

論文 PC 鋼材の動的付着強度に関する高速引抜き実験

圓林栄喜^{*1}, 香月智^{*2}, 石川信隆^{*3}, 太田俊昭^{*4}

要旨:プレストレストコンクリート(PC)製落石覆工(ロックシェッド)のはり部材は衝撃荷重を受けるため、PC鋼材は衝撃的引抜き力を受ける。しかし、PC鋼材とコンクリート間の動的付着強度に関して未解明なため、はり全体の破壊メカニズムを明らかにできない。そこで本研究は、衝撃的な引抜き力を受けるPC鋼材の動的付着強度に関する基礎的なデータを得るため、直径 9.3mm のPC鋼より線および直径 9.0mm のPC異形鋼棒の高速引抜き実験を実施し、載荷速度およびモルタル強度がその付着応力へすべり関係に及ぼす影響について考察した。その結果、静的載荷時 ($\dot{\epsilon}=10^{-6}/\text{sec}$) に比べ、高速載荷時 ($\dot{\epsilon}=10^{-1}/\text{sec}$) にはPC鋼材の付着強度が約 2 倍増加することが明らかとなった。

キーワード: PC鋼材, 付着強度, 載荷速度, 高速引抜き実験, 動的付着倍率

1.はじめに

落石荷重を受けるロックシェッドのPCはりでは、きわめて速い曲げ変形を起こすためPC鋼材とコンクリート間では急激な付着力の増加が生じる。

従来、衝撃的な引抜き荷重を受ける鉄筋とコンクリートの付着応力へすべり関係に関する研究としては、石本、島ら¹⁾によって載荷ひずみ速度をパラメータとして詳細な実験が行われており、載荷速度を考慮した鉄筋の付着応力構成則が提案されている。また、Mindessら²⁾は重錘落下により鉄筋の引抜きまたは押抜き実験を行い、動的な最大付着力が静的の約 2~3 倍になると指摘している。一方、PC鋼材とコンクリート間との動的付着特性に関する研究はあまりなされていないようである。

そこで本研究は、載荷速度およびモルタル強度がPC鋼材の付着応力へすべり関係および動的付着倍率(動的最大付着応力/静的最大付着応力)に及ぼす影響を調べるため、高速引抜き実験を行ったものである。

2.実験概要

2.1 載荷装置

引抜き実験は、静的および高速実験とも図-1 に示す高速変形負荷装置³⁾の加圧力を利用して、図-2 に示す引抜き試験装置を使用して行った。高速変形負荷装置は立ち上がり 10msec で最大 4.0m/s に達する速度制御型の加圧装置であり、図-3(a)に載荷速度~時間関係を示す。図-3(b), (c)には、実験時の付着応力およびひずみの時刻歴を示す。これより、付着応力がピークに達する時の到達載荷速度は概ね 50cm/s であり、この間のPC鋼棒の平均ひずみ速度は、概ね $4.5 \times 10^{-1}/\text{sec}$ であることがわかる。載荷力は、写真-1 に示すPC鋼材の載荷端側に出ているグリップを引張用治具に固定し、PC鋼材を高速で引き抜くように与える。静的引抜き実験も併せて実施し、この場合の載荷速度は平均 0.1mm/min とした。

2.2 測定項目

測定項目は、PC鋼材の自由端、載荷端変位(移動ビーム変位)、荷重および加速度である。計測器材の詳細を表-1 に示す。荷重は容量 98.1kN のひずみゲージ式ロードセルによって、自由端変位は渦電流式変位計によって、載荷端変位は載荷端

*1 防衛大学校研究員	土木工学科	工修	(正会員)
*2 防衛大学校助教授	土木工学科	工博	(正会員)
*3 防衛大学校教授	土木工学科	工博	(正会員)
*4 九州大学教授	大学院工学研究科	工博	(正会員)

