

論文 高性能コンクリートを用いた RC 構造物の鉄筋付着性状

岩城 圭介^{*1}・楨島 修^{*1}・田中 斉^{*2}・小澤 一雅^{*3}

要旨：高性能コンクリートと締固め方法を変化させた普通コンクリートを用いた実大鉄筋コンクリート構造物において、鉄筋引抜き試験と採取コアのコンクリートと鉄筋の界面の目視評価から、鉄筋付着性状の評価を行った。その結果、普通コンクリートでは、締固め方法により付着性状の変化が見られるのに対し、高性能コンクリートでは締固めなしで適切な付着性状が得られた。また、健全な鉄筋付着は、鉄筋引抜き時の適切な応力伝達によるひび割れの発生を反映するアコースティック・エミッション挙動と関連づけられた。

キーワード：高強度・高流動コンクリート、鉄筋付着、アコースティック・エミッション

1. はじめに

高流動コンクリートでは、施工の良否を決定付ける締固め作業を省略することにより、初期欠陥を排除し、コンクリート構造物の品質向上が期待できる¹⁾。近年では、高流動コンクリートによる品質の向上を積極的に活用する試みがなされており、高強度・高流動コンクリート(以下、高性能コンクリート)に関する研究もそのひとつといえる。例えば、高性能コンクリートの過酷な条件下での長期耐久性の評価²⁾や高性能コンクリート構造物の耐久性能に関する性能照査方法の提案³⁾などが行われている。

また、高流動コンクリートでは、ブリーディングの発生がなく、鉄筋付着の信頼性も向上すると期待される。例えば、高強度鉄筋と高性能コンクリートの付着特性に関する実験的検討⁴⁾では、優れた付着性状が確認されている。

しかし、高流動コンクリートの鉄筋周囲への

充てん性に関し、実施工レベルにおける十分な検討がなされているとはいえない。また、普通コンクリートにおいても、実施工における締固め作業の良否が付着性状に与える影響に関し、これまでに十分把握されているとはいえない。

そこで、本研究では、締固め条件の異なる普通コンクリートおよび高性能コンクリートを用いた実大規模の試験体において、鉄筋とコンクリートの付着性状を検討した。なお、付着性状は、鉄筋引抜き試験時におけるアコースティック・エミッション(以下、AE)および採取コアの切断面の目視観察により評価した。

2. 実験概要

2.1 試験水準および試験体

表 - 1 に試験配合を示す。高性能コンクリート(S)配合については、コンクリートポンプ投入口に取付けた自己充てん性全量試験装置¹⁾

表 - 1 試験配合

コンクリートの種別, 記号	フレッシュ性状の目標値			粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	単体量 (kg/m ³)					
	スランブ (cm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)			水	セメント	細骨材		粗骨材	混和剤
								砕砂	陸砂		
高性能 S	-	65.0	5.5	20	29.6	163	551	245	568	798	5.79
普通 N	12.0	-	4.5	20	57.5	166	289	431	431	982	2.89

使用材料：皆野町砕砂(密度2.63, 粗粒率2.81), 上里町陸砂(密度2.61, 粗粒率3.07), 皆野町産砕石(密度2.66, 粗粒率6.65)
S配合：低熱ポルトランドセメント(密度3.22), 高性能AE減水剤 N配合：普通ポルトランドセメント(密度3.16), AE減水剤標準型

*1 飛鳥建設(株)技術研究所 材料研究室 主任(正会員)

*2 飛鳥建設(株)技術研究所 技術推進プロジェクト 担当部長(正会員)

*3 東京大学大学院助教授 新領域創成科学研究科 工博(正会員)

表 - 2 打込み方法

項目	高性能コンクリート S	普通コンクリート	
		N1	N2
1層打込み高さ	連続打込み	40 ~ 50 cm	100 ~ 150 cm
締固め方法	締固めなし	高周波パイプレータ	
挿入間隔	-	50 cm	100 cm
挿入深さ	-	下層10 cm	下層50 cm
1箇所挿入時間	-	5 ~ 15 秒	20 ~ 30 秒
打上り速度	3.0 m/30 分	1.5 m/30 分	3.0 m/30 分
横移動	8.0 m横移動	横移動なし	横移動あり
筒先位置	1箇所	1.5 m間隔	4.0 m間隔

