

論文 PC 外ケーブル定着部の疲労および持続荷重の耐久性に関する研究

俵 道和^{*1}・彦坂 熙^{*2}・小嶺 啓蔵^{*3}・二井谷 教治^{*4}

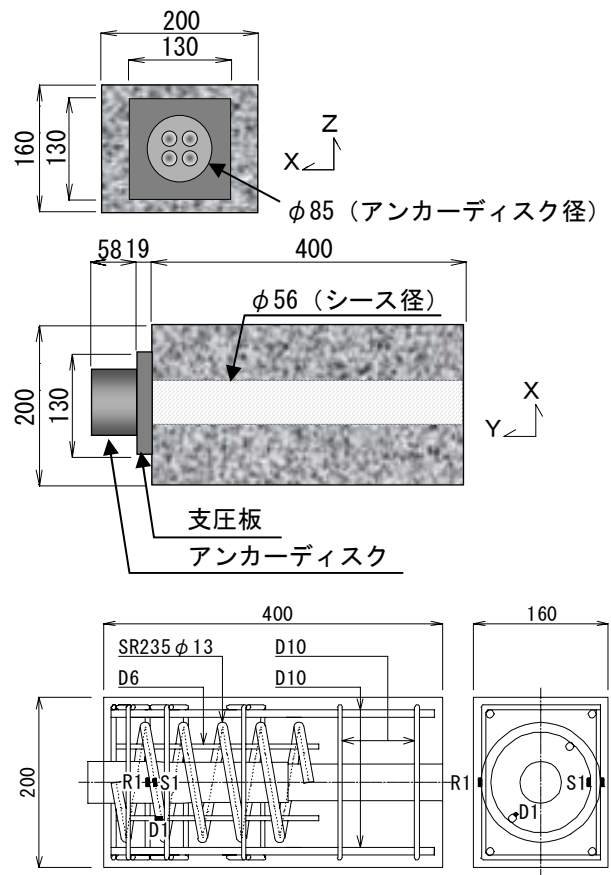
要旨：外ケーブル定着部の疲労载荷および持続载荷に対する耐久性を実験により検証した。その結果、初期に発生したひび割れは長期的に増加するため、初期ひび割れ幅を小さく抑える必要があることが明らかとなった。次に、支圧板構造を変えた定着部モデルを提案し、疲労試験と破壊試験を行った。検討の結果、支圧板厚を厚くしたものや囲みリブで補剛することで、初期ひび割れの発生と繰り返し荷重载荷に対し耐久性および耐荷力が向上することが明らかになった。

キーワード：外ケーブル，定着部，疲労試験，持続载荷試験，耐久性，耐荷力

1. はじめに

PC 外ケーブル工法が内ケーブル工法と相違する点は、定着部の長期耐久性にある。外ケーブル工法の場合、定着された PC 鋼材の緊張力は永久に定着部で固定支持され、緊張力や活荷重による変動荷重をその部分で受け持つことになる。内ケーブル工法の定着部は導入時にその耐力が決定されるのに対して、外ケーブル工法の定着部は供用荷重時および終局荷重作用時にその耐力が求められることになる。

本研究では、外ケーブルによる大きな緊張力を直接受ける鉄筋コンクリート構造体としての定着部に着目した。まず定着部の疲労耐久性、次いで緊張力による長期持続荷重に対する定着部の耐久性をそれぞれ実験により検証し、さらに支圧板構造を変えた定着部モデルの疲労試験と破壊試験に基づき、耐久性に優れた外ケーブル定着部を提案する。



- R1：横方向鉄筋ひずみ
- D1：軸方向ダミー鉄筋ひずみ
- S1：スパイラル筋ひずみ（裏表平均）

図-1 供試体寸法図および測定位置

2. 実験供試体

試験方法は、土木学会のコンクリート標準示方書¹⁾ (11.PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法) ならびに建築学会のプレストレストコンクリート設計施工規準・同解説²⁾ (付 6-1 定

