

論文

[2020] 鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響

正会員○佐々木淳（間組）

正会員 丸山久一（長岡技術科学大学建設系）

正会員 清水敬二（長岡技術科学大学建設系）

学生員 米田直也（長岡科学技術科学大学大学院）

1. はじめに

塩害によるRC構造物の損傷が顕在化して以来、発錆メカニズム的な事から補修工法に至るまで広範囲にわたり研究がなされている。耐荷性状に関するこれまでの研究で、内部鉄筋の腐食量と表面ひび割れ幅の関係、^[1,2]表面ひび割れ幅と曲げ耐力の低下との関係^[3]は、ある程度明らかにされてきているが、耐力の低下メカニズム、特に鉄筋腐食やひび割れ幅の拡大による鉄筋とコンクリートとの付着性状の変化については、あまり解明されていない。

そこで、本研究では、鉄筋の発錆、ひび割れの発展による鉄筋とコンクリートとの付着劣化機構を解明する事を目的とした。通常の鉄筋コンクリートにおける鉄筋とコンクリートとの付着機構を扱った研究は、これまでに数多くあり^[4,5]、ほぼ確立されていると思われるが、本研究で対象としているものは次の点でこれまでの機構と異なっている。

①鉄筋の腐食膨張によるプレストレス効果②錆による噛み合い効果③腐食による鉄筋ふしの欠損④ひび割れ幅の拡大に伴う支圧面積欠如とコンクリートの拘束度合の低減

2. 実験 1：引き抜け耐力

2. 1 使用材料及び供試体

コンクリートの示方配合を表-1に示す。骨材は、細骨材として川砂（比重2.55）を、粗骨材として川砂利（比重2.60、最大寸法15mm）を使用した。混和剤には良質のAE減水剤ボゾリスNo.70を用いた。また、コンクリート中に鉄筋腐食作用の促進のため、練り混ぜ水として海水相当（NaCl 3.13%水溶液）の食塩水を用いた。供試体の形状は図-1に示すとおりであり、かぶりは5cmとし、内部鉄筋は付着長を中央5cmとし、その両端には5cmずつの非付着区間を設けた。非付着区間はグリースを塗布したゴムチューブを用い、鉄筋とコンクリートとの付着を断った。付着区間においては、ふしの配置と数に十分配慮し、ふし数は5個に統一した。

表-1 示方配合表

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単体量 (kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
63	43	165	260	793	1053	0.650
設計強度		210kg/cm ²		目標スランプ		8±2.5cm
配合強度		280kg/cm ²		目標空気量		4±1%

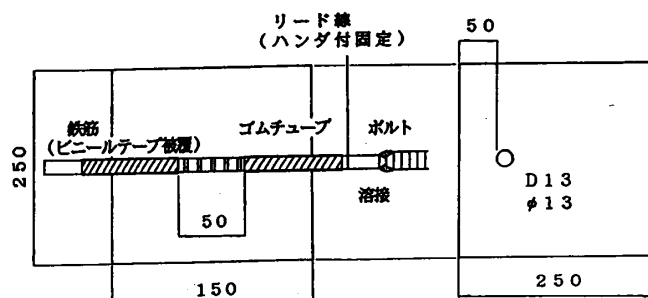


図-1 供試体形状

実験1では、縦ひび割れの影響と腐食した鉄筋表面形状の影響を異形鉄筋と丸鋼において比較検討するものである。その試験パラメータの一覧表とコンクリートの圧縮強度、最大付着応力及び初期付着応力の試験結果を表-2に示す。供試体は、鉄筋の腐食膨張によって生ずる縦ひび割れ幅 ($W_{e,i}$) を基本パラメーター (Q1~Q8) とし、他に、腐食した鉄筋を用いてコンクリートを打設した供試体 (Q9~Q13) も作成した。後者は縦ひび割れが生じておらず、錆による付着性状の影響を調べるものである。鉄筋の腐食を促進させる方法としては電食試験^[1]を用い、ひび割れ幅の評価はコンクリート歪ゲージとクラックスケールの併用により行った。

