Japan Concrete Institute

コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17, No. 2 1995

論文 プレキャストブロックと外ケーブルを用いたPC単純梁及び連続梁の曲げ性状

山口 統央[*1]・睦好 宏史[*2]・小関 喜久夫[*3]・徳山 清治[*4]

要旨：本研究は、プレキャストブロックを用いた外ケーブルＰＣ単純梁及び２スパン連続梁の曲げ性状を実験的に明らかにしたものである。載荷実験結果から、プレキャストブロックの接合方法が曲げ性状に及ぼす影響はあまり見られないことが示された。また、梁内部に引張鉄筋が連続して配筋されていないためぜい性的な破壊性状を示したが、コンクリート圧縮部に拘束筋を配置することにより部材の変形能と破壊性状は大幅に改善されることが明らかになった。このような手法を連続梁に適用することにより、十分な回転能を確保できモーメント再分配が可能となることが明らかとなった。

キーワード：プレキャストブロック、外ケーブルＰＣ、拘束筋、連続梁

1. はじめに

外ケーブルＰＣ構造物は欧米各国においては多くの施工例があるが、わが国においては、本格的な実施工例はまだ少なく、プレキャストブロックと外ケーブルを用いたＰＣ構造物に関しては、その挙動さえもほとんど明らかにされていないのが現状である。一体打ちの外ケーブルＰＣ部材では、アンボンドＰＣ部材と比較して、変形が増大するにつれてケーブル位置の変化（偏心量の変化）により耐力が低減することが明らかにされている[1]。さらに、プレキャストブロックを用いた場合には、軸方向に連続した鉄筋が配筋されないこと、プレキャストブロックの接合法（エポキシ樹脂接着の有無）等が部材の挙動に大きな影響を及ぼすことが考えられる。

本研究は、プレキャストブロックを用いた外ケーブルＰＣ単純梁及び連続梁の曲げ載荷実験を行い、基本的な曲げ性状の把握、各種要因が曲げ性状に及ぼす影響、一体打ちした部材との相違等を明確にしたものである。

2. 実験概要

2.1 供試体

(1) 単純梁

供試体の形状寸法及びケーブルと

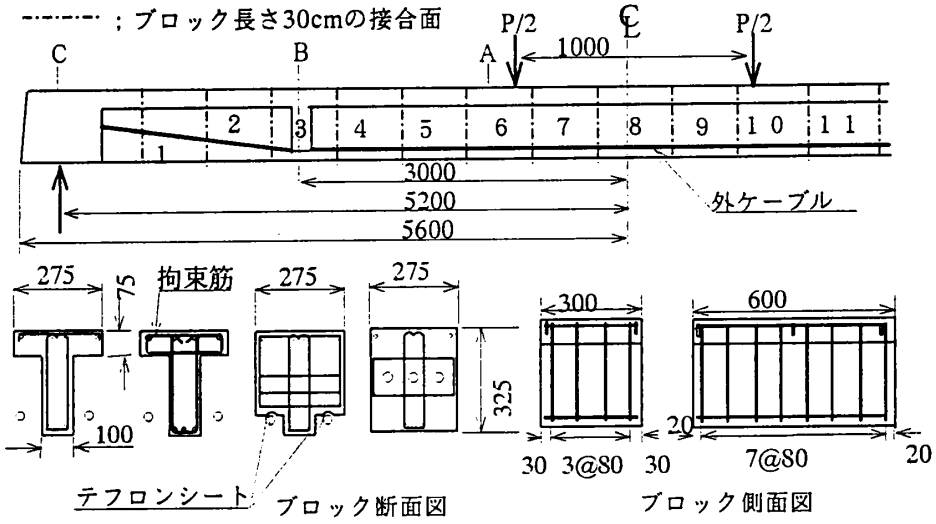


図-1 単純梁供試体形状および配筋状況(mm)

＊１埼玉大学大学院（現、鹿島建設（株））、工修（正会員）
＊２埼玉大学助教授 工学部建設工学科、工博（正会員）
＊３鹿島建設（株）建設総事業本部土木技術本部技術部技術開発課課長、工修（正会員）
＊４鹿島建設（株）技術研究所第一研究部第一研究室長、工修（正会員）