*1 オリエンタル建設(株) 技術研究所 (正会員)
 *2 九州大学大学院工学研究院 (正会員)
 *3 オリエンタル建設(株) 大阪支店 (正会員)
 *4 オリエンタル建設(株) 技術研究所 (正会員)

着部の試験)に準じ、グラウトは施さず試験を行った。ケーブル定着工法は、荷重試験機の能力を勘案して4S12.7を選定した。緊張材の規格引張荷重は $P_u=733\text{ kN}$ である。供試体寸法および配筋はOBC (Oriental Bearing Core) 工法に準じて決定した。図-1に供試体寸法図および測定位置を示す。製作した供試体種類を表-1、基準強度 36 N/mm^2 のコンクリート材料試験結果を表-2に示す。配筋について、スパイラル筋は、丸鋼SR235($\phi 13\text{ mm}$)を使用し、横方向鉄筋には異形鉄筋SD295A(D10)を使用した。各供試体2本ずつ配置した軸方向鉄筋D6は、供試体の軸方向ひずみ測定を目的としたダミー鉄筋である。疲労荷重試験および持続荷重試験共に、使用限界状態までの静的荷重試験を行った後、活荷重によるPC鋼材の張力変動を考慮しそれぞれの荷重試験を行った。

表-1 供試体種類

試験種類	供試体名称	繰返荷重回数 または 持続荷重日数
疲労荷重試験	C1	1000万回
	C2	200万回
	C3	
持続荷重試験	S4	650日
	S5	

表-2 コンクリート材料試験結果

材 齢 (日)	圧縮 強度	引張 強度	弾性 係数	試験時期
	(N/mm ²)			
7	30.7	—	—	—
18	36.0	3.20	29800	持続試験開始時
28	37.6	—	—	—
75	39.0	3.54	30500	疲労試験中間時
672	40.8	3.23	30000	持続試験終了時

3. 疲労荷重

疲労試験で繰り返し荷重する上限荷重はコンクリート標準示方書の使用限界状態における制限値 511 kN ($0.7 P_u$)とし、緊張材の応力変動を過去の設計事例として 100 N/mm^2 (張力変動 39 kN)と仮定して下限値を 472 kN ($0.65 P_u$)と設定した。なお、荷重振動数は 10 Hz とした。荷重繰り返し回数は200万回を基本としたが、疲

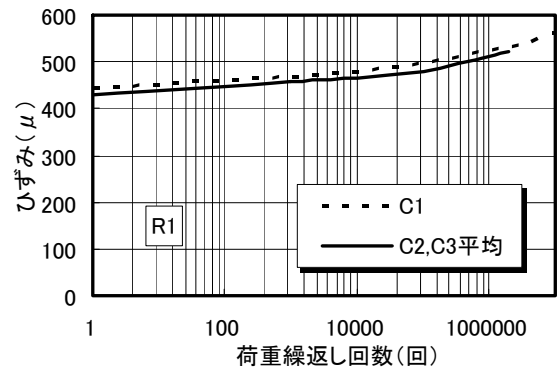


図-2 横方向鉄筋ひずみ (疲労)

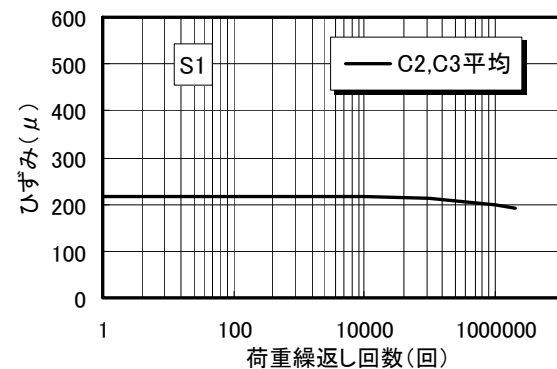


図-3 スパイラル鉄筋ひずみ (疲労)

