

論文 炭素繊維シート端部の定着に関する実験研究

中澤 敏樹^{*1}・福本 昇^{*2}・市川 昌和^{*3}・石渡 康弘^{*3}

要旨：壁付き柱に炭素繊維シート（以下，シート）を巻き付けて補強する場合，シートによる拘束効果を確実にするために，壁に孔を設けてボルトを貫通しL型に加工した金物（以下，L型金物）でシートを定着する方法が考案されているが，その定着効果については不明な点が多い。本研究では，従来のL型金物に比べ比較的コンパクトで，かつシートの定着効果に優れた定着金物を提案し，金物形状やコーナー部の面取り寸法等を変動因子としたシート端部の定着に関する要素実験を行った。その結果，提案した定着金物はL型金物と比較してシートを拘束する効果が高く，十分な定着性能を有することが確認できた。

キーワード：炭素繊維シート，耐震補強，定着金物，鉄筋コンクリート造

1. はじめに

既存不適格建物の耐震補強が急務となるなか，鉄筋コンクリート造柱に炭素繊維シートを巻き付けて補強する方法が，高い補強効果と共に優れた施工性をもつことで注目されている。この場合，十分な補強効果を得るにはシートを閉鎖型に巻き付けることが必要であり，そのため壁付き柱の場合は壁端部を研ってシートを巻き付けている例が多い。しかし，壁を研る際に騒音や粉塵が発生し，またその壁が耐震壁である場合はその構造性能に問題が生じる恐れがある。近年の研究では，壁に孔を設けてボルトを貫通させL型金物でシートの端部を定着する方法が提案されているが，金物の形状が大きくなり，またその定着効果についても判然としない点が多い。本報告では，「壁付き柱の耐震補強工法」開発の一環として，シート端部の定着効果を把握するために行った要素実験の結果について述べる。今回，一般に用いられているL型金物等と比べ比較的コンパクトで，かつシートの定着効果を期待できる定着金物（以下，金物）を提案し，その金物形状の違いがシートの定着力におよぼす影響について述べる。

2. 工法概要

図-1に今回提案した金物の形状を示す。金物は高強度の鋳鉄でできており，従来のL型金物等と比べ非常にコンパクトな形状をしているため，施工性に優れた金物となっている。金物の断面は矩形であり，中央にボルト貫通用の孔を設けている。孔はボルトの頭部が金物の内部に埋まるように2段に加工してあり，シートと接する面の隅角部には面取り加工を施している。シートは重ね継ぎ手部分を残して，工場で予め金物に貼り付けておく。現場での施工方法を以下に示す。①壁にボルト穴用の穿孔を行う。②

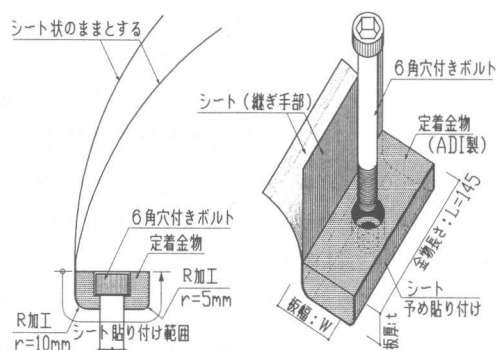


図-1 金物形状

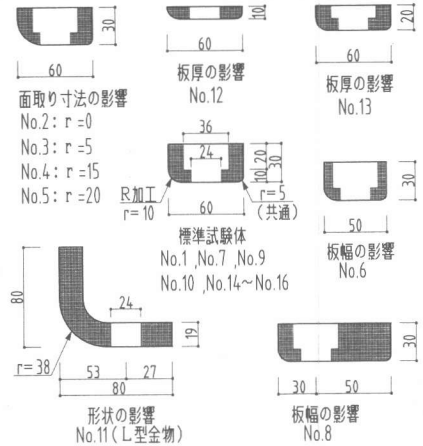
*1 (株) 浅沼組技術研究所 建築構造研究室 (正会員)

*2 (株) 浅沼組技術研究所 建築構造研究室室長 (正会員)

*3 鉄建建設(株) 技術研究所 建築構造研究室 (正会員)