表-2 供試体パラメータと試験結果

供試体	$W_{e,i}$ (mm)	腐食量** (mg/cm ²)	使用鉄筋	腐食膨張の有無	f_c' (kgf/cm ²)	最大付着応力 (MPa)	初期付着応力 (MPa)
Q1	0.00	0.0	D13	無	275	6.900	0.450
Q2	0.03	3.4	D13	有	356	7.450	0.550
Q3	0.30	34.3	D13	有	301	6.400	1.000
Q4	0.50	57.2	D13	有	280	4.900	1.817
Q5	1.00	114.7	D13	有	305	1.450	0.745
Q6	0.00	0.0	φ13	無	240	2.000	1.167
Q7	0.30	34.3	φ13	有	230	5.683	3.117
Q8	0.50	57.2	φ13	有	254	2.640	0.693
Q9	0.00	Q2と同等	Q2鉄筋	無	213	19.268	4.302
Q10	0.00	Q3と同等	Q3鉄筋	無	297	11.409	4.871
Q11	0.00	Q4と同等	Q4鉄筋	無	277	6.587	1.917
Q12	0.00	Q7と同等	Q7鉄筋	無	230	8.368	1.010
Q13	0.00	Q8と同等	Q8鉄筋	無	264	11.101	7.475

* ;腐食膨張によって生ずる初期縦ひび割れ幅

** ;既往の研究より、積算電流量より換算した鉄筋の腐食量

注) 表中の初期付着応力は、すべり量0.025mm時におけるものである。

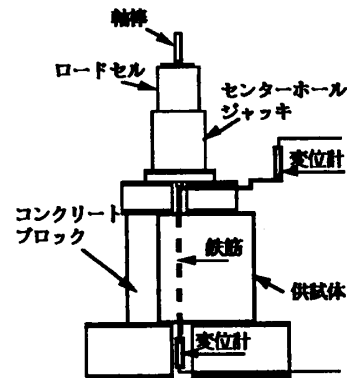


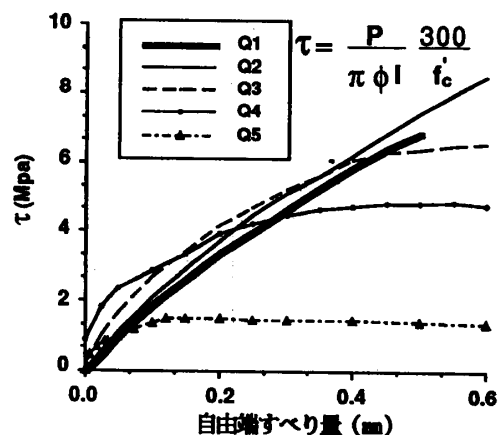
図-2 試験装置概要図

2. 2 試験方法

付着強度試験としては引き抜き試験法を採用した。その試験装置を図-2に示す。本試験では図に示す様に通常の引き抜き試験方法に準じた。载荷には20t用油圧ジャッキを用い、载荷速度は500kgf/cm²以下を目標に一定速度で行った。データの測定は初期剛性の高い供試体においては滑り出し荷重を測定するために自由端側にすべりが発生するまで0.1tピッチで、発生してからは自由端すべり量0.02mmピッチを目安に鉄筋自由端すべり量とそれに対応する荷重を読み取った。試験は自由端側すべり量が0~0.5mmの範囲を対象として行った。また、試験結果における最大付着応力も、この範囲について考察したものであるため、Q5~Q8の供試体を除いては、全て自由端すべり量が0.5mmの時のものである。

2. 3 試験結果

図-3(a)~(d)は全供試体の付着応力~すべり量曲線をシリーズ毎に示したものである。これを

図-3(a) 鉄筋の腐食およびひび割れ
(異形鉄筋)