により、ワーカビリティを確認するとともに、表 - 2 に示すように締固めなしで図 - 1 に示す壁供試体に打込みを行った。また、普通コンクリート (N) 配合に関しては、表 - 2 の 2 水準の締固め方法 (N1, N2) により、図 - 1 の壁供試体に打込みを行った。なお、表 - 2 の横移動とは、壁試験体長手方向の移動であり、S においては、壁の端部から 8 m 横移動した。

試験体では、図 - 1 に示すように目視評価用と引抜き試験用の鉄筋を隣接して配置した。また、各試験体の鉄筋位置は、材料分離の影響を把握するために、高さを上、中、下段 (U, M, L) の 3 水準とし、高さごとに 3 本を配置した。鉄筋は、目視評価用で異形棒鋼 D25 (SD345)、引抜き試験用で高強度異形棒鋼 D25 (USD685⁴⁾) を用いた。評価対象としたすべての鉄筋のリブは、水平に配置した。なお、本論文では、試験のケースを、例えば N1-M (普通コンクリート、打込み方法 1、中段) と表示する。

2.2 鉄筋引抜き試験

(1) 試験方法

壁厚 400 mm のうち、背面から 150 mm を鉄筋定着部として、油圧ジャッキを用いて鉄筋引抜き試験を実施した。引抜き時には、油圧変換器により荷重を計測するとともに、鉄筋の自由端すべり量を計測した。

また、同時に行った AE 計測では、図 - 2 に示すように壁の両面に 400 mm 間隔で配置した 8 個の AE センサ (共振周波数 60 kHz) により AE を取得し、40 dB のプリアンプを介して MISTRAS AE 計測システム (PAC 社製) により AE パラメータと AE 波形を収録した。

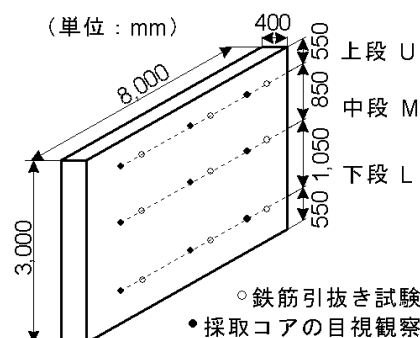


図 - 1 壁試験体概要

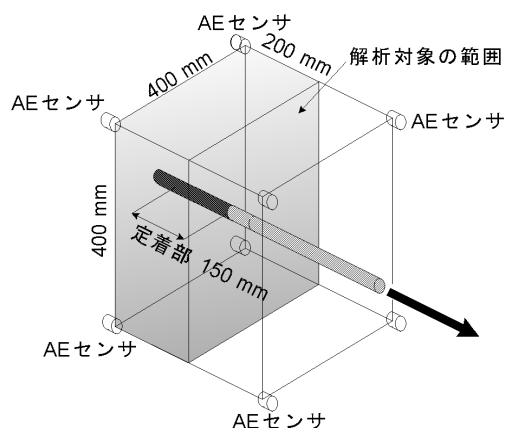


図 - 2 AE センサ配置と空間フィルタ

なお、試験材齢は 56 日であり、このときの各試験体のコア圧縮強度は、N1: 34.8 N/mm²、N2: 36.9 N/mm²、S: 85.0 N/mm²であった。

(2) AE 計測結果の解析手法

AE 計測結果の解析では、ジャッキ載荷面からの AE を除去するために、図 - 2 に示す空間フィルタを設置し、載荷背面から 200 mm の深さに発生した AE イベントを解析対象とした。

一方、鉄筋引抜き試験における荷重と鉄筋すべり量の関係では、N 配合で最大荷重以降に鉄筋のすべりが顕著であった。また、S 配合のほとんどのケースで鉄筋が降伏し、鉄筋降伏後、徐々に荷重を増し定常状態になった時点で鉄筋すべりが生じた。ここでは、鉄筋の大きな変位に起因する AE を除去するために、載荷開始から最大荷重時までの AE を解析対象とした。

