

連続繊維シートを応用したコンクリートの 一軸引張試験方法の開発

青木優介¹・下村 匠²

¹正会員 工博 木更津工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

²正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

高い確率で供試体が試験区間で破断すること、供試体の作製、荷重が比較的容易であること、試験区間がある程度の長さを有し、試験区間のひずみが測定できること、これらの特長を備えたコンクリートの一軸引張試験方法について検討を行った。ドッグボーン型供試体、角柱型供試体の検討を経て、連続繊維シートにより端部を補強した角柱型供試体を用いる試験方法を開発した。本供試体は、荷重伝達用の埋込みボルトに起因した端部における破断を防いで、試験区間で破断させることができ、ひずみの測定も安定して行うことができた。また、ドッグボーン型供試体に比べて、試験区間を長くでき、軽量化を実現できた。

Key Words: uniaxial tensile test, continuous fiber sheet, dog-bone shape specimen, anchor bolt

1. はじめに

著者らは、コンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する研究において、荷重速度と乾燥条件を変化させた場合の、一軸引張応力下におけるコンクリートの変形および破壊性状に関する系統的实验を行った¹⁾。コンクリートの一軸引張試験については、安定性に優れた一般的な試験方法が確立されていない現状があるので、研究目的に適う実験データを取得するためには、まず試験方法に関する検討を行わねばならなかった。実験的検討を重ねた結果、ほぼ満足に行く試験方法の確立に成功するとともに、コンクリートの一軸引張試験に関するいくつかの実験上の知見を得た。本稿は、それらについて述べるものである。

コンクリートの一軸引張試験方法の検討において著者らが重視したことは、①高い確率で供試体が試験区間で破断すること、②供試体の作製、荷重が比較的容易であること、③試験区間がある程度の長さを有し、破断荷重だけでなく、荷重中の試験区間の領域平均的な変形(ひずみ)が測定できること、である。このうち、③は研究目的によっては必ずしも要求されるものではないが、①②は一軸引張試験を行う多くの研究に共通であると考えられる。特に①は、この種の試験方法の検討において最も重要で興味の対象となる項目である。著者らは、試行錯誤の結果、連続繊維シートを用いて供試体端部を外部より補強する試験方法を開発した。

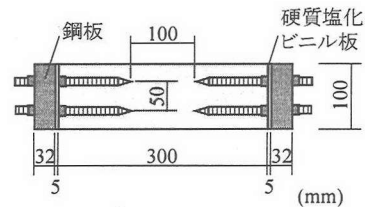


図-1 吉本らの一軸引張試験供試体

2. 既往の一軸引張試験法における問題点

既往のコンクリートの一軸引張試験法に関する研究においても、いかに安定して供試体を試験区間で破断させるかということに主眼が置かれている。主として、供試体両端部における引張力伝達方法と、試験区間を含む部分の供試体の形状に関して、種々の工夫が試みられている。

吉本ら²⁾は、図-1に示す断面形状が一般的な角柱供試体を用いて試験を行った。引張力は供試体端部に埋め込んだ複数本のボルトを介して伝達させている。埋込みボルトに起因する局所応力により供試体が定着部で破断することを防ぐために、ボルトの先端を尖らせ、その表面に溝を彫りこむ加工を施している。このことにより、供試体を試験区間で破断させることができたと報告している。ただし、埋込みボルト先端の形状やその表面の溝の形状に、試験の成功率が敏感に左右されることも指摘している。したがって、実験条件が多少変化しても、安定した成功率を保証されるためには、さらなる試験方法の工夫が必要と思われる。

秋田ら³⁾は、破断面を誘導する切欠きを設けた供試体を用いた一軸引張試験を提案している。確かにこの方法によると、破断位置が限定されるため、破断強度を安定して測定するには適している。しかし、破断前の変形が均一な段階におけるコンクリートのひずみを測定することが原理的にできないので、本研究の目的には完全には合致しない。

試験区間で破断が生じるようにし、かつ試験区間の長さがある程度確保する方法として、試験区間の断面を絞ったドッグボーン型供試体を用いた一軸引張試験が行われている⁴⁾。断面形状が異なる角柱供試体を用いた場合に比較すると、端部での破断は生じにくい、断面が変化する曲面部の成型に注意を要すると思われる。また、曲面部は試験区間に含まれないので、供試体全長に占める試験区間の割合は大きくできない。