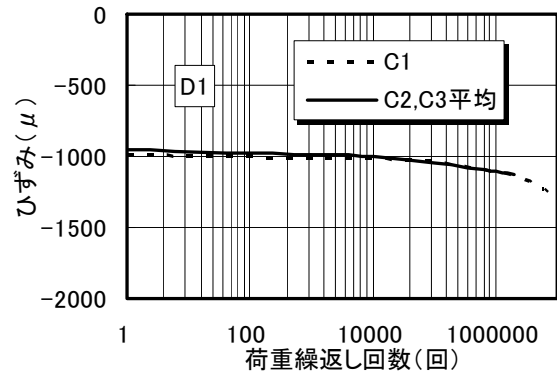


図-4 軸方向ダミー鉄筋ひずみ (疲労)

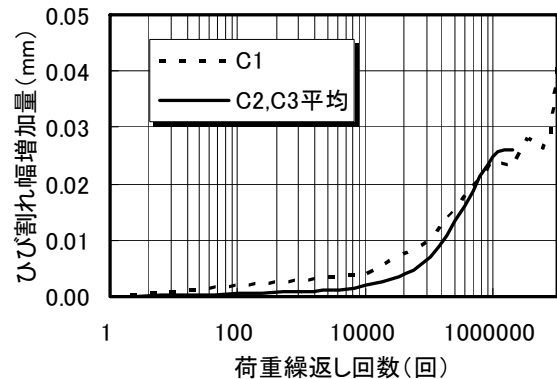


図-5 ひび割れ幅増加量 (疲労)

労試験体 3 体のうち 1 体 (C1) については 1000 万回まで延長した。

図-2 に示す横方向鉄筋の引張ひずみは、試験中経時的に増加している。疲労による増加ひずみは 200 万回、1000 万回でそれぞれ 92μ 、 115μ である。横方向鉄筋ひずみの疲労試験中の増加は 100μ 前後であり、応力換算すると 20 N/mm^2 程度の増加量となる。静的荷重および疲労試験の結果、横方向鉄筋は供用時に作用する固定荷重に対して十分に余裕があり、繰り返し荷重に対しても高い疲労性能を示すことが確認された。

図-3 に示すスパイラル筋のひずみは 200μ 程度で、荷重回数が増えても経時的にほとんど変化していない。疲労試験中の横方向鉄筋ひずみの増加は、供試体表面のひび割れ進展によるものであるが、スパイラル筋のひずみは変化しないのは、ひび割れがスパイラル筋で囲まれたコアコンクリートまで達しないためと思われる。

図-4 に示す軸方向ダミー鉄筋の増加ひずみは 200 万回で -177μ 、1000 万回で -302μ である。

静的荷重試験の上限荷重 511 kN における各供試体のひび割れ幅を目視確認した後、供試体の 2 側面 (表・裏面) の主ひび割れ各 1 本にパイ型変位計を取り付け、疲労試験中の荷重繰り返し回数増加に伴うひび割れ幅増加量を図-5 に示す。増加ひび割れ幅は、200 万回荷重後 C2、C3 供試体はそれぞれ 0.025 、 0.027 mm であり、C1 供試体は、350 万回付近から急激に増加したひび割れ幅が、1000 万回終了時は 0.04 mm に達した。コンクリート標準示方書³⁾によるかぶり厚から算定した本供試体の許容ひび割れ幅は $W_a = 0.005c = 0.05 \text{ mm}$ (かぶり厚 $c = 10 \text{ mm}$) であるが、目視確認による初期ひび割れ幅 (0.04 mm 程度) と繰り返し荷重による増加ひび割れ幅を合計すると 0.08 mm 程度となり、許容値を越えてしまう。ただし、200 万回試験には 2 日程度、1000 万回試験には 11 日程度を要し、疲労試験中の供試体には持続荷重が荷重され続けることから、 0.04 mm の増加ひび割れ幅に対する持続荷重の影響を検証する必要がある。

