

# 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

川村力<sup>1</sup>・谷村幸裕<sup>2</sup>・曾我部正道<sup>3</sup>・佐藤勉<sup>4</sup>・長谷川雅志<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>2</sup>正会員 工修 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>3</sup>正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>4</sup>正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>5</sup>正会員 北海道旅客鉄道(株) (〒060-8644 北海道札幌市中央区北11条西15丁目1-1)

本研究は、最近建設された鉄道高架橋においてかぶりの実態調査を実施し、かぶりの施工誤差について、その生じる要因と大きさについて検討を行った。3万点以上におよぶかぶりの測定結果から、かぶりの施工誤差の分布傾向は部材により異なり、柱側面や梁の下面および側面、張出スラブの下面においてかぶり不足が多く発生していることが明らかになった。また、かぶりの施工誤差が生じる原因は、柱と梁では、柱において鉄筋が全体的にずれることが影響していることや、鉄筋の全体的なずれは、基礎構造によって異なることが明らかになった。さらに、耐久性照査において、あらかじめ見込むかぶりの施工誤差の値を提案した。

**Key Words :** covering concrete, error margin, railway RC rigid frame viaducts

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物が増加し、建設後長期間経過した構造物が増えるに伴い、構造物の維持管理に関する問題が顕在化している。特に鉄筋の腐食によるコンクリートのはく落が数多く報告されているが、その原因の一つにかぶり不足があげられる。設計時に適切な値を設定し、実構造物が設計通りのかぶりを有していればかぶり不足が問題となることはない。しかし、現実的には施工段階で誤差が生じ、かぶり不足が発生するものと考えられる。

2002年制定の土木学会コンクリート標準示方書施工編<sup>1)</sup>では耐久性照査法が示されており、鉄筋の腐食に関する照査においては、鉄筋のかぶりが重要なパラメータとなっている。耐久性の照査を行う場合、かぶりの期待値として一般に設計かぶりをを用いることになるが、このような施工段階で発生する誤差を考慮して照査を行う必要がある。しかしながら、かぶりの施工誤差について、設計時に見込むべき数値

についての記述はない。

既往の研究<sup>2)</sup>によると、かぶりの施工誤差は柱、梁、床版の順で誤差が大きくなることが明らかになっている。また、実際の建築物を調査した結果<sup>3)</sup>によると、柱においてかぶり不足が生じる確率が高いことが明らかになっている。しかしながら、かぶりの施工誤差が発生する要因について分析し、部材毎に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ないのが現状である。

そこで本研究では、まず2章において、電磁誘導法を用いたかぶり測定手法の精度を検証した後、3章に示す25箇所の鉄道構造物に対してかぶりと部材寸法の調査を行った。次に、4章、5章において、調査で得られた約14,000点のかぶり測定結果から、部材毎にかぶりの施工誤差の発生状況とその要因について分析した。また6章においては、調査結果から特に施工誤差の大きかった柱に対して、42箇所の鉄道構造物で約17,000点の詳細な調査を行い、施工の観点からより詳細な分析を試み、かぶりの施工誤差の発生

要因について整理した。さらに7章では、スペーサの使用量が、かぶりの施工誤差に及ぼす影響について検討した。以上の結果に基づき、8章において、部材毎に設計時に見込むかぶりの施工誤差を提案した。

## 2. 電磁誘導法による鉄筋探査機の適用

### (1) 測定原理

電磁誘導法は、磁気式と渦流式に大別することができる。本研究においては磁気式により測定を行った。磁気式とは、コイルを巻いた探触子に低い周波数の交流磁界を発生させ、鉄筋の存在により生じる磁束の変化を、電磁誘導現象により生じるコイル起電力の変化として捉え、鉄筋のかぶりを測定する方法である<sup>4)</sup>。

電磁誘導法による測定法は簡便であるが、探触子の作る磁界の影響範囲内に、測定対象以外の鉄筋が存在する場合に、その影響により測定誤差が生じることが知られている<sup>5)</sup>。

図-1に電磁誘導法による鉄道ラーメン高架橋の柱における測定の概念図を示す。電磁誘導法を用いて高架橋柱の帯鉄筋のかぶりを測定する場合、帯鉄筋の狭い間隔での配置や複数組での配置、直交する軸方向鉄筋などが測定精度に影響をおよぼすと考えられる。したがって、かぶりの実態調査を実施するにあたり、精度の検証を行い、測定値の補正方法を検討することとした。

### (2) 測定精度検証試験

#### a) 試験方法

測定対象以外の鉄筋が、測定精度に及ぼす影響を検証するために試験を行った。試験方法は、実構造物の配筋状態に鉄筋を組み、その上に木板を置き、木板の厚さを変化させて測定を実施した。図-2に試験の概況を示す。実際の構造物はコンクリートに囲まれているが、コンクリート自体は導電率が低く、透磁率も問題になるほどの大きさではないため、木板に置き換えても問題ないものと考えられる。試験で設定した木板の厚さは、9,18,30,45,60mmである。

#### b) 鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響

図-3に、測定対象鉄筋の間隔及び組数が、かぶり測定誤差に及ぼす影響として、木板の厚さであるかぶり真値と、木板の厚さと電磁誘導法によるかぶり測定値の差である測定誤差との関係を示す。ラーメン高架橋の柱や梁における帯鉄筋やスターラップ等の横方向鉄筋は、一般に100mm程度の間隔で1~2

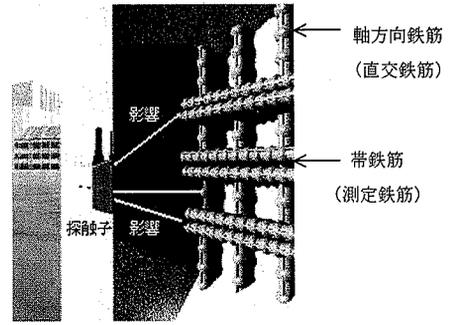


図-1 電磁誘導法によるかぶり測定の概念図

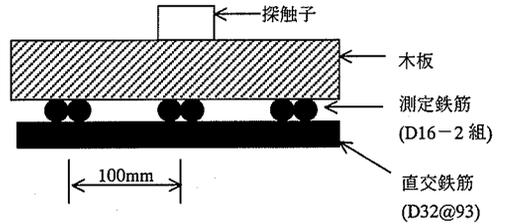


図-2 測定精度検証試験の概況 (断面図)

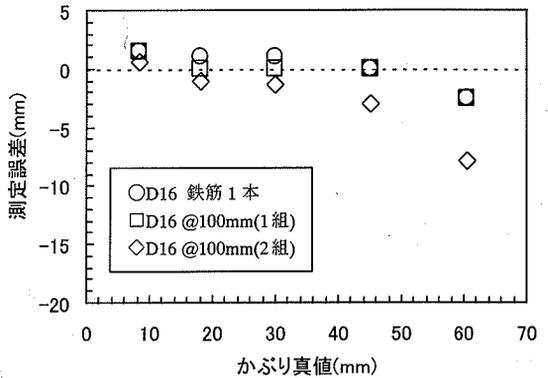


図-3 鉄筋間隔及び鉄筋組数の影響

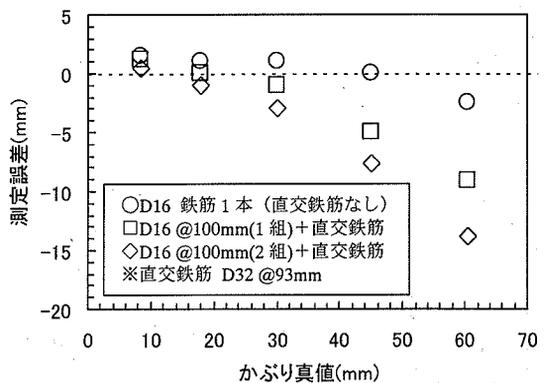


図-4 直交鉄筋の影響

組程度配置される。使用される鉄筋は D16, D19 など  
 などが一般的である。

試験は D16 の鉄筋を使用して鉄筋間隔及び鉄筋の  
 かぶり (木板の厚さ) をパラメータとして測定を行  
 った。図-3 より、鉄筋が 1 組で鉄筋間隔 100mm の  
 場合は、鉄筋一本のみを測定した場合とほぼ同一の  
 結果で測定誤差は少ない。

