

論文 HEM鉄筋継手の性能評価と同継手で接合したプレキャストRC

スラブの力学的挙動

石川喬士*1・原田哲夫*2・永藤政敏*3・久野俊文*4

要旨：定着用膨張材（HEM）を用いた新たな鉄筋継手を開発し、D16, D19, D25を用いた場合について、土木学会「鉄筋継手指針」に基づく性能評価を実施し、実用的な鉄筋継手であることを確かめた。次に、HEM鉄筋継手で接合したプレキャストRCスラブの曲げ載荷実験、せん断実験を実施して、その力学的な挙動について検討した。その結果、RCスラブのHEM鉄筋継手接合面での開口量はひび割れ発生荷重時で0.2mm以下であり、鉄筋降伏後の終局状態までの挙動は、一体スラブとほぼ同じであり、有用な継手工法であることが確認できた。

キーワード：定着用膨張材、鉄筋継手、プレキャスト製品、定着、付着

1. まえがき

建設工事におけるプレキャスト化はますます重要度を増してきており、大型化のニーズも高まってきている。大型構造物では、部材を工場で分割製作し、現場での接続・組立作業が必要となる。工場製作されたプレキャスト部材は、運搬が容易であることは勿論、現場での確実な組立作業が迅速かつ安全に行えることが重要である。現場では、特に、部材同士の接続方法が重要となる。そこで、筆者らは、例えば図-1に示すようなプレキャスト部材の鉄筋同士を現場で効率良く接合する方法として、定着用膨張材（Highly Expansive Material, HEMと略称）を用いる鉄筋継手工法（HEM鉄筋継手工法）を開発し、基礎的な検討を行ってきている。HEMは、水と練り混ぜ後、硬化とともに膨張し、50MPa以上の高膨張圧が発生し、しかも液圧的な伝播をする。HEM鉄筋継手工法は、上記のような特性を利用した工法である。

筆者らは、D19（SD295A）を用いたHEM鉄筋継手の場合、スリーブ長4D、膨張圧50MPaあれば規格降伏荷重でも引き抜けは生じないことを確認している。また、この条件を満足するHEM鉄筋継手について、土木学会継手指針により、静的耐力性能、高応力繰返し耐力性能を調べたところ、静的耐力性能は“A級”、高応力繰返し耐力性能は“S”と評価できることを確かめている。¹⁾

本研究では、まず、鉄筋径の異なったD16, D25のHEM鉄筋継手の性能試験を行った。次いで、ボックスカルバートの頂版部分を想定し、HEM鉄筋継手で接合したスラブ供試体を作製して曲げ試験、せん断試験を実施し、耐力や変形性能、開口変位等、力学的な性能について実験的な検討を行った。

今回の供試体においては、一般的な2000×2000のボックスカルバートを対象とした設計を行い、主鉄筋にはD16を用いた。

-
- *1 長崎大学大学院 生産科学研究科 環境システム工学専攻 (正会員)
 - *2 長崎大学教授 工学部構造工学科 工博 (正会員)
 - *3 長崎大学技官 工学部構造工学科 (正会員)
 - *4 (株)ヤマックス 開発研究本部 (非会員)

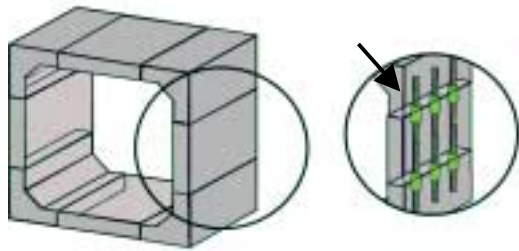


図-1 プレキャスト部材の継手の例

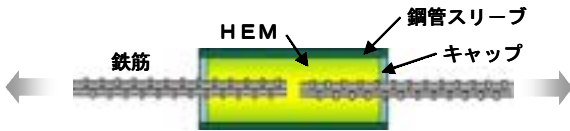


図-2 HEM鉄筋継手の概要

表-1 継手性能試験一覧表

供試体名	鉄筋径	目標膨張圧 (MPa)	スリーブ長 (mm)	供試体数
D16-50-16.5	D16	50	165	1
D16-50-16.5S	D16	50	165	1
D19-50-24	D19	50	240	3
D25-50-20	D25	50	200	3
D25-100-20	D25	100	200	3
D25-50-30	D25	50	300	3
D25-100-30	D25	100	300	3