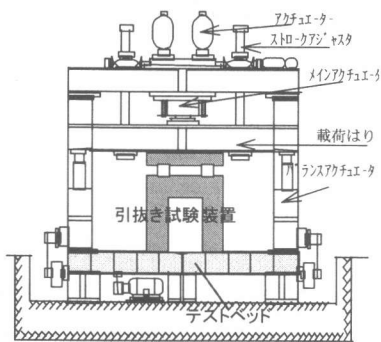


図-1 高速変形負荷装置

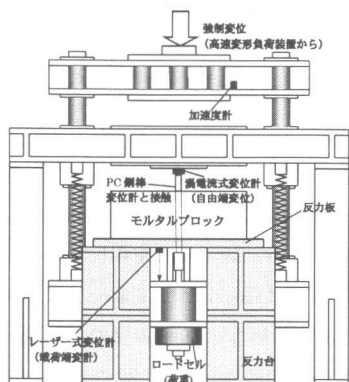
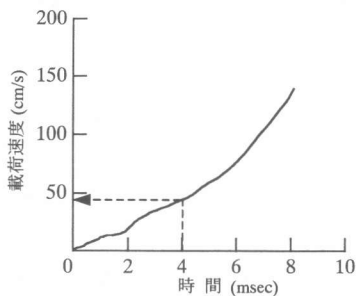


図-2 引抜き試験装置

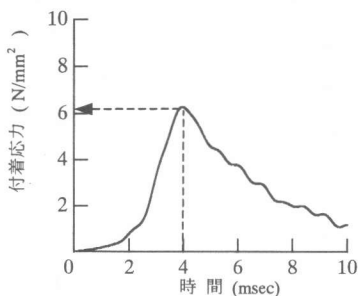
側レーザー式変位計を用いて測定した。また、ひずみは鋼材用ひずみゲージを用い、図-4 に示すようにに荷役端から5mmの位置に、異形PC鋼棒の場合のみ貼付した。なお、本研究では、このゲージの履歴曲線の傾きの平均によって図-3(c)に示すようにひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ を求めた。さらに、高速引抜き実験時の各データはサンプリングタイム $50\mu\text{sec}$ で計測し、A/D変換した。

2.3 試験体および実験ケース

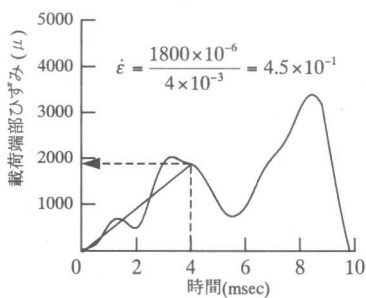
本実験では、材料のばらつきを少なくし、PC鋼材とコンクリート間の付着をなるべく均一化するため、プレミックスタイプのモルタルを使用した。材料諸元を表-2に示す。モルタル強度については、2種類作成した。Aタイプは7日強度で平均圧縮強度は 30.9N/mm^2 、Bタイプは28日強度で平均圧縮強度は 44.7N/mm^2 であった。供試体寸法は、たてひび割れを防止するため、図-4に示すようにPC



(a) 荷役速度～時間関係



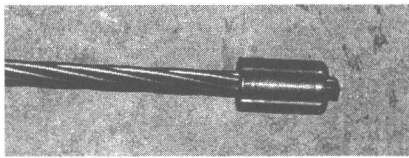
(b) 付着応力～時間関係



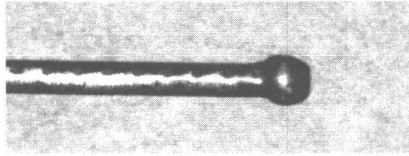
(c) ひずみ～時間関係

図-3 荷役速度、付着応力、および荷役端部ひずみ～時間関係

鋼材まわりのコンクリート面積を大きくするため、 $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ の正方形断面とし、付着長さを 100mm (約 $10D$)とした。島ら⁴⁾は、異形鉄筋の引抜き実験で十分な付着長さ(鋼材径の約50倍)を用いて実験を行うことを提案している。しかし、本試験装置の制約上付着長さを十分に長くはできないため、六車らの研究⁹⁾を参考に、短い付着長(鋼材径の約10倍)の引抜き実験を実施した。この際、平均付着応力(引抜き力を付着面積で除した値)および自由端におけるすべりによって考察を行うこととした。また、反力台による圧縮応力が付着応力～



