縦梁は、機械式継手が部材の両端部に配置されていた。一方で、回転・芯ずれが発生していない上層横梁には機械式継手が配置されてい

ないことが確認された。

機械式継手が配置された場合、継手の配置箇所において設計上必要なかぶりを確保し、その他の範囲においては、設計上必要なかぶりより大きく確保されることになるため、配筋やかぶりの管理が、継手がない場合と比較して複雑となることが影響しているものと考えられる。

また、工場別での回転・芯ずれの発生部材数を確認すると、B工場でその数が多いことが確認できる。これは、表-3に示す工場別の検査時の許容誤差から、B工場は、A工場と比較して検査時の配筋間隔や、かぶりの許容誤差を大きく設定しており、検査時の許容値をどの程度厳しく設定して製作部材を管理するかといった工場の管理能力の影響を受けていると考えられる。

これらのことから、PCa部材の場合においても、回転・芯ずれの影響があり、その影響は継手の有無や製作工場の管理能力によって左右されると考えられる。

5. 設計時に見込むかぶりの施工誤差

ここでは、既往の研究²⁾で示されている、設計時に見込むかぶりの施工誤差の提案方法と同様の方法を用いて、PCa部材の場合の設計時に見込むかぶりの施工誤差について算出することを行った。

場所打ちの場合、例えば柱部材では、杭との接合部における配筋の取り合いから、柱の配筋の芯ずれが生じることより、型枠内で鉄筋が全体的にずれることが報告されている。設計時に見込むかぶりの施工誤差の算出では、柱側面以外でも隣接部材との取り合いにより、型枠内で鉄筋が全体的にずれることは考えられるものの、設計時にこのような鉄筋の全体的なずれまでも考慮して施工誤差を設定することは合理的ではないとの判断がなされている。

表-6 設計時に見込むかぶりの施工誤差²⁾と同様の整理を実施した場合の各値

		柱		上層縦梁		上層横梁		中間 スラブ	片持ち スラブ
		側面	下面	側面	下面	側面	下面	下面	
全体	平均	0.5	0.2	—	0.3	4.0	-0.2	0.7	
	標準偏差	3.2	2.4		2.8	2.3	1.1	1.3	
	1.282σ	4.1	3.1		3.6	3.0	1.4	1.7	
	5mm 切上	5.0 (10.0)*	5.0 (10.0)		(10.0)	5.0 (10.0)	5.0 (10.0)	5.0 (5.0)	5.0 (10.0)
A工場	平均	-1.4	-1.7	0.6	-1.3	2.5	—		
	標準偏差	2.1	2.0	1.0	1.6	2.2			
	1.282σ	2.6	2.5	1.2	2.0	2.9			
	5mm 切上	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			
B工場	平均	2.2	1.9	9.9	1.9	5.4			
	標準偏差	3.2	2.0	3.9	2.8	1.3			
	1.282σ	4.0	2.5	5.0	3.5	1.7			
	5mm 切上	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0			

※()は場所打ちの場合の設計時に見込むかぶりの施工誤差

このことから、かぶりの施工誤差を、鉄筋の全体的なずれとそうでないものを分離して取り扱い、設計時に見込むかぶりの施工誤差には、後者のみを考えることとされている。そのため、場所打ちの場合の設計に見込むかぶりの施工誤差は、各測定値から、全体的なずれ（平均値）を差引いた値を用いて算出している。

しかしながら、PCa 部材の場合は、現場打ちのように隣接する部材との配筋の取り合いは生じないことから、全体的な鉄筋のずれの影響は取り除くべきではないと考えられる。以上を踏まえ、本報告では、全体的なずれに対する処理を行わずに設計時に見込むかぶりの施工誤差を算出することとした。

表-6 に、算出したかぶりの施工誤差の標準偏差（ σ ）と、非超過確率 90%を考慮した値（ 1.282σ ）、非超過確率 90%を考慮した値を 5mm 単位で切り上げた値を示す。

表には、既往の研究から得られる場所打ちの場合の値も併せて示す。なお、上層縦梁側面については、B 工場においてかぶりを 10mm 程度増加させて製作していることが確認されたことから、全体としての値は算出していない。

表から、非超過確率 90%を考慮した値を 5mm 単位で切り上げた値では、いずれの部材も 5mm であった。場所打ちの場合、中間スラブ下面のみが設計時に見込むかぶりの施工誤差が 5mm であるのに対し、PCa 部材の場合は、部材によらず 5mm であるため、PCa 部材を採用する際には、かぶりの施工誤差を場所打ちよりも小さく設定することは可能と思われる。

ここで、90%非超過確率を考慮した標準偏差値（ 1.282σ ）を確認すると、B 工場では 1.7mm~5.0mm を示す一方で、A 工場では、すべて 3.0mm 未満となっている。これは、4.4 で示した工場別で、施工誤差の生じる割合が異なる要因と同様に、A 工場は、検査時の許容誤差を小さく設定していること等の工場の管理能力が影響していると考えられる。

これらのことから、工場の管理能力によってかぶりの施工誤差が異なるため、設計時点では PCa 部材としてのかぶりの施工誤差の小ささを、本報告の場合では 5mm 等で一律で評価することも考えられる。しかしながら、設計時に製作する工場が想定できる場合には、工場の管理能力や製造後の PCa 部材におけるかぶりの施工誤差の実績に基づいて、製作する工場別にかぶりの施工誤差を設定することも可能であることが推察される。

6. まとめ

本報告では、近年建設されたフルプレキャスト鉄道ラーメン高架橋を対象に、プレキャスト部材のかぶりの施工誤差について整理し、既往の研究で示される場所打ちの場合のかぶりの施工誤差と同様の分析を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) プレキャスト部材の場合のかぶりの施工誤差は、機械式継手の有無や、製作時のかぶりの許容誤差に対する管理値といった工場の管理能力によって影響を受けることが確認できた。
- 2) 設計時に見込むかぶりの施工誤差について、設計時のかぶりに考慮するかぶりの施工誤差を、工場のかぶりに対する管理能力やその製作実績に応じて設定することが可能であることが推察された。

参考文献

- 1) 久保達彦, 宮本順一, 岡本圭太, 光森章: 北陸新幹線における鉄道初のフルプレキャストラーメン高架橋の建設工事, コンクリート工学, Vol.59, No.3, pp.261-266, 2021.3
- 2) 川村力, 谷村幸祐, 曾我部正道, 佐藤勉, 長谷川雅志: 実態調査に基づく鉄道高架橋におけるかぶりの施工誤差に関する研究, 土木学会論文集, No.767, V-64, 253-266, 2004.8
- 3) 2022 年制定 コンクリート標準示方書改定資料, 基本原則編, 設計編, 維持管理編, コンクリートライブラリー162
- 4) 2017 年制定 コンクリート標準示方書改定資料, 設計編, 施工編, コンクリートライブラリー149
- 5) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004
- 6) (財)鉄道総合技術研究所: トラス鉄筋付プレキャスト鉄道ラーメン高架橋の設計・施工指針, 2009
- 7) (財)鉄道総合技術研究所: モルタルスリーブ継手を用いたプレキャストラーメン高架橋の設計・施工指針, 2015
- 8) 西日本旅客鉄道株式会社: 土木工事標準示方書, 1996.3
- 9) 西日本旅客鉄道株式会社: 品質管理マニュアル《土木編》, 2001
- 10) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物構造物等維持管理標準・同解説 コンクリート構造物, 2007