2. HEM鉄筋継手の性能

2.1 HEM鉄筋継手の概要

図-2に、HEM鉄筋継手の概要を示す。鉄筋径に応じた適切な寸法の鋼管スリーブの断面中心部に、両端から鉄筋を挿入し、その隙間にHEMスラリーを充填する。適切な膨張圧が発生した段階で鉄筋に作用する引張力に抵抗でき、継手としての性能が発揮できる。

今回、D16 (SD295A) 及びD25 (SD295A) の静的耐力性能、高応力繰返し耐力性能の評価を行った。

表-1にHEM鉄筋継手の性能試験の供試体一覧を示している。目標膨張圧は50MPaと100MPaであり、スリーブ長は4D、6Dで、D16のみスラブ供試体の材料試験を兼ねて5Dとした。膨張圧の管理は、スリーブ表面にひずみゲージを貼付して厚肉円筒理論により膨張圧を算定する外管法によって行い、目標膨張圧に達した段階で実験に供した。鋼管スリーブは、D16用；外径38mm、内径28mm、D19用；外径40mm、内径30mm、D25用；外径51mm、内径35mmである。

2.2 静的耐力性能試験の結果

図-3 (a), (b), (c)に静的耐力性能試験の結果の

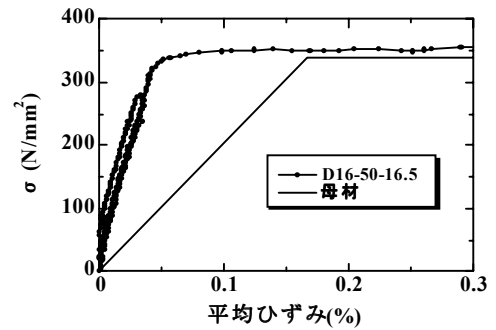


図-3 (a) 静的耐力性能試験
(D16, 50MPa, 5Dの場合)

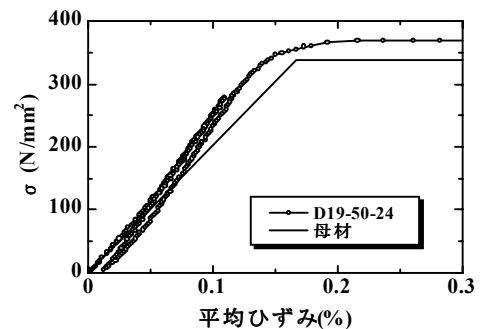


図-3 (b) 静的耐力性能試験
(D19, 50MPa, 6Dの場合)

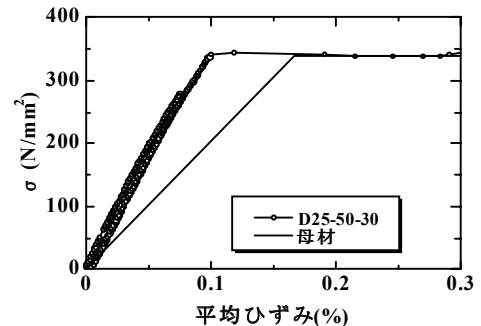


図-3 (c) 静的耐力性能試験
(D25, 50MPa, 6Dの場合)