表－１ 試験体一覧

No.	シート 層数 (層)	シート 幅 (mm)	定着金物			材質	面取り 寸法 (mm)	ボルト 径 (mm)	締付け トルク (N・m)	着目点	
			形状	板幅 (mm)	板厚 (mm)						
1	1	120	矩形	60	30	FCAD 900-8	10	20	200	面取り寸法	
2						SM490	0				
3							5				
4							15				
5							20				
6	2	120	矩形	50	30	FCAD 900-8	10	22	300	板幅	
7				60		FCAD 1400-1				材質	
8				80							
9				60							
10			L型	80	30	SM490	38	22	300	金物形状	
11				SM490							
12		145	矩形	60	10	FCAD 900-8	10	22	300	板厚	
13					20						
14					30						
15					30						16
16					320						



図－２ 金物断面図

け、所定の位置へ金物を貼り付ける。③壁を貫通させたボルトで締め付けて接合する。④金物から突出したシートと柱に貼り付けたシートをエポキシ樹脂で接合して一体化させる。

3. 実験概要

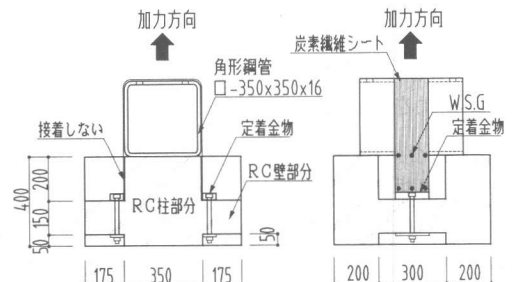
3.1 実験因子

表－１に試験体一覧を、図－２に金物の断面図を示す。実験因子は金物形状、金物材質、シートと接する金物コーナー部の面取り寸法、ボルト締め付けトルクとした。基本とした試験体は No.7 であり、金物の形状は幅：60 mm、長さ：145 mm、厚さ：30 mm、コーナー部の面取り半径： $r = 10$ mm である。金物の材料にはオーステンパ球状黒鉛鉄（以下、ADI と称す）の FCAD900-8 を用いた。No.1 ～ No.5 はシート層数を 1 層とし、面取り寸法の影響を確認するために $r = 0 \sim 20$ mm とした。No.6 ～ No.8, No.12 ～ No.14 は金物形状の影響を確認するために、No.6, No.8 では板幅を 50 mm, 80 mm とし、No.12, No.13 では板厚を 10 mm, 20 mm とした。金物の材質による影響を確認するために、No.9 には FCAD900-8 より高強度となる FCAD1400-1 を、No.10 には SM490 を用いた。No.15, No.16 はボルトの締付けトルクの影響を確認するために、No.15 では低トルクを、No.16 ではボルト張力が

115kN となるようにトルクを導入した。なお、他の試験体では M20 のボルトには 200N・m, M22 のボルトには 300N・m のトルクを導入した。No.11 は比較用として従来の L 型金物を用いた試験体である。

3.2 試験体

図－３に試験体の形状を示す。試験体は鉄筋コンクリート造柱に厚さ 15 cm の壁が取り付け入り隅部を想定して製作したものであり、スタブを兼ねたコンクリート部分と載荷用の角形鋼管部分から構成されている。金物は左右対称に 2 個取り付け、角形鋼管を覆うようにシートを貼り付けた。シートの継ぎ手位置は角形鋼管の頂部に設け、金物部分の定着力を明確にするために、角型鋼管より下部のコンクリートとシートの接着は行わなかった。



図－３ 試験体形状

3.3 使用材料

表－2 に材料試験結果を示す。金物材料に用いた ADI は SM 材に比べ高強度であり、また形状を自由に製作できるという利点を持つ。今回用いた ADI は FCAD900-8 と FCAD1400-1 の 2 種類である。コンクリートは設計基準強度を $F_c = 21 \text{ N/mm}^2$ となるように調合し、金物を定着するボルトは F10T の六角穴付きボルト、角形鋼管は STKR400 を用いた。

3.4 加力方法および測定方法

歪みおよび変位の測定位置を図－4 に示す。加力は 500kN ジャッキを鋼管上部に取り付け、左右の金物とシートに同じ引張り力が同時に作用するように行った。測定は荷重、全体変形、金物の浮き上がりおよび変形、シートとボルトの歪みを計測した。金物の変形は、金物の中央と端部に設置した変位計によって、材軸方向の曲げ変形量およびねじれ変形量を測定した。ここで、材軸と直交方向における曲げ変形量は、L 型金物を除いて微小であるため無視した。

