

論文

[2162] 内面高突起付鋼管と充填コンクリートの付着特性

井上 末富\*1・山本 昇\*2・南 宏一\*3

1. はじめに

充填形鋼管コンクリート柱は耐震性、耐火性に優れ、さらには、型枠が不要などの施工上の長所を有する。しかし、コンクリートの充填性と柱・梁接合部における応力伝達機構の解明が不十分であることなど、施工上と設計上の問題点が指摘されている〔1〕。こうした問題点の解決手段の一つとして、鋼管の内面に突起を付与し充填コンクリートとの合成効果を向上させた突起付鋼管コンクリート構造の研究開発が行われている〔2〕〔3〕。筆者らは、鋼管と充填コンクリートの付着性能をさらに向上させるとともに、付着強度の長期的安定性の確保を狙いとした内面高突起付鋼管の開発を目的として、付着特性に関する研究を行った。

本論では、突起形状の選定経過および、実大モデルによる内面高突起付角形および円形鋼管に関する押抜き試験を行い、主に付着性状について検討した結果を報告する。

2. 突起形状の選定

コンクリートとの付着性能を最大限に確保する最適な突起形状を検討するために、図-1に示す角形鋼管による押抜き試験を行った。試験パラメータとして、コンクリートとの付着特性に大きく影響するとされる突起高さ(h)、突起間隔(d)、径厚比(B/t)を採用した〔4〕。また、試験体は機械加工で突起を成形した鋼板を溶接組立することにより製作した。

図-2に最大付着応力度 ( $\tau_{max}$ ) とB/tの関係、図-3に $\tau_{max}$ と突起間隔と高さの比 (d/h) の関係を示す。これらから、突起高さとしてはB/tが大きくなっても $\tau_{max}$ の低下率が小さいh=6mmが、また、突起間隔としては高さの10倍が最適と判断し、角形および円形の何れの鋼管に対してもh=6mm、d=50mmとした。

3. 実験計画

3.1 試験体

試験体の形状寸法を図-4に、実験計画を表-1

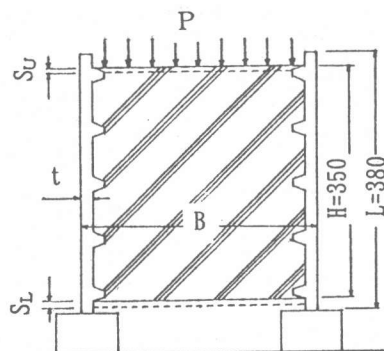


図-1 押抜き試験

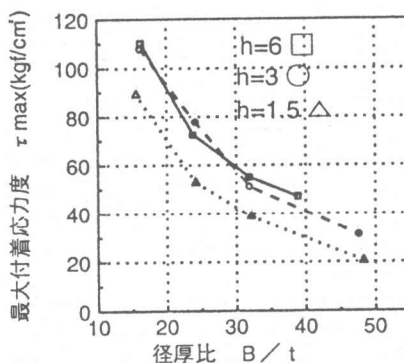


図-2  $\tau_{max}$  と B/t の関係

\*1 川崎製鉄(株) 鋼構造研究所建築建材研究室主任研究員 (正会員)

\*2 川崎製鉄(株) 鋼構造研究所建築建材研究室主任研究員

\*3 福山大学教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

に示す。試験体数は計24体で、試験パラメータとして鋼管形状（角形、円形）、コンクリート設計強度（ $F_c = 210, 360 \text{ kgf/cm}^2$ ）、鋼管の径厚比（ $B/t = 16 \sim 80$ ）、および荷重形式（単調、繰返し）を選択した。

試験体に用いた鋼板は、圧延成形により突起を付与した厚さ2.5mmの突起付き平鋼を素材として、機械切削により所定の厚さに仕上げた。角形鋼管は突起付き平鋼を溶接により組み立て、また、円形鋼管は冷間プレス成形により製作した。

実験に使用したコンクリートの配合および材料試験結果を表-2, 3に示す。

### 3.2 実験

図-1に押し抜き試験の荷重方法を示すが、鋼管の一端を支持端に、他端の充填コンクリート面を荷重面とする単調圧縮荷重および一方向繰返し圧縮荷重とした。

鋼管と充填コンクリートの相対すべり量は、試験体の支持端変位（ $S_L$ ）と荷重端変位（ $S_U$ ）を2箇所計測し、その平均値を平均すべり量  $S$  とした。