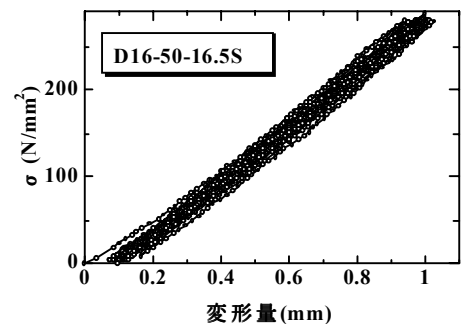


図-4 高応力繰返し性能試験

一例を示す。降伏点を明示する意味で鉄筋母材の応力-ひずみ関係を示している。図は引張荷重を鉄筋の公称断面積で除した応力と、検長区間の伸び量を

検長で除した平均ひずみで表した。その結果、母材の規格降伏点の70%の応力に対し、軸方向剛性が母材以上、および母材の規格降伏点の95%の応力に対し、軸方向剛性が母材の90%以上であった。また、95%規格降伏点まで載荷後の残留変形はD16では0.01mm、D25では0.02mmと小さく、継手性能は“A級”と判定できる²⁾。全て規格降伏の応力までは弾性的な挙動を示した。

2.3 高応力繰返し耐力性能の試験結果

図-4には、高応力繰返し耐力性能の試験結果の一例を示している。30回繰返し載荷後の剛性の変化はほとんどなく、残留変形量は0.03mmと極めて小さい。従って、高応力繰返し性能は、“S”と判定できる²⁾。

3. HEM鉄筋継手をプレキャスト部材に適用する場合の問題点とその対策

HEM鉄筋継手をプレキャスト部材に適用する際、継手部鋼管には、50MPa以上の膨張圧が持続して作用するために、鋼管スリーブを介して、周囲のコンクリートに膨張圧が作用することになり、特にかぶり部分では、鋼管軸方向のひび割れが発生することが懸念される。いま、図-5に示すように、 p_1 なる膨張圧が鋼管スリーブに作用した場合、かぶりコンクリート部を半径とする厚肉円筒を仮定すれば、鋼管スリーブとコンクリート境界面に作用する圧力 p_2 との関係は、次式で与えられる。

$$p_2 = \alpha p_1 \quad (1)$$

ただし、

$$\alpha = \frac{2}{\left[n \left(\frac{k_2^2 + 1}{k_2^2 - 1} + \nu_2 \right) + \frac{k_1^2 + 1}{k_1^2 - 1} - \nu_1 \right] (k_1^2 - 1)}$$

$$\text{ここに、 } n = \frac{E_1}{E_2}, \quad k_1 = \frac{b}{a}, \quad k_2 = \frac{c}{b}$$

E_1, E_2, ν_1, ν_2 : 各円筒 (1, 2) のヤング係数, ポアソン比

一方、膨張圧が作用した時に、コンクリートにひび割れが生じるときの膨張圧 p_u は、コンクリートの

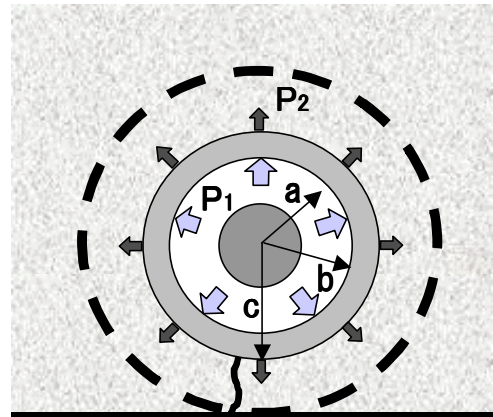


図-5 膨張圧の伝達状況

割裂引張強度 f_t とコンクリート円筒の外内径比 k を用いて、式 (2) で評価できる。

$$\frac{p_u}{f_t} = k - 1 \quad (2)$$

コンクリートの割裂引張強度を 2N/mm^2 , $k=2.2$ と仮定したとき、抵抗できる膨張圧は $p_u=2.4\text{MPa}$ となる。式

(1) より、 $p_1=50\text{MPa}$ の時に、 $p_2=8.39\text{MPa}$ となり、容易にひび割れが発生することが予想される。

そこで、鋼管スリーブにゴムシートを巻くことで鋼管とコンクリート界面における膨張圧を抑制する方法について実験的な検討を行った。供試体は、鋼管表面にゴムシートを巻いて、その周りにコンクリートを巻きたてた $\phi 100\text{mm}$ の円筒供試体である。ゴムシートの厚さを0.5, 1.0, 1.5, 2.0mmと変化させ、ゴムシートなしの場合と比較検討した。ゴムシートなしとゴムシート厚さ1.0mmの場合、膨張圧によるひび割れが確認された。膨張圧は、長期的に50MPa以上になること、また確実にひび割れを抑制する必要があることから、ゴムシートの厚さは、2mmあればよいと判断した。

