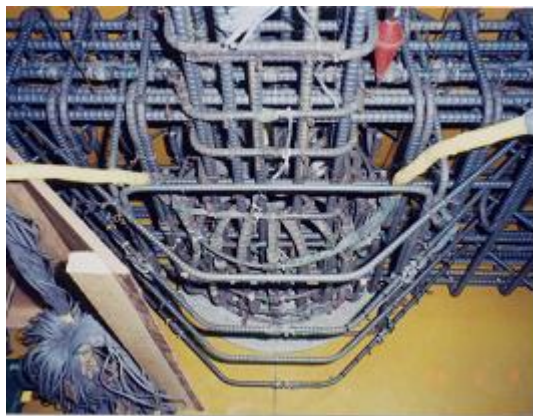


鉄道RCラーメン高架橋接合部の定着構造の合理化に関する研究

竹内 秀聡・松林 卓・原 夏生・三島 徹也*¹・田所 敏弥*²・谷村 幸裕*²

A RESEARCH ON THE RATIONAL BOND MECHANISM OF THE JOINTS IN RAILWAY RIGID-FRAME VIADUCT

Hideaki TAKEUCHI, Taku MATSUBAYASHI, Natsuo HARA, Tetsuya MISHIMA, Toshiya TADOKORO, Yukihiro TANIMURA



従来型の配筋（図-1）



本研究で提案する配筋（図-2）

研究の目的

鉄道 RC ラーメン高架橋の部材接合部は、柱や梁の軸方向鉄筋および横拘束鉄筋が縦横に配置されており、鉄筋の組立やコンクリートの打設など施工が困難な場所となっている。さらに、兵庫県南部地震以降の耐震設計の見直しによる基準の強化や、経済性の追求に伴う断面の削減により、さらに配筋が高密度となる傾向にある（図-1）。また、施工作業合理化の観点から、杭や柱の主筋に太径や高強度鉄筋の適用が要請されているが、コスト面で不利となってしまう。定着長は鉄筋の径および強度に比例し、地中梁の梁高をより高くする必要が生じるからである。これらの問題を解消する新しい定着構造が望まれている。

そこで、本研究では部材接合部に鋼繊維補強コンクリートを適用することによって、高密度配筋の原因となっている軸方向鉄筋の帯鉄筋とフックを省略し、部材接合部の配筋を合理化するものである（図-2）を提案する。

本研究の目的は、鋼繊維混入率等をパラメータとした検証実験を行うことにより、従来型の配筋と同等の性能をもつ合理的な配筋の詳細仕様を決定することにある。

技術の説明

本技術は、柱、梁、杭の各部材が集中する鉄道 RC ラーメン高架橋の部材接合部に鋼繊維補強コンクリートを適用することにより、高密度配筋の原因となっている軸方向鉄筋の帯鉄筋とフックを省略し、部材接合部の配筋を合理化するものである。次の特長が挙げられる。①配筋が簡素化されることによる作業効率の向上。②コンクリートの充填性や配筋の確実性等の品質向上。③地中梁と作業土工の合理化による現場の利益率の改善。

主な結論

検証実験より①、②の結論を得た。また、その結論に基づきコスト試算して得られたのが結論③である。

- ①帯鉄筋は鋼繊維補強コンクリートにより置換できる。
- ②定着が有効とならない範囲の長さは鉄筋径の 10 倍必要である。
- ③杭頭鉄筋の定着長で地中梁高が決定される鉄道高架橋に対し、本技術を適用すると、地中梁高の減少により全体工事の約 10%のコスト削減が可能である。

*1 本店 TPM プロジェクト推進室

*2 （財）鉄道総合技術研究所

鉄道RCラーメン高架橋接合部の定着構造の合理化に関する研究

竹内 秀 聡 松 林 卓
 原 夏 生 三 島 徹 也*¹
 田 所 敏 弥*² 谷 村 幸 裕*²

要 旨

鉄道RCラーメン高架橋の部材接合部は、柱や梁の軸方向鉄筋および横拘束鉄筋が縦横に配置されており、鉄筋の組立やコンクリートの打設など施工が困難な場所となっている。さらに、兵庫県南部地震以降の耐震設計基準の強化や、経済性の追求に伴う断面の削減により、さらに配筋が高密度となる傾向にある。著者らの既往の研究では、鋼繊維補強コンクリートが定着鉄筋の付着性能を向上させることが実験で確認されている。そこで、本研究では部材接合部に鋼繊維を適用することによって、高密度配筋の原因となっている軸方向鉄筋のフックと帯鉄筋を省略した合理的な配筋を提案する。従来型の配筋と同等の性能がある配筋仕様の詳細を決定するため、鋼繊維混入率等をパラメータとした検証実験を行った。その結果、①帯鉄筋は鋼繊維補強コンクリートで置換できること、②鉄筋定着長のうち、定着が有効とならない範囲の長さは鉄筋径の10倍必要であることがわかった。さらに、杭等鉄筋の定着長で地中梁高が決定される鉄道RCラーメン高架橋に対して本技術を適用した場合、全体で約10%のコスト削減が可能であることを確認した。

キーワード 高架橋接合部／鋼繊維補強／定着／配筋合理化

目 次

- | | |
|-------------|------------|
| 1. はじめに | 5. 考察 |
| 2. 定着長の設計方法 | 6. 本技術の有用性 |
| 3. 実験概要 | 7. 結論 |
| 4. 実験結果 | |

A RESEARCH ON THE RATIONAL BOND MECHANISM OF THE JOINTS IN RAILWAY RIGID-FRAME VIADUCTS

Hideaki TAKEUCHI	Taku MATSUBAYASHI
Natsuo HARA	Tetsuya MISHIMA
Toshiya TADOKORO	Yukihiro TANIMURA

Synopsis:

Due to the congested reinforcement bars in the joint of column, underground beam and pier of RC-rigid-frame viaducts, not only arranging bars but also pouring concrete are getting difficult. Authors suggest introducing the steel fiber to the joint as the solution to these problems and conducted the experiment with parameters such as the mix ratio of the steel fiber so as to determine the details of the spec of the arrangement of bars.

From the result of this research, authors get three conclusions, as below.

- ① The hoop tie can be replaced by the steel fiber reinforcement concrete.
- ② The length of the bar of which the bond can't function is 10 times as long as Φ , which is the diameter of the bar.
- ③ This technique reduces the cost by about 10% at the underground beam whose span is 10(m) long.