表-1 実験計画

試験体名称	コンクリート設計強度 $F_c$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	鋼材降伏点 $\sigma_y$ (tf/cm <sup>2</sup> )	荷重形式	鋼管径 $B$ (mm)	板厚 $t$ (mm)	径厚比 $B/t$
B25-2	210	2.45	単調荷重	400	16.3	24.5
B25-2C	"	"	繰返し荷重	"	16.4	24.4
B45-2	"	"	単調荷重	500	11.6	43.1
B60-2	"	"	"	"	8.7	57.4
B60-2C	"	"	繰返し荷重	"	8.5	58.8
B16-3-1	360	4.08	単調荷重	400	25.4	15.7
B16-3-2	"	"	"	"	24.4	16.4
B25-3-1	"	"	"	"	16.1	24.8
B25-3-2	"	"	"	"	16.2	24.7
B33-3-1	"	"	"	500	15.1	33.1
B33-3-2	"	"	"	"	15.1	33.1
B45-3-1	"	"	"	"	11.1	45.0
B45-3-2	"	"	"	"	11.1	45.0
B60-3-1	"	"	"	"	8.4	59.5
B60-3-2	"	"	"	"	8.1	61.7
C33-2	210	4.08	単調荷重	500	15.3	32.7
C45-2	"	"	"	"	11.2	44.6
C45-2C	"	"	繰返し荷重	"	11.4	43.9
C60-2	"	"	単調荷重	"	8.5	58.8
C25-3	360	"	"	400	16.0	24.9
C33-3	"	"	"	500	15.1	33.0
C45-3	"	"	"	"	10.9	45.8
C60-3	"	"	"	"	8.5	58.7
C80-3	"	"	"	"	6.3	79.2

記号 B25-2C-1

試験体番号  
 荷重形式 (C:繰返し荷重 無:単調荷重)  
 コンクリート強度  $F_c$  (2:210kg/cm<sup>2</sup> 3:360kg/cm<sup>2</sup>)  
 径厚比  
 断面形状 (B:角形 C:円形)

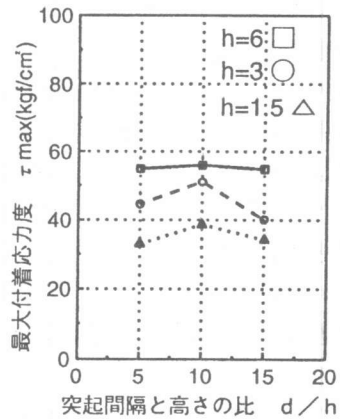


図-3  $\tau_{max}$  と  $d/h$  の関係

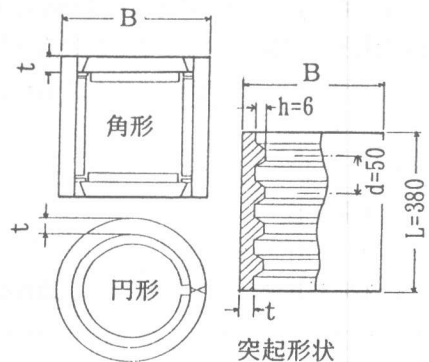


図-4 試験体形状

表-2 コンクリートの配合

F <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	スラ ンプ (cm)	水セメ ント比 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			セメント	水	細骨材	粗骨材
210	19.2	56.0	304	170	820	975
360	20.0	35.0	492	172	669	994

表-3 コンクリートの機械的性質

F <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強さ $\sigma_{cB}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_t$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング率* $E_c$ (tonf/cm <sup>2</sup> )	備 考
210	208	17.4	195	
360	375	26.0	294	角 鋼 管
"	428	30.0	317	円形鋼管