NII-Electronic Library Service

補強筋の配置を図-1に、補強筋の材料特性を表-1に示す。コンクリートブロック（以下ブロック）の長さは30cm（一部材のブロック数15個）で、いずれの場合も、はり両端に定着用ブロックを設けている。ブロックに配置した補強筋は、引張鉄筋比0.56%（D10、3本）、圧縮鉄筋比0.33%（D6、4本）とし、せん断補強筋にはD6を8cm間隔で配置した。ブロックの接合面の形状は、図-2に示すように雄または雌のシアーキーを一断面に6個設けている。ブロックの製作方法は、最初に奇数番号のブロックを打設し、型枠を取り外した後、硬化したブロックの接合面を型枠として残りの偶数番号のブロックを打設する方法を採用した。ブロックを組み立てる場合には、ブロック接合面にエポキシを塗布する場合（エポキシジョイント）と何も塗布しない場合（ドライジョイント）の２種類とし、エポキシを塗布した場合には、ブロックをはりの形状に組み立てた後、ブロックを固定するために、外ケーブルによりプレストレス（圧縮応力度7～15kgf/cm^2）を導入した。接合面に塗布したエポキシの圧縮強度は420kgf/cm^{2}および引張強度は193kgf/cm^{2}であった。

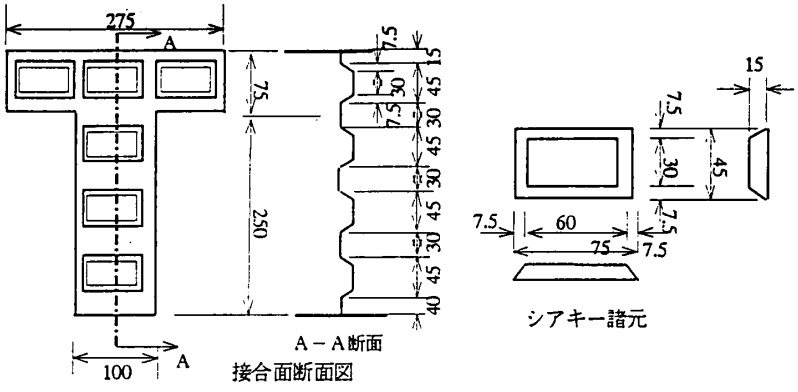


図-2　シアキー形状(mm)

(2)連続梁

供試体の形状寸法及びケーブルの配置を図-3に示す。ブロックの長さは30cmで（全ブロック数25個）、はり両端に定着用ブロックを設け、梁中央支点ブロックにはエポキシによりコンクリート製のデビエータを後付けした。ブロックに配置した補強筋は、スパン中央で引張鉄筋比0.70%（D13-2本）、中央支点上で0.87%（D13-2本、D6-2本）とし、せん断補強筋にはD6を8cm間隔で配置した。ブロックの接合面の形状及び製作方法は、単純梁と同一とした。ケーブルの有効高さは、スパン中央で22.5cm、中央支点上で17.5cm（梁上面から15cm）とした。

2.2　実験要因

(1)　単純梁

実験要因を、表-2に示す。No.2では、接合方法による影響を調べるためドライジョイントとし、ブロックの圧縮じん性を改善し、はり全体の変形能を高めるために、No.3およびNo.4には拘束筋をスパン中央のブロック５個に配筋した。No.5は、内ケーブルと外ケーブルを併用した供試体である。内ケーブルについては、エポキシ接合完了後プレストレスを導入しグラウトを行った。なお、供試体No.6は同一形状寸法を持つ一体打ちした外ケーブルＰＣはり部材で、比較のために既往の実験を引用したものである[1]。この場合、軸方向補強筋は連続している。ケーブルはＰＣ鋼より線SWPR7Aφ15.2を２本使用し、内外ケーブル併用型供試体には、外ケーブルのみの場合とケーブル断面積が等し

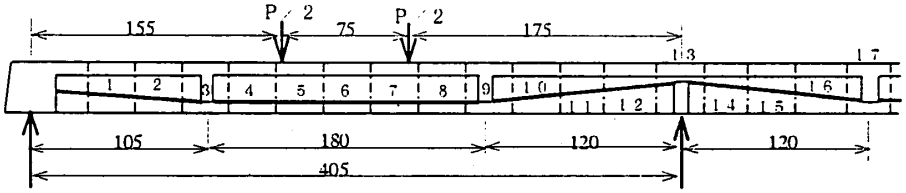


図-3　連続梁供試体形状　(cm)