以上の処理を行った AE 位置標定の一例を図 - 3 に示す。本研究では、AE 発生位置の定量的評価を行うために、鉄筋に対する AE 源の位置を水平線となす角度によって表した。角度は、図 - 4 に示すように区分した。

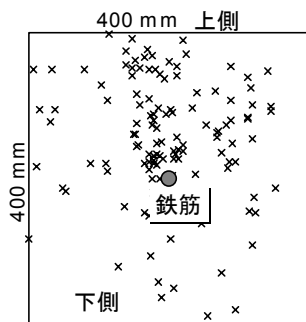


図 - 3 N1-L1 AE 位置標定

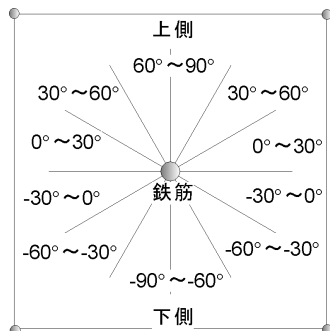


図 - 4 AE 源の角度区分



写真 - 1 採取コアの外観

2.3 目視観察による評価方法

壁試験体から採取した鉄筋を含むコア（写真 - 1）を両端部から約 100 mm の位置で切断し、1 本のコアにつき 2 切断面の目視評価を行った。

目視評価では、図 - 5（左）に示すように鉄筋とコンクリートの「付着切れ長さ L」（空隙に接する鉄筋の周長）と「空隙の幅 W」（鉄筋からコンクリートまでの距離）を測定した。

測定結果の整理では、「付着切れ長さ」と「付着切れ面積」を指標とした。ここで定義した「付着切れ面積」とは、鉄筋と接する空隙の面積であり、図 - 5（右）に示すように各々の空隙の「付着切れ長さ L」を底辺、「空隙の幅 W」を高さとして求めた三角形の面積の和である。また、前述の AE 発生位置の評価と同様に、角度（図 - 4）による「付着切れ長さ」、「付着切れ面積」の区分を行い、付着切れ位置を評価した。

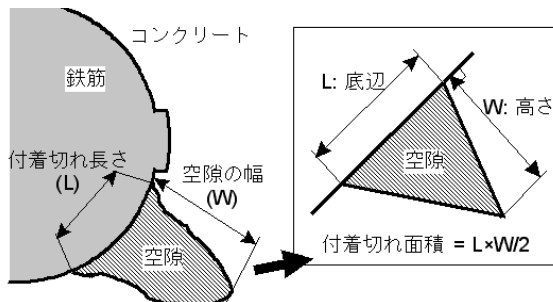


図 - 5 付着切れ測定結果の整理方法

表 - 3 鉄筋引抜き試験時の最大荷重

記号	最大荷重 (kN), 鉄筋の状態				
	1	2	3	平均	
N1	U	122 すべり	164 すべり	186 すべり	157
	M	199 すべり	167 すべり	232 すべり	199
	L	150 すべり	201 すべり	191 すべり	175
N2	U	201 すべり	199 すべり	208 すべり	203
	M	189 すべり	196 すべり	278 すべり	221
	L	217 すべり	208 すべり	214 すべり	213
S	U	389 降伏	387 降伏	415 降伏	397
	M	376 すべり	378 降伏	381 降伏	378
	L	384 降伏	393 降伏	383 降伏	387

ない傾向がみられた。この傾向は、N1 の中でも N1-L が最も顕著であった。

N2 の AE 源の角度に関しても、鉄筋下部で AE 発生数が少ない傾向がみられたが、N1 ほど極端でなく、緩やかな傾向であった。また、N2-U では、 $-30 \sim 0^\circ$ の鉄筋の斜め下方向が相対的に少ない傾向であった。

S の AE 計測結果は、N1、N2 に比べて AE 発生数が多く、角度区分においても比較的一様であった。高さによる影響に関しては、S-U で鉄筋下部の AE 発生が少ない傾向が見られ、S-L で鉄筋横 ($-30 \sim 30^\circ$) の AE 発生が少ない傾向であった。これに対し S-M では、全方向でほぼ一様の AE 発生がみられた。