\*: 1/3<sub>c</sub>σ<sub>B</sub>時の割線ヤング率

4. 実験結果

4. 1 付着応力とすべり変形状

試験結果として表-4に、押抜き最大荷重(P)を鋼管とコンクリートの付着面積(S<sub>a</sub>)で除して求めた最大付着応力度(τ<sub>max</sub>)、最大荷重を鋼管断面積およびコンクリート断面積で除して求めた鋼管軸方向応力度(σ<sub>B</sub>)とコンクリート圧縮応力度(σ<sub>c</sub>)等の一覧を示す。また、図-5、6に平均付着応力度(τ)と平均すべり量(S)の関係の代表例として、F<sub>c</sub>=360 kgf/cm<sup>2</sup>について径厚比(B/t)をパラメーターにして示す。B/tが大きくなるに従いτ<sub>max</sub>が低下し、τ<sub>max</sub>到達時のすべり量も少なく、初期剛性も小さい。また、τ<sub>max</sub>到達以降の付着応力の低下率が大きい。これはコンクリートの付着破壊メカニズムが鋼管の横方向拘束力に大きく依存し、その付着性能は角形、円形鋼管ともB/tに大きく影響されることが示されている。

表-4 試験結果

試験体 名 称	σ <sub>B</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	S <sub>a</sub> (cm <sup>2</sup> )	P (tf)	σ <sub>B</sub> =P/A <sub>S</sub> (tf/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>c</sub> =P/A <sub>C</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	τ <sub>max</sub> =P/S <sub>a</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
B25-2	208	5129	291.0	1.16	215	56.7
B25-2C	"	5126	294.6	1.17	218	57.4
B45-2	"	6661	258.7	1.14	113	38.8
B60-2	"	6756	192.0	1.12	82	28.4
B60-2C	"	6762	206.6	1.23	88	30.5
B16-3-1	375	4844	634.9	1.67	520	131.1
B16-3-2	"	4860	618.0	1.68	501	127.1
B25-3-1	"	5076	385.3	1.55	285	75.9
B25-3-2	"	5102	406.3	1.63	300	79.6
B33-3-1	"	6520	434.5	1.48	196	66.6
B33-3-2	"	6520	437.1	1.49	198	67.0
B45-3-1	"	6631	344.4	1.58	150	51.9
B45-3-2	"	6574	350.5	1.61	153	53.3
B60-3-1	"	6707	268.4	1.62	114	40.0
B60-3-2	"	6676	259.4	1.62	110	38.8
C33-2	208	5128	625.1	2.68	360	121.9
C45-2	"	5240	567.6	3.30	317	108.3
C45-2C	"	5247	516.7	2.95	289	98.5
C60-2	"	5299	500.6	3.81	273	94.5
C25-3	428	4047	731.2	3.79	687	180.6
C33-3	"	5173	813.2	3.53	469	157.2
C45-3	"	5277	628.1	3.75	349	119.0
C60-3	"	5330	509.8	3.88	278	95.6
C80-3	"	5379	467.2	4.78	250	86.8

(注) σ<sub>B</sub>: コンクリート圧縮強度、S<sub>a</sub>: 付着面積 (角形鋼管 S<sub>a</sub>=4H(B-2t)、円形鋼管 S<sub>a</sub>=πH(B-2t))、P: 最大荷重、A<sub>S</sub>: 鋼管断面積、A<sub>C</sub>: コンクリート断面積 (角形鋼管 A<sub>C</sub>=(B-2t)<sup>2</sup>、円形鋼管 A<sub>C</sub>=π(B-2t)<sup>2</sup>/4) σ<sub>B</sub>: 鋼管軸方向応力度、σ<sub>c</sub>: コンクリート圧縮応力度、τ<sub>max</sub>: 最大付着応力度

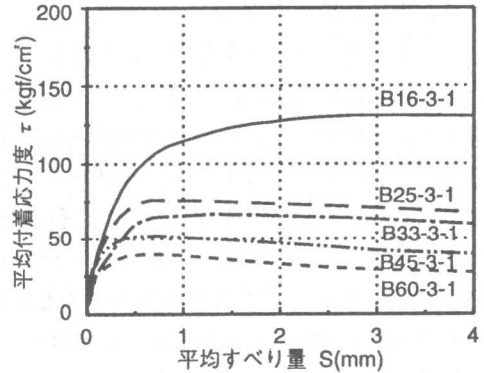


図-5 付着応力度-すべり量関係 (角形)