NII-Electronic Library Service

表-1　補強筋の材料特性

径	降伏点 (kgf/cm²)	引張強さ (kgf/cm²)	ヤング係数 (kgf/cm²)
D6	4607	6570	$2.37*10^6$
D10	3462	5090	$2.18*10^6$
D13	3973	5659	$1.83*10^6$

表-3　ケーブルの材料特性

ケーブル種類	断面積 (cm²)	降伏点荷重 (tf)	引張荷重 (tf)	弾性係数 (kgf/mm²)
SWPR7A φ12.4	0.930	13.9	16.3	19000
SWPR7A φ15.2	1.387	20.8	24.5	19000

表-2　単純はり実験要因

供試体 No.	接合方法	拘束筋 (cm)	構造形式	コンクリート強度 (kgf/cm²)
1	エポキシ	なし	外ケーブル	369
2	ドライ			356
3	エポキシ	D10@5		363
4		D10@10		329
5		なし	内外併用	333
6	一体打ち		外ケーブル	385

表-4　連続はり実験要因

供試体 No.	接合方法	拘束筋 (cm) スパン中央	拘束筋 (cm) 中央支点	コンクリート強度 (kgf/cm²)
7	一体打ち	D10@5	D10@5	395
8	エポキシ	なし	なし	422
9		なし	D10@5	403
10		D10@5	D10@5	372

くなるようＰＣ鋼より線SWPR7Aφ12.4を内ケーブルに１本、外ケーブルに２本使用した。この場合内ケーブルは、グラウトにより付着を持たせた。導入したプレストレス量は全供試体に対し27tfとし、各ケーブルにおけるプレストレス導入率は約55%とした。内外ケーブル併用型では、内ケーブルに9tf、外ケーブルに18tf緊張力を導入した。表-3にケーブルに用いたＰＣ鋼より線の材料特性を示す。

(2)　連続梁

連続はりの実験は、拘束筋を配置することによる部材の回転能の向上ならびにモーメント再分配を明確にするために行った。実験要因を表-4に示す。供試体No.8はすべて非拘束、No.9は中央支点を含む３ブロック（ブロック番号12,13,14）の１ヶ所を拘束、No.10ではスパン中央の３ブロック（ブロック番号5,6,7及び19,20,21）と中央支点の３ブロックの計３ヶ所を拘束した。No.7は一体打ちとし、補強筋の配筋状況はNo.12と同一とした。ケーブルは、ＰＣ鋼より線SWPR7Aφ12.4を２本使用し導入プレストレスを18tfとした。

2.3　実験方法

載荷方法は油圧ジャッキによる一方向静的載荷で、単純梁では載荷スパンを100cm、連続梁では75cmとした。測定項目は、はり中央部、デビエーター位置のたわみ、スパン中央部のブロックの圧縮縁のひずみ、接合部の開口量、外ケーブルの張力とひずみ等であり、連続梁ではさらに各支点反力も計測した。

3.　実験結果

3.1　ひびわれ性状

図-4にひびわれ状況を示す。エポキシジョイントの場合、エポキシの引張強度はコンク

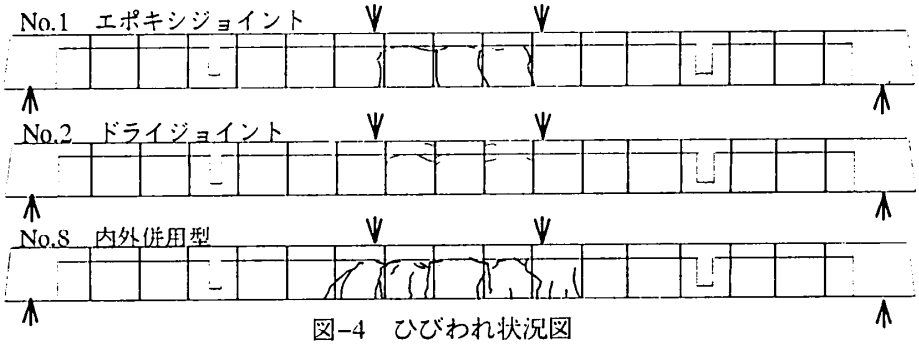


図-4　ひびわれ状況図

NII-Electronic Library Service

リートの引張強度よりも大きいため、接合面ではひびわれが生じず、ブロック内に配筋した引張鉄筋の先端部と接合面の間、即ち補強筋がないコンクリート部でひびわれが生じ、これが圧縮縁に向かって進展していった。ドライジョイントの場合では、ひびわれ（または開口）は当然の如く接合面から生じ、荷重の増大とともに接合面が開いていった。内外ケーブル併用型では、梁中央から80cm程度までひびわれが分散していた。