4. 実験結果

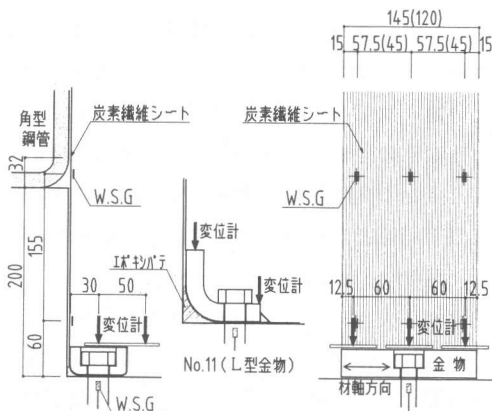
表－3 に実験結果一覧を、図－5 にシートの破断位置を示す。最大荷重はジャッキに作用する荷重の 1/2 を、最大応力度は最大荷重をシートの炭素繊維部の断面積で除した値である。

シートが L 型金物から剥がれて抜け出した No.11、ボルト破断した No.15、No.16 以外は全てシート部分で破断した。また、シート破断した試験体の最大応力度は、シートの引張試験値の 1/2 程度の値となった。

面取り寸法を $r=0 \text{ mm}$ とした No.2 では面取り部分で破断し、 $r=5 \text{ mm}$ とした No.3 でも面取り部分の一部での破断がみられた。それに対し面取り寸法を $r=10 \text{ mm}$ 以上とした試験体では、面取り部分での破断は見られなかった。板厚を 10 mm とした No.12 の金物には材軸方向に、No.11 の L 型金物には R 部分において材軸と直角方向に実験終了後も曲げ残留変形が認められた。

表－2 材料試験結果

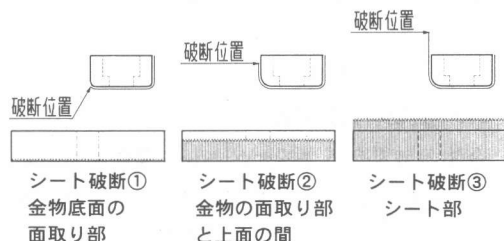
材質		降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性率 (kN/mm^2)	伸び量 (%)	備考
シート 300g/ m^2	1層	—	4596	250	1.83	No.1～5
	2層	—	4479	228	1.94	No.6～16
FCAD900-8		810	1047	175	11.7	No.1,6～8,12～16
FCAD1400-1		1233	1471	166	2.8	No.9
SM490		366	527	214	44.2	No.2～5,10,11
ボルト (F10T)	M16	959	1013	2.10	—	No.15,16
	M22	1055	1145	2.21	18.1	No.6～No.14



図－4 測定位置

表－3 実験結果一覧

No.	最大荷重 (kN)	最大応力度 (N/mm^2)	破断状況	備考
1	39.0	1945	シート破断②③	面取り寸法
2	35.6	1778	シート破断①	
3	38.1	1900	シート破断①②	
4	44.4	2215	シート破断③	
5	53.4	2666	シート破断③	
6	99.4	2481	シート破断②③	板幅
7	82.1	2049	シート破断②	
8	82.7	2064	シート破断③	
9	83.5	2084	シート破断③	材質
10	84.3	2104	シート破断③	
11	81.9	2044	シート抜け出し	金物形状
12	52.2	1079	シート破断③	板厚
13	88.9	1835	シート破断②③	
14	87.5	1807	シート破断②③	
15	102.2	2110	ボルト破断	締付けトルク
16	102.9	2124	ボルト破断	



図－5 シートの破断位置図

5. 実験結果の検討

5.1 面取り寸法の影響

1層巻き試験体について、最大耐力時のシーートの応力度と金物の面取り寸法との関係を図-6に示す。面取り寸法が大きくなるに従い最大応力度が増大する傾向を示した。ただし、面取り： $r=10$ mm以上の試験体に関しては、面取り部での破断は発生しなかった。

シーートの拘束効果に影響を及ぼすと考えられる金物の変位量について、シートに作用する荷重と金物内端部の変位量との関係を図-7に、金物外端部の変位量との関係を図-8に示す。ここで金物の変位量は、図-4に示す中央と両端での平均値とした。金物内端部の変位量について、面取り： $r=20$ mmとしたNo.5の変位量が他に比較し大きくなっている。また金物外端部の変位量について、No.5では微少ではあるが金物外端部の底面が躯体へ陥没していることがわかる。これは面取り寸法が大きくなることで金物の底面積が減少し、金物とコンクリート躯体との支圧力が増大したため、金物外端部の陥没が進行し、その影響で内端部の浮き上がりが大きくなったものと考えられる。