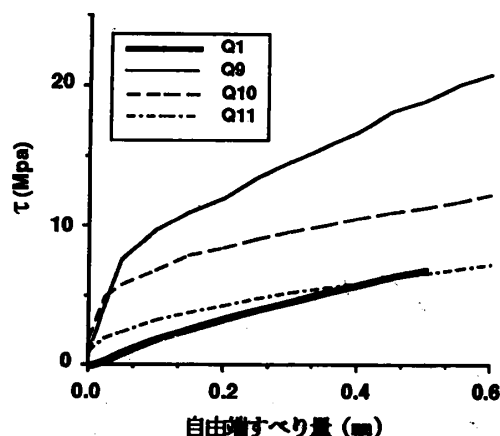


図-3(b) 腐食鉄筋の使用（異形鉄筋）

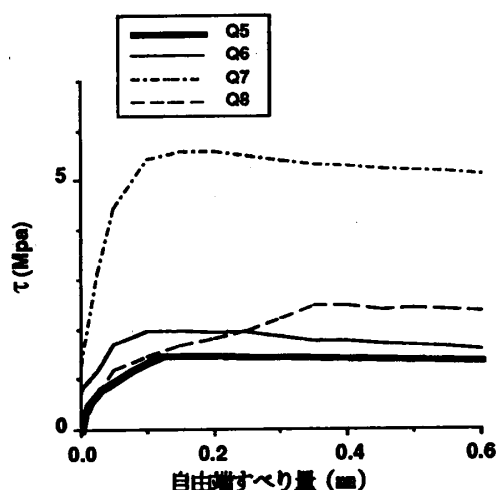


図-3(c) 鉄筋の腐食およびひび割れ（丸鋼）

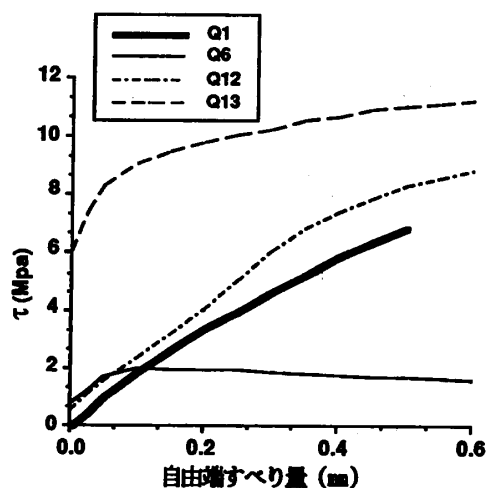


図-3(d) 腐食鉄筋の使用（丸鋼）

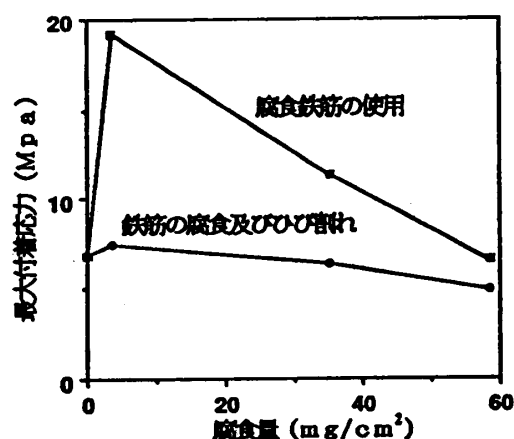


図-4(a) 腐食量と最大耐力（異形鉄筋）

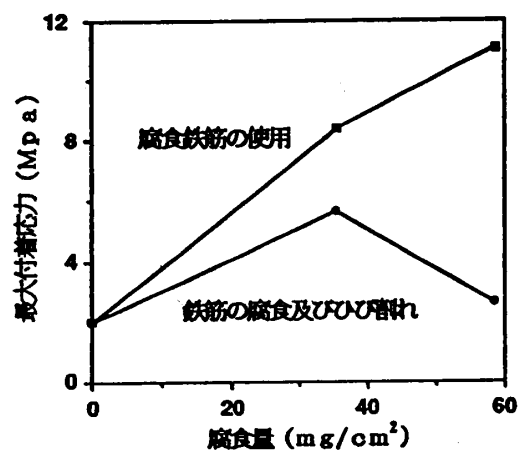


図-4(b) 腐食量と最大耐力（丸鋼）

基に、鉄筋腐食量と最大付着応力の関係を示したのが図-4(a)～(b)である。図-3と図-4より、腐食した鉄筋を新たにコンクリート中に埋め込んだ供試体（Q9～Q13）の方が異形鉄筋でも丸鋼でも初期剛性や最大耐力が大きくなっている。鉄筋の腐食が付着性状に及ぼす影響として、付着抵抗を増すものとして、①錆による噛み合い効果②腐食膨張によるプレストレス効果が考えられ、逆に付着劣化を生じるものとして③縦ひび割れの発生によるコンクリートの拘束力の低下、④異形鉄筋では腐食による「ふし」の欠損、等が考えられる。この中で②と③を除いたものとしての「腐食鉄筋の使用」（Q9～Q13）を考えると、丸