表-5 実験結果および計算結果

供試体 No.	ひびわれ発生荷重 (tf)	終局時ケーブル2本分張力 (tf)	最大耐力 P (tf)			
			実験値	精算法[2]	Naaman[3]	示方書
1	5.0	35.5 [0.31]	6.7	6.7 (1.00)	8.3 (1.24)	6.1 (0.91)
2	4.8	34.3 [0.28]	6.5	6.7 (1.03)	8.2 (1.26)	6.1 (0.94)
3	5.2	39.9 [0.48]	6.5	6.9 (1.06)	6.2 (1.26)	6.1 (0.94)
4	5.1	38.5 [0.40]	6.5	6.7 (1.03)	8.1 (1.25)	6.0 (0.92)
5	4.9	39.0以上	7.9	7.6 (0.96)	---	---
6	5.5	38.6 [0.38]	8.6	8.6 (1.00)	11.1(1.29)	8.1 (0.94)

[ ] ：ΔP=(Pu-Pe)/Pe　Pu:終局時ケーブル張力
Pe：有効プレストレス
( )：解析値／実験値

3.2 単純梁のひびわれ発生荷重と最大耐力

表-5は実験から得られたひびわれ発生荷重、最大耐力の実験値と計算値、終局時におけるケーブルの張力を示したものである。プレキャストブロックを用いた供試体No.1～6のひびわれ発生荷重は4.8tfから5.3tfであった。ドライジョイントのひびわれ発生荷重が小さいのは、3.1で述べたようにひびわれが接合面から生じたため、コンクリートの引張強度の寄与分がないためである。最大耐力についてみてみると、プレキャストブロックを外ケーブルＰＣ部材に用いた供試体では最大耐力はほとんど同じであった。No.6の内外ケーブル併用型の耐力は他のプレキャストブロック供試体よりも大きく一体打ちの92%であった。

表に示した計算結果は、変形の適合条件とケーブル位置の変化を考慮した精算法[2]、Naamanによって提案されているアンボンドＰＣ部材の耐力算定式[3]、土木学会コンクリート標準示方書によるアンボンドＰＣ部材の耐力評価法により得られたものである。なお、供試体No.1からNo.6の計算には、ブロック内に配筋されている軸補強筋は考慮されていない。Naamanの方法では、耐力を過大に評価しており、示方書の方法では逆に過小に評価している。一方、精算法では計算値と実験値はよく一致しており、外ケーブルＰＣ部材の曲げ耐力を精度よく評価するためには、変形の適合条件とケーブル位置の変化を考慮した耐力算定式を確立する必要があることが示されたと言える。

3.3 単純梁の荷重－変位関係

図-5(a)は、供試体No.1（エポキシジョイント）、No.2（ドライジョイント）、No.8（一体打ち）の荷重－変位曲線を示したものである。No.2は、No.1と比べひびわれ発生前までの剛性はやや低下したが、両者の曲げ性状はほとんど同じであった。

図-5(b)はブロックに拘束筋を配置したNo.3,4と拘束筋を配置していないNo.1,6の荷重－変位曲線を示したものである。図より、拘束筋がないNo.1では65mm程度の変位で圧壊が生じ部材全体が急激に破壊したのに対し、