5.2 金物幅の影響

金物幅をパラメータとした2層巻き試験体について、シート荷重と金物内端部の変位量との関係を図-9に、荷重とボルトの伸び（壁厚： $t=150$ mmの範囲）との関係を図-10に示す。

金物内端部の浮き上がり変位量については、金物幅が大きくなるに従い変位量が小さくなったものの、金物内端部が躯体から離間した後のボルトの伸びは金物幅に関係なくほぼ一定となった。

5.3 金物材質の影響

金物の材質をパラメータとした2層巻き試験体について、シート荷重と金物の変位量との関係を図-11に示す。最大耐力および金物の変位量ともに基本試験体と比較して大きな差は見

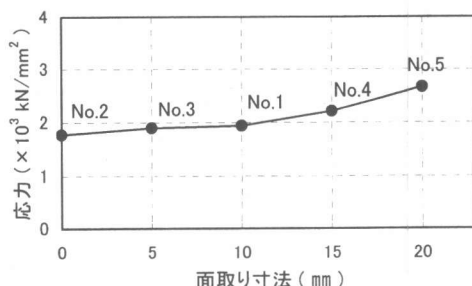


図-6 最大応力度－面取り寸法

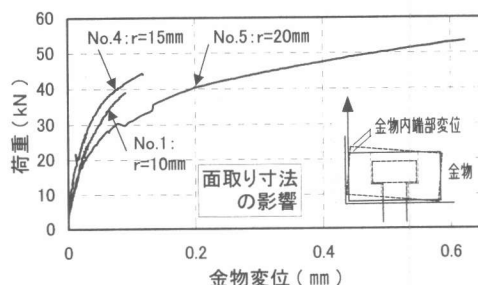


図-7 荷重－金物変位（内端部）

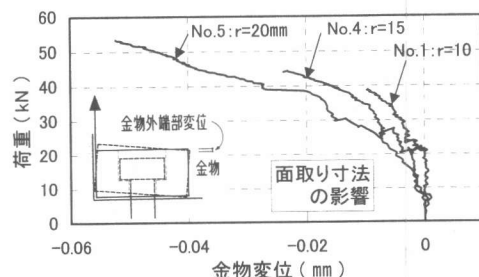


図-8 荷重－金物変位（外端部）

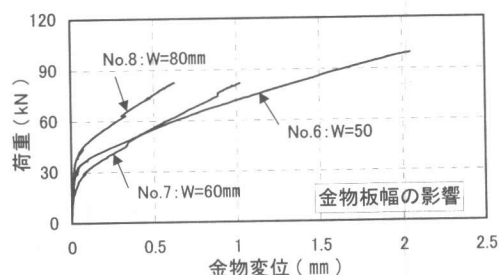


図-9 荷重－金物変位（内端部）

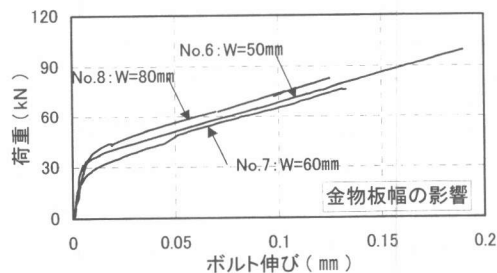


図-10 荷重－ボルト伸び

られない。全ての試験体で金物からのシートの抜け出しおよびずれは全く発生していない。今回行った実験の範囲内では、材質による影響は確認できなかった。

5.4 L型金物との比較

今回提案した金物と従来のL型金物について、シート荷重と金物内端部の変位量との関係を図-12に、荷重とボルトの伸びとの関係を図-13に示す。L型金物の最大強度はシートの抜け出しによって決定しており、金物の変位量およびボルトの伸びとともに矩形金物と比較して非常に大きくなっている。これはL型金物自身が材軸と直行方向へ曲げ変形したことに加えて、金物形状の違いからボルトに作用するてこ反力が増大し、ボルト張力が大きくなったためであると考えられる。