* 1 本店 TPM プロジェクト推進室

* 2 財団法人 鉄道総合技術研究所

1. はじめに

鉄道 RC ラーメン高架橋の部材接合部は、柱や梁の軸方向鉄筋および横拘束鉄筋が縦横に配置されており、鉄筋の組立やコンクリートの打設など施工が困難な場所となっている。さらに、兵庫県南部地震以降の耐震設計の見直しによる基準の強化や、経済性の追求に伴う断面の削減によりさらに配筋の高密度化が行われている。さらに、高密度な配筋は、現場打ちコンクリートの打設の施工性に限らず、部材のプレキャスト化等の合理化の妨げにもなる。

そこで、施工合理化の観点から、杭や柱の軸方向鉄筋に太径や高強度鉄筋の適用が要請されているが、コスト面で不利になってしまう。定着長は鉄筋の径や強度に比例し、地中梁の梁高をより高くとる必要が生じるためである。したがって、これらの問題を解消する新しい定着構造が望まれている。

著者らは既往の研究¹⁾で、鋼繊維補強コンクリートが定着鉄筋の付着性能を向上させることを実験により確認している。したがって、接合部への鋼繊維補強コンクリートの適用は接合部の配筋を簡素化し、軸方向鉄筋の定着長を低減することができると期待される。

そこで、本研究では部材接合部に鋼繊維補強コンクリートを適用することで、従来型の配筋（図-1）より合理的な配筋（図-2）を提案した。実構造物をモデル化した試験体を用いて、従来型の配筋に相当する性能があることを確認するための検証実験を行った。なお、従来型の配筋を有する無繊維コンクリート仕様の試験体は、（財）鉄道総合研究所との受託研究で既に検討を行っており、合理的な配筋を有する鋼繊維補強コンクリート仕様の試験体は、共同研究で検討を行った。

2. 定着長の設計方法

本章では、実験結果を検証するための指標となる定着長の算定方法を示す。

本研究は、接合部における配筋の合理化を行った上で、地中梁高を決定する柱や杭の軸方向鉄筋の定着長をいかに低減するかということに主眼を置いている。したがって杭軸方向鉄筋の定着仕様が試験体の性能を決定するように、杭基部が先行して塑性化するような試験体仕様となっている。なお、新しい定着構造を検討するため、試験体仕様が現行の「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 配筋の手引き」²⁾（以降、「配筋の手引き」と記す）が定める条件を必ずしも満足していない。そのため、「配筋の手引き」では、本試験体の性能を厳密に評価できない。そこで、「配筋の手引き」の内容を一部修正し、本配筋仕様を評価可能とした。

まず、「配筋の手引き」に基づく定着長の算定方法を示し、次に修正した算定方法を提案する。

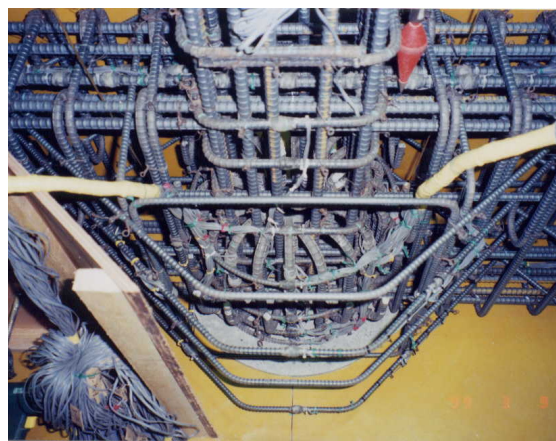


図-1 従来の配筋



図-2 本研究で検討する配筋

2.1 「配筋の手引き」に基づく算定方法

「配筋の手引き」によると、杭とフーチングの結合における杭軸方向鉄筋の定着長は式〔1〕で定められている。

$$l = l_{d0} + l' \quad [1]$$

ここに、

- l : アンカー長（本文では「定着長」と称している）
- l_{d0} : 基本定着長
- l' : 地中梁下端から杭径の 0.4 倍または 10 Φ のうち小さい方の値（以降、「余長」と称す）

以下に、基本定着長、余長それぞれについての算出方法を順次示す。

基本定着長は、式〔2〕～〔5〕に基づいて算出される。ただし、標準フックを設ける場合には、算定値 l_{d0} から 10 Φ だけ減じることができる。

$$l_{d0} = \alpha_b \frac{f_{syd}}{4f_{bod}} \cdot \phi \quad [2]$$

ここに,

f_{syd} : 鉄筋の設計引張降伏強度

f_{bod} : コンクリートの設計付着強度

ϕ : 定着する鉄筋の直径

$$\alpha_b = \left(\frac{0.75}{K_c}\right) + 0.2 \quad [3]$$

ただし, $0.5 \leq \alpha_b \leq 1.0$

$$K_c = \frac{c_b}{\phi} + \frac{15A_t}{s \cdot \phi} \quad [4]$$

ここに,

s : 接合部の杭の帯鉄筋の最大間隔

c_b : 定着する鉄筋のかぶりと, あきの
1/2 のうち, 小さい方の値

$$A_t = A_0 + A'_0 \cdot \frac{s}{s'} \leq 2A_0 \quad [5]$$

ここに,

A_t : 仮定される割裂破壊断面に垂直な横
方向鉄筋の断面積

A_0 : 杭の帯鉄筋 1 本の断面積

A'_0 : 接合部の補強鉄筋 1 本の断面積

s' : 接合部の補強鉄筋の間隔

次に, 余長について示す. 「配筋の手引き」によると, 余長は地中梁下端から杭径の 0.4 倍または 10Φ のうち小さい方の値と定められている. したがって, 「配筋の手引き」に基づく余長は本実験では 10Φ となる.

2.2 本研究で提案式する算定方法

本研究で提案する試験体の接合部の仕様を厳密に評価するため, 基本定着長の算定方法に関して次の 2 点を修正することが必要になる.

- ①基本定着長の算定式に鋼繊維補強の効果を組み込む.
- ②杭の帯鉄筋, 接合部補強鉄筋の配筋条件の緩和.

以下, ①, ②について順次, 説明する.

(1) 基本定着長算定式の修正

著者らは, 既往の研究¹⁾で鋼繊維補強コンクリートにおける鉄筋の付着特性を検討するために, 付着割裂を許容した鋼繊維補強コンクリートからの鉄筋の引抜試験を行っている. その結果, 鋼繊維による補強効果は, 現行

の式 [3] における α_b の範囲を式 [6] のように拡張し, 現行の式 [4] を式 [7] に置き換えることで評価できるという結論を得ている.

$$0.4 \leq \alpha_b \leq 1.0 \quad [6]$$

$$K_c = \frac{c_b}{\phi} \cdot (1 + 50p_f) + \left\{ \frac{15A_t}{s \cdot \phi} \cdot (1 + 174p_f) \right\} \quad [7]$$

ここに,

p_f : 繊維体積混入率 ($0 \leq p_f \leq 0.01$)

(2) 配筋条件の緩和

「配筋の手引き」は, 杭軸方向鉄筋の帯鉄筋を配筋することを前提としているため, 帯鉄筋を省略した試験体の基本定着長を算定することができない. そこで, 本研究では, 「配筋の手引き」の配筋の条件を次のように緩和する. すなわち, 鋼繊維補強を施した場合は, 式 [8] に示すように, 接合部の補強鉄筋を杭の帯鉄筋と同等とみなすというものである.

$$A_0 = 0 \text{ の場合は, } A_t = A'_0 \quad [8]$$

3. 実験概要

3.1 試験体の概要

試験体は, 標準的な鉄道ラーメン高架橋の杭, 柱, 地中梁を約 50% に縮小した十字形モデルとした. 試験体の概略形状を図-3 に示す. 接合部, 柱, 地中梁, 杭における配筋概略および杭軸方向鉄筋定着方法の仕様一覧を図-4 にまとめて示す. なお, 試験体は杭部材のみ塑性化するように柱および地中梁の配筋を決定している. 実験パラメータは, 杭軸方向鉄筋の定着方法, 定着長および接合部高, 繊維混入率とした. 試験体諸元を表-1 に示す.