鋼では図-4(b)に示すように、この範囲の腐食量では、腐食量が無いほど噛み合い効果が増加し、付着抵抗が増している。

一方、異形鉄筋では「ふし」の欠損による影響が腐食量の増加とともに大きくなり、腐食量が 40 mg/cm^2 以上になると丸鋼と同じような付着抵抗になる。

①～④の影響が同時に存在する場合（「鉄筋の腐食及びひび割れ」；Q1～Q8）、異形鉄筋では図4-(a)で示されるように、相互の影響が相殺されているように見える。一方、丸鋼では（図4-(b)）、錆による噛み合い効果が若干優っているようである。ただし、異形鉄筋の場合、図-4(a)に示す様に、あまり腐食量が大きいと、この噛み合い効果が小さくなり、ふし部の欠損の影響が大きくなり耐力低下をもたらす。一方、丸鋼では、ひび割れがなければ、錆による噛み合い効果で付着抵抗の増加が考えられ、図-4(b)に示すように、この範囲において錆の量が多い程、付着力が増している。

初期剛性については、自由端すべり量が 0.025 mm 時の付着応力で評価する事とし、その結果を図-5に示す。Q1～Q5では、腐食量の増加による縦ひび割れ幅が 0.5 mm まで、Q6～Q8では 0.3 mm まで初期剛性は増加傾向を示している。ひび割れ幅が多少大きくても、初期剛性には錆による噛み合い効果が現れていると考えられる。

3. 実験 2：ひび割れ幅の変化

実験1では、主として引き抜け耐力に着目し、その耐力低下要因が、ふし部の欠損を含めた支圧面積の欠如とコンクリートの拘束効果の低減であると判断した。そして、その低下度合を初期ひび割れ幅で判定しようとしたが、引き抜き試験中でのひび割れ幅の変化について充分把握していなかった。そこで、それをより詳細に調べ、コンクリートの拘束効果の変化を調べようとしたのが本実験である。供試体及び材料・試験パラメータは実験1と全く同様とした。試験装置は図-6に示すように、実験1とは若干異なり、反力面で摩擦による拘束を減ずるため、反力板と供試体面に間にグリースを塗布したテフロンを挿入した。また、ひび割れ幅の変化を測定するために、付着区間に 4 cm 間隔で2組のコンタクトチップを貼付けた。その付着応力～すべり量曲線と、それに対応するひび割れ幅の変動状況を図-7に示す。これらの図より、いずれの供試体においても最大耐力に至るまでは、初期ひび割れ幅は殆ど増加傾向を示さず、最大耐力に達した後に急激にひ

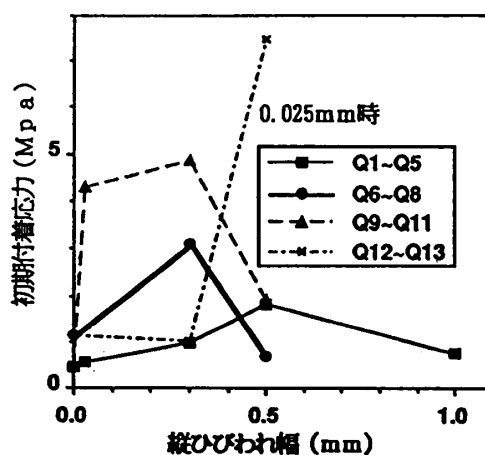


図-5 縦ひび割れ幅と初期剛性

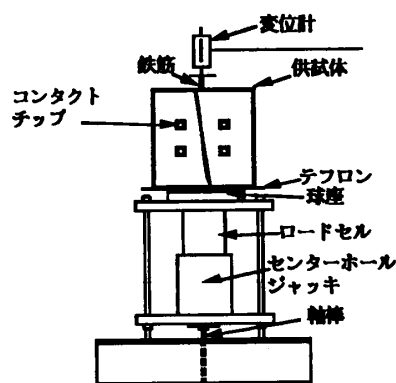


図-6 試験装置概要図

表-3 試験結果

縦ひび割れ幅 (mm)	割線係数 (MPa/mm)		最大付着応力 (MPa)		最大付着応力時 すべり量(mm)	
		比		比		比
0.03	18.710	1.000	16.500	1.000	0.713	1.000
0.30	16.989	0.908	6.571	0.398	0.433	0.607
0.50	15.032	0.803	5.000	0.303	0.339	0.475
1.00	5.269	0.282	1.427	0.086	0.124	0.174