4. 持続荷重

持続荷重用供試体 S4、S5 を図-6 のようにアンカーディスクを挟んで対称に設置し、温度 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ 、湿度 $\text{RH}60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室で持続荷重を荷重した。持続荷重の荷重管理は、パーソナルコンピュータを用いて $\pm 3\%$ の管理値で行い、手動ポンプで荷重調節を行った。荷重荷重期間は、測定されるひずみやひび割れの経時変化が十分小さくなる時点までとし、持続試験における荷重は、使用限界状態における制限値 $0.7 P_u$ ($=511 \text{ kN}$) とした。図-7~9 に持続荷重試験結果を示す。

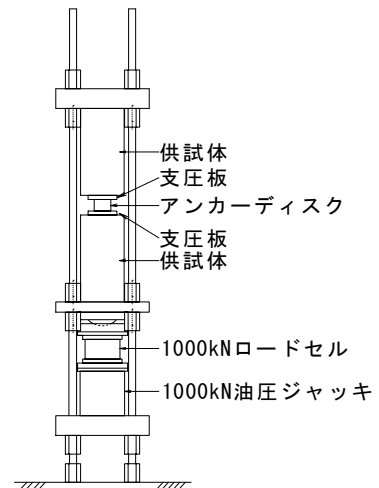


図-6 持続荷重試験状況

繰り返し疲労試験において、図-7 に示す横方向鉄筋ひずみ R1 は 100μ 前後 (初期ひずみの約 20%) の増加を示したが、持続荷重に対して経時的にほぼ一定であった。

持続荷重開始時において、図-8 に示す軸方向ダミー鉄筋圧縮ひずみは、 1030μ であり、また持続荷重による圧縮ひずみ増加量は、 3400μ であった。疲労試験において図-4 に示す軸方向ダミー鉄筋ひずみは 200μ 前後しか増加しておらず、これらのことから、軸方向増加ひずみは繰り返し荷重作用より荷重荷重の持続時間に依存しているものと考えられる。

図-9 に示すひび割れ幅増加量より、持続荷重日数 650 日後で 0.034 mm の増加ひび割れ幅を記録した。1000 万回の疲労試験では荷重日数 11 日

間を要し、その間のひび割れ幅増加量は 0.04 mm となった。持続載荷試験によれば、11 日後のひび割れ幅は 0.01mm であることから変動荷重の影響が大きくなっている。また、本研究では約 2 年間の持続載荷で 0.034mm とひび割れ幅が増加した。実際の構造物の供用期間を考えると、ひび割れ幅はさらに増加する可能性がある。以上のことから、初期の目視可能なひび割れ幅が 0.04mm とすると、外ケーブル定着部の設計に当り耐久性を重視し、疲労および持続荷重による増加を考慮する際には、初期ひび割れ幅を低く抑える必要がある。

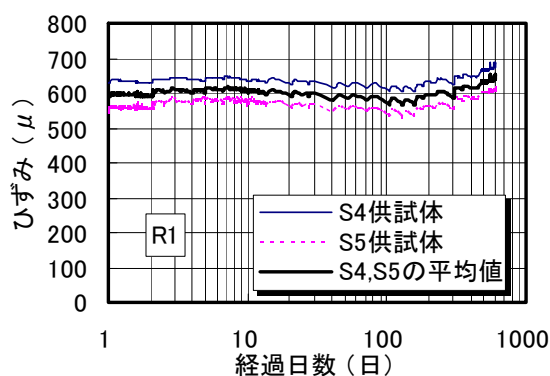


図-7 横方向鉄筋ひずみ (持続)

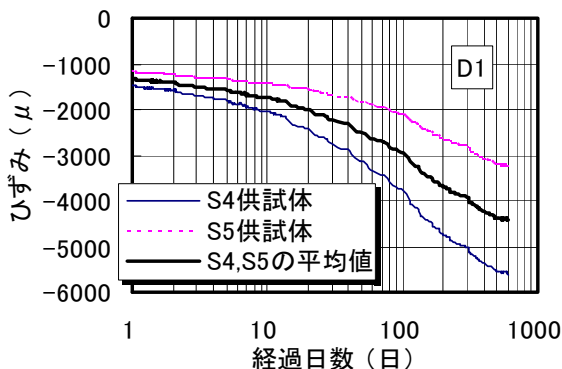


図-8 軸方向ダミー鉄筋ひずみ (持続)