一方、鉄筋が 2 組になると、隣接する鉄筋の影響  
 が大きくなるため、誤差は大きくなる傾向となった。  
 また、かぶりが増加するに従い誤差が大きくなるの  
 は、コイルの作る磁界が、かぶりの増加により広が  
 るため、測定値に影響を及ぼす範囲も広がることで、  
 隣接する鉄筋の影響をより多く受けるためと考えら  
 れる。かぶり 45mm における測定誤差は 3mm 程度、  
 かぶり 60mm における測定誤差は 8mm 程度であ  
 った。なお、ラーメン高架橋柱のかぶりは 40~50mm  
 程度が一般的である。

c) 直交鉄筋の影響

ラーメン高架橋の柱や梁においては、測定する横  
 方向鉄筋と直交する軸方向鉄筋に D29, D32 など比  
 較的太径の鉄筋を使用する。今回、かぶりの実態調  
 査を行った鉄道高架橋における柱の軸方向鉄筋の配  
 置間隔は 90~110mm 程度であり、平均で約 93mm  
 であった。そこで、軸方向鉄筋を 93mm の間隔で  
 配置し、その上に直交するように測定鉄筋を並べ、更  
 に木板をかぶりに見立てて重ね、その上から測定し  
 た。

図-4 に、直交鉄筋が、かぶり測定誤差に及ぼす影  
 響として、木板の厚さであるかぶり真値と、木板の  
 厚さと電磁誘導法によるかぶり測定値の差である測  
 定誤差との関係を示す。D16 の鉄筋に D32 の鉄筋  
 が交差する場合を想定し、その影響を検証した。図  
 -4 より、横方向鉄筋が 1 組の場合も 2 組の場合も、  
 直交鉄筋の影響を大きく受ける結果となり、かぶり  
 が増加するに従いその影響が顕著となった。また、  
 かぶり 45mm における測定誤差は横方向鉄筋 1 組の  
 場合で 5mm, 2 組の場合で 8mm 程度であった。

(3) 測定誤差補正方法の検討

かぶりの測定を、鉄筋探査機を用いて行うにあ  
 たり、測定誤差の補正方法を検討した。

実構造物における多様かつ複雑な配筋に対して  
 個々に理論式を導くことは煩雑であるため、補正方  
 法は以下のような簡略式を提案した。

$$y = ax^2 + x \quad (1)$$

ここに、 $y$  はかぶりの真値(mm)、 $a$  は配筋状態に

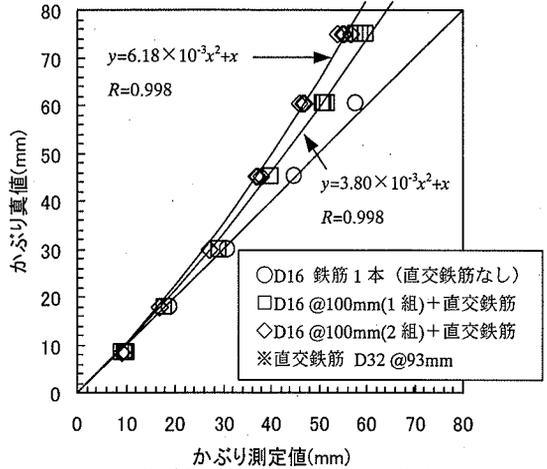


図-5 磁気式による場合の補正値の算定

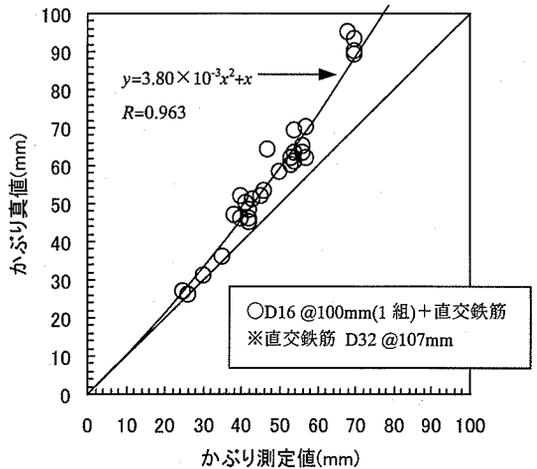


図-6 高架橋柱による検証結果

より求まる定数(1/mm)、 $x$  は電磁誘導法によるか  
 ぶりの測定値(mm)である。簡略式を式(1)のように定め  
 たのは、測定値の分布形状から原点を通る二次式と  
 仮定し、配筋状態により個々に求まる係数は、現場  
 における適用を考慮して、係数  $a$  で集約することと  
 した。

図-5 に、図-4 で示した 3 ケースについて、電磁誘  
 導法によるかぶり測定値と、木板の厚さであるか  
 ぶり真値との関係を示す。図-5 から最小二乗法により  
 定数  $a$  を求めると、横方向鉄筋が 2 組の場合は  $6.18$   
 $\times 10^{-3}$ 、横方向鉄筋が 1 組の場合は  $3.80 \times 10^{-3}$  となる。

(4) 実構造物による測定精度の検証

式(1)の精度確認のため、ラーメン高架橋の柱にお  
 いて試験測定を行った。試験は 32 箇所電磁誘導法  
 による鉄筋探査機を用いてかぶりを測定し、その後  
 鉄筋をはつり出しノギスによりかぶりを測定した。

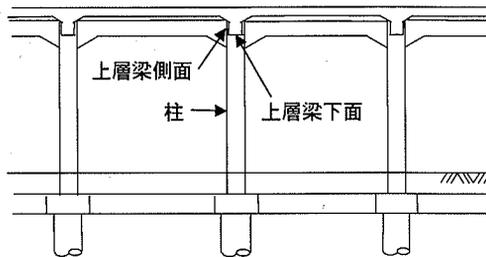
図-6に、電磁誘導法によるかぶり測定値と、ノギスにより実測したかぶり真値との関係を示す。試験測定を行ったラーメン高架橋の配筋は、軸方向鉄筋がD32を107mm間隔、帯鉄筋がD16を100mm間隔であり、提案した式(1)において、横方向鉄筋が1組の場合とほぼ同様である。係数 $a$ の値に $3.80 \times 10^{-3}$ を用いた場合の式(1)と測定値の相関係数は0.963と非常に良い結果となった。

### (5) 実構造物への適用性

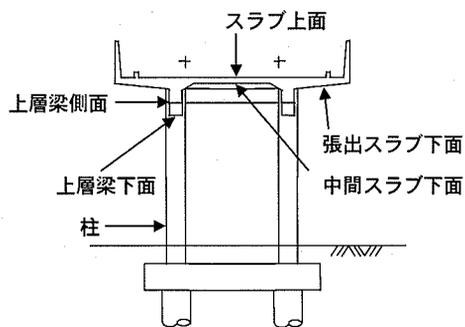
測定精度検証試験の結果、一般的なラーメン高架橋の柱においては、測定値を式(1)で補正することにより、かぶりを精度良く測定できると考えられる結果が得られた。