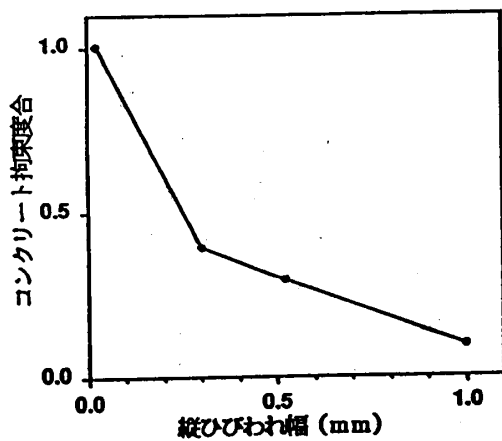


図-8 コンクリートの拘束度合

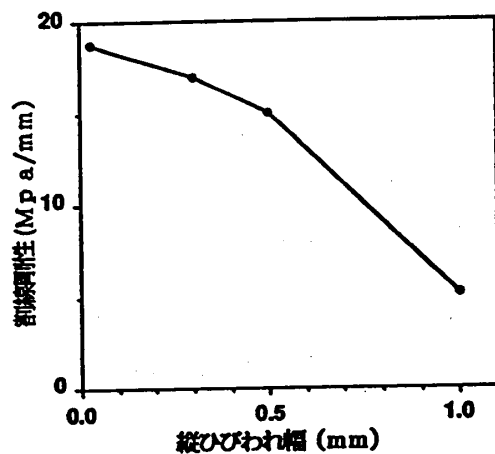


図-9 縦ひび割れ幅と割線剛性

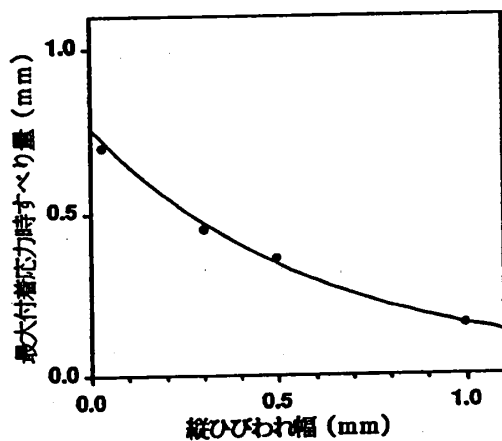


図-10 最大耐荷時すべり量

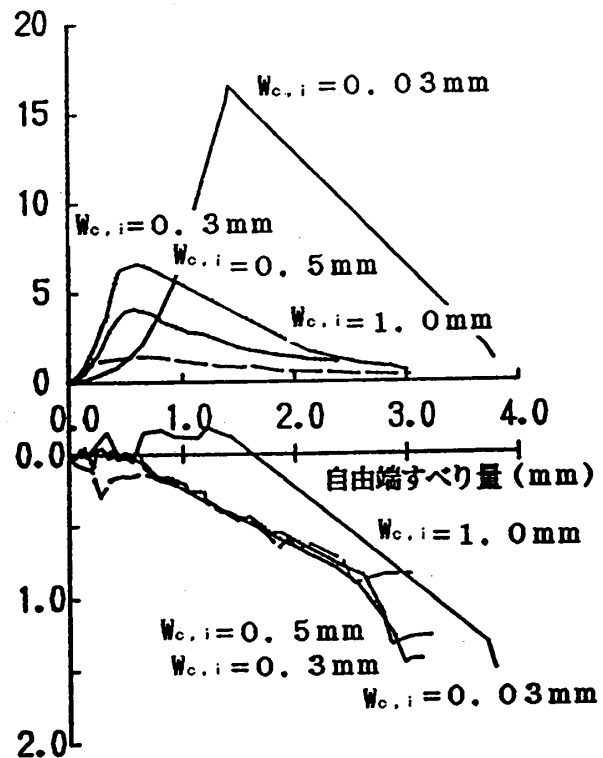


図-7 付着応力～すべり量曲線およびひび割れ幅変動量曲線

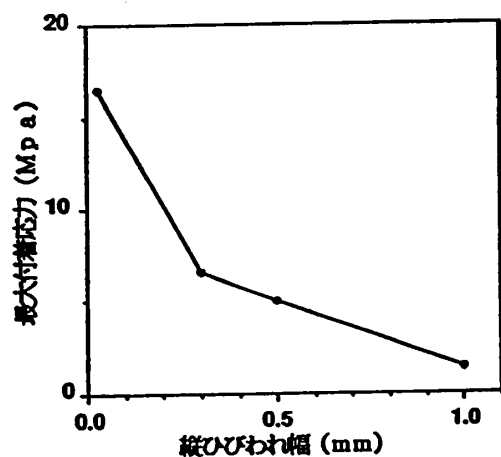


図-11 縦ひび割れ幅と最大付着応力

ひび割れ幅が大きくなっている。これより本供試体の付着耐荷機構の喪失は、ふし前面のコンクリートの部分的な圧壊や割裂によるものではなく、ひび割れ幅の拡大により、コンクリートが拘束力を失った事によるものと考えられる。そこで、初期ひび割れ幅が増加し始める荷重（最大耐力）

を、コンクリートの拘束効果を表す指標として、初期ひび割れ幅が 0.03mm のケースを仮に基準にとり表すと、図-8のようになる。これより、腐食膨張によりコンクリートにひび割れが入ると、コンクリートの拘束度合は急激に低下するのが分かる。初期ひび割れ幅が 0.3mm の供試体で約4割、 1.0mm に達したものと1割以下となっている。更に、鉄筋の腐食膨張による初期縦ひび割れ幅と初期付着剛性 ($0.15\tau_{max} \sim 0.8\tau_{max}$ の割線剛性)、最大耐力、最大耐力時すべり量との関係を図-9～11に示す。実験1での結果と同様で、縦ひび割れ幅が 0.3mm 以下であると初期剛性はあまり低下していないが、最大耐力は上記のコンクリートの拘束度合で示されるように、縦ひび割れ幅が 0.3mm では急激に低下している。このことは、初期ひび割れ幅がある程度小さければ、ひび割れ幅によるコンクリートの拘束の低下は、初期剛性にあまり影響しないことを示している。また、図-11の最大耐力時すべり量を見ても解るように、初期ひび割れ幅が大きいと、最大耐力までのすべり量も小さく、すぐにひびわれが開いて付着抵抗力を失うことが読み取れる。