3. 実験結果および考察

3.1 鉄筋引抜き試験

(1) 引抜き試験の最大荷重

各ケースの最大荷重を表 - 3 に示す。N1 では、N2 に比べて最大荷重が低く、ばらつきが大きい結果であった。S では、ほとんどのケースで鉄筋が降伏し、N に比べて優れた付着強度を有することが示された。

(2) AE 計測結果

各ケースの AE 源位置情報として、区分した角度に対する平均 AE 発生数を図 - 6 に示す。

N1 では、正の角度で示される鉄筋上部に比べて負の値で示される下部鉄筋で AE 発生数が少

(3) 鉄筋引き抜き試験の考察

異形鉄筋の付着破壊は、a) 鉄筋の突起による局部圧縮、b) 突起の頂点を結ぶ面のせん断破壊、c) 鉄筋移動により突起がコンクリートを押し広げて生じる円周方向引張りに分類される⁵⁾。

鉄筋引き抜き試験における AE 解析では、鉄筋の大きな変位を生じた時間帯を除外したため、c) の引張による破壊を考えにくく、a), b) のような鉄筋突起の周辺の破壊が想定できる。

一方、締固め作業の不具合や材料分離などの要因により、付着の不十分な部分が存在する場合には、鉄筋の突起による機械的な作用が不足すると考えられる。特に、鉄筋周辺に付着の偏りを生じた場合には、付着部の応力伝達が卓越し、ひび割れの進展、すなわち AE 発生の方に偏りが生じると考えられる。

鉄筋上部に比べて鉄筋下部での AE 発生が極端に少ない N1 全般では、鉄筋下部での付着が十分でなく応力伝達が十分に行われなかった可能性がある。また、鉄筋の斜め下や横で相対的に AE 発生が少ない N2-U, S-L でも、鉄筋リブや空隙の影響により、局所的に応力伝達が不足した可能性がある。逆に、鉄筋周囲で偏りのない AE 発生を示した S-M や顕著な AE 発生の前がなかった N2-M, N2-L, S-U では、健全な応力伝達が行われたと考えられる。

3.2 目視観察による評価

(1) 目視観察結果

各ケースの鉄筋全周における付着切れ長さ、面積を図-7に示す。N1では、N2やSに比べて大きい付着切れを示した。鉄筋配置の上下差に関しては、N1, N2で、壁の上方に配置したものほど、また、Sで、壁の下方に配置したものほど、付着切れが大きい傾向であった。

各ケースにおける角度で区分した付着切れ長さを図-8に、付着切れ面積を図-9に示す。

付着切れ長さは、全般的に-90~0°の鉄筋下面の範囲で大きい値を示し、特に、N1-Uでは、-90~-30°で平均7mm程度の値であり、対象とする鉄筋周囲の1/6の長さ(約13mm)の50%