一方、ラーメン高架橋の梁下面および桁主梁下面についても、軸方向鉄筋がD32を100mm間隔程度で、スターラップがD16を100~150mm間隔が一般的な配筋であり、柱と同様に式(1)により補正が可能であると考えられる。また、ラーメン高架橋および桁のスラブ下面と梁側面については、測定対象となる最外縁の鉄筋がD13~D16で125~250mm間隔、直交鉄筋がD13~D22で125~300mm間隔が一般的な配筋であり、測定対象鉄筋の配置間隔が柱や梁下面に比べて広く、直交鉄筋も鉄筋径が細く間隔も広いいため、測定値に与える鉄筋間隔や直交鉄筋の影響は少ないと考えられる。実際に、2章(2)で示した試験方法により、測定鉄筋としてD16を125mm間隔に、直交鉄筋としてD13を150mm間隔に配置して測定した結果、かぶりが45mmにおける測定誤差は1mm程度であった。よって、補正を行わずに測定値をそのまま採用しても問題ないと考えられる。

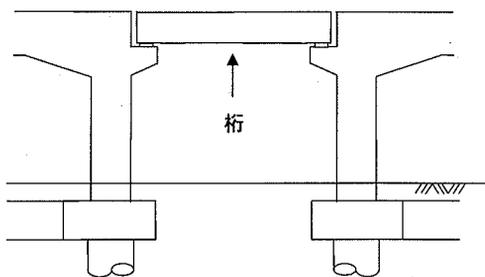
以上より、今回のかぶり測定ではラーメン高架橋の柱と梁下面については前述の方法を用いて補正を行い、スラブ下面と梁側面については測定値をそのまま用いて検討を行うこととした。



(a) ラーメン高架橋線路方向側面図



(b) ラーメン高架橋線路直角方向断面図



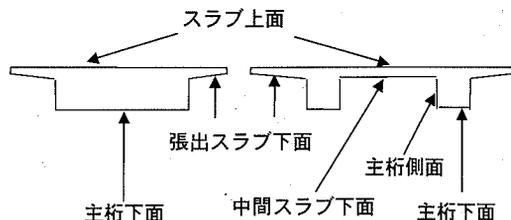
(c) スラブ桁, T形桁側面図

## 3. 実態調査の概要

### (1) 調査対象構造物

調査は、2000~2001年度に建設された鉄道高架橋を対象として行った。調査場所は全国から数箇所を選定し、事業主体、施工業者のそれぞれ異なる構造物を対象としている。

調査対象構造物の構造形式は、RC ラーメン高架橋 10基、RC スラブ桁 8連、RCT 桁形 7連である。これらの構造形式は、鉄道高架橋で一般的に用いら



(d) スラブ桁 (左図), T形桁断面図 (右図)

図-7 調査対象構造物の概略形状

れている形式であり、いずれも複線を支持する構造物である。表-1, 2 に調査対象構造物の諸元を、図-7 に概略形状を示す。表-1, 2 において、ラーメン高架橋の梁およびT形桁の主桁の軸方向鉄筋(直交鉄筋)は、下面でD32、側面ではD16,D19,D22の鉄筋が使用されていた。なお、調査対象構造物のかぶりの設計値は30~50mmであった。また、スペーサは、ラーメン高架橋の柱ではプラスチック製の円形スペーサ、梁およびスラブではモルタル製のスペーサが使用されていた。

これらの構造物は、鉄道構造物等設計標準<sup>6), 7)</sup>を適用して設計されており、施工管理は各鉄道事業者で定められた土木工事標準示方書に基づいている。なお、いずれの鉄道事業者の土木工事標準示方書にも、鉄筋工、型枠および支保工に関して、設計図に示されている形状、寸法にしたがって正確に施工するとともに、組立て完了後すみやかに検測を行うことが定められている。

## (2) 測定方法

### a) かぶりの測定方法

かぶりの測定は、電磁誘導法により行い、前述の方法で補正した。表-3~5 に、対象構造物ごとの、測定対象面数および測定した鉄筋の本数を示す。測定箇所は、ラーメン高架橋の柱側面、上層梁の下面および側面、中間スラブの下面、張出スラブの下面、スラブ桁の主桁下面、張出スラブ下面、T形桁の主桁下面および側面、中間スラブの下面、張出スラブの下面である。なお、スラブ上面の測定も試みたが、スラブ上に排水勾配コンクリートが一体となって施工されており、かぶりが設計値を大幅に上回っていて、測定困難であった。測定対象の鉄筋は、最外縁に配置された鉄筋であり、柱では帯鉄筋、上層梁および主桁ではスターラップ、スラブでは線路直角方向に配置された鉄筋である。

表-1 構造物の諸元(ラーメン高架橋)

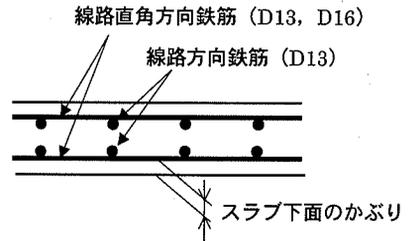
線路方向スパン	10m×3~8 径間	
線路直角方向スパン	5~6.5m×1 径間	
張出スラブ長さ	1.7~2.5m	
高架橋高さ	6.7~8.4m	
基礎形式	杭基礎、直接基礎	
上段: 測定鉄筋	柱	D13,D16,D19(@90~200) D32(@91~112)
	梁	D16,D19(@125~200)
下段: 直交鉄筋	スラブ	D16,D19,D32(@93~250)
		D13,D16(@125~250) D13,D16(@125~300)

注: 括弧内の数値は鉄筋間隔(単位: mm)

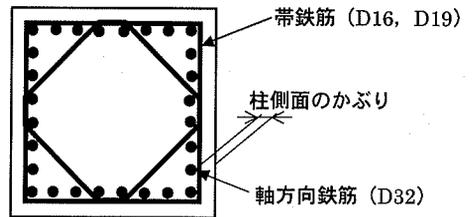
表-2 構造物の諸元(スラブ桁, T形桁)

		スラブ桁	T形桁
主桁本数		1本	3~4本
スパン		8.0~10.1m	12.1~14.7m
張出スラブ長さ		1.7~2.0m	1.2~1.9m
上段: 測定鉄筋	主桁	D13,D16(@250)	D13,D16 (@150~250)
		D32 (@96.2~105)	D19,D22,D32 (@80~250)
下段: 直交鉄筋	スラブ	D13(@250)	D13,D16(@250)
		D13(@300)	D13 (@250~300)

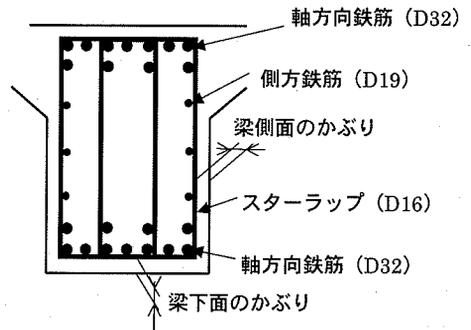
注: 括弧内の数値は鉄筋間隔(単位: mm)



(a) スラブ



(b) 柱



(c) 梁

図-8 断面形状および配筋の例

表-3 ラーメン高架橋の測定箇所数

構造物	柱側面	梁下面	梁側面	中間スラブ 下面	張出スラブ 下面
R1	4 (684)	3 (103)	6 (218)	1 (342)	1 (128)
R2	4 (647)	—	6 (230)	1 (350)	1 (129)
R3	—	1 (31)	2 (108)	—	—
R4	4 (646)	4 (91)	8 (269)	2 (350)	1 (75)
R5	—	3 (67)	6 (189)	1 (184)	1 (71)
R6	—	1 (34)	2 (128)	1 (181)	1 (73)
R7	—	3 (86)	7 (297)	1 (181)	1 (79)
R8	4 (603)	3 (91)	6 (255)	1 (177)	1 (72)
R9	—	3 (95)	6 (257)	1 (180)	1 (76)
R10	4 (391)	5 (171)	10 (4,455)	1 (237)	1 (106)
合計	20(2,971)	26 (769)	59 (2,406)	10 (2,182)	9 (809)