(a) φ9.3mmPC 鋼より線



(b) φ9.0mm 異型 PC 鋼棒

写真-1 実験に使用したPC鋼材

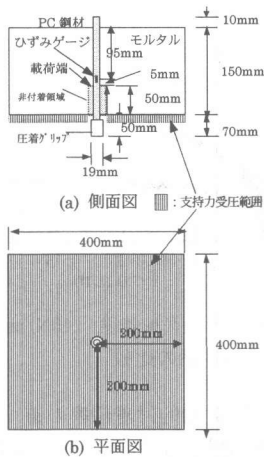


図-4 供試体寸法図およびひずみゲージ添付位置

すべり関係(以下 $\tau \sim S$ 関係)に及ぼす影響を取り除くため、長さ50mmの非付着領域を設けた。

実験ケースは、表-3に示すようにモルタル圧縮強度を2種類とし、PC鋼より線を用いる場合、静的3体および高速3体の計12体、異形PC鋼棒を用いる場合、静的2体、高速1体の計6体で合計18体である。

3. 実験結果および考察

3.1 載荷速度が付着応力～すべり関係に及ぼす影響

すべての供試体で付着破壊によってPC鋼材が抜け出した。その際に、モルタルブロックにひび割れは全く発生していない。各供試体の平均付着応力とすべり(自由端すべり量 S を鋼材径 D で除し、無次元化した値)の関係を図-5に示す。図-5より付着応力～すべり関係は、いずれもきれいな完全弾塑性型の弾塑性挙動を示し、高速載荷時の付着応力は静的の場合よりも約2倍程度大きくなって

表-1 測定項目および計測器材の諸元

測定項目	計測器材	諸元等
荷重	ロードセル	容量: 98.1 kN
変位	自由端	渦電流式変位計 測定範囲: 5mm 応答周波数: 13kHz
	載荷端	レーザー式変位計 測定範囲: 300±100mm 応答周波数: 915Hz
ひずみ	ひずみゲージ	ゲージ率: 2.14 抵抗値: 1205±05Ω
加速度	加速度計	測定範囲: 500G 応答周波数: 1000Hz

表-2 材料諸元

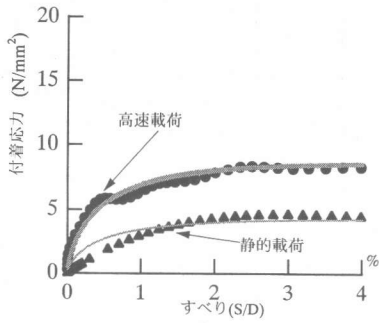
材料	項目	数値
モルタル	水セメント比	0.47
	セメント	600kg/m ³
	水	298kg/m ³
	細骨材	1300kg/m ³
PC鋼材	A 圧縮強度 f_c'	30.9N/mm ²
	B 圧縮強度 f_c'	44.7N/mm ²
	より線径	φ9.3mm
	鋼棒径	φ9.0mm
	0.2%永久伸びに対する荷重	90.9kN
引張荷重	98.7kN	
破断時伸び	7.5%	

表-3 実験ケース

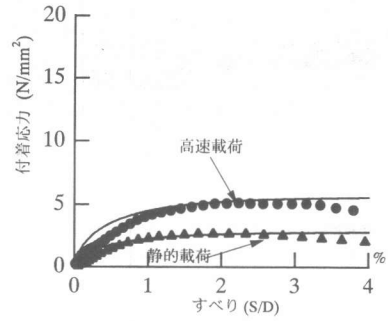
供試体	モルタル 圧縮強度 f_c'	供 試 体 本 数		
		静的載荷 (0.1mm/min)	高速載荷 (4m/s)	合 計
Aタイプ	30N/mm ²	5(2)	4(1)	9(3)
Bタイプ	45N/mm ²	5(2)	4(1)	9(3)
合 計		10(4)	8(2)	18(6)