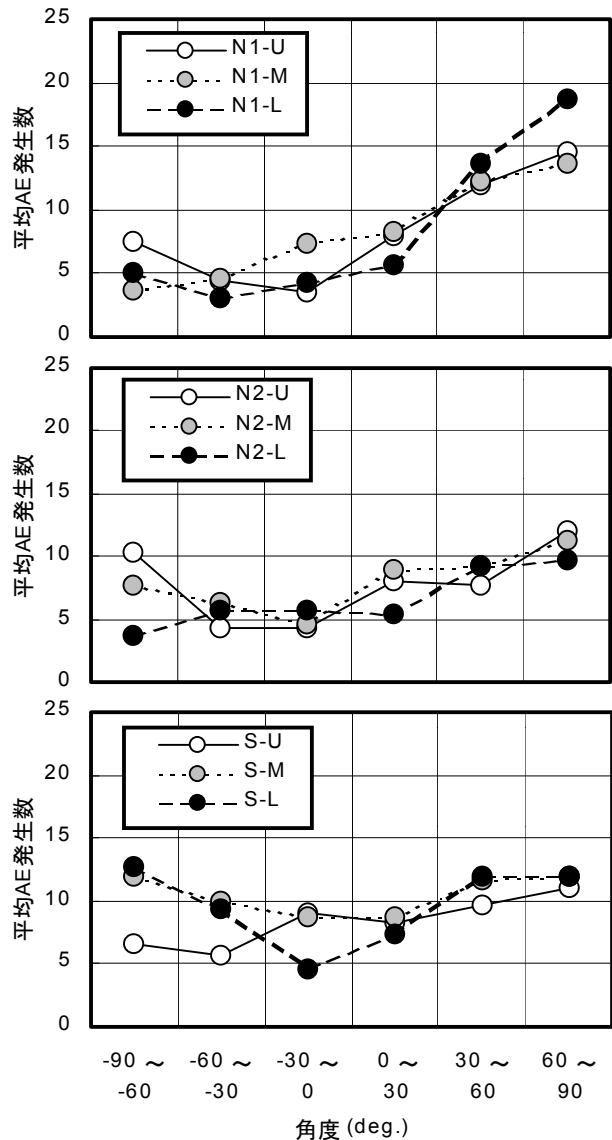


図-6 AE源の角度区分

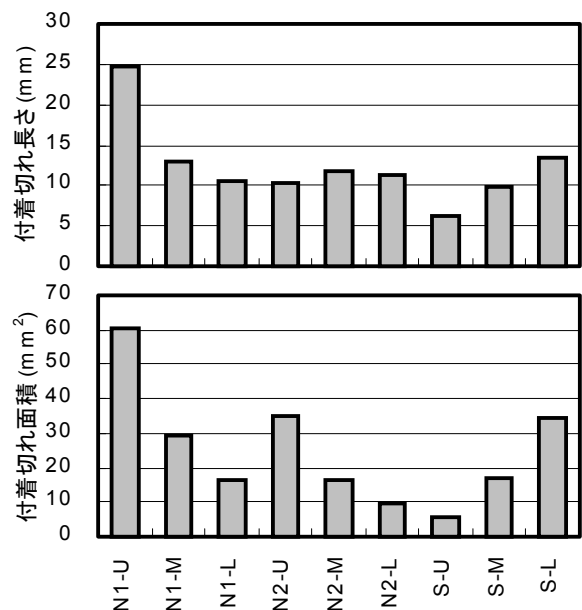


図-7 各ケースの付着切れ長さ、面積

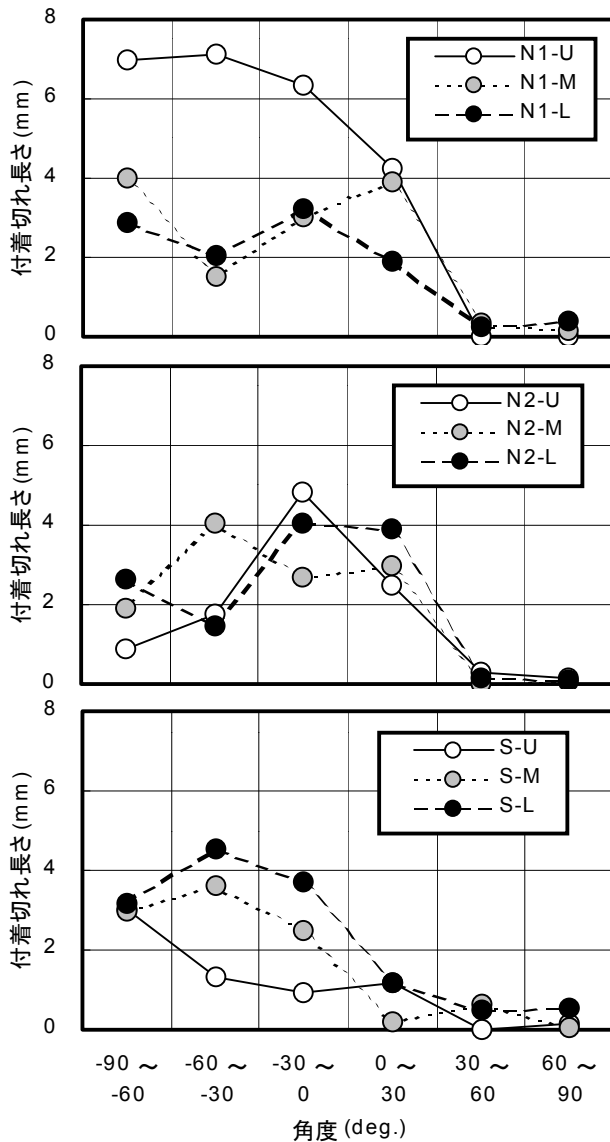


図 - 8 付着切れ長さの角度区分

を越える付着切れを生じた。付着切れ面積は、 $-30 \sim 30^\circ$ の鉄筋側面で大きい値を示すケースがみられた。特に、N1-U, N2-U では、 $-30 \sim 0^\circ$ で 20 mm^2 程度の値を示し、平均的に相当大きな空隙が鉄筋側面に接していることを示す結果であった。

(2) 目視観察の考察