供試体の両端部において引張力を伝達する方法として、埋込みボルトを用いる方法の他に、チャック方式⁵⁾、成型したキャップを利用する方法⁶⁾、接着剤を用いる方法などがある。いずれの方法も一長一短であると考えられるが、既往の研究における実績の多さから、本研究ではコンクリート端部に埋め込んだボルト用いる方法を採用することにした。

3. ドッグボーン型供試体に関する検討

(1) 実験概要

本研究では、まず図-2に示すドッグボーン型供試体を用いた一軸引張試験を試みた。全10体の供試体を試験した。この試験法を用いて行う本来の研究目的から、各供試体の荷重速度と乾燥条件は表-1のように設定した。

断面変化部の曲面形状は、JIS原案の一軸拘束収縮試験体⁷⁾と同様の形状にした。ただし、本研究では、曲面部分の型枠は発泡スチロールの表面をガムテープで覆って作製した。そのため、この部分の供試体の作製精度は、鋼製型枠の部分に比べて劣る。

断面積が一定となる試験区間は、供試体中央部の100mmの区間となる。荷重を伝達する各ボルトの先端部には、吉本らの試験法にならない、鉛筆状に尖らせた後に溝を掘り込む加工を施した(写真-1)。

実験には水セメント比50%の普通コンクリートを使用した。コンクリート打設後、供試体はポリエチレンシートを用いて乾燥を防ぎ、室温20℃の室内に24時間静置した。その後脱枠し、乾燥を防ぐためにただちに供試体全表面をアルミテープでシールし、再び同室内に28日間以上静置した。

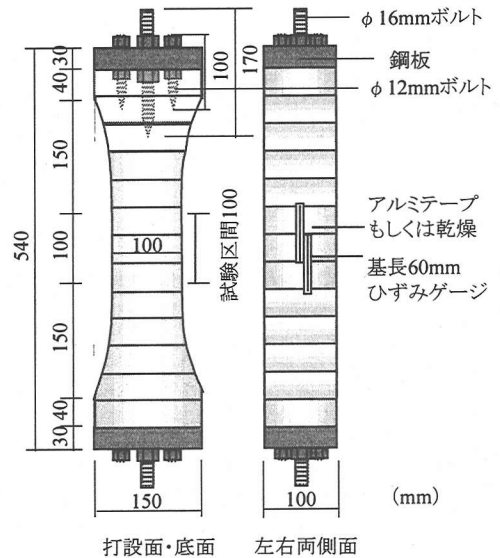


図-2 ドッグボーン型一軸引張試験供試体

表-1 各供試体の荷重速度および乾燥条件

供試体の種類	荷重速度 (Pa/秒)	乾燥条件	破断に要する時間
ドッグボーン型 (各1体)	10000		6分
	14	荷重前: 封かん	3.8日
	6	荷重中: 封かん	8.0日
	3		16.2日
	10000	荷重前:	6分
	10000	数日間乾燥	6分
角柱シート補強型 (各1体)	10000	荷重中: 乾燥	6分
	14		2.8日
	6	荷重前: 封かん	6.4日
	3	荷重中: 乾燥	12.8日
	10000	荷重前: 封かん	6分
	25	荷重中: 封かん	2.1日
角柱シート補強型 (各1体)	10000	荷重前:	6分
	10000	数日間乾燥	6分
	10000	荷重中: 乾燥	6分
	25		1.6日
	10	荷重前: 封かん	4.0日
	5	荷重中: 乾燥	8.2日

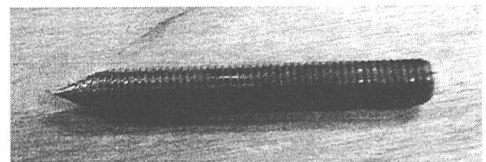


写真-1 加工したφ12mmボルト

荷重には、荷重速度をプログラムできる油圧試験機を用いた。荷重は試験機付属の荷重計により測定し、試験区間のひずみは、図-2に示すように、左

右両側面に貼付けた基長 60mm のひずみゲージにより測定した。ひずみゲージは、部分的にアルミテープを切り抜き、コンクリート表面に直接接着した。

(2) 供試体の破断性状

全 10 体の供試体のうち、8 体は写真-2(a)のように試験区間内で破断した。荷重速度と乾燥条件によらず、高い確率で試験区間で破断できることが明らかとなった。残りの 2 体は、写真-2(b)のように試験区間から外れた断面変化部で破断した。