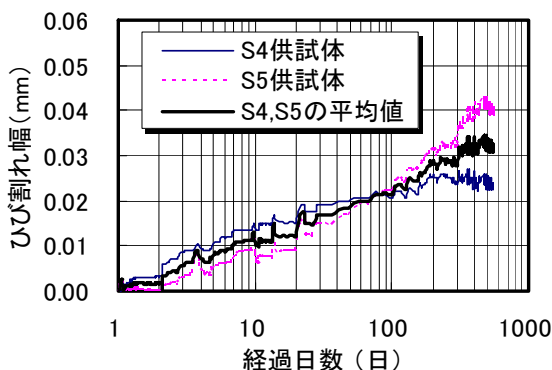


図-9 ひび割れ幅増加量 (持続)

5. 静的破壊試験

疲労試験および持続載荷試験後の静的載荷破壊試験より得られた、5 体の供試体の最大荷重と安全率を表-3 に示す。ここで、安全率とは、定着体供試体で想定する 4S12.7 緊張材の規格引張荷重 $P_u=733\text{kN}$ に対する最大荷重の比である。

疲労試験および持続載荷試験後共に安全率は 1.2 以上となり、OBC 工法の定着仕様に基づく供試体が疲労試験および持続載荷試験後にも安定した耐力を維持していることが確認された。

表-3 各試験後の静的載荷試験の最大荷重

供試体番号	最大荷重 (kN)	安全率 (最大荷重/緊張材引張荷重)
C1(疲労 1000 万回)	884	1.21
C2(疲労 200 万回)	915	1.25
C3(疲労 200 万回)	881	1.20
S4(持続載荷 650 日)	906	1.24
S5(持続載荷 650 日)	916	1.25

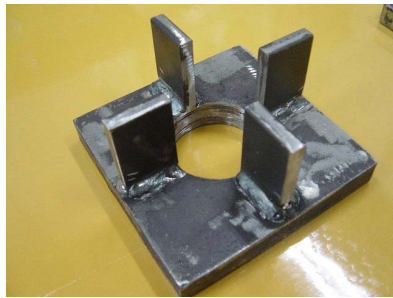
6. 定着部の耐久性能の改善

想定される荷重に対して、外ケーブル定着部の長期耐久性を確保するためには、定着部の静的耐荷特性、耐疲労特性、耐持続荷重特性等から構造性能を検証する必要がある。

上記成果を踏まえ、より耐久性の高い外ケーブル定着構造を提案するために、支圧板を OBC 工法の仕様より増厚または新たに補剛した定着部供試体に対して、疲労試験および静的破壊試験を実施し、構造性能を比較検証した。

6.1 試験方法

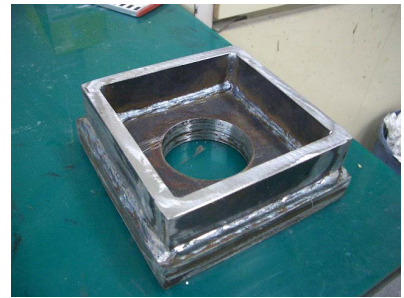
表-4 に供試体の種類を示す。なお、試験方法は先述の疲労試験と同様に行い、繰り返し載荷回数は 200 万回とした。シリーズ A の供試体 1A, 2A, 3A は、支圧板の厚さのみをそれぞれ 19mm, 25mm, 30mm に変えたものである。支圧板厚 19mm の供試体 1A は OBC 工法の PC ケーブル定着仕様に基づくもので、これを標準供試体として他の供試体の性能改善効果を評価する。



4B (リブ付支圧板)



5B (開孔リブ付支圧板)



6B (囲みリブ付支圧板)