注：数字は測定面数，括弧内は測定鉄筋本数

表-4 スラブ桁の測定箇所数

構造物	主桁下面	張出スラブ 下面
S1～S8	1部材×1面	1部材×1面
合計	8 (615)	8 (780)

注：数字は測定面数，括弧内は測定鉄筋本数

表-5 T形桁の測定箇所数

構造物	主桁 下面	主桁 側面	中間スラブ 下面	張出スラブ 下面
T1	4 (175)	4 (174)	2 (78)	1 (106)
T2	3 (173)	6 (325)	—	1 (200)
T3	3 (233)	6 (455)	—	—
T4	2 (154)	2 (153)	—	—
T5	—	—	3 (280)	1 (127)
T6	2 (91)	4 (172)	2 (72)	1 (87)
T7	2 (89)	4 (170)	2 (76)	1 (101)
合計	16 (915)	26 (1,449)	9 (506)	5 (621)

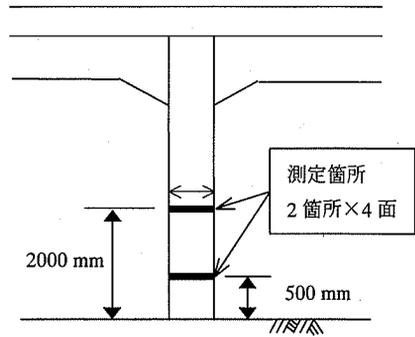
注：数字は測定面数，括弧内は測定鉄筋本数

図-8(a)～(c)に、ラーメン高架橋において測定した部材の断面形状および配筋の例と測定位置を示す。柱、梁および主桁は部材軸方向に、スラブは線路方向に測定線を1面に1～8本設定し、測定線に沿って測定対象鉄筋が現れるごとに鉄筋のかぶりを測定した。

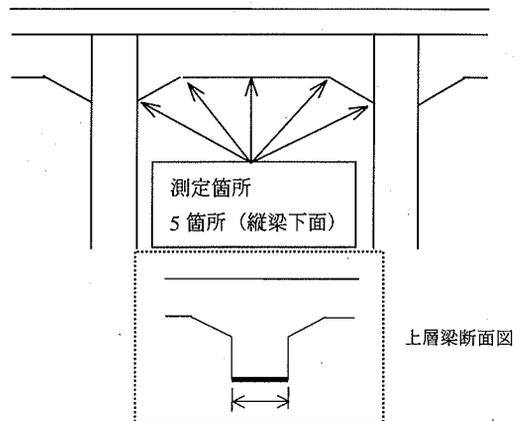
#### b) 部材寸法の測定方法

かぶりの測定の他に、部材寸法についても測定を行った。部材寸法の測定は、ラーメン高架橋の柱および上層梁の下面、T形桁の主梁下面で行った。

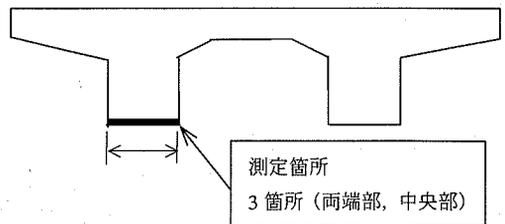
図-9(a)～(c)に、各部材における部材寸法の測定箇所を示す。測定箇所は、1面につき2～5箇所を測定した。



(a) ラーメン高架橋柱の測定箇所



(b) ラーメン高架橋上層梁下面の測定箇所



(c) T形桁主梁下面の測定箇所

図-9 部材寸法の測定箇所

#### 4. 調査結果

##### (1) かぶり測定値の分布

本研究では、かぶりの測定値を統計的分析により検討することとした。図-10(a), (b)にラーメン高架橋の柱ならびに中間スラブの、一測定面における測定結果の例を、度数分布で示す。図中のNの値は測定箇所数（鉄筋本数）の合計を表している。この例では、平均値付近の測定データ数が最も多く、平均値よりも差が大きくなるほど測定データ数が小さくなり、誤差の正負によらずほぼ均等に分布している。このような傾向は、他の測定面でも多く見られた。したがって、各測定面におけるかぶりの分布は正規分布となることが考えられる。そこで、各測定面について、カイ二乗検定を行い、その妥当性を検証した。図-11に検定の結果を示す。危険率5%および1%の検定結果は、いずれの部材における測定面についても採択率が60%を超える結果となり、多くの場合は正規分布と見なすことができると考えられる。したがって、本研究では、各測定面におけるかぶりの分布を正規分布として取り扱い、検討を行うこととする。

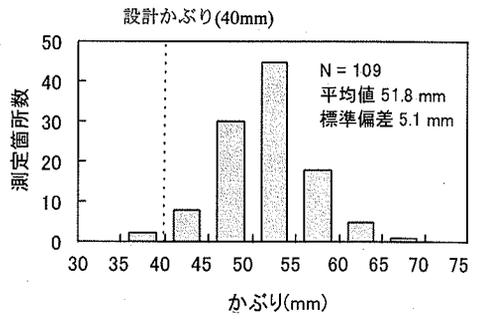
##### (2) 部材寸法

図-12 にラーメン高架橋の柱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も大きいもの、負側のものは設計値よりも小さいものを表す。これによると、設計値を下回るものはほとんどなく、他の部位でも設計値を下回るものはわずかであった。

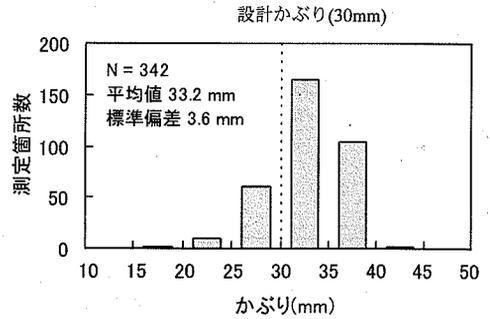
表-6に部材寸法の測定結果を示す。ラーメン高架橋の柱、上層梁下面、T形桁の主桁下面ともに平均値で設計値を上回っており、いずれの部材も設計値より平均で3mm程度大きい結果となった。

表-6 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	標準偏差	測定箇所数
ラーメン高架橋 柱側面	3.5 mm	3.0 mm	1,842
ラーメン高架橋 上層梁下面	3.2 mm	2.6 mm	113
T形桁 主桁下面	3.7 mm	3.8 mm	42