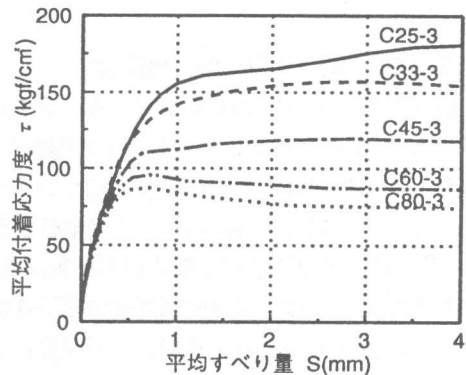


図-6 付着応力度-すべり量関係 (円形)

## 4. 2 破壊性状

実験終了後、試験体の鋼管部分を縦方向に切断し、コンクリートの破壊面の目視観察を行った。その代表例を写真-1、2に示す。破壊形態は何れの試験体ともほぼ同様な状況を示し、鋼管の突起間に挟まれたコンクリートは健全な状態を保ち、突起の頂部を結ぶ線上のやや内側を破壊面とするせん断破壊である。これは、突起高さが高いことにより、突起部側面のコンクリートの局部支圧耐力が大きいことと、鋼管壁が面外変形しても支圧耐力が容易に低下しないためと考える。

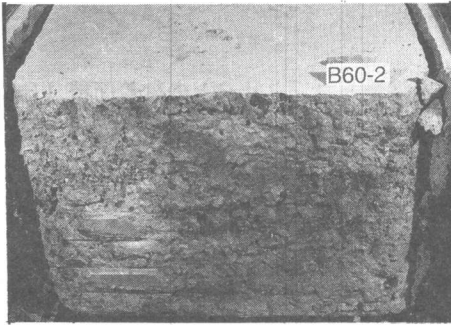


写真-1 破壊面の状況 (角形)

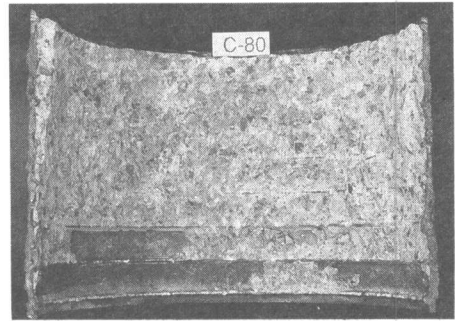


写真-2 破壊面の状況 (円形)

## 5. 実験結果の考察

### 5. 1 コンクリート強度と付着性状

図-7に角形および円形鋼管についてコンクリート設計強度 $F_c$ を変化させた場合の $\tau$ と $S$ 関係の代表例を示す。これより、コンクリート圧縮強度が高くなるに従い付着剛性ならびに付着強度とも増加している。一般に、コンクリートのせん断強度は圧縮強度 $\sigma_B$ の平方根に比例すると言われている〔2〕。本実験においてもコンクリートがせん断破壊しており、 $\tau_{max}$ に対しコンクリートのせん断強度が支配的であると仮定するなら、 $\tau_{max}$ はほぼ $\sqrt{\sigma_B}$ に比例して増加するものと考えられる〔5〕。

### 5. 2 鋼管断面形状と付着性状

図-7の $\tau-S$ 関係および図-8に示す $F_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ の時の $\tau_{max}$ と $B/t$ の関係から、鋼管の断面形状と付着性状の関係について検討する。 $\tau-S$ 関係に見られるすべり変形状から、 $\tau_{max}$ に至るまでのすべり量に顕著な差があり、円形鋼管が角形に対し約3倍弱程度の変形性能を有することが判る。また、角形、円形鋼管とも $B/t$ が大きくなるに従い $\tau_{max}$ 値は双曲線的に低下するが、その傾向は両者ともほぼ同様である。また、

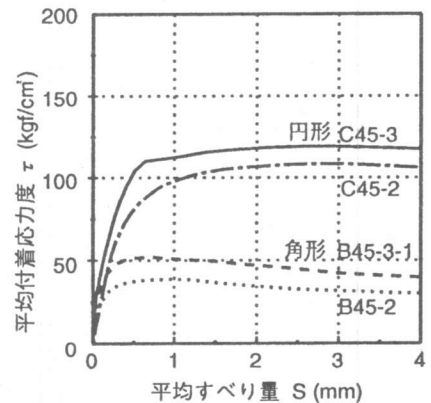


図-7  $\tau-S$  関係 ( $F_c$ の影響)