図-10 シリーズ B 支圧板写真

シリーズ B の供試体 4B, 5B, 6B では、標準形供試体と同じ 19mm 厚の支圧板にそれぞれ形状の異なる埋込み式リブを取付けて支圧板の剛性を高めるとともに、コンクリートとの付着一体化を図り、定着部の耐久性能への効果を確認する。図-10 にシリーズ B 定着体の写真を示す。

表-4 供試体種類

シリーズ	供試体番号	供試体タイプ	支圧板厚 (mm)
A	1A	標準支圧板	19
	2A	支圧板増厚	25
	3A	支圧板増厚	30
B	4B	支圧板補剛 (埋込式・リブ付)	19
	5B	支圧板補剛 (埋込式・開孔リブ付)	19
	6B	支圧板補剛 (埋込式・囲みリブ付)	19

6.2 実験結果

200 万回疲労試験において図-11 に示す横方向鉄筋ひずみは平行的に増加しているが、一般的に初期ひずみが小さいほど疲労試験中の増加ひずみも小さいといえる。すなわち、初期ひずみが最小の供試体 3A は増加ひずみも最小の 109 μ であり、他方初期ひずみが最大の供試体 5B は 181 μ の最大増加ひずみを記録した。鉄筋ひずみの増加は疲労試験中のコンクリートのひび割れ進展に基づくはずであり、実際に、シリーズ A 各供試体については、後出のひび割れ幅増加量の経時変化に概ね対応している。

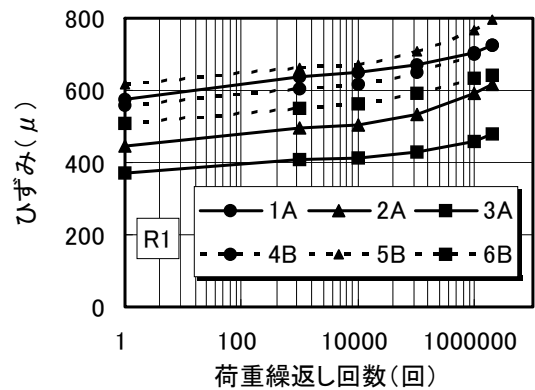


図-11 横方向鉄筋ひずみ (疲労)

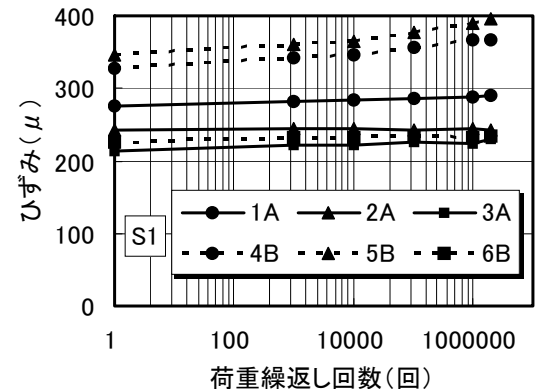


図-12 スパイラル鉄筋ひずみ (疲労)

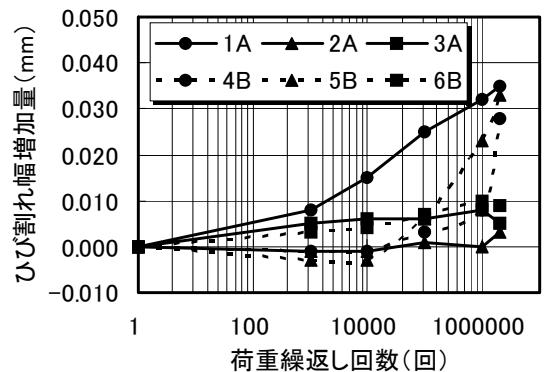


図-13 ひび割れ幅増加量 (疲労)

図-12 に示すスパイラル筋のひずみは、シリーズ A の供試体とシリーズ B の供試体 6B のひずみが 200 万回繰り返し荷重を受けてもほとんど増えないのに対し、供試体 4B と 5B のスパイラル筋ひずみだけがともに 50 μ ほど増加した。