表-1 試験体諸元

試験体名	軸方向鉄筋		接合部 形状 (mm)			コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)			備考	
	定着方法	定着長	B	T	H	杭	柱	接合部		
A-0L2f	半円形フック	20Φ	760		700	30.6	37.1	37.6	基準試験体 内向きフック	
A-0L3	直筋	30Φ				31.8	38.0	39.9		
A-0L2		20Φ				32.7	29.8	29.9		
A-1L3		30Φ				37.7	32.0	30.8		SF混入率1.0%
A-05L3						35.6	34.5	31.8		SF混入率0.5%
B-0L3	15Φ	550			28.5	27.5	26.6	地中梁高縮小		
B-1L1					29.9	41.5	27.2	地中梁高縮小 SF混入率1.0%		
B-05L2		20Φ		32.3	48.7	29.5	地中梁高縮小 SF混入率0.5%			

* ここで, A-1L3, A-05L3, B-1L1, B-05L2 は共同研究で実験を行った試験体である. その他は受託研究である.

なお、試験体名は以下のように定めた。

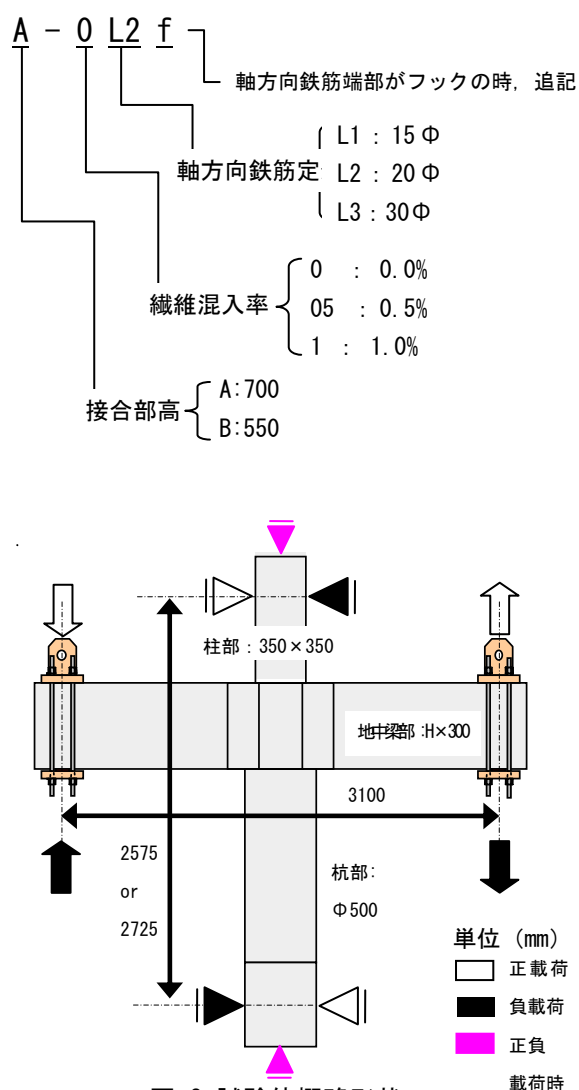


図-3 試験体概略形状

A-0L2f は、比較のための基準試験体であり、従来の定着方法をとった。すなわち、杭軸方向鉄筋の端部仕様を半円形フックとした。その他の試験体の杭軸方向鉄筋の端部仕様は全て直筋である。A-0L3、A-0L2 は、定着長の違いに着目したものである。A-1L3、A-05L3 は、接合部内の杭および柱の帯鉄筋を配置せず、接合部を鋼繊維補強コンクリート仕様とした。B-0L3、A-0L3 は、接合部の高さの違いに着目したものである。B-1L1、B-05L2 は、A-1L3、A-05L3 に比較して、接合部高さを変え、さらに定着長を減じたものである。

以上で、本論文で検討する試験体の諸元を決定したので、第 2 章で示した方法で各試験体の基本定着長および余長を順に評価していく。表-2 にそれらの評価結果を示す。ここに、実験設定時の定着長とは、実際に試験体に配筋した杭軸方向鉄筋の定着部分の長さのことで、本論文で提案する基本定着長とは、式 [7] および式 [8] を前提として算出した基本定着長のことである。実験設定

時の定着長から本論文で提案する基本定着長を差し引いた値が各試験体の余長となる。

したがって、各試験体の余長は、A-0L3、A-1L3 で約 13.5Φ、A-05L3、B-0L3 で 9.3～11.2Φ、A-0L2、B-1L1、B-05L2 で-1.2～2.3Φであることがわかる。

以上の試験体を、変形性能およびエネルギー吸収能に関して基準試験体と比較することによって、基準試験体と同等の性能を示し、且つ、最も合理的な試験体を見出す。

本実験に使用した鋼繊維の機械的性質および鉄筋の材料試験結果をそれぞれ、表-3、表-4 に示す。

表-2 各試験体の評価

試験体名	実験設定時の定着長①	本論文で提案する基本定着長②	①と②から設定される余長③
A-0L2f	20Φ	17.0Φ	3Φ
A-0L3	30Φ	16.4Φ	13.6Φ
A-0L2	20Φ	17.7Φ	2.3Φ
A-1L3	30Φ	17.9Φ	12.1Φ
A-05L3		18.8Φ	11.2Φ
B-0L3		20.7Φ	9.3Φ
B-1L1	15Φ	17.6Φ	-2.6Φ
B-05L2	20Φ	17.9Φ	2.1Φ

* 但し、③=①-②である。

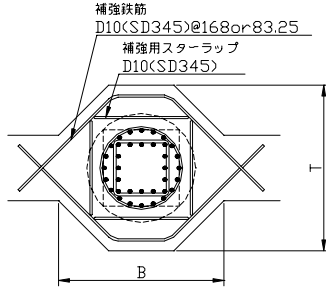
表-3 鉄筋材料試験結果

呼び名	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 × 10 ⁵ (N/mm ²)	適用箇所
D19	443	631	1.89	B-0L3 地中梁
	406	603	1.84	B-1L1, B-05L2 地中梁
D16	380	554	1.84	A-0L2f, A-0L3, A-0L2 杭
	383	561	1.86	A-0L2f, A-0L3, A-0L2 柱・地中梁
	393	597	1.90	A-1L3, A-05L3 杭・柱・地中梁
	369	536	1.87	B-0L3 杭・柱・地中梁
	356	544	1.75	B-1L1, B-05L2 杭・柱
D13	372	520	1.77	A-0L2f, A-0L3, A-0L2 柱・地中梁
	376	549	1.66	A-1L3, A-05L3 柱・地中梁
	389	556	1.87	B-0L3 柱・地中梁
	396	530	1.85	B-1L1, B-05L2 地中梁・柱
	380	564	1.73	B-1L1, B-05L2 地中梁
D10	352	503	1.70	A-0L2f, A-0L3, A-0L2 杭
	374	550	1.69	A-1L3, A-05L3 杭
	382	565	1.76	B-0L3 杭
	392	534	1.83	B-1L1, B-05L2 杭