(a) R10 柱側面



(b) R1 中間スラブ下面

図-10 測定値の分布

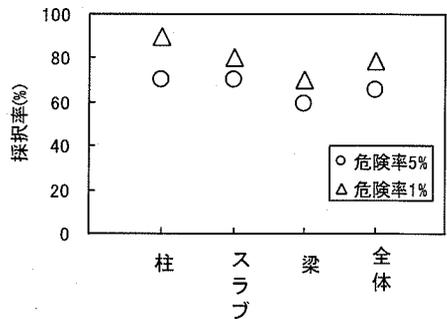


図-11 カイ二乗検定の結果

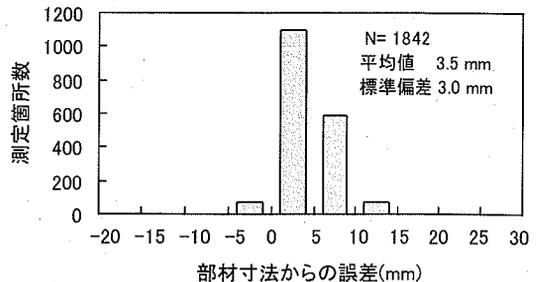


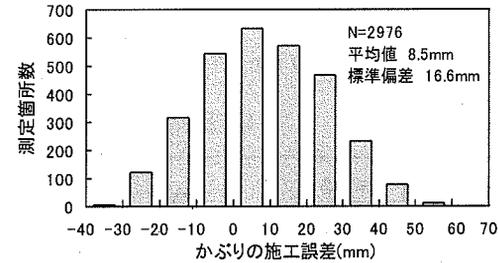
図-12 部材寸法の測定結果（ラーメン高架橋柱）

## 5. かぶりの施工誤差の検討

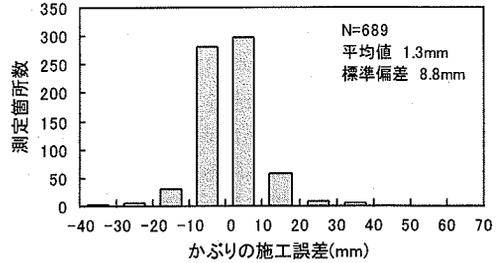
### (1) 部材の種類と施工誤差の関係

かぶりの測定結果を、部位別に集計し比較検討する。一般に、かぶりの施工誤差とは、施工後のかぶりの値と、設計値との差と考えられる。本研究では、

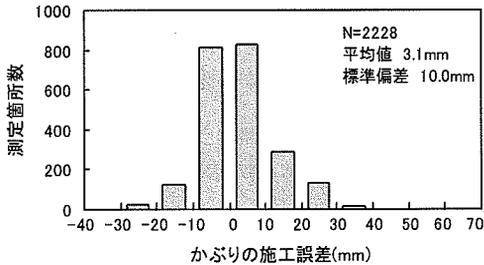
2章での検討結果から、電磁誘導法によるかぶり測定値を補正することにより、施工後のかぶりの値を精度良く表すことができると考え、補正後の電磁誘導法によるかぶり測定値と設計値との差を、かぶりの施工誤差として以降の検討を行う。図-13に、かぶりの施工誤差の分布を示す。図中のNの値は測定箇所



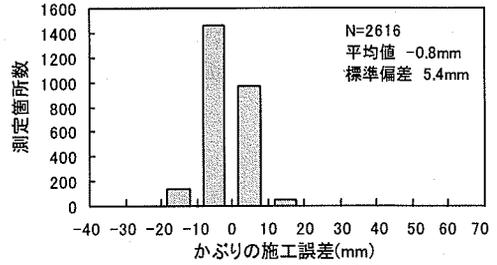
(a) ラーメン高架橋柱側面



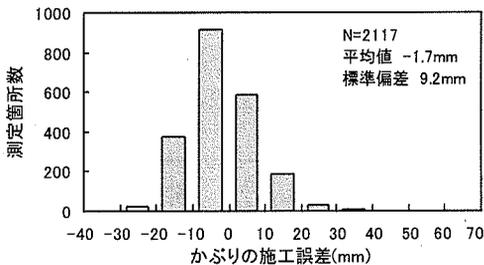
(b) ラーメン高架橋上層梁下面



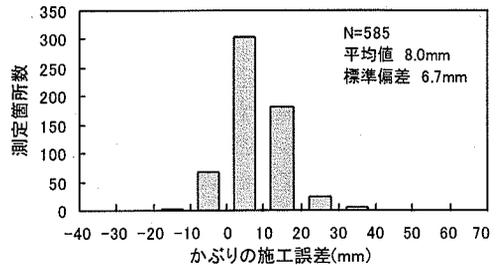
(c) ラーメン高架橋上層梁側面



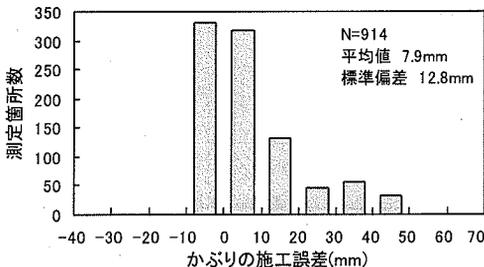
(d) 中間スラブ下面



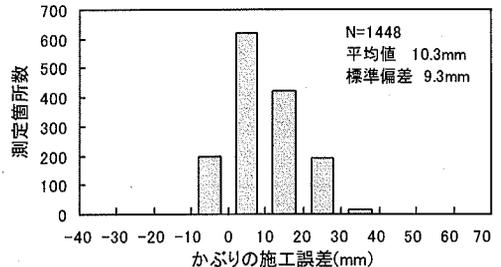
(e) 張出スラブ下面



(f) スラブ桁主梁下面



(g) T形桁主梁下面



(h) T形桁主梁側面

図-13 各部材毎の施工誤差の分布

数（鉄筋本数）の合計を表している。施工誤差が負の場合はかぶり不足となっていることを表している。ここで、中間スラブおよび張出スラブは、構造物間で形状寸法や配筋に大きな差がないことから、ラーメン高架橋、スラブ桁およびT形桁を区別せずに集計した。

図-13(a)より、ラーメン高架橋の柱では20mm以上のかぶり不足を生じているものがある。また、標準偏差も16.6mmと他の部位にくらべて大きく、施工誤差のばらつきが大きい。

図-13(b), (c)より、ラーメン高架橋の上層梁下面および側面では、いずれも20mmを超えるかぶり不足を生じているものがあるが、柱側面に比べるとかぶり不足となっているものは少ない。

図-13(d), (f)より、中間スラブ下面およびスラブ桁主梁下面では、標準偏差がそれぞれ5.4mmと6.7mmで他の部位と比べて小さく、施工誤差のばらつきが小さい。

図-13(e)より、張出スラブ下面では標準偏差が9.2mmで中間スラブ下面に比べて大きく、ばらつきが大きい。また、20mmを超えるかぶり不足を生じているものがある。

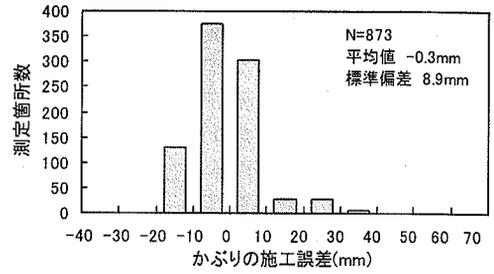
図-13(g), (h)より、T形桁主梁下面および側面では、標準偏差がそれぞれ12.8mmと9.3mmで中間スラブやスラブ桁主梁下面に比べてばらつきが大きいがかぶり不足についてはいずれも10mm以内におさまっている。

かぶりの施工誤差が問題となるのは、主にかぶり不足の場合である。したがって、本研究では、20mm以上のかぶり不足が生じているラーメン高架橋柱、梁および張出スラブ下面について、かぶりの施工誤差が生じる要因について検討することとする。

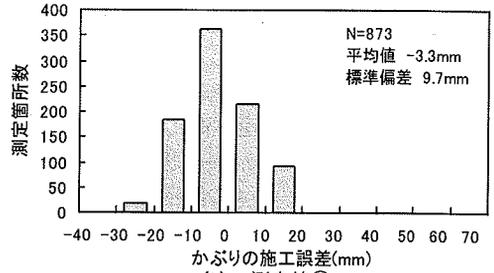
## (2) 施工誤差の生じる要因

### a) 張出スラブ下面

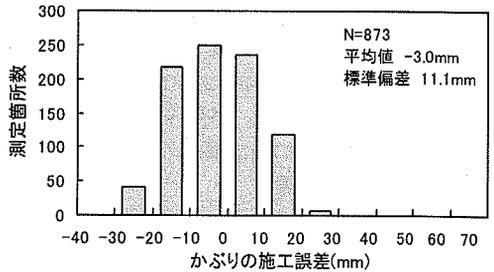
図-14(a)～(c)に、張出スラブ下面における施工誤差の分布を示す。図-14(a), (b)に示す施工誤差の分布は、図-15に示す測定線①, ②における測定値を集計したものである。また、図-14(c)は、同一測定面の同一断面における測定線②の測定値から測定線①の測定値を差し引いた値の分布を示している。図-14(a), (b)より、測定線①では、平均値が-0.3mmでありほぼ設計どおりのかぶりを有している。測定線②では、平均値が-3.3mmとなっておりかぶり不足が比較的多く生じている。また、図-14(c)より、平均値が-3.0mmであり同一断面で測定線①に比べ測定線②のかぶりが小さくなる場合が多くなっている。