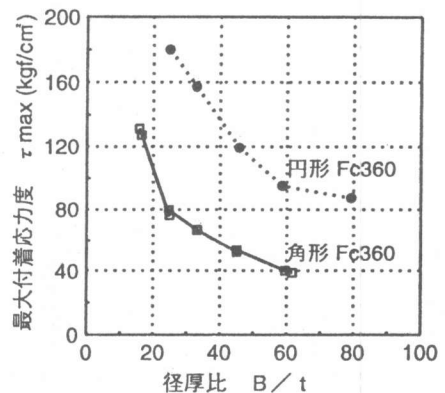


図-8  $\tau_{max}-B/t$  関係 (鋼管形状の影響)

円形鋼管は角形鋼管に対し、 $B/t$ および $F_c$ に関わらず約2倍以上の付着強度を有することが明らかである。これは円形鋼管が角形鋼管に対して、コンファインド効果に優れているためであると考えられる。

### 5.3 繰返し载荷と付着性状

図-9、10に繰返し载荷を行った試験体の $\tau-S$ 関係の代表例を単調载荷試験体と比較して示す。繰返し試験体は同一条件で製作された単調载荷試験体の $\tau_{max}/2$ の荷重を上限として、 $0 \sim \tau_{max}/2$ で10回繰返した。その後、徐々にすべり量を増加させながら繰返した後、最大荷重に至らせ、さらに大変形域( $S=10$  mm)まで数回繰返した。その結果、 $\tau_{max}$ は単調载荷試験結果に等しいかあるいは極く僅かな低下にとどまり、また、付着剛性に及ぼす繰返し载荷の影響もほとんど見られない。従って、本実験のような载荷方法では $\tau_{max}/2$ の繰返し载荷ならびに弾性域から塑性域にわたる繰返し载荷が高突起付鋼管の付着性能に与える影響は大きくないと考えられる。

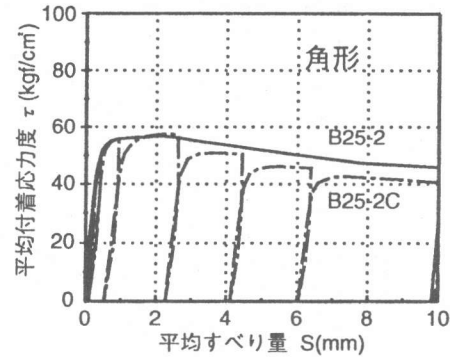


図-9  $\tau-S$ 関係 (繰返し载荷-角形)

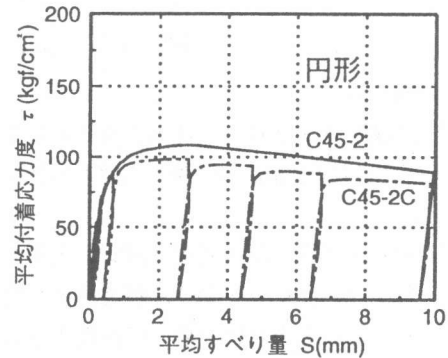


図-10  $\tau-S$ 関係 (繰返し载荷-円形)

## 6. 付着耐力に関する評価式

内面高突起付き角形および円形鋼管の付着耐力に関する評価式を得るため、最大付着応力度 $\tau_{max}$ は、①コンクリートのせん断強度で決定し、コンクリートの圧縮強度( $\sigma_B$ )の平方根に比例する、また、②鋼管の横方向拘束力に支配されることから、鋼管の径厚比の逆数( $t/B$ )に比例するものと仮定する。そこで、全試験体の試験結果について、 $\tau_{max}/\sqrt{\sigma_B}$ と $t/B$ の関係をプロットして示したのが図-11である。これらの関係について最小二乗法を用いて直線近似すれば角形および円形鋼管に関する耐力評価式として式(1)、(2)が得られる。

$$\text{角形鋼管} : \quad \tau_{max} = \sqrt{\sigma_B} [ 0.40 + 96.07 (t/B) ] \dots\dots (1)$$

$$\text{円形鋼管} : \quad \tau_{max} = \sqrt{\sigma_B} [ 2.79 + 163.3 (t/B) ] \dots\dots (2)$$