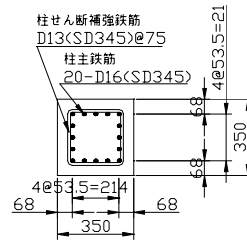
表-4 鋼繊維の機械的性質

繊維長 (mm)	繊維径 (mm)	引張強度 (N/mm ²)
30	0.6	1100 以上

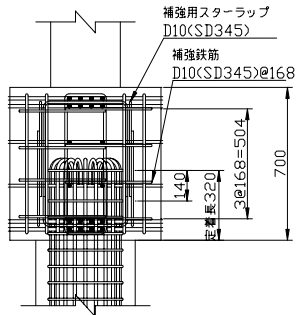
接合部



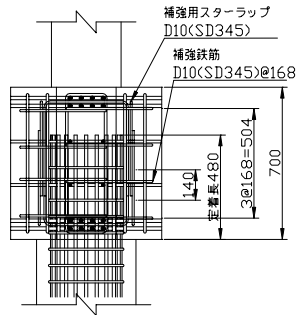
柱



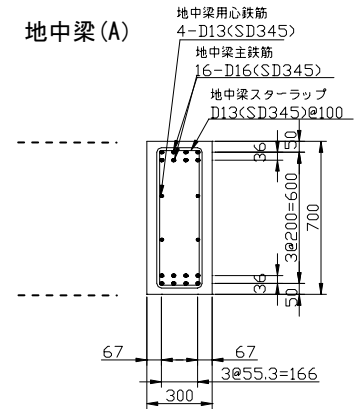
A-OL2f



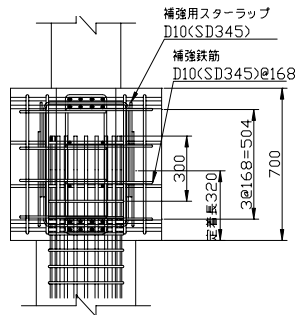
A-OL3



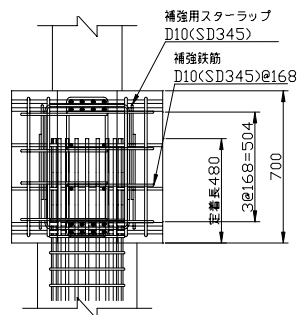
地中梁 (A)



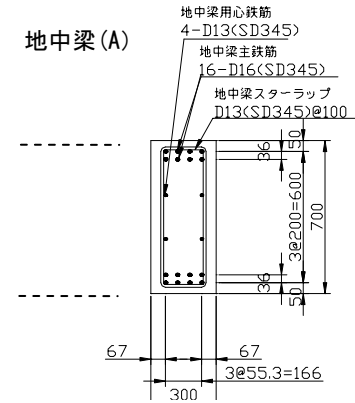
A-OL2



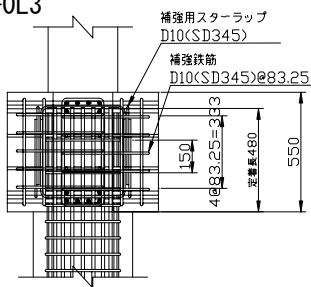
A-1L3, A-05L3



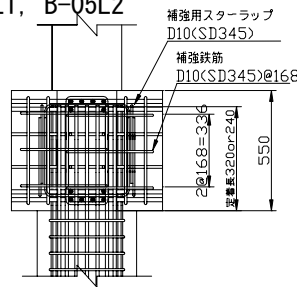
地中梁 (A)



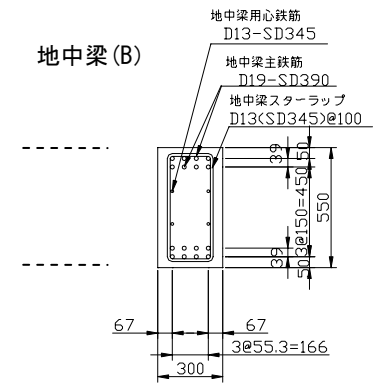
B-OL3



B-1L1, B-05L2



地中梁 (B)



杭

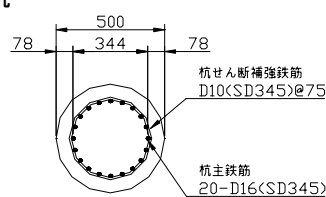


図-4 試験体配筋図

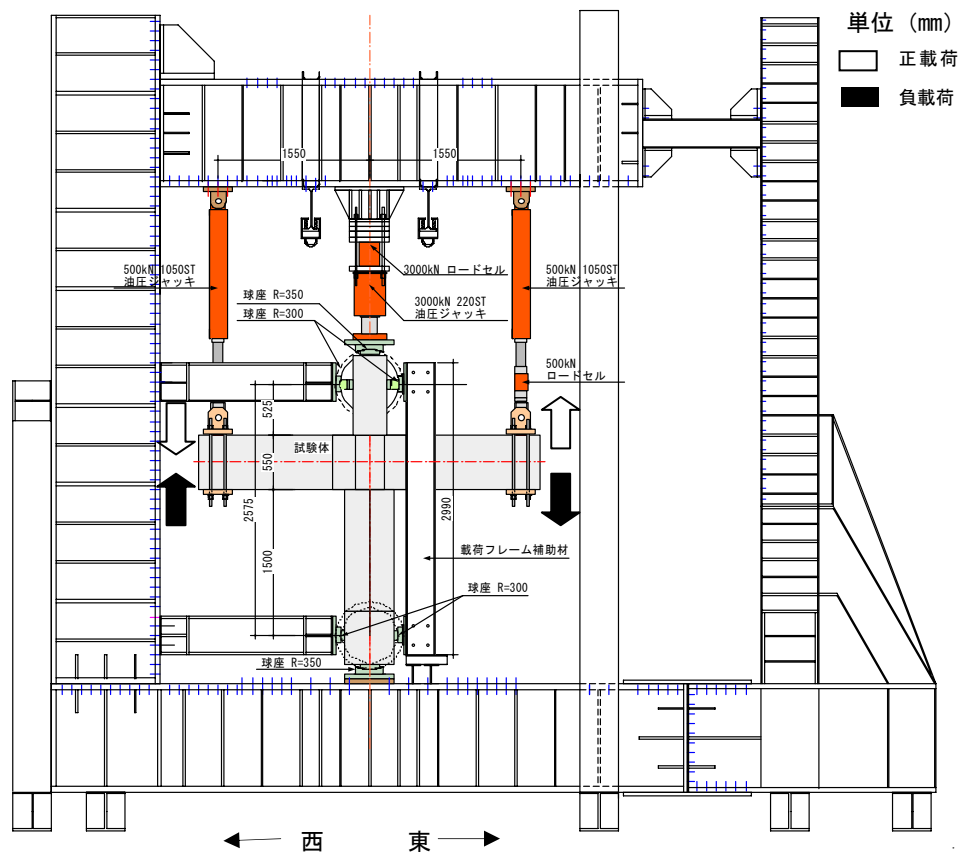


図-5 載荷装置概要

3.2 実験方法

(1) 載荷装置

図-5 に載荷装置概要を示す。図-5 に示すように、加力は地中梁両端で行い、その荷重の平均値から杭及び柱の水平荷重を算出した。西側のジャッキを押し、東側のジャッキを引く方向の載荷を、本実験における正載荷とする。軸力はコンクリートの設計基準強度 27 N/mm^2 の 10%, 2.7 N/mm^2 (530 kN) とし、一定載荷した。