(a) 測定線①



(b) 測定線②



(c) 測定線②-①

図-14 施工誤差の分布（張出スラブ下面）

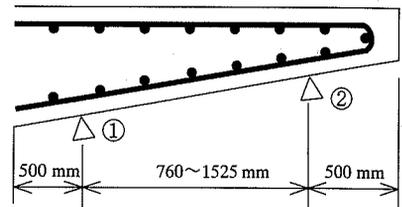


図-15 張出スラブの測定線の位置

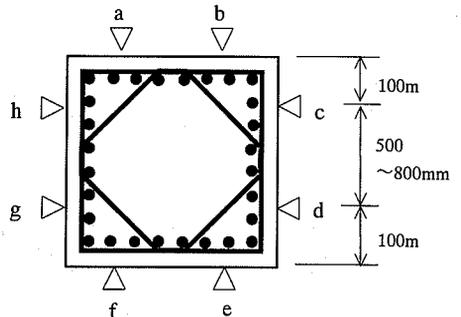


図-16 柱の測定線の位置（柱断面図）

ることが分かる。つまり、張出スラブの下面では、支持部付近で所要のかぶり確保されているが、先端付近でかぶり不足が多く生じる傾向がある。この要因としては、張出スラブが片持形式であるため、部材の先端で鉄筋が垂れ下がることによりかぶり不足が生じているものと考えられる。

b) ラーメン高架橋の柱

図-16 にラーメン高架橋の柱における測定位置を、図-17 に測定結果の例を示す。図の a~h は測定線の位置で、図-17 の横軸は柱の地表面からの測定位置の高さを示している。また、この部材のかぶりの設計値は 40mm であり、図中に破線で示した。

a,b および g,h はかぶりが全体的に設計値よりも大きいですが、その裏側にあたる c,d および e,f ではかぶり不足を生じている。また、各々の測定線の中でも測定値が変動している。つまり、ラーメン高架橋の柱におけるかぶりの施工誤差は、位置ごとのばらつきによる誤差と、全体的にずれる誤差の二つが考えられる。このうち、前者は個々の鉄筋の加工誤差、組立て誤差により生じていると考えられ、後者は鉄筋全体と型枠の位置関係が全体的にずれたことにより生じているものと考えられる。鉄筋全体と型枠の全体的なずれによるかぶりの施工誤差の検討は後述する。

c) ラーメン高架橋の梁

ラーメン高架橋の上層梁の軸方向鉄筋は、部材接合部において柱の軸方向鉄筋と交差するため、柱の軸方向鉄筋の位置がずれるとその影響を受けることになる。図-13 (b), (c) で上層梁下面に比べて、側面が平均値および標準偏差が大きいのは、その影響が原因の一つとなっていると考えられる。

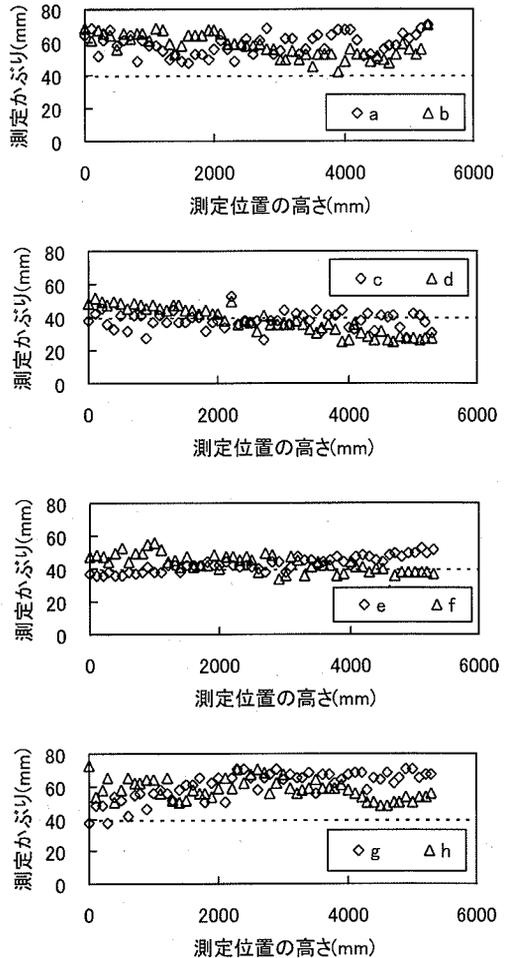


図-17 かぶりの測定結果 (R2 柱側面)

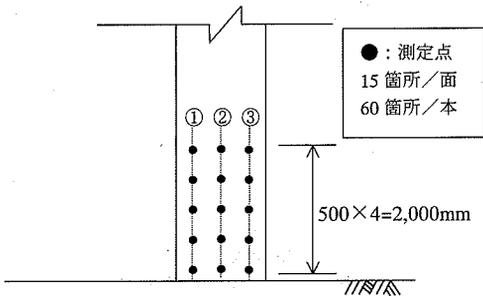


図-18 測定位置 (柱側面図)

表-7 測定箇所数

構造物	基礎形式	測定箇所数
R1~R35	杭基礎	960(14,400)
R36~R42	直接基礎	208(3,120)
合計		1,168(17,520)

注：数字は測定面数、括弧内は測定鉄筋本数

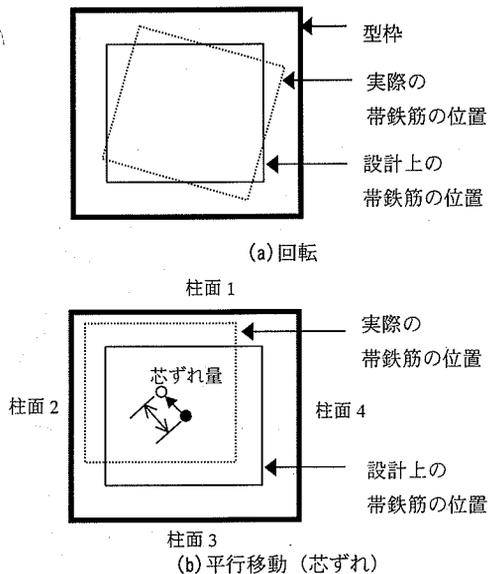


図-19 柱の鉄筋かごのずれ (柱断面図)

## 6. 柱の詳細調査

柱については、前述の測定に加えて詳細測定を行った。図-18に測定の概要を、表-7に測定箇所数を示す。表中のR1～R10については、表-3に示したものと同一構造物の別の柱で測定を行った。詳細測定は、柱の各4面に、軸方向に設定した3本の測定線について、地表面から2mの高さまで500mmピッチ程度で帯鉄筋を測定した。前述したとおり、柱側面のかぶりの施工誤差が発生する要因には、位置ごとのばらつきによるもの他に、鉄筋全体が型枠内でずれるために生じる施工誤差が考えられる。図-19(a), (b)に型枠内での鉄筋全体のずれの状況をイメージしたものを示す。鉄筋全体のずれは、図-19(a)に示すような回転によるものと、図-19(b)に示すような平行移動（以下、「芯ずれ」と言う）によるもの、さらに両方が同時に発生する場合が考えられる。

図-20に柱の詳細測定結果において、回転のみ、芯ずれのみ、および回転と芯ずれ両方によりかぶり不足が生じているものの分布を示す。ここで、回転の判定は、図-18において測定線ごとに測定値の平均を求め、その測定線①と測定線③の差が、10mm以上となるものを回転しているものとした。