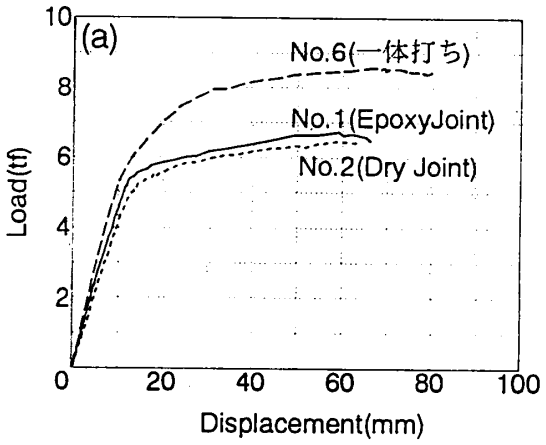


図-5　単純はりの荷重－変位関係

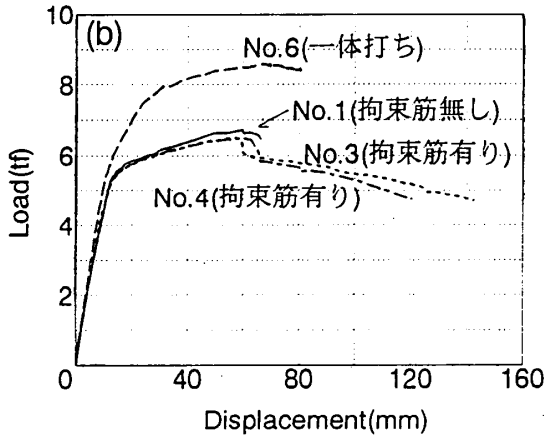
NII-Electronic Library Service

拘束筋を配置したNo.3および4では、拘束筋上のかぶりコンクリートが破壊し耐力が一旦低下するものの、拘束筋により圧縮部のコンクリートは破壊せず、最終的には部材の崩壊は見られずケーブル張力が降伏荷重まで到達したため載荷を終了した。以上の結果から部材の変形能は大幅に改善されることができ、拘束筋を用いたプレキャストブロック外ケーブルＰＣ部材は、従来の曲げ降伏型のＰＣ部材と同様にじん性のある破壊性状を示すことが明らかとなった。

図-5(c)は内外ケーブル併用型の供試体No.5と外ケーブルの供試体No.1,6を比較したものある。ケーブルの総断面積の1/3を内ケーブルにすることにより、外ケーブルだけの供試体よりも最大耐力で約18%増大した。

3.4 連続桁の曲げ挙動

プレキャストブロックを用いた外ケーブル単純桁の曲げ挙動が概ね明らかとなったので、ここでは連続桁の荷重－変形性状、部材が降伏した後のモーメント再分配について述べることとする。図-6は供試体No.7,8,10の荷重－左スパン中央の変位関係を示したものである。全ての供試体で荷重が5.3～6.0tfの時、スパン中央と中央支点上において同時にひび割れが発生した。その後、一体打ち供試体が軸方向補強筋が降伏するまである程度剛性を保ちながら荷重が増大したのに対し、プレキャストブロックを用いた供試体では、単純梁の時と同様にひびわれ発生後に剛性が大幅に低下した。さらに、供試体No.8,10では荷重が約7tfで中央支点近傍のブロックのかぶりコンクリートが破壊した。その後、中央支点上のコンクリートブロックを拘束した供試体No.10では剛性