4. まとめ

本研究では、比較的短期間に鉄筋が腐食する場合の挙動をあつかっている。その中で、本研究の範囲で言える事をまとめると次のようになる。

- ①初期付着剛性には、鉄筋の錆による噛み合い効果が大きく、鉄筋の腐食膨張によるコンクリートのひび割れ幅がある限度以内であれば、初期剛性は大きくなる。
- ②コンクリートにひび割れが発生しなければ、鉄筋腐食による錆は、ある限度以内であれば最大付着耐力を増加させる。
- ③最大付着耐力に最も大きく影響しているのは、鉄筋の腐食膨張によってコンクリートに入るひび割れ幅で、初期ひび割れ幅の増加はコンクリートの拘束効果を急激に低減し、最大付着応力を低下させる。

なお、長期間にわたって腐食が進行してゆく場合には、錆が溶解することも考慮する必要がある、それについては今後の課題である。

〈謝 辞〉 本研究の実験遂行にあたり、技官の中村裕剛氏には多大なご協力を頂き、ここに期して謝意を表します。

参考文献

- 1)田森清美、丸山久一、小田川昌志、橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第10巻 第2号、pp.505～510、1988
- 2)高岡祐二、丸山久一、清水敬二、中田泰広：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、第11巻 第1号、pp.591～596、1989
- 3)中田泰広、丸山久一、橋本親典、清水敬二：鉄筋腐食によるひび割れが梁供試体の耐荷性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻 第1号、pp.551～556、1990
- 4)角徹三、山田守：付着割裂作用を受けるコンクリートの応力解析、土木学会論文集、第396号、pp.159～168、1988
- 5)前田匡樹、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート梁の付着破壊強度、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻 第2号、pp.485～496、1990