4. HEM鉄筋継手を用いたプレキャスト部材の曲げ性能試験

4.1 供試体と実験概要

供試体の断面形状・寸法を図-6に示す。今回の供試体は、一般的な 2000×2000 のボックスカルバートを対象とした設計を行い、主鉄筋にはD16 (SD295) を3本用いた。HEM鉄筋継手部は、接合面より片側

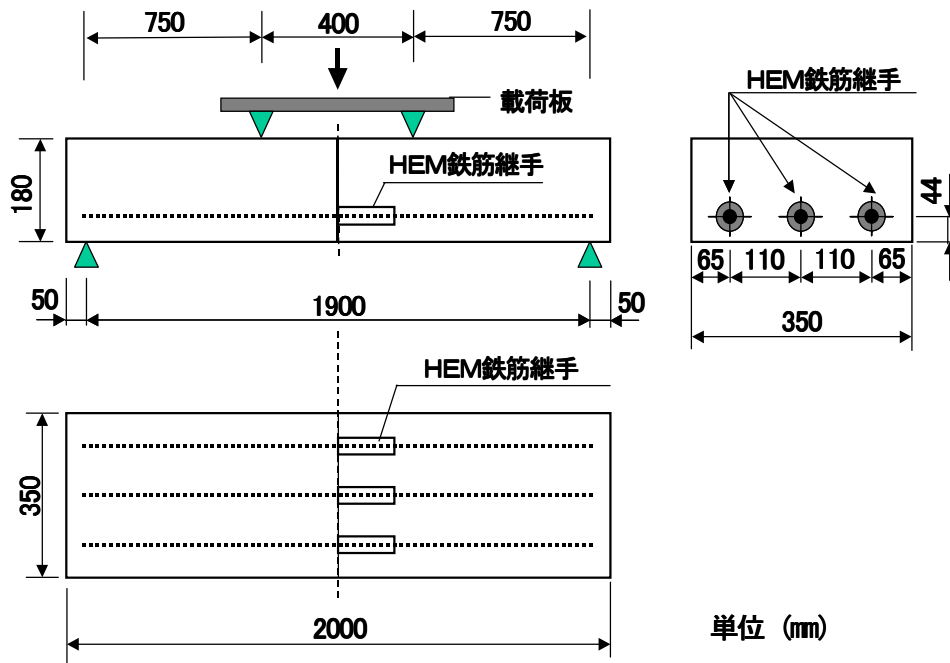


図-6 曲げ供試体の寸法形状および荷重方法

表-2 曲げ供試体一覧

供試体名	接続方法	接合面の処理	供試体数
M-0	一体型	-	1
M-1	HEM鉄筋継手	無処理	1
M-2	HEM鉄筋継手	エポキシ樹脂	1
M-3	HEM鉄筋継手	モルタル	1

に設けた。設定膨張圧は50MPa，定着長は5D（鋼管スリーブ長は165mm），鋼管スリーブの外径40mm，内径30mmである。接合後の供試体全長は2000mmである。プレキャスト部材同士の接合面は無処理，エポキシ樹脂接着（圧縮降伏強さ85N/mm²，曲げ強さ87N/mm²，引張強さ35N/mm²），モルタル処理の3種類であり，比較のために接合面のない一体型の供試体を作製した。いずれも各1体である。