本載荷装置は、地中梁両端の加力に対して、杭および柱の東あるいは西の側面で反力がとれるようになっている。なお、杭および柱における力の作用面は鉄板を埋込むことによって躯体を保護し、さらに球座によって回転を許容した仕様となっている。軸力を伝達する載荷面は柱の上面でとり、東西の両側面の球座と共通の中心と半径 (R300) をもつ球座を設け、地中梁上面から 525 mm の位置で柱に作用する曲げモーメントが 0 になるようにした。軸力の反力が作用する面は杭の下面でとり、東西の両側面の球座と共通の中心と半径 (R300) をもつ球座を設け、地中梁下面から 1500 mm の位置で杭に作用する曲げモーメントが 0 になるようにした。

(2) 載荷方法

図-6 に載荷サイクルを示す。載荷は、予備載荷、ひび割れ発生時、杭軸方向鉄筋許容応力時、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、

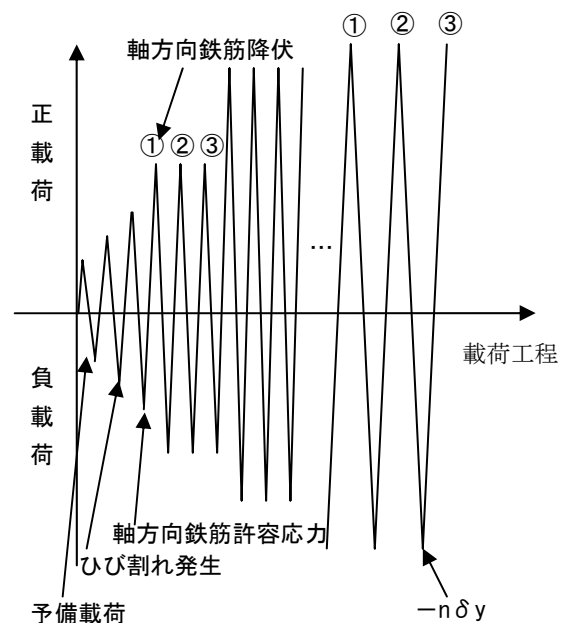


図-6 載荷サイクル

$\pm 3\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y \cdots \pm n\delta_y$ まで交番載荷を行うものとした。ここでの $1\delta_y$ は、杭最外縁の軸方向鉄筋降伏時の杭水平変位であり、それぞれ正負の変位を $+1\delta_y$ 、 $-1\delta_y$ とする。また、各載荷サイクルでの載荷は正負 3 回の交番載荷を行うものとした。なお、 $n\delta_y$ の杭基部曲げモーメントが、

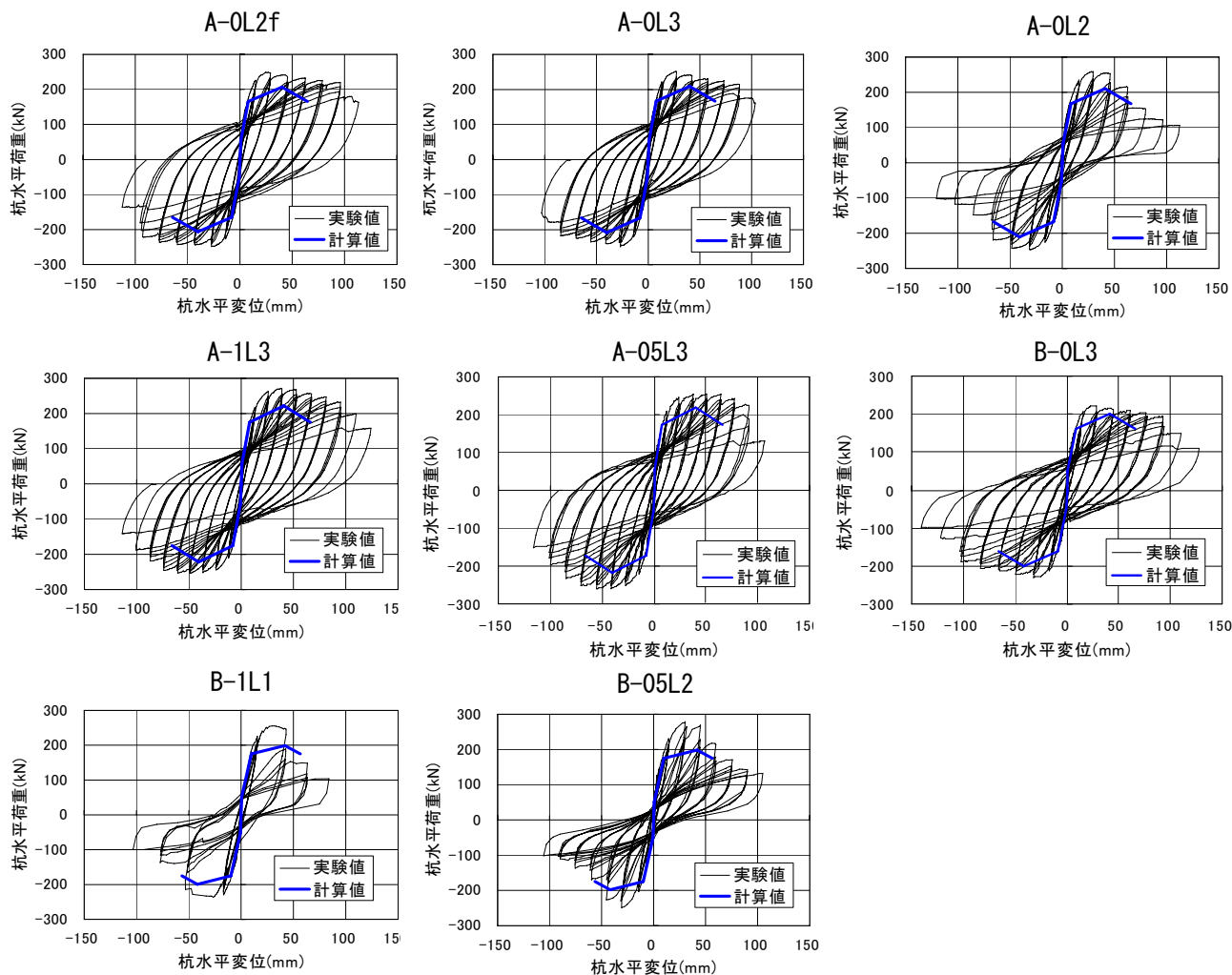


図-7 荷重－変位関係

降伏時杭基部曲げモーメントの 80%以下に低下した時点で実験を終了した。

4. 実験結果

4.1 破壊性状

破壊性状は、杭軸方向鉄筋の終局状態に着目すると、大きく 2 通りに分類される。1 つは杭軸方向鉄筋が座屈し、破断にまで至るケース、もう 1 つは杭の軸方向鉄筋が抜け出すケースである。前者は定着長が十分取れていたために生じた破壊形態であり、後者は定着長が不足していたために生じた破壊形態である。なお、実構造物では前者の破壊形態をとるように設計する。