図-13 に示す増加ひび割れ幅は、目視によるひび割れ発生荷重が最も小さかった供試体 1A で最大値 0.035 mm、支圧板を増厚したシリーズ A の供試体 2A, 3A で最小の 0.003~0.005 mm を記録した。供試体 2A, 3A とともに支圧板を囲みリブで補剛する供試体 6B の有効性は、横方向鉄筋の引張ひずみ挙動からも確認できる。シリーズ B の供試体 4B, 5B は、ともに疲労試験の終盤でひび割れ幅が急増した点が懸念される。外ケーブル定着部の耐久性を、初期ひび割れ発生と繰り返し荷重載荷後のひび割れ増加から判断すれば、支圧板を厚くするシリーズ A と支圧板を囲みリブで補剛する供試体 6B のタイプが優位な構造と考えられる。

6.3 耐荷性状

各供試体は何れも 200 万回の疲労試験では破壊しなかった。疲労載荷試験終了後、静的単調載荷試験により破壊耐力を測定した。全 6 体の供試体の最大荷重、安全率、および標準供試体 1A に対する破壊耐力の比を表-5 示す。図-14 に、各供試体の目視により確認されたひび割れ発生荷重と破壊耐力の比較図を示す。

支圧板形状を変えた供試体に、疲労試験後の破壊試験を行った結果、標準供試体で安全率 1.2 となり安全性が確認された。また支圧板形状を変えたいずれの供試体についても標準供試体以上の安全率を確認した。破壊耐力は、支圧板をリブで補剛した供試体 4B の最大荷重が全供試体中最も高くなったが、定着部の性能を破壊耐力とひび割れの観点から着目すると、疲労載荷によるひび割れ増加量が小さく、初期ひび割れ発生荷重が大きく、施工面から考えても支圧板を厚くしたシリーズ A が有効であると考えられる。

表-5 静的載荷試験の破壊耐力

供試体番号	最大荷重 (kN)	安全率	標準供試体に対する比
1A	881	1.20	1.00
2A	963	1.31	1.09
3A	1076	1.47	1.22
4B	1139	1.55	1.29
5B	1085	1.48	1.23
6B	972	1.33	1.10

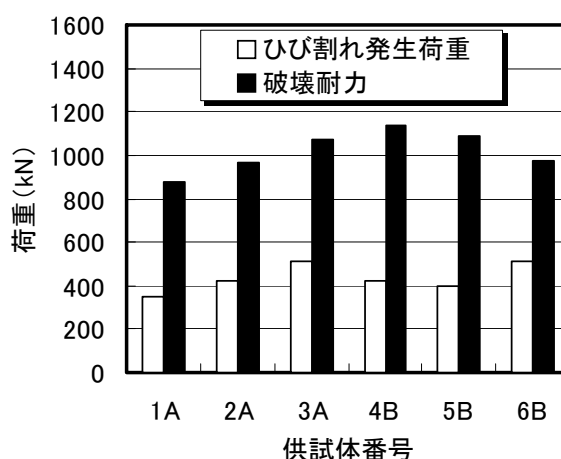


図-14 ひび割れ発生荷重と破壊耐力との比較

7. まとめ

- (1) 外ケーブル定着部の設計において、実物大モデルによる静的載荷試験を実施し、その初期ひび割れ幅から耐久性を検討する場合は、疲労試験によるひび割れ幅増加量と持続荷重試験による増加量をそれぞれ考慮して、許容初期ひび割れ幅を適切に決める必要がある。
- (2) 外ケーブル定着部の耐久性を、初期ひび割れ発生と繰り返し荷重載荷後のひび割れ増加から判断すれば、支圧板を厚くするシリーズ A のタイプが優位な構造である。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書規準編，土木学会，pp.76-77，2002
- 2) プレストレスコンクリート設計施工規準・同解説，日本建築学会，pp.415-420，1998
- 3) コンクリート標準示方書構造性能照査編，土木学会，2002