(3) 荷重中の供試体のひずみの測定

封かん状態のまま、通常の荷重速度（破断までに約 6 分を要する荷重速度）で荷重した供試体の応力と、左右両側面に接着したひずみゲージで測定したひずみ（各面 2 枚のゲージの平均値）の関係を図-3 に示す。ひずみゲージの測定値は安定しており、左右両側面のひずみの差は小さい。この条件下では、ひずみの測定が良好に行えたといえる。

しかし、低速の荷重速度で荷重する供試体では、ひずみゲージの測定値が乱れ、正常なひずみの測定が行えない場合がほとんどであった。例として、封かん状態のまま、低速の荷重速度（破断までに約 8 日を要する荷重速度）で荷重した供試体の応力と、左右両側面のひずみの関係を図-4 に示す。

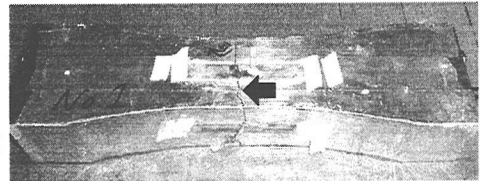
なお、著者らは、これまでも、今回と同じひずみゲージおよび接着剤を用いてコンクリートの自由収縮供試体のひずみを長期的に計測しており、その値が、コンタクトチップによる測定値、および内部埋め込み型のひずみゲージの値とほとんど相違ないことを確認している。したがって、図-4 のひずみの測定値の乱れは、ひずみゲージや接着剤の不具合によるものではないと考えている。

先述したように、ドッグボーン型供試体は、作製上の問題から、ひずみゲージ接着面のコンクリート表面は完全に平滑ではない。このことがひずみの測定値に悪影響を及ぼした可能性がある。しかし、仮にそうであるとしても、なぜ低速荷重時にのみその影響が現れたのか明らかではない。

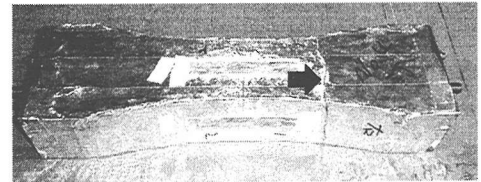
4. 連続繊維シートにより補強した供試体に関する検討

(1) 開発に至った経緯

ドッグボーン型供試体は、高い確率で試験区間において破断させることができるが、断面変化部の曲面の作製が難しい。また、供試体の全長 540mm に占



(a) 試験区間内で破断した供試体



(b) 試験区間外で破断した供試体

写真-2 ドッグボーン型供試体の破断状況

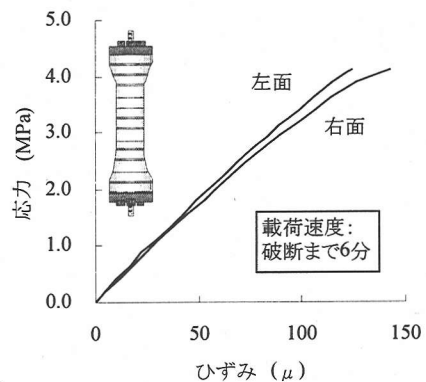


図-3 ドッグボーン型供試体の応力-ひずみ関係 (通常速度で荷重)

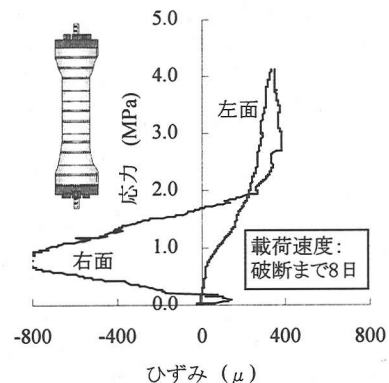


図-4 ドッグボーン型供試体の応力-ひずみ関係 (低速で荷重)

める試験区間 (100mm) の割合が小さいことは本来望ましい特徴ではない。そこで、断面が一様な角柱供試体による一軸引張試験を検討することにした。

予備実験として、吉本らの供試体を参考に図-

5(a)の供試体を作製した。100×100mm断面の角柱であり、コンクリート部分の全長は480mmである。供試体両端部の荷重治具を図-5(b)に示す。吉本らの試験法にならない先端を加工したφ12mmボルト