図-20より、回転によりかぶり不足を生じているものは柱本数で2本であるが、芯ずれによりかぶり不足を生じているものは71本であり、回転と芯ずれによるものを含めると106本であった。したがって、型枠内での鉄筋全体のずれのうち、芯ずれが柱側面のかぶりの施工誤差に大きく影響していると考えられる。

そこで、芯ずれの影響について検討を行った。芯ずれ量は、図-19(b)における各柱面1～4におけるかぶり測定値の平均値を $c_1 \sim c_4$ とした場合、式(2)により求めた。測定値の平均値は、図-18に示す1面全ての測定値（15点）の平均値を用いた。

$$\text{芯ずれ量} = \sqrt{(c_1 - c_3)^2 + (c_2 - c_4)^2} \quad (2)$$

図-21に芯ずれ量を求めた結果を度数分布で示す。また、図には、累積百分率を線グラフで右軸に示した。図-21より、芯ずれ量が10mm以内におさまるものは全体の35%程度であり、20mmを超えるものが30%程度であった。平均で15mm程度の芯ずれが発生しており、芯ずれが、柱のかぶりに大きな影響を与えているものと考えられる。

次に、柱の基礎構造の違いによる芯ずれ量についても検討を行った。図-22に基礎構造が杭基礎（一柱

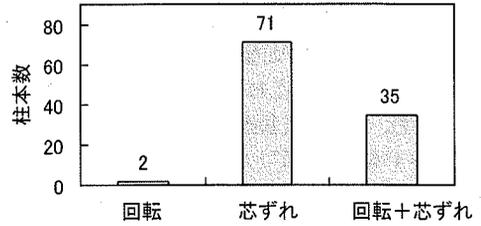


図-20 回転および芯ずれによるかぶり不足の分布

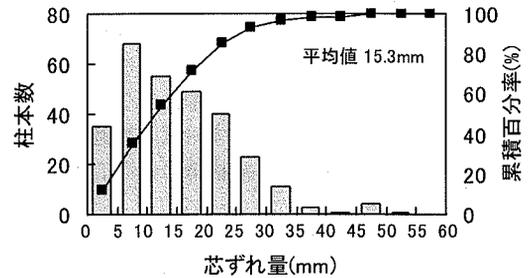


図-21 柱の芯ずれ量の分布

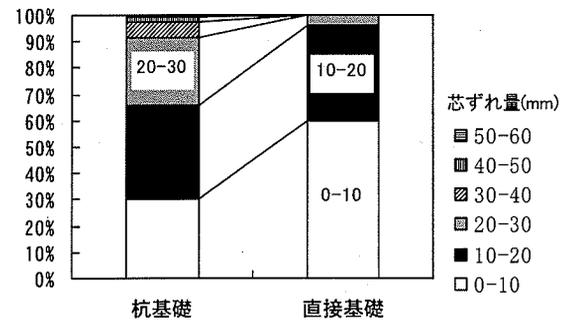


図-22 基礎構造別の柱の芯ずれ

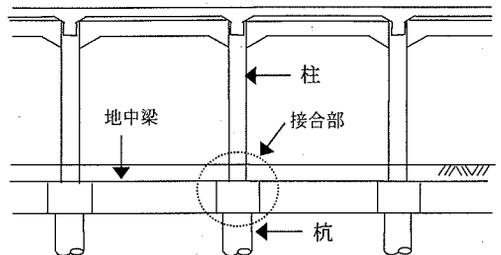


図-23 一柱一杭基礎構造（線路方向側面図）

一杭)である高架橋と、直接基礎である高架橋における芯ずれ量を比較した結果を示す。基礎構造が直接基礎の場合は、芯ずれ量が10mm以内のものが60%以上あり、20mm以内におさまるものは95%以上であった。なお、一柱一杭基礎構造とは、図-23に示すとおり、柱1本の基礎が1本の杭基礎となっているものであり、鉄道高架橋の柱の基礎構造としては比較的多い構造である。施工時に芯ずれが生じる原因としては、基礎構造が一柱一杭基礎構造の場合、施工誤差により杭の中心がずれることで、接合部の配筋の取り合いから柱の芯ずれが生じることが考えられる。図-24に、図-23に示した接合部における配筋の例を示す。この図より、接合部においては鉄筋が密に配置されており、杭芯のずれにより柱の軸方向鉄筋の位置がずれることが推察される。

以上より、柱における芯ずれは、基礎構造により違いがあり、一柱一杭基礎構造の場合に大きくなるものと考えられる。

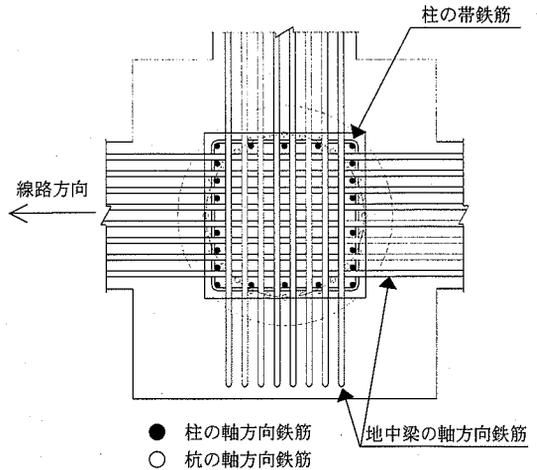


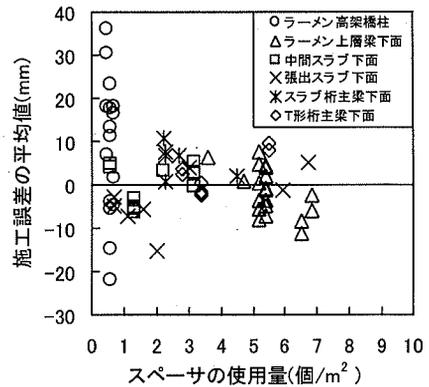
図-24 接合部における配筋の例(平面図)

## 7. スペーサ使用量とかぶりの施工誤差の関係

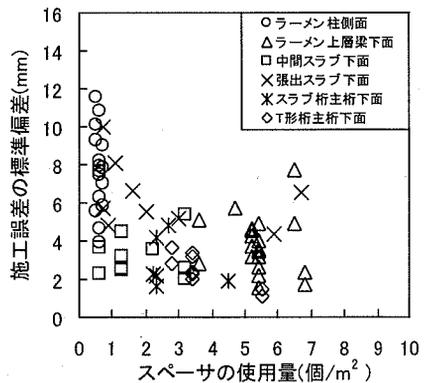
図-25(a), (b)に、スペーサの使用量と、かぶりの施工誤差の平均値および標準偏差の関係を示す。ここで、施工誤差の平均値および標準偏差は、測定面ごとに求めた。また、図には、調査時にスペーサの数を確認できた測定面のみを示している。図-25(a), (b)より、スペーサの使用量が少ない場合は、かぶりの施工誤差の平均値および標準偏差とも大きくなっているが、使用量が多くなると減少する傾向にある。1m<sup>2</sup>あたり3個程度以上のスペーサを配置することにより、かぶりの施工誤差を一定以内に抑えることができることがわかる。しかし、スペーサの量を多くしても、ある程度の施工誤差は生じていることもわかる。後者については、現状の施工方法が抜本的に見直されない限り避けることは難しいものと考えられ、かぶりには設計段階である程度の施工誤差を考慮しておくことが望ましいものと考えられる。

## 8. 設計時に見込むかぶりの施工誤差

柱側面以外の上層梁下面や側面、中間スラブや張出スラブの下面、スラブ桁主梁下面、T形桁主梁下面や側面においても、施工時において型枠内で鉄筋が全体的にずれることが考えられる。しかしながら、設計時に鉄筋の全体的なずれまでも考慮して施工誤