(但し、 $\sigma_B$ の単位は $\text{kgf/cm}^2$ )

また、同図には文献〔2〕に提案されている実験式を比較のため示した。文献〔2〕の縞模様の突起形状( $h=2.5 \sim 2.7$  mm)を有する角形鋼管の $B/t=30 \sim 100$ の範囲の結果に対して、式(1)、(2)は $B/t=16 \sim 60$ のより広い範囲の実験結果に基づくものである。また、前者の $B/t$ の範囲内でのみ比較すれば、より高い突起の効果が現れている。

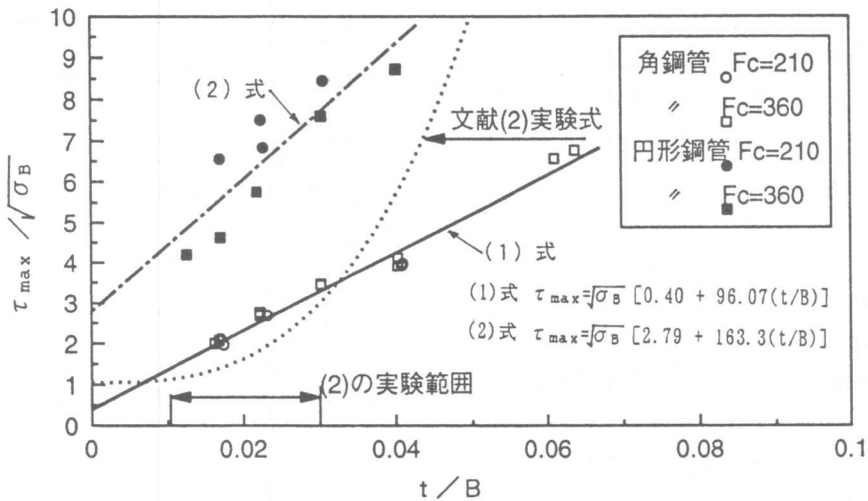


図-11  $\tau_{max} / \sqrt{\sigma_B} - t/B$  の関係

## 7. 結 語

充填形鋼管コンクリート柱への適用を対象にして、鋼管とコンクリートの付着性能の大幅な向上を期待した内面高突起付鋼管の付着特性について押抜き試験によって検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 本実験で用いた高突起付鋼管と充填コンクリートとの付着破壊は、鋼管の径厚比にかかわらずコンクリートのせん断破壊で決定している。
- (2) 最大付着応力度は角形、円形鋼管とも径厚比と関係し、径厚比の増大と共に双曲線的に低下する。
- (3) 角形と円形鋼管の付着耐力を比較すると、鋼管の拘束効果に優れる円形鋼管が角形に対し約2倍の最大付着応力度を有する。また、塑性変形能も大きく、靱性に富む。
- (4) 一方向繰返し荷重下においても剛性および付着耐力の劣化はみられない。
- (5) 付着耐力は、充填コンクリートの圧縮強度の平方根と鋼管の径厚比の逆数にほぼ比例することから、角形及び円形鋼管の両者について付着耐力に関する評価式(1)および(2)を得た。

## 参考文献

- [1] 富井政英・崎野健治・森下陽一：コンクリート充填鋼管構造の設計上の問題点、カラム、No. 73, pp. 91-98, 1979. 7
- [2] 松村弘道・佐久間仁：内面リブ付き角形鋼管と充填コンクリートとの付着性能、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1383-1384, 1988. 10
- [3] 松井千秋・計良光一郎・山口種美：コンクリート充填内面突起付き鋼管構造の開発(その1 実験計画および付着性能)、日本建築学会中国・九州支部研究報告第8号, pp. 109-112, 1990. 3
- [4] 佐藤政勝・石渡正夫：平鋼および突起付鋼材とコンクリートの付着特性、コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp. 365-368, 1980
- [5] 岡村 甫・訳：高張力異形鉄筋の伝達長、コンクリート・ジャーナル, Vol. 5, No. 2, pp. 46-53, 1967. 2