(写真-1)4本を、厚さ30mmの鋼板に固定している。ただし、著者らは試験区間の変形を測定する研究目的から、試験区間を長くする必要があり、ボルトの埋込み長さを50mmと吉本ら(100mm)よりも短くしている。鋼板中央には、試験機と連結させるφ16mmボルトを固定している。

図-5(a)の供試体を3体試験したところ、写真-3のように3体ともボルト先端付近で供試体が破断し、試験区間で破断させることはできなかった。ボルトの埋込み長さが短いことが一因とも考えられる。しかし、元来、埋込みボルト先端の形状やその表面の溝の形状が、破断位置の安定性を大きく左右することが吉本らにより指摘されている。したがって、埋込みボルトの形状・寸法に改良を加えることにより試験の成功率を飛躍的に改善するのは難しいと予想される。そこで著者らは、他の方面からの工夫を行った方がよいと考え、ボルト先端部付近を供試体表面から補強することにより、破断位置を試験区間に誘導することを試みた。供試体を補強する方法として、既設コンクリート構造物の補修補強に用いられている連続繊維シートを利用することとした。

(2) 実験概要

連続繊維シートにより補強した供試体を図-6に示す。供試体の寸法・形状、荷重治具、ボルトの加工・埋込み深さは、全て図-5の予備実験供試体と同じである。供試体中央部の300mm区間を試験区間とし、それ以外のコンクリート表面と荷重治具の側面に連続繊維シートを接着している。

シートには炭素繊維シートを用い、接着は一般的な方法(図-7)によった。シートの接着作業工程が追加されるものの、ドッグボーン型供試体のように曲面部分を成型する必要はなく、重量も5kg程度軽くなる(ドッグボーン型は約21kg)。

全10体の供試体について荷重速度や乾燥条件を変化させた一軸引張試験を行った。各供試体の荷重速度および乾燥条件は表-1に示している。実験に用いたコンクリートや養生方法は、ドッグボーン型供試体の場合と同様である。シート接着は、養生期間中の材齢23日において行った。