N2 では、積極的にコンクリートの横移動を行うとともに N1 に比べて大きいパイプ挿入間隔で締めを行ったが、付着切れが比較的少ない結果であった。この要因としては、N1 の上部 (N1-U) の鉄筋下面で付着切れが極端に大きいことから、ブリーディングの影響が推定される。すなわち、N1 における締め方法が過

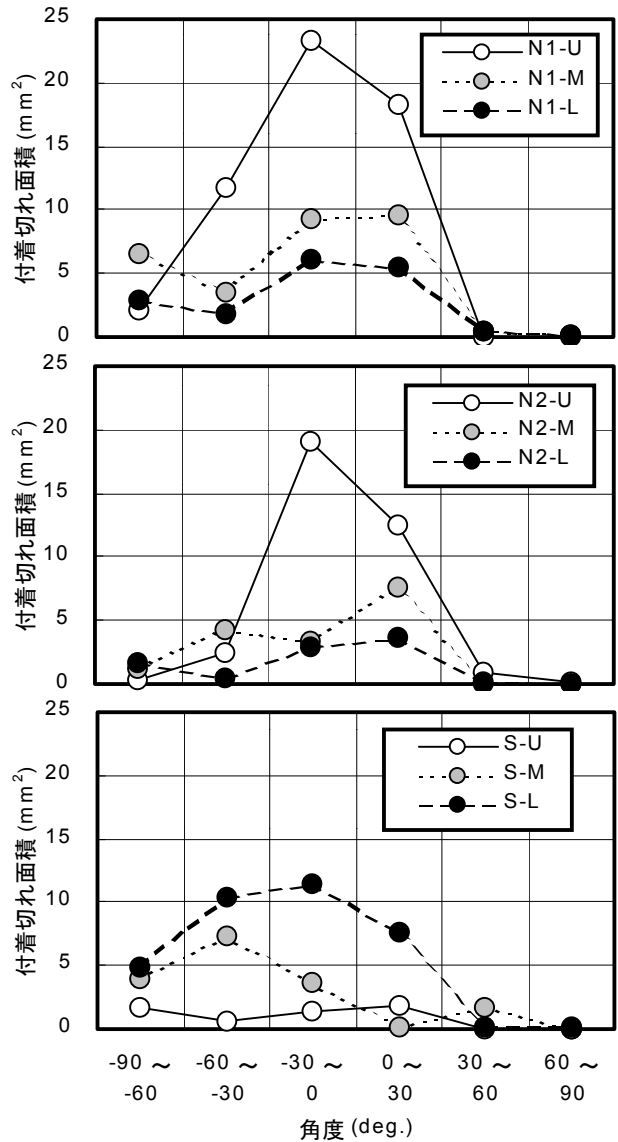


図 - 9 付着切れ面積の角度区分

度であり、材料分離が顕著であったと考えられる。また、鉄筋側面でみられた比較的大きな寸法の付着切れは、ジャンカやコールドジョイントのようであり、鉄筋がコンクリートの横移動を妨げたことも要因のひとつと考えられる。

一方、S では、N1, N2 とは逆に上部ほど付着切れが小さい傾向であり、高性能コンクリートの材料分離に対する抵抗性が示される結果であった。また、S の付着切れは、比較的気泡を多く含む結果であり、粘性の高いフレッシュ性状に起因すると考えられる。