曲げ荷重試験は，接合面がスパン中央で等曲げモーメントが作用する2点荷重で，曲げ圧壊するまで漸増荷重した。各荷重段階でたわみの計測，ひび割れ状況を観察するとともに，供試体の上下面に10cm間隔で取り付けられたπ型ゲージにより，接合面の開口変位はもちろんのこと，曲率分布の計測を行った。

表-2には，曲げ供試体を一覧表として示した。

4. 2 曲げ試験結果と考察

図-7は，各供試体のひび割れ発生曲げモーメン

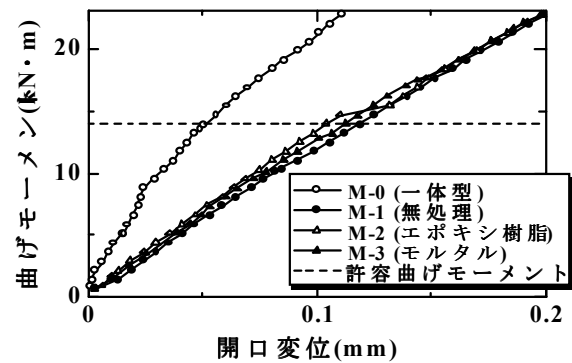


図-7 曲げモーメントー開口変位の関係

トの1.5倍程度の範囲内における曲げモーメントー開口変位関係である。この開口変位は，接合面をはさむ10cm区間のπ型ゲージにより計測された値で，接合面の開口変位と，ひび割れ幅を含むコンクリートの伸び量の総量を示している。図中の破線は，文献4)に従い，鉄筋が許容応力160N/mm²に達したときの曲げモーメントの計算値である⁴⁾。いずれの接合面処理の場合も，この曲げモーメントの計算値のときの開口変位は0.1mm程度であり，一体型の約2倍であった。この開口変位の挙動からは，接合面の処理効果が表れていないように見える。しかし，図-8に示す各供試体の曲率分布を見ると，接合面に処理を施した供試体は，無処理の供試体に比べ，接合部に集中した曲率が，より小さく抑えられており，エポキシ