(1) 杭軸方向鉄筋が座屈・破断にまで至るケース

A-0L2f, A-0L3, B-0L3, A-1L3, A-05L3 (以降、これを総称して Gr.1 とする。) は、基部に曲げひび割れが生じ、その後杭部材の軸方向鉄筋が降伏した。このとき、柱部、地中梁部の軸方向鉄筋は降伏していない。また、 $2\delta_y$ の途中で接合部に斜めひび割れが生じた。接合部下面には $1\delta_y$ の载荷中に杭の中心に向かって放射状にひび割

れが発生した。その後、 $2\delta_y$ もしくは $3\delta_y$ で最大荷重に達した後、荷重が低下し、柱及び梁の軸方向鉄筋のひずみは増加せず、杭部材の曲げ変形のみが大きくなっていった。変形の増加に伴ってかぶりコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋が座屈、破断して荷重が大きく低下し終局に至った。

(2) 杭軸方向鉄筋が抜け出すケース

A-0L2, B-1L1, B-05L2 (以降、これらを総称して Gr.2 とする。) は、 $2\delta_y$ で最大荷重に達した後、杭軸方向鉄筋の拔出量が大きくなり、急激に荷重が低下した。杭部材はかぶりコンクリートが剥落する程度で軸方向鉄筋が座屈することはなかった。ただし、B-05L2 は $2\delta_y$ で荷重が最大となった後も拔出量はそれほど急激には大きくならず、荷重もなだらかに低下した。

4.2 荷重－変位関係

各試験体について、実験より得られた荷重－変位関係と、鉄道標準⁴⁾に従って計算した骨格曲線を、図-7 に重ねて示す。従来の定着方法をとった基準試験体の A-0L2f

は、計算値と比較して十分な変形性能が得られ、骨格曲線が示す終局変位に相当する点（N 点）以降も荷重が最大荷重時（M 点）の約 80%である 200 (kN) 以上を保持している。A-0L3, B-0L3, A-1L3, A-05L3 も同様に、基準試験体とほぼ同等の部材耐力および変形性能が得られた。一方、A-0L2, B-1L1, B-05L2 は、杭軸方向鉄筋の拔出により耐力が低下し、基準試験体に比べ、耐力および変形性能が劣る結果となった。N 点以降は荷重が下がり、200 (kN) を保持できていない。以上から、以下のことがいえる。

- ①基準試験体および A-0L3 の試験結果から、軸方向鉄筋のフックは直筋 10Φに相当することが確認された。
- ②A-0L3 および B-0L3 の試験結果から、接合部の高さの相違が荷重－変位関係に影響を及ぼすことはない。
- ③A-1L3 と B-1L1 および A-05L3 と B-05L2 の試験結果から、2Φ程度の余長では基準試験体と同等の荷重－変位関係は得られない。

4.3 拔出量－荷重ステップ関係

杭基部断面における杭最外縁の軸方向鉄筋の拔出量を計測するために、次のような方法をとった。ワイヤーの先端を杭最外縁の軸方向鉄筋の杭基部断面の位置で取り付け、接合部中を貫通させ、接合部外で拔出変位計に取り付けた。なお、ワイヤーとコンクリートの付着を切るために、ワイヤーは金属製のシース管に通した。図-8 に、拔出変位計を取り付けた位置およびワイヤーの軌道を示す。図-9 に、拔出量（計測値）と荷重ステップの関係を示す。なお、データは図-8 で 7 と符番した鉄筋に関するものであり、各荷重ステップにおける正載荷時の第 1 周目の値を採用している。

Gr. 1 に属する試験体は互いにほぼ同等の拔出量を示しており、荷重ステップが 6, 7 においても拔出量は 5 mm 程度である。一方、Gr. 2 に属する試験体は、荷重ステップが 2～4 の間で拔出量が 5 mm を超過しており、Gr. 1 に属する試験体と Gr. 2 に属する試験体の拔出性状に有意な差が認められる。「4.1 破壊性状」における破壊形態の分類はこの図に基づいて行なわれている。

4.4 エネルギー吸収量－荷重ステップ関係

エネルギー吸収量と荷重ステップの関係を図-10 に示す。なお、データは各荷重ステップにおける正載荷時の第 1 周目の値を採用している。本図より、Gr. 1 に属する試験体は互いにほぼ同等のエネルギー吸収能をもつと言える。Gr. 2 に属する試験体は、荷重ステップ 7 においてエネルギー吸収量は高々 150 (kN・m) であるのに対し、Gr. 1 に属する試験体は、250 (kN・m) 以上である。以上より、Gr. 2 に属する試験体は明らかにエネルギー吸収能が劣っていることがわかる。