以上の結果から、普通コンクリート (N) では、締め方法の影響により付着切れに違いを生じることが示された。今回の条件では、N1

に比べて N2 の締固め方法が適切であったと考えられる。また、締固めなしで打込みを行った高性能コンクリートでは、普通コンクリートを適切な締固め方法により打ち込んだ場合と同程度以上に付着切れを制御することが可能であることが示された。

3.3 各評価の関係と考察

鉄筋引抜き試験における AE 計測結果から、鉄筋上部での AE 発生が顕著であった N1 における応力伝達の偏りを推定した。また、N2-U では、鉄筋側面の問題を指摘した。さらに、N2-M、N2-L、S-U、S-M における健全な応力伝達を推定した。一方、鉄筋埋込みコア切断面の目視観察では、N1 および N2-U の鉄筋側面で比較的大きな付着切れが確認された。この結果は、AE 計測結果とほぼ符合するものであった。

各ケースの角度区分における付着切れ長さと平均 AE 発生数の関係を図 - 10 に示す。鉄筋引抜き試験と目視観察が同一供試体で行われなかったため寄与率が低いですが、付着切れが大きいほど AE 発生数が少ない傾向が認められた。

以上の結果から、鉄筋周囲における付着切れ分布の偏りは、鉄筋からコンクリートへの応力伝達に影響を与えることが示された。

4. まとめ

締固め条件の異なる普通コンクリートおよび高性能コンクリートの実施工レベルにおける鉄筋とコンクリートの付着性状を検討した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 普通コンクリートでは、締固め方法により、付着性状の差を生じることが示された。
- 2) 高性能（高流動）コンクリートでは、締固めなしで、普通コンクリートにおける適切な締固めを行った場合と同程度以上の付着性状を確保できることが示された。
- 3) 鉄筋周囲の付着切れの偏りは、鉄筋引抜き時の AE 挙動と関連づけられる鉄筋からコンクリートへの応力伝達に影響することが示された。

鉄筋周囲の空隙は、鉄筋腐食を誘発すること

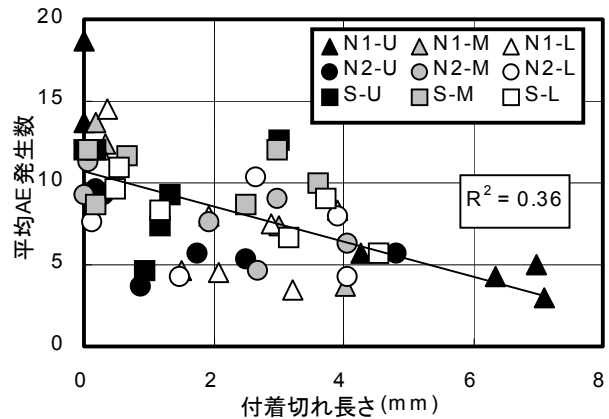


図 - 10 角度区分ごとの付着切れと AE の関係

が指摘されている⁶⁾。力学的効果の確保のみならず、コンクリート構造物の耐久性向上の観点からも、高性能コンクリートの適用などによる鉄筋の付着性状の改善が望まれる。

なお、本研究は、文部科学省革新的技術開発研究推進費補助金（研究課題「高性能コンクリートを用いた次世代建設システムに関する研究」研究代表者：東京大学助教授小澤一雅）を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9
- 2) Makishima, O. et al.: Evaluation of mechanical properties and durability of super quality concrete, Proceedings of second international symposium on self-compacting concrete, pp.475-482, Oct. 2001.
- 3) 土木学会: 自己充てん型高強度高耐久コンクリート構造物設計・指針(案), コンクリートライブラリー105, 2001.6
- 4) 山本晴人, 伊藤 始, 三島徹也, 島 弘: 高強度材料を用いた RC 部材の鉄筋付着性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1249-1254, 2000.6
- 5) 岡田 清: 鉄筋コンクリート工学, 朝倉書店, pp.136-142, 1972.
- 6) 濱田秀則, T. U. Mohammed, 山路 徹, 渡邊弘子: 海洋環境下におけるコンクリートの長期耐久性, コンクリート工学, Vol.39, No.10, pp.17-24, 2001.10