()内の数字は異形PC鋼棒を用いた供試体の数を示す。したがって、PC鋼より線を用いた供試体の数はそれを差し引いた数で12体である。

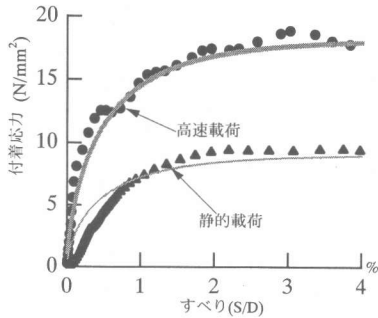
いる。付着応力そのものは、モルタル強度一定のとき図-5(a), (c)のPC鋼より線の方が図-5(b), (d)のPC鋼棒よりも大きい。この理由は、PC鋼より線の付着応力の算定において、引抜き力をより線束の直径による円周面積で除しているが、実際には、PC鋼より線一本一本とコンクリートは複雑に接しており、付着面積が大きいので、PC鋼棒よりも引抜きにくいと考えられる。次に、各供試体で最大付着応力の生じるすべりに違いが生じているため、ここでは、すべりが2%のときの付着応力を最大付着応力と定義し、静的載荷時と高速載荷時の最大付着応力の比を動的付着倍率(=動的付着最大付着応力/静的最大付着応力)と名づけ表-4に示した。これより、PC鋼材の動的付着倍率は、PC鋼より線、



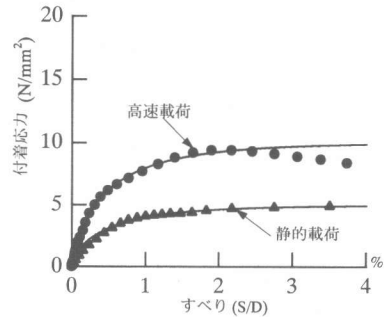
(a)PC鋼より線 モルタル強度 (30N/mm²)



(b)PC鋼棒 モルタル強度 (30N/mm²)



(c)PC鋼より線 モルタル強度 (45N/mm²)



(d)PC鋼棒 モルタル強度 (45N/mm²)

図-5 静的載荷と高速載荷時の付着応力～すべり関係の比較

PC鋼棒の如何に拘わらず、また、モルタル圧縮強度の如何に拘わらずほぼ2倍になっていることがわかる。コンクリートの純引張試験では、高速載荷時にひずみ速度効果によってその強度が静的載荷時の2～3倍に達するとの報告⁹⁾もされていることから、付着応力もひずみ速度効果で2倍程度増加するものと思われるが、詳細は今後検討する予定である。

3.2 モルタル圧縮強度が付着応力～すべり関係に及ぼす影響

次に、モルタル圧縮強度をパラメータとして、付着応力～すべり関係を図-6に示す。これより、モルタル圧縮強度が増加すると付着強度も増大することがわかる。そこで、モルタル圧縮強度30N/mm²の最大付着応力とモルタル圧縮強度45N/mm²の比を付着強度増加率と名づけ、この値を表-5に示した。これより、モルタル圧縮強度の増加に伴う付着強度増加率は、約1.8～2.2倍であり、PC鋼より線の方がPC鋼棒よりも大きく、高速載荷時の方が静的載荷時よりも大きくなる傾向が見られた。

表-4 動的付着倍率の値
(=動的最大付着応力/静的最大付着応力)

	より線	鋼棒
30N/mm ²	1.96	1.98
45N/mm ²	1.95	2.02

表-5 付着強度増加率の値
(=圧縮強度45N/mm²のときの最大付着応力 ÷ 30N/mm²の時の最大付着応力)

	静的	高速
より線	2.16	2.22
鋼棒	1.82	1.85

表-6 表面形状係数

	より線	鋼棒
30N/mm ²	0.56	0.36
45N/mm ²	0.89	0.49

この原因としては、前述したように鋼棒よりもより線の方が付着面積が大きいこと、モルタル圧縮強度が増大すれば、それに比例して付着応力も増大すると考えられる。一方、高速載荷時はひずみ速度効果により、モルタル引張強度が増大するので静的載荷時よりも高速載荷時の方が付着の度合いが大きくなると思われる。