(a) スペーサ使用量と施工誤差の平均値



(b) スペーサ使用量と施工誤差の標準偏差

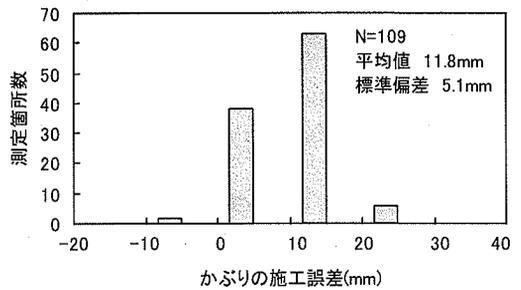
図-25 スペーサ使用量と施工誤差の関係

差を設定することは合理的でない。よってここではかぶりの施工誤差を、鉄筋の全体的なずれによるものと、そうでないものに分離して取り扱うこととし、設計時に見込むかぶりの施工誤差としては、後者のみを考えることとする。図-26(a)に、芯ずれが発生している一本の柱の側面におけるかぶりの施工誤差の分布を示す。図-26(a)より、この面では平均値が11.8mmとなっている。これは、前述の通り芯ずれの影響と考えられる。そこで、各測定値から平均値を差し引いて再集計すると図-26(b)のようになる。

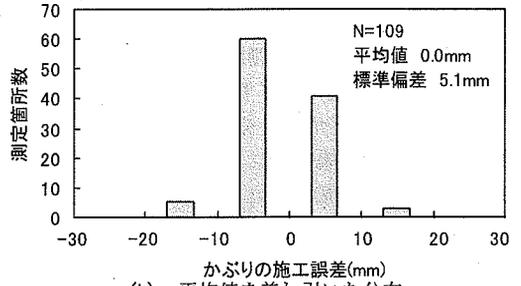
図-26(b)は、芯ずれの影響を取り除いた分布である。全ての柱の全測定面について、同様の作業を行い再集計したものが図-26(c)であり標準偏差は7.8mmとなる。表-8に、他の部位についても同様の作業を行い再集計した場合の、かぶりの施工誤差の標準偏差( $\sigma$ )と非超過確率90%を考慮した値( $1.282\sigma$ )を示す。

表-8より、設計時に見込むかぶりの施工誤差は、非超過確率90%程度とすると、中間スラブ下面以外の部位で10mm程度を考慮するのがよいと考えられる。中間スラブ下面については、図-13(d)より、前述のとおり再集計する前の、かぶりの施工誤差の標準偏差が5.4mmと他の部位に比べて最も小さい。また、平均値も-0.8mmであり、ほぼ設計どおりのかぶりが確保されていると考えられる。したがって、中間スラブ下面は、型枠内での鉄筋の全体的なずれがほとんど発生しない部位と考えられる。以上より、中間スラブ下面におけるかぶりの施工誤差として5.0mm程度を考慮すればよいと考えられる。

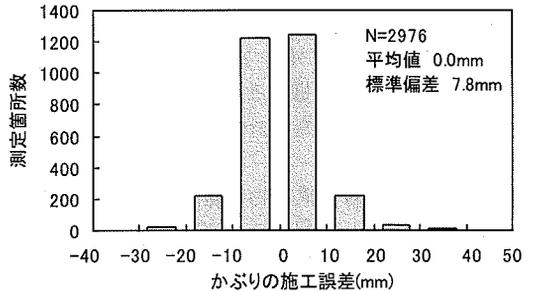
表-9に、各部位における設計時に見込むかぶりの施工誤差を示す。この場合、十分な施工管理により型枠内での鉄筋の全体的なずれを発生させないことが重要である。また、7章で述べた通り、スペーサを十分に配置しても、ある程度の施工誤差は発生すると考えられるため、スペーサを適切に配置する場合においても、表-9に示す程度の施工誤差を考慮するのがよいと考えられる。



(a) 柱一側面のかぶりの施工誤差分布



(b) 平均値を差し引いた分布



(c) 平均値を差し引いたかぶりの施工誤差分布

図-26 柱側面のかぶりの施工誤差

表-8 かぶりの施工誤差の標準偏差

部 位		標準偏差 $\sigma$ (mm)	1.282 $\sigma$
高架橋	柱側面	7.8	10.0
	上層梁下面	5.3	6.8
	上層梁側面	4.7	6.0
高架橋 スラブ桁 R C T桁	中間スラブ 下面	3.5	4.5
	張出スラブ 下面	4.4	5.6
スラブ桁	主桁下面	5.8	7.4
T形桁	主桁下面	6.5	8.3
	主桁側面	3.7	4.7

表-9 設計時に見込むかぶりの施工誤差

部 位		施工誤差 (mm)
高架橋	柱側面	10
	上層梁下面	
	上層梁側面	
高架橋	中間スラブ下面	5
スラブ桁 T形桁	張出スラブ下面	10
スラブ桁	主桁下面	
T形桁	主桁側面	

## 9. まとめ

鉄道高架橋のかぶりの施工誤差について、実構造物の調査を実施し検討を行った結果、以下の結論を得た。

- (1) 電磁誘導法による鉄筋探査機は、柱や梁下面などにおける、複数組の帯筋、スターラップ、太径かつ密な直交鉄筋の影響を受ける。この場合、通常の鉄道高架橋における柱や梁下面の配筋状態であれば、本研究で提案した式(2)により測定値を補正できる。
- (2) ラーメン高架橋の柱側面および上層梁下面・側面ならびに張出スラブ下面は、中間スラブ下面に比べて施工誤差が大きくなる傾向にある。
- (3) ラーメン高架橋の柱において、かぶりの施工誤差が生じる要因の一つとして、鉄筋全体の型枠内でのずれ(芯ずれ)が影響している。芯ずれは、基礎構造により異なり、直接基礎に比べて、一柱一杭形式の杭基礎の場合に芯ずれが大きくなる傾向にある。
- (4) スペーサの使用量が多くなるとかぶりの施工誤差が小さくなり、3個/m<sup>2</sup>以上配置すると、施工誤差を一定以内に抑えることができる。しかし、使用量を多くしても、5~10mm程度の施工誤差は発生する。
- (5) 今回の調査対象構造物の範囲において、非超過確率を90%とした場合のかぶりの施工誤差は、中間スラブの下面で5mm程度、それ以外の部位では10mm程度であった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編 2002年制定，2002.
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー第41号 鉄筋コンクリート設計法の最近の動向，pp.62-64，1975.
- 3) 榎田佳寛，友沢史紀，矢島義磨：実際の鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋のかぶり厚さの実態，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.7，pp.45-48，1985.
- 4) 小井戸純司：鉄筋位置測定のための非破壊試験—電磁誘導法—，非破壊検査，Vol.47，No.10，pp.712-716，1998.
- 5) 東川孝治，曾我部正道，井上裕司，谷村幸裕：鉄筋検査機の鉄道構造物への適用に関する研究，鉄道総研報告，Vol.16，No.9，2002.
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，1999.
- 7) 鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，1996.

(2004. 2. 2 受付)

## INVESTIGATION OF CONSTRUCTION ERRORS OF THE COVER FOR RAILWAY RC RIGID FRAME VIADUCTS

Chikara KAWAMURA, Yukihiro TANIMURA, Masamichi SOGABE, Tsutomu SATO and Masashi HASEGAWA

To evaluate the durability of a concrete structure, it is important to secure the precision of the cover. In this study, we surveyed the construction errors of the covers of railway RC rigid frame viaducts constructed in recent years, and clarified that the errors in covers were different at different parts and larger with pillars caused by the overall shift of reinforcing bars. Based on the study results, we proposed a value of allowable construction error for the design of railway RC rigid frame viaducts.