荷重試験の方法もドッグボーン型供試体の場合と同様である。試験区間のひずみは、図-6に示すように、左右両側面に貼付けた基長60mmのひずみゲージにより測定した。

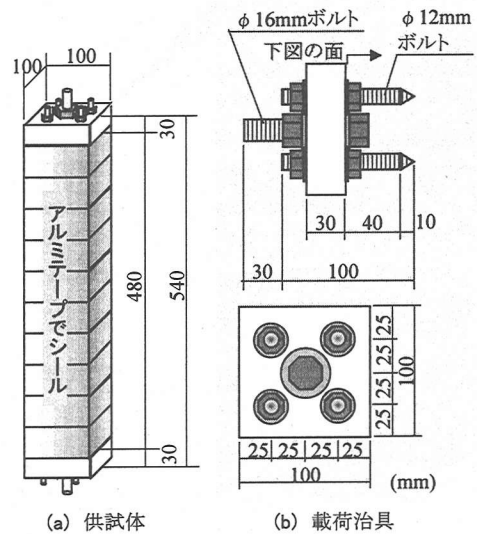


図-5 角柱型一軸引張試験供試体と荷重治具

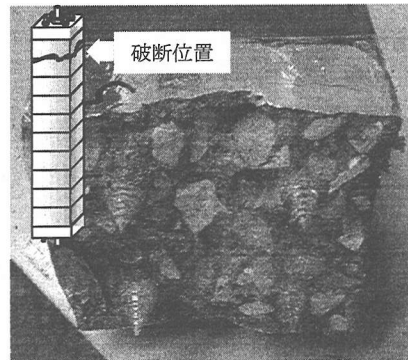


写真-3 角柱供試体の破断位置・破断面

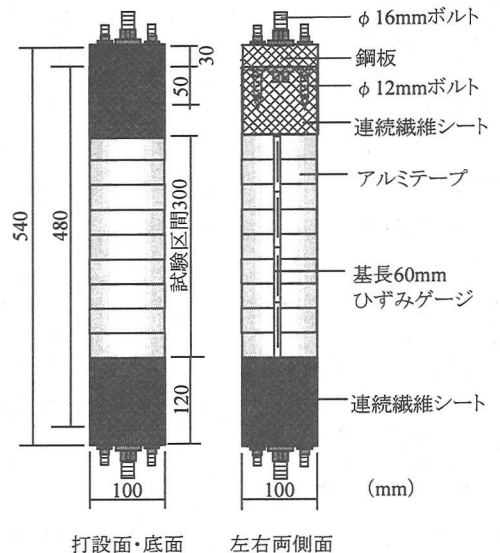


図-6 連続繊維シートにより補強した一軸引張試験供試体

(3) 供試体の破断性状

全 10 体の供試体のうち、9 体は写真-4(a)のように試験区間内で破断した。荷重速度と乾燥条件によらず、高い確率で試験区間で破断できることが明らかとなった。残りの 1 体は、写真-4(b)のように試験区間から外れたシート補強部で破断した。破断面には埋込みボルトの先端が露出しており、破壊がボルト先端部より生じたことを示唆していた。

連続繊維シートにより端部を補強することで、ボルトに起因した局所応力が供試体の破断位置に及ぼす影響を鈍化させることができ、その結果、試験の成功率が向上すると考えられる。

(4) 荷重中の供試体のひずみの測定

封かん状態のまま、通常の荷重速度（破断までに約 6 分を要する荷重速度）で荷重した供試体の応力と、左右両側面のひずみゲージで測定したひずみ（各面 4 枚のゲージの平均値）の関係を図-8 に示す。ひずみゲージの測定値は安定しており、左右両側面のひずみの差は小さい。この条件下では、ひずみの測定が良好に行えたといえる。

封かん状態のまま、低速の荷重速度（破断までに約 5 日を要する荷重速度）で荷重した場合を図-9 に示す。ドッグボーン型供試体の低速荷重の場合に現れたひずみの測定値の乱れはなかった。破断近くの高応力域において、左右両側面のひずみの差が大きくなっている。本結果からでは確実な判断はできないが、供試体に 2 次曲げが生じた可能性がある³⁾。しかし現段階の本実験方法では、この程度が制御限界と考えている。

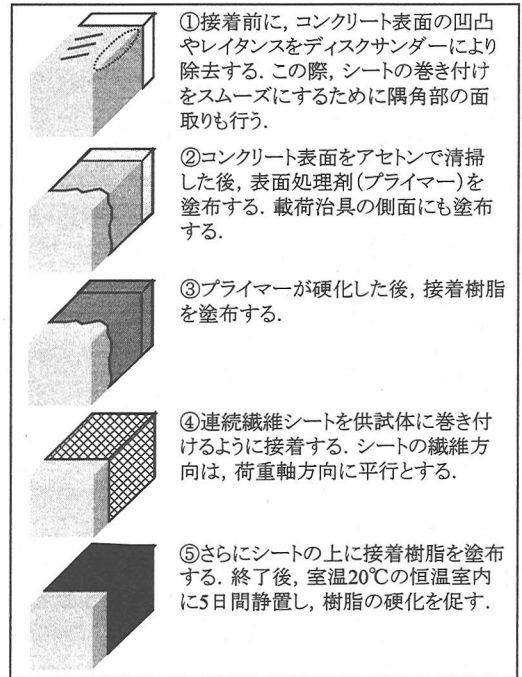
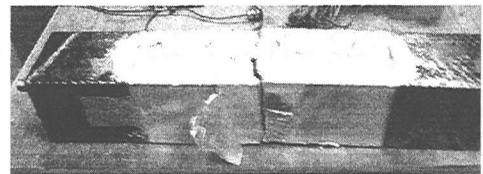
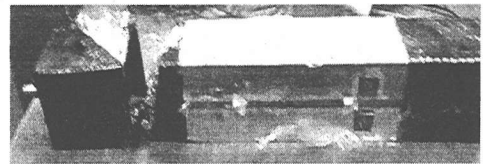


図-7 連続繊維シートの接着作業



(a) 試験区間内で破断した供試体



(b) 試験区間外で破断した供試体

写真-4 連続繊維シートにより補強した供試体の破断状況

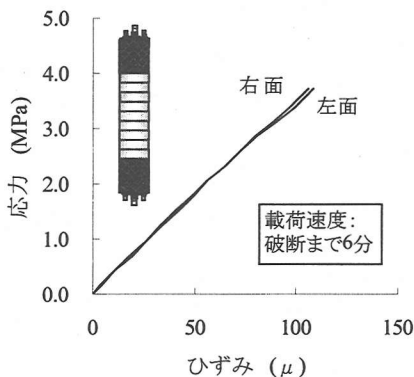


図-8 連続繊維シートにより補強した供試体の応力-ひずみ関係 (通常速度で荷重)