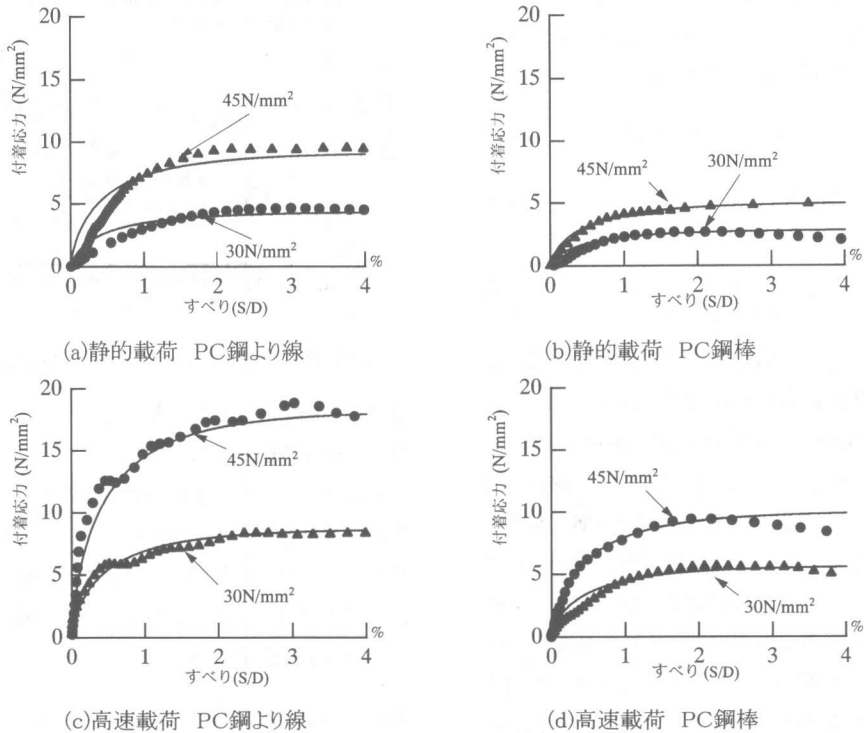


図-6 モルタル圧縮強度の違いによる付着応力～すべり関係の比較

3.3 PC鋼材の動的付着応力～すべり関係式の提案

ところで、島・周ら⁴⁾はマッシュパなコンクリートに埋め込められた鉄筋の $\tau \sim S$ 関係の式として、次式を提案している。

$$\tau = 0.9(f'_c)^{2/3} \left[1 - \exp\{-40(S/D)^{0.6}\} \right] \quad (1)$$

$$\tau = 0.73f'_c \left\{ \ln(1 + 5000S/D) \right\}^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5) \quad (2)$$

ただし、 f'_c : 付着コンクリートの圧縮強度 (単位 Mpa)

ε : 求める τ の位置の鋼材ひずみ

式(1)は付着長が十分に長く、自由端におけるすべりおよびひずみが0の場合における $\tau \sim S$ 関係の算定式であり、式(2)は付着長が短い場合にも適用可能な式である。よって、本来式(2)を修正することが望ましいが、式(2)では供試体内のひずみ(ε)が必要なため、ここでは式(1)を修正して平均付着応力～すべり関係式として次式を提案することとした。

$$\tau = \alpha_D \cdot c \cdot 0.9(f'_c)^{2/3} \left[1 - \exp\{-40(S/D)^{0.7}\} \right] \quad (3)$$

ここで、 τ : 付着応力、 S : すべり量、 D : PC鋼材の直径、 α_D : 動的付着倍率 (静的実験では $\alpha_D = 1.0$ 、高速載荷では $\alpha_D = 2.0$ とした。)、 c : PC鋼線の表面形状係数で表-6 の値を用いる。この値は島、周らの提案する式(1)による値に動的付着倍率を考慮した上で得られる値と実験結果との差異を補正するように求めた係数である。ただし、この係数の中にはモルタル強度の影響も暗黙のうちに含まれるため、純粋に評価するためには今後のより詳細な検討が必要である。

ここで、式(3)による付着応力～すべり関係式を示すと図-5 および図-6 の実線のようになり全体的に実験値を良くシミュレートしている。しかし、図-5(d) および図-6(d) の PC 鋼棒の場合は 2%以後で生じている付着応力の軟化現象についてはあまりシミュレートできていない。この現象は、六車ら⁵⁾が指摘しているように大きな応力がPC鋼材に生じた場合、断面積が収縮しすべりやすくなり、さらに応力も減少するという現象が生じたためと考えられる。

3.4 動的付着倍率とひずみ速度との関係

式(3)においてすべりを十分に大きくとると、最大付着応力が次式のように求められる。

$$\tau_{c \max} = \alpha_D \cdot c \cdot 0.9(f'_c)^{2/3} \quad (4)$$

よって、式(4)より動的付着倍率は次式によって求められることになる。

$$\alpha_D = \frac{\tau_{c \max}}{c \cdot 0.9(f'_c)^{2/3}} = \frac{\tau_{c \max-d}}{\tau_{c \max-s}} \quad (5)$$