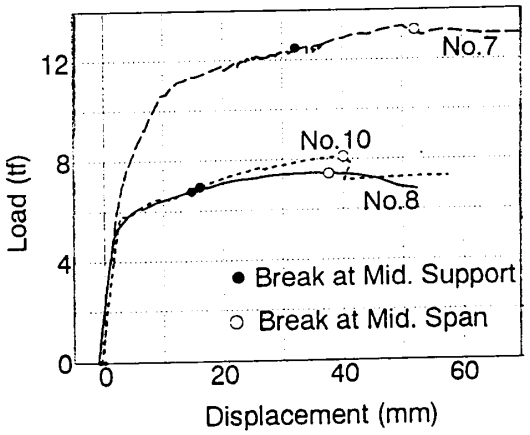


図-6　連続はりの荷重－変位関係

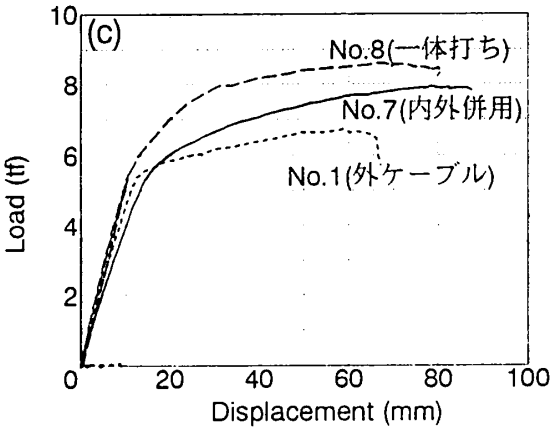


図-5　単純はりの荷重－変位関係

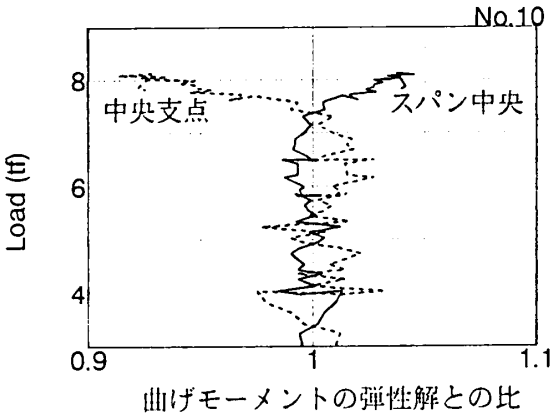


図-7　荷重－モーメント再分配の関係

NII-Electronic Library Service

をある程度保ちながら荷重と変位が増大したのに対し、拘束筋がない供試体No.8では変位の増大に対し荷重の増加は少なかった。図-7に供試体No.10での荷重と中央支点とスパン中央における弾性解によるモーメントの計算値と実験値の比の関係を示す。中央支点圧壊時の荷重約7tfまでは弾性解と実験値との比はほぼ一定の値を示していたが、その後は、実験値は弾性解による値から離れ始め、梁の耐荷機構が変化しモーメント再分配が生じているのが分かる。表-6は終局時における中央支点と載荷点における最大モーメントの実験値と弾性解による計算値、これらから得られモーメント再分配率を示したものである。供試体No.9,10のモーメント再分配率は、中央支点上において7.2～13.8%であった。これに対し、一体打ちの供試体No.7と中央支点上のブロックを拘束していないNo.8では、明確なモーメントの再分配は生じなかった。このことから、コンクリートブロックを拘束した場合には、回転能が向上しモーメント再分配が生じることが明らかとなった。

表-6 連続はり実験結果

供試体No.	最大耐力(tf)	中央支点曲げモーメント(tf・m)			載荷点曲げモーメント(tf・m)		
		実測値	弾性計算値	再分配率(%)	実測値	弾性計算値	再分配率(%)
7	13.4	-9.86	-9.63	-2.4	7.10	7.19	1.3
8	7.4	-5.27	-5.38	2.0	3.97	3.93	-1.0
9	7.7	-4.80	-5.57	13.8	4.45	4.16	-6.9
10	8.1	-5.41	-5.83	7.2	4.53	4.36	-3.9

再分配率=(弾性計算値-実測値)/弾性計算値

4. まとめ

本研究から以下のことが明らかとなった。

(1)エポキシジョイントの場合、ブロック内に配筋した鉄筋の先端部と接合面の間でひびわれが生じた。ドライジョイントの場合では、ひびわれ（または開口）は当然の如く接合面から生じ、荷重の増大とともに接合面が開くことが明らかとなった。

(2)プレキャストブロックはりでは、引張鉄筋が連続して配筋されていないため、ひびわれ発生後の荷重増加は少なく、拘束筋のない供試体は最終的にコンクリートの圧壊により破壊することが明らかとなった。

(3)拘束筋を配置したはりでは、拘束筋により圧縮部のコンクリートは破壊せず、部材の変形能と破壊性状は大幅に改善されることが明らかとなった。

(5)プレキャストブロックを用いた連続梁において、中央支点上のブロックに拘束筋を用いることにより、十分な回転能を確保できモーメント再分配も可能となることが明らかとなった。

[謝辞] 本研究を行うにあたり、埼玉大学町田篤彦教授から貴重な御助言を頂いた。また、㈱住友電工、ショーボンド建設（株）から実験材料の一部を提供して頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

[参考文献][1]土田一輝、睦好宏史、MATUPAYONT,S、谷口裕史：外ケーブル式ＰＣはりの曲げ性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16,No.2,pp.1009-1014,1994.6

[2]土田一輝、睦好宏史、谷口裕史、町田篤彦：新素材を外ケーブルに用いたＰＣはり部材の曲げ解析、土木学会第48回年次学術講演会概要集第５部、pp.758-759,1993.9

[3]Naaman,Antoine E.,and Alkhairi,Fadai M.,"Stress at Ultimate in Posttensioning Tendons-Part 1:Proposed Methodology",ACI Structural Journal,Vol 88,pp.683-692.,No.6,Nov-Dec.1991

NII-Electronic Library Service