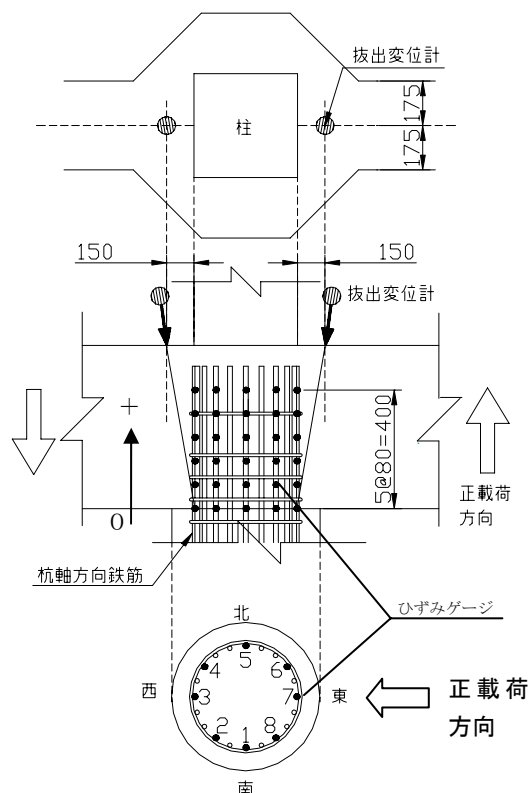


図-8 計測位置関係

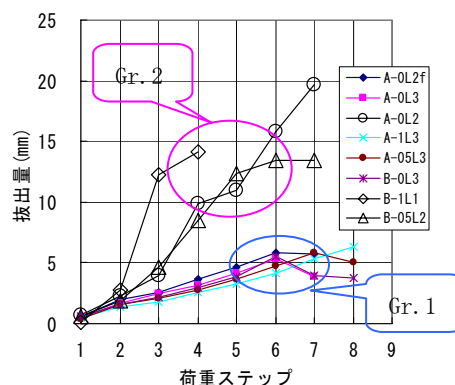


図-9 拔出量－荷重ステップ関係

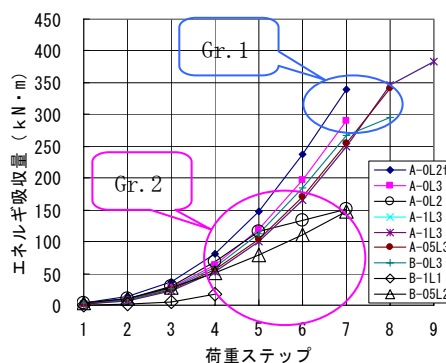


図-10 エネルギー吸収量－荷重ステップ関係

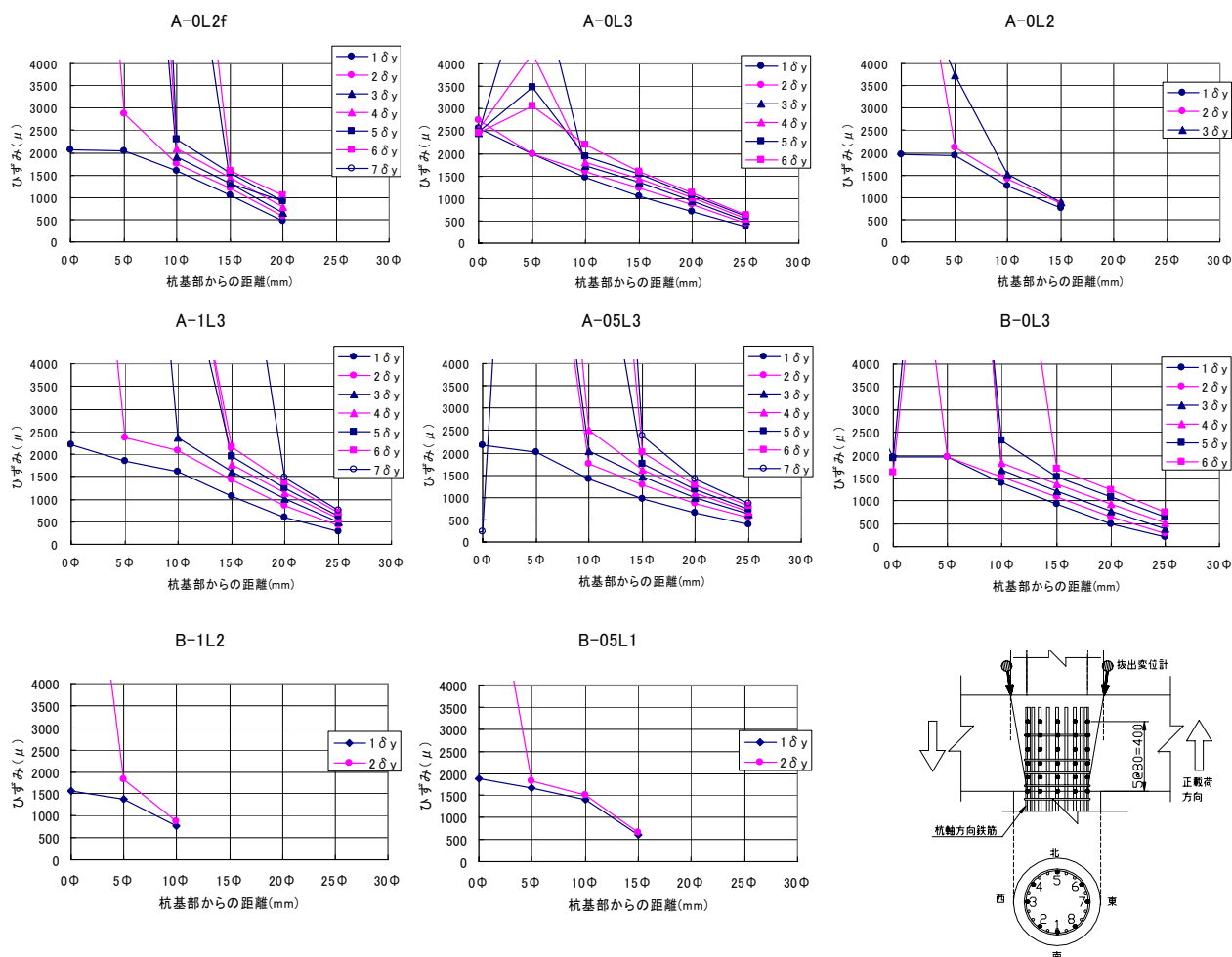


図-11 杭軸方向鉄筋のひずみ分布

4.5 杭軸方向鉄筋のひずみ分布

図-8 で 1~8 と番号した軸方向鉄筋に関してのみ 5Φピッチでひずみゲージを貼付し、接合部内における杭軸方向鉄筋のひずみ分布を計測した。図-8, 11 におけるひずみゲージ貼付図は、B-0L3 を例にとっている。端部がフック仕様となっている基準試験体を除き、端部にはひずみゲージを貼らなかつた。これは鉄筋端部がフック仕様となっていない限り、端部には反力がかからず、ひずみが 0 になるからである。各試験体の接合部内での杭軸方向鉄筋のひずみ分布と荷重ステップの関係を図-11 に示す。なお、各試験体のデータは図-8 で 7 と番号した鉄筋に関するものであり、各荷重ステップにおける正載荷時の第 1 周目の値を採用している。杭と接合部の境界面を原点とし、接合部の方向を正とした座標軸を設定する。ただし、ひずみゲージの破損により計測できなかった荷重ステップについてのデータは省略している。ひずみ分布の結果から、どの試験体も軸方向鉄筋の末端から杭基部に向かってひずみが徐々に増大しており、荷重ステップが進むに従い、塑性領域の範囲（以降「塑性長」と称す）が進展していく様子がわかる。

表-5 に、代表点（Y, M, N 点）における塑性長の実験値の一覧を示す。なお、表-5 に示す各点における荷重ステップは図-7 の計算値ではなく実験値から読み取った。また、実験から求められる各点の塑性長は、図-11 における各点のひずみ分布曲線と、鉄筋の降伏ひずみを示す直線（ $\epsilon = \epsilon_y$ ）との交点から求めた。

表-5 代表点における塑性長（実験値）一覧

試験体名	塑性長（Φ）			荷重ステップ		
	Y 点	M 点	N 点	Y 点	M 点	N 点
A-0L2f	2.5	8.6	11.5	1	2	5
A-0L3	4.2	4.4	11.1	1	2	6
A-0L2	0.0	5.4	*	1	2	*
A-1L3	1.9	11.9	19.7	1	3	8
A-05L3	3.4	9.7	16.6	1	3	7
B-0L3	0.0	5.0	14.8	1	2	6
B-1L1	0.0	4.9	*	1	2	*
B-05L2	0.0	4.8	*	1	2	*

*はひずみゲージ破損のため計測できなかった

5. 考察

鋼繊維補強した試験体の定着長に関する実験結果の検証を行う。実験結果から余長を定めるために、実験時に設定した定着長と提案する基本定着長（式〔2〕，〔3〕，〔6〕～〔8〕で算出）の差から求まる余長と M 点における塑性長の実験値を比較する（表-6）。M 点を選定した根拠は、M 点は試験体の最大耐力を示す点であることが挙げられる。

次に、余長を M 点における塑性長の実験値以上と定める根拠を、以下に示す。

設計定着長は式〔1〕に示すように、基本定着長と余長に分離される。基本定着長の物理的な意味は、軸方向鉄筋の降伏時に必要な鉄筋の長さであり、余長に関しては定着が有効とされない範囲である。すなわち、基本定着長は、鉄筋の定着長のうち弾性領域を占め、余長はそれ以外の領域である塑性領域を占める。したがって、M 点における塑性長の実験値より、余長を大きくとらない場合、同じ塑性長に達したときに必要な基本定着長を確保できず、検討している実験の試験体と同等の性能を確保できなくなってしまう。