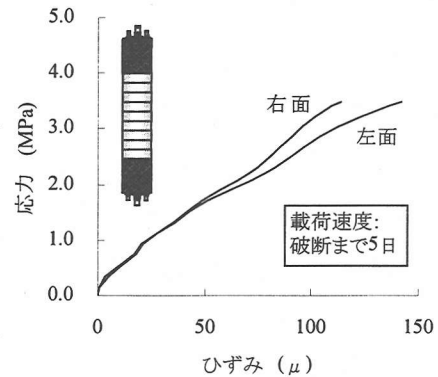


図-9 連続繊維シートにより補強した供試体の応力-ひずみ関係 (低速で荷重)

5. まとめ

高い確率で供試体が試験区間で破断すること、供試体の作製、载荷が比較的容易であること、試験区間がある程度の長さを有し、試験区間のひずみが測定できることを開発目標として、コンクリートの一軸引張試験方法について検討した。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 試験区間の断面積を端部の断面積より小さくしたドッグボーン型供試体は、高い確率で試験区間での破断を生じさせることができる。しかし、断面変化部の曲面を作製しなければならず、試験区間の大きさに比べ供試体が大型となる。また本研究における実験では、ドッグボーン型供試体を用いた場合、低速载荷の場合のひずみの測定に不具合が生じた。その理由は明らかではないが、供試体の作製精度に起因すると考えている。
- (2) 角柱供試体の両端部を連続繊維シートにより外部から補強することにより、埋込みボルト付近での破断を防ぎ、高い確率で試験区間での破断を誘導できることを明らかにした。この供試体は、ドッグボーン型供試体と比較して、曲面部分を成型する必要がなく、試験区間を大きくでき、軽量である。また、低速载荷の場合を含め、ひずみの測定を安定して行うことができた。

謝辞：本研究で用いた連続繊維シートおよび接着樹脂は、三菱化学産資㈱に提供していただきました。ここに記して、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 青木優介, 下村匠: 一軸線拘束されたコンクリートの乾燥収縮応力の導入とひび割れ発生条件, コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム論文集, pp.325-332, 2001.7.
- 2) 吉本彰, 長谷川博, 兼行啓治, 白上博明: 純引張試験用コンクリート供試体に関する研究, セメント技術年報, Vol.32, pp.231-234, 1978.
- 3) 秋田宏, 小出英夫, 外門正直: コンクリートの直接引張試験における実際的方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.643-648, 1999.
- 4) 笠井芳夫, 横山清, 松永龍彦: ひずみ速度を変えて载荷した初期コンクリートの引張性状に関する研究, セメント技術年報, Vol.40, pp.379-382, 1986.
- 5) 上田賢司: コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れの予測に関する基礎的研究, 大分大学学位論文, pp.82-84, 1999.3.
- 6) Domene, P.L.: Uniaxial tensile creep and failure of concrete, *Magazine of Concrete Research*, Vol.26, No.88, pp.144-153, 1974.12.
- 7) 仕入豊和, 川瀬清孝, 飛坂基夫: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験における諸問題に関する検討, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.388-393, 1991.
- 8) 岳尾弘洋, 松下博通, 牧角龍憲, 長島玄太郎: CFRP接着工法における炭素繊維シートの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.1599-1604, 1997.

(2002. 1. 11 受付)

DEVELOPMENT OF A METHOD OF UNIAXIAL TENSILE TEST OF CONCRETE USING CONTINUOUS FIBER SHEET

Yusuke AOKI and Takumi SHIMOMURA

This paper describes an experimental study on uniaxial tensile test of concrete, in which concrete failures within the testing zone in specimen at high possibilities, specimen can be easily prepared and tested, and the testing zone of specimen has enough length for measurement of strain. After the trial of the dog-bone shape specimen and the conventional prismatic specimen, the authors developed the prismatic specimen, which was externally strengthened with continuous fiber sheet. It was verified that this specimen ensured failure of concrete in the testing zone instead of failure in the end caused by embedded anchor bolts. Strain of concrete at elastic stage can be successfully measured. The preparation of this specimen can be easier than that of the dog-bone shape specimen.