ここで、シート荷重： T_{CF} によってボルトに作用する張力： T_B を計算すると、No.7 では $T_B = 2.0 \cdot T_{CF}$ 、No.11 では $T_B \approx 3.0 \cdot T_{CF}$ となり、図-13で No.11 の勾配が No.7 の勾配の約 2/3 となっていることとよく対応している。

5.5 金物板厚の影響

金物板厚をパラメータとした2層巻き試験体について、シート荷重と金物内端部の変位量との関係を図-14に、金物の変形量（端部と中央の変位量の差）との関係を図-15に示す。

金物の板厚が小さくなるに従い金物内端部の浮き上がり量が大きくなり、また金物自身の変形量も大きくなった。ボルトの伸びは各試験体ともほぼ同じ値を示していることから、浮き上がり量の違いは金物の変形量に依存したと考えられる。

ここでシートの破断直前に金物に作用したと思われる応力の計算値を表-4に示す。金物応力の算定は式(1)、式(2)を、曲げ応力とねじり応力の組み合わせ応力に対する検討は式(3)を用いた。また、応力計算にあたりシートの引張応力は金物に均等に作用するものと仮定した。

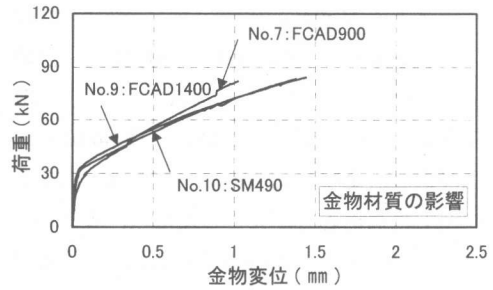


図-1 1 荷重-金物変位（内端部）

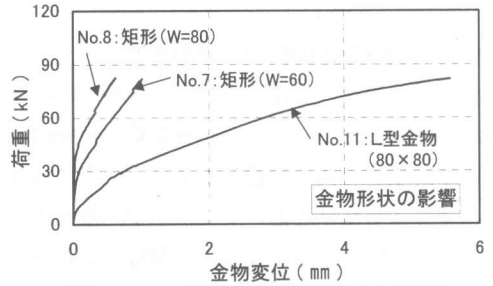


図-1 2 荷重-金物変位（内端部）

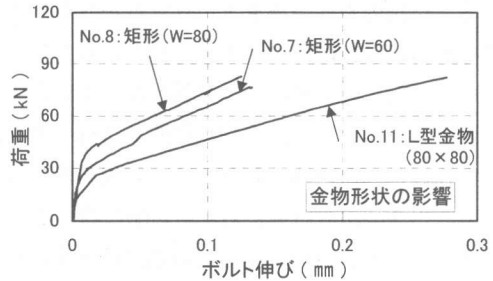


図-1 3 荷重-ボルト伸び

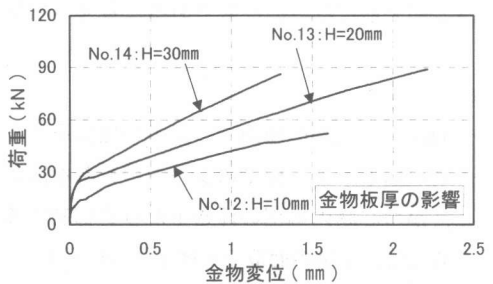


図-1 4 荷重-金物変位（内端部）

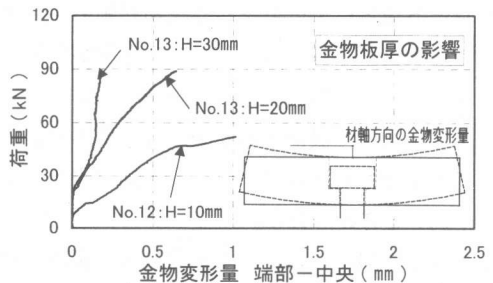


図-1 5 荷重-金物変形量（端部-中央）

$$\sigma_y = M_y / Z_y \quad (1)$$

$$\tau_{max} = (1/k_1)(M_t / ab^2) \quad (2)$$

$$f_t^2 \geq \sigma_y^2 + 3 \tau_{max}^2 \quad (3)$$

計算結果から、板厚を 10 mm とした No.10 の金物は降伏し、金物の変形量が大きくなったことでシートに局部応力が発生したため、破断応力度が 1,079N/mm² と他の試験体と比較して非常に小さな値になったと考えられる。