表-6 定着長に関する実験設定値と計算値の比較

試験体名	実験設定時の定着長①	本報告で提案する基本定着長②	余長(*1)③	M 点の塑性長(*2)④
A-1L3	30Φ	16.5Φ	13.5Φ	11.9Φ
A-05L3		18.8Φ	11.2Φ	9.7Φ
B-1L1	15Φ	16.2Φ	-1.2Φ	4.9Φ
B-05L2	20Φ	17.9Φ	2.1Φ	4.8Φ

(*1)③=①-② (*2)実験から求める

各試験体について、以下考察を示す。

なお、本研究において、基準試験体と同等の性能を持つとは、変形性能とエネルギー吸収能が基準試験体と同等であるということと定義する。

(1) B-1L1, B-05L2 について

B-1L1, B-05L2 については、余長を約 0Φ として、基本定着長だけを設けた仕様となっているが、基準試験体と同等の性能はなかった。したがって、これらの試験体の実験結果から、設計時において余長は省略できないことがわかる。

(2) A-1L3, A-05L3 について

A-1L3, A-05L3 については、約 10Φ の余長に基本定着長を設けた仕様となっているが、本試験体は基準試験体と同等の性能を示した。したがって、設計時の余長は約 10Φ とれば十分である。なお、A-05L3 は A-1L3 に比し、

繊維混入率が 0.5% 小さい分だけ合理的な試験体である。

(3) まとめ

以上、(1)～(2)の考察より、基準試験体と同等の性能を示し、且つ、最も合理的な試験体は A-05L3 といえる。ここで、厳密には本試験体の余長は 11.2Φ である。しかし、表-6 に示すように実験から求まる M 点での塑性長が 9.7Φ であることや実験誤差等を考慮すると、余長を 10Φ とするのは妥当であると考えられる。よって、所定の要求性能を満足する合理的な定着構造の詳細仕様は、以下の通りである。

- ①提案式（鋼繊維を考慮した基本定着長算定式）に従って、軸方向鉄筋の帯鉄筋を鋼繊維補強コンクリートで置換する。
- ②余長は 10Φ とする。

6. 本技術の有用性

本技術を適用することによる有用性は次の 3 点が考えられる。

- ①作業効率の向上
- ②品質向上
- ③現場の利益率改善

近年の高耐震基準を満たし施工性の合理化の観点から杭軸方向鉄筋に D51 を使用した高い鉄道 RC ラーメン高架橋の事例、すなわち、杭頭鉄筋の定着長で地中梁高が決定される事例で、本技術の有用性を具体的に示す。なお、D51 にはフックを設けられないため、定着長を 10Φ 減じることができない。

図-12, 13 に従来技術を適用した場合と本工法を適用した場合の配筋を示す。また、接合部の詳細仕様を表-7 に示す。まず、従来技術を適用した場合の計算結果を示す。杭軸方向鉄筋の定着長は 1898(mm) であり、地中梁高は 2100(mm) となる。次に、本工法を適用した場合の計算結果を示す。杭軸方向鉄筋の定着長は 1394(mm) となり、地中梁高は 1600(mm) となる。

したがって、本事例に本工法を適用すると従来工法に比し地中梁高を約 500(mm) 低減することができることがわかった。さらに、鋼繊維補強によって杭の帯鉄筋が省略されるので、作業効率の向上、品質の向上（配筋の確実性、コンクリートの充填性の向上）が期待される（①、②）。最後に③について、従来技術によるコストに対する本技術によるコストの比を表-8 に示す。地中梁に本技術を適用した場合、鋼繊維の材料費がさらに計上されるが、地中梁と作業土工で合理化がなされ、全体で約 10% のコストの削減が可能となる。

表-7 従来技術と本技術のコスト比較

接合部仕様		従来 工法	本工法
コンクリート (地中梁部)	強度 (N/mm ²)	27.0	
杭軸方向 鉄筋	径φ (mm)	51.0	
	降伏強度 (N/mm ²)	390.0	
	かぶり (mm)	197.0	
	水平あき (mm)	140.8	
帯鉄筋	公称直径 (mm)	22.0	—
	配筋ピッチ S (mm)	200.0	—
補強鉄筋	径 (mm)	16.0	25.0
	配筋ピッチ S' (mm)	261.2	150.0
繊維	体積混入率 (%)	—	1.0
杭	径 (mm)	1200	

表-8 従来技術と本技術のコスト比較

作業種類	本技術／従来 技術コスト比
基礎工	1.00
地中梁	0.77
柱	1.00
梁・スラブ	1.00
作業土工（掘削，埋戻，残土処分）	0.69
全体コスト	0.91

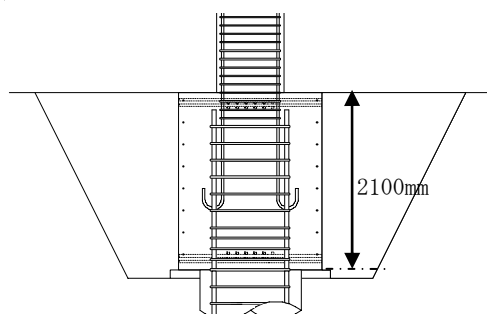


図-12 従来技術による配筋

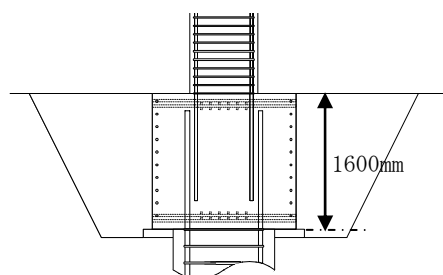


図-13 本技術による配筋

7. 結論

- (1) 荷重－変位関係における A-0L3 と A-05L3 の結果から、杭の横方向鉄筋は提案式に従って鋼繊維補強コンクリートに置換できることがわかった。
- (2) 荷重－変位関係における A-0L3 と B-0L3 の結果から、接合部高の影響はないと考えてもよいことがわかった。
- (3) 結論(2)と A-05L3 と B-05L2 に関する定着長に関する実験設定値と計算値の比較から、余長は、10Φ必要であることがわかった。
- (4) 杭等鉄筋の定着長で地中梁高が決定される鉄道 RC ラーメン高架橋に対して本技術を適用すると約 10% のコスト縮減が可能である。

謝辞：本研究は、（財）鉄道総合技術研究所との受託研究及び共同研究で進められた。尚、（財）鉄道総合技術研究所の前田友章氏、及び前田建設工業㈱建築グループの成瀬忠氏には貴重且つ丁寧なご意見を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 松林卓，竹内秀聡，原夏生，三島徹也：短繊維補強コンクリートによる鉄道 RC ラーメン高架橋部材接合部の配筋合理化に関する研究，前田建設技術研究所所報，Vol. 47，2006
- 2) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 「配筋の手引き」，pp. 87-88，2005
- 3) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎・杭土圧構造物，pp. 518-519，1997
- 4) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，pp. 142-149，1999
- 5) 山田尚義，近藤眞生，柏原茂，谷村幸裕：鋼繊維補強コンクリートを用いたラーメン高架橋部材接合部の軸方向鉄筋定着方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 3，pp. 853-858，2001