ここで、 $\tau_{c \max-d}$ ：高速載荷時の最大付着応力、 $\tau_{c \max-s}$ ：静的載荷時の最大付着応力
 そこで、本実験でひずみ速度が計測されているPC鋼棒の実験を○で、石本、島らの行った鉄筋の実験を●、山口らの行った鉄筋の実験⁷⁾を■で整理し、動的付着倍率とひずみ速度との関係を図-7に示す。なお、石本、島らの実験および山口らの実験はすべて異形鉄筋を用いているので表面形状係数は1.0として扱っている。これより、石本らの実験結果はひずみ速度 10^{-2} 以下の領域で線形性を示すことがわかる。一方、山口らの実験データでは、ひずみ速度が 10^{-2} 以下ではあまり大きな増加はなく、 $10^{-2} \sim 10^0$ 付近で急激に付着倍率が増加していることがわかる。本実験データの場合も $10^{-1} \sim 10^0$ の範囲で明瞭に動的付着倍率が大きくなっていることがわかる。

4. 結論

本研究の成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) PC鋼材の付着応力はひずみ速度が増加するにつれて増大し、動的付着倍率はPC鋼材の種類およびモルタル強度の如何に拘わらず約2倍となった。
- (2) モルタル圧縮強度が増加すると、付着強度も増加し、その増加率はPC鋼より線の方が大きいことがわかった。
- (3) 鉄筋付着応力に対する島、周らの式を修正して、PC鋼材の形状係数を考慮することにより、PC鋼材の動的および静的付着応力～すべり関係式を導き、実験データをほぼ良く回帰させることができた。
- (4) PC鋼材の動的付着倍率に及ぼすひずみ速度

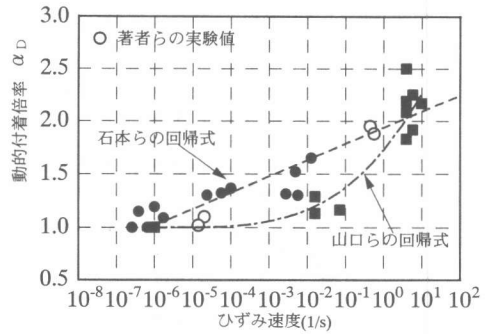


図-7 動的付着倍率とひずみ速度との関係

効果については、ひずみ速度 $10^{-1} \sim 10^0$ で急に増加する傾向が見られた。

今後、さらに多くの種類のPC鋼材で、十分な付着長を有する供試体で実験を行い、実験データを補足する必要がある。また、PC鋼材は通常プレストレスを導入することから、プレストレスの影響についても検討が必要である。

謝辞：本実験の作製にあたり、日本サミコン(株)の小林一隆氏をはじめ同研究所の方々の協力を得た。また、実験の実施、計測については研究科学生の黒木勇人、長屋秀和両氏の協力を得た。ここに、記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 石本陽一、島弘：鉄筋とコンクリートの付着応力～すべり関係に及ぼす載荷速度の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2, pp. 129～134, 1993.6.
- 2) X. Ye, N. Wang, S. Mindess: Effect of Loading Rate and Support Conditions on The Mode of Failure of Prestressed Concrete Railroad Ties Subjected to Impact Loading, Cement and Concrete Research, Vol.24, pp. 1286-1298, 1994.
- 3) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法、pp.39～40, 1993.12.
- 4) 島弘、周礼良、岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力～すべり関係、土木学会論文集、第378号/V-6, pp. 165～174, 1987.2.
- 5) 六車熙、森田司郎、富田幸次郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、No. 131, pp. 1～8, 1967年1月, 1967.2.
- 6) 藤掛一典、山根茂樹、大野友則、水野淳、鈴木篤：急速一軸引張試験においてコンクリート円柱供試体の高さ寸法の違いが引張特性に及ぼす影響、土木学会論文集、第592号/V-39, 83～95, 1998.5.
- 7) 山口弘、安藤智啓、星川辰雄、藤本一男：鉄筋とコンクリートの動的付着特性に関する実験的研究、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集、I-B214, pp. 428～429, 1997.8.