5.5 ボルト締め付けトルクの影響

ボルトの締め付けトルクをパラメータとした 2 層巻き試験体について、シート荷重と金物内端部の変位量との関係を図-16 に、荷重とボルトの伸びとの関係を図-17 に示す。図-17 中の破線はボルト M16 の引張試験結果における荷重と長さ 15cm あたりの伸びを示したものである。金物内端部の浮き上がりはボルトが伸び始めるのとほぼ同時に発生しており、高トルクで締め付けた金物の離間荷重は低トルクのものより大きくなっている。金物が離間した後のボルトの伸びは両試験体ともほぼ同じ勾配を示しており、ボルト引張試験における勾配の約 1/2 倍となっている。これは金物内端部が浮き上がったことで、ボルトに作用する張力がてこ反力によって約 2 倍になったためであると考えられる。

6. まとめ

今回行った実験の範囲で、以下の知見を得た。

- 1) 金物の面取り部近傍でのシートの破断を防止し、かつ金物内端部の浮き上がりを抑制するためには、金物の面取り半径を $r=10 \sim 15$ mm とすることが適当である。
- 2) シート荷重によって生じる金物材軸方向の曲げおよびねじれ応力に対して、金物が降伏しないように断面を設計する必要がある。
- 3) 上記によって設計された金物は、変形および浮き上がりが小さく、シートを拘束する効果が高いと考えられる。
- 4) ボルトの設計には、てこ反力による張力の増大を考慮する必要がある。

表-4 金物の応力計算値

No	シート最大応力度 (N/mm ²)	金物曲げ応力度		金物ねじり応力度		降伏強度: f_t (N/mm ²)	(3)式による降伏の判定
		M_y (kN・mm)	σ_y (N/mm ²)	M_t (kN・mm)	τ_{max} (N/mm ²)		
6	2481	954	318	994	93	810	OK
10	2104	809	180	1012	76	366	OK
12	1079	659	1099	654	365	810	NG
13	1835	1122	561	1113	173	810	OK
14	1807	1105	245	1095	82	810	OK

M_y : 金物材軸方向曲げモーメント

$$M_y = 1/2 \cdot \omega \cdot (L')^2$$

M_t : 金物材軸方向ねじりモーメント

$$M_t = 1/2 \cdot a \cdot \omega \cdot L'$$

σ_y : 材軸方向曲げによる応力、

Z_y : ボルト穴を考慮した金物の断面係数

τ_{max} : 材軸方向ねじりによるせん断応力

f_t : 金物の降伏応力、 a : 金物板幅

b : 金物板厚、 k_1 : a/b に関する係数

($a/b=2.0 \rightarrow k_1=0.2459$, $a/b=3.0 \rightarrow 0.2672$, $a/b=6.0 \rightarrow 0.2984$)

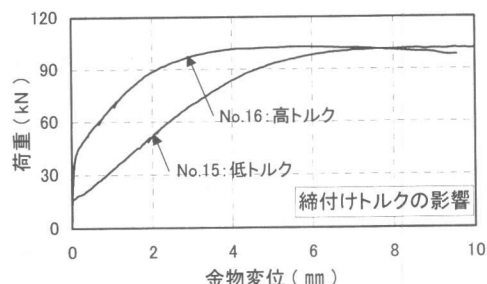
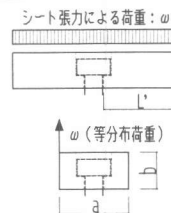


図-16 荷重-金物変位 (内端部)

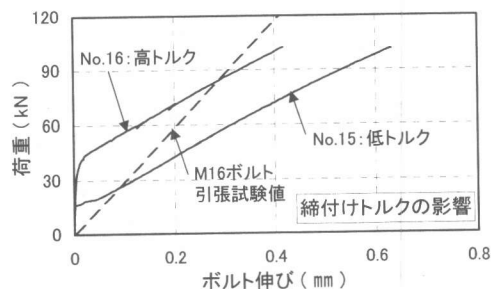


図-17 荷重-ボルト伸び

【謝辞】本研究は、(財)日本建築総合試験所構造部長 益尾潔工博にご指導を頂き、(株)日鉄コンポジット、(株)岡部エンジニアリングのご協力を得て行いました。ここに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 石渡康弘, 中澤敏樹他: 炭素繊維シート端部定着に関する実験的研究 (その1~その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 C (中国), pp41 ~ pp44, 1999.9