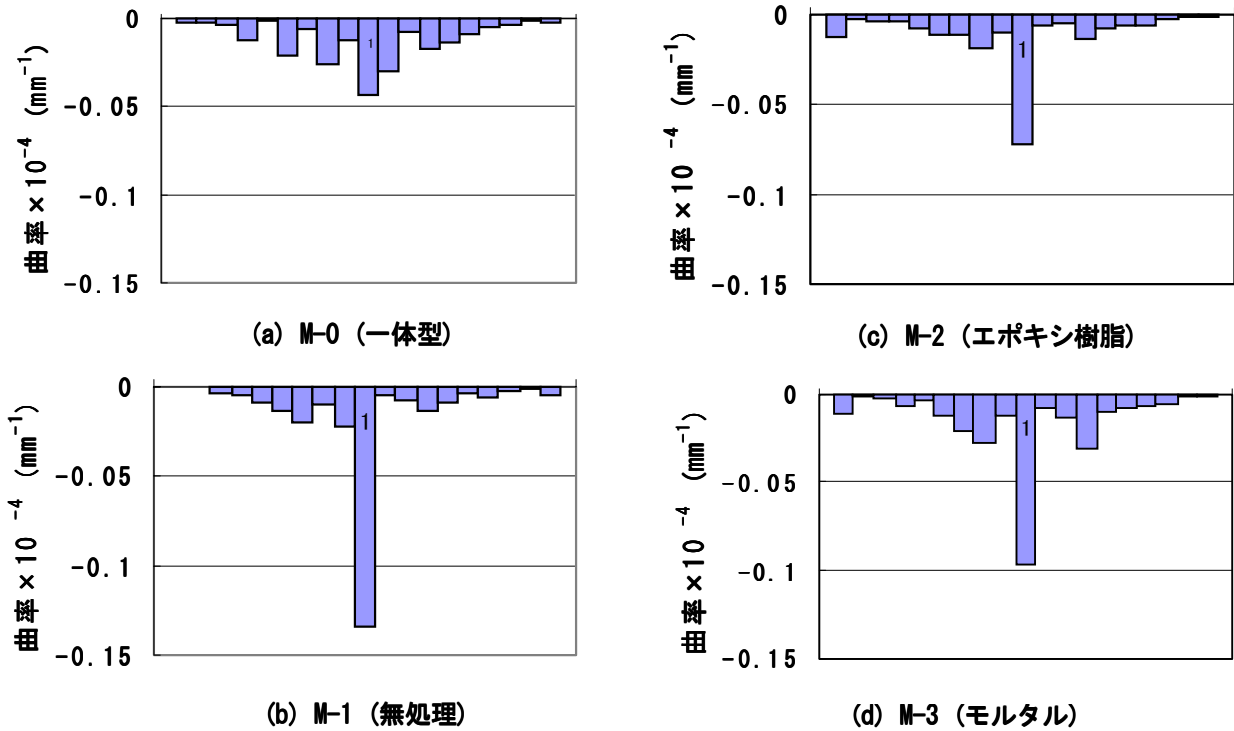


図-8 曲げ載荷試験の曲率分布 (曲げモーメント20kN・m の時点)

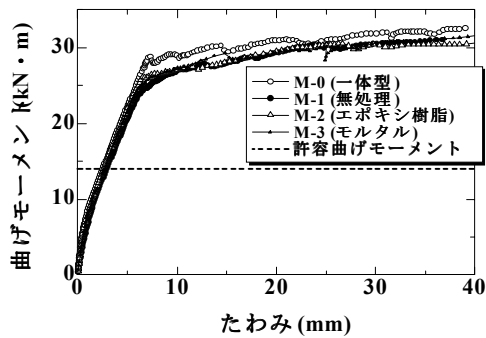


図-9 曲げモーメントーたわみの関係

樹脂で接着した場合には、一体型の曲率状態に近いことがわかる。

図-9には、終局状態までの曲げモーメントーたわみ関係を示している。いずれの供試体も、鉄筋降伏後に上縁コンクリートの圧壊で終局に至った。これより、終局状態までHEM鉄筋継手を用いた部材としての一体性が保てていることが分かる。

図-10 (a), (b), (c), (d)には、各供試体の破壊時のひび割れ性状を示す。継手部を有するすべての供試体で、右側に継手部である鋼管スリーブが入っている。鋼管スリーブが入っている位置を避けるようなひび割れ発生状況であるのが特徴である。これは、

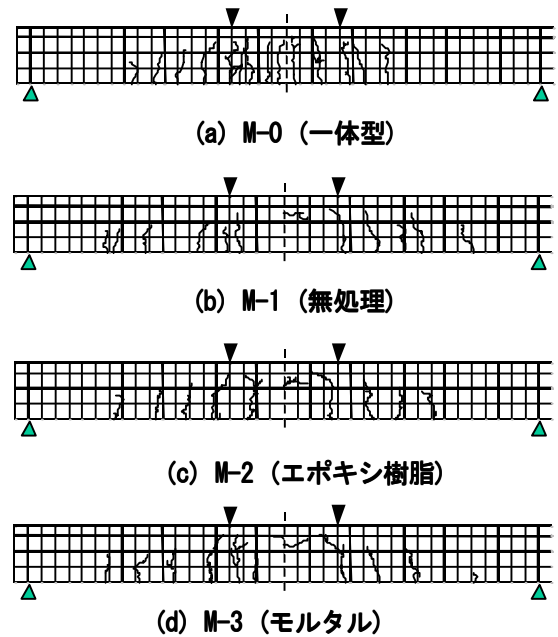


図-10 曲げ載荷試験のひび割れ性状

この位置での剛性が局所的に大きいことや、鋼管スリーブにゴムシートを巻いて付着無しの状態であることの影響が考えられる。しかしながら、曲げ変形挙動や、終局耐力には影響はなかった。

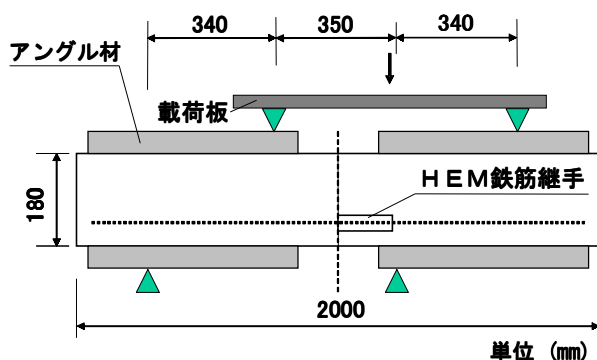


図-11 せん断供試体の載荷方法

5. せん断性能試験

図-1で示したボックスカルバートの場合、HEM鉄筋継手部は、通常、曲げモーメントがゼロに近い位置に設けられる。しかしながら、HEM鉄筋継手部での作用せん断力は必ずしも小さくはない。部材接合面にせん断力が直接作用した場合、鉄筋に作用するせん断力で、かぶりコンクリートがコーン状に剥落することが考えられる。その場合の耐力は、チェックしておく必要がある。そこで、図-11に示すようなせん断実験を実施した。ここで、接合面をエポキシ樹脂接着した場合、作用せん断力の大半がコンクリート面で分担されると考えられるので、今回は最もきびしい状況を想定して、接合面は無処理とした。

載荷実験では、曲げひび割れの影響を取り除くため、接合部を含むせん断区間以外はアングル材で補強し、曲げ変形が起らないようにした。

せん断試験の結果、25.4kNで図-12の破線で示すようにコーン破壊を起こした。文献5)では、コーン破壊を起こした時のせん断力 q_{max} とその時の有効投影面積 A_c との関係は、式(3)で与えている。

$$q_{max} = \sqrt{F_c} A_c \quad (3)$$

式(3)によりせん断耐力を計算したところ、13.7kNであった。これは実験結果の2分の1程度であることから、同手法により安全側でコーン破壊を起こすせん断力を予測することができる事が分かる。

6. 結論

本研究の範囲内で明らかになったことを以下にまとめて示す。

- 1) HEM鉄筋継手の鉄筋径を変化させ引き抜き試

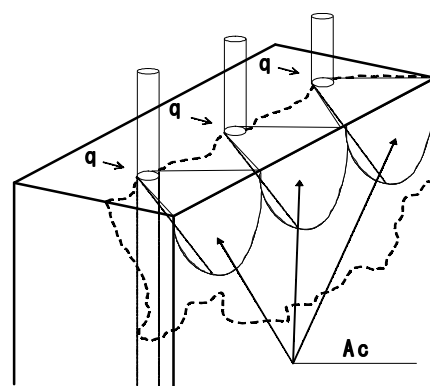


図-12 せん断耐力性能試験のひび割れ性状

験を実施したところ、D16、D25ともに“A級”、“S”と評価できた。

- 2) 鋼管スリーブの膨張に伴う鋼管軸方向のひび割れを防止するために、厚さ2mmのゴムシートの巻きつけが有効である。
- 3) HEM鉄筋継手により接合したRCスラブは、接合部を持たない一体型のRCスラブと同等の曲げ耐力を有する。
- 4) HEM鉄筋継手を有する接合面の接着には、エポキシ樹脂が適切と考えられる。
- 5) せん断耐力性能試験を行いコーン破壊について検討したところ、計算値の2倍程度の耐力が得られており、安全側でコーン破壊の発生の判定を行えることが分かった。

参考文献

- 1) 原田哲夫ほか：HEMを用いた鉄筋継手に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.871-876，2001.6
- 2) 土木学会：鉄筋継手指針，コンクリートライブラリー第49号，1982.2
- 3) 原田哲夫ほか：静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究，土木学会論文集，第360号，pp.61-70，1985.8
- 4) 全国ボックスカルバート検討委員会：鉄筋コンクリート製プレキャストボックスカルバート道路埋設指針，1990.3
- 5) 日本建築学会：各種合成構造設計指針，1985