

論文

[2168] 外ケーブル式 PC はりの曲げ性状に関する研究

土田一輝^{*1}, 睦好宏史^{*2}, Songkiat MATUPAYONT^{*3}, 谷口裕史^{*4}

1. はじめに

外ケーブル式 PC 部材は内ケーブル式のものと比べ、1)ウェブ幅を低減できる、2)ケーブルの交換が可能、3)コンクリートの施工性が良い等の利点があり、新設の構造物だけではなく、既設の構造物の補修や補強にも適用されつつある。しかしながら、外ケーブル式 PC 部材の曲げ耐力は内ケーブル式のものと比べて低下することが知られているが、その程度とこれに影響をおよぼす要因や終局時の挙動は明らかにされておらず、設計手法も確立されていない。

本研究では外ケーブル式 PC はりの曲げ挙動を明らかにするために曲げ載荷実験を行った。実験では、1)アンボンド式 PC はり、ボンド式 PC はり、外ケーブル式 PC はりの曲げ性状の比較、2)外ケーブル式 PC はりにおいてケーブルを保持するデビエータの間隔に関する検討、3)内ケーブルと外ケーブルを併用した PC はりの曲げ挙動の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状寸法および配筋図を図-1に示す。供試体ははり長560cmの T 型断面で、外ケーブル式供試体の No.1, 2, 3 はケーブル位置を保持するためのデビエータを有している。デビエータははり製作時にはりと一体として打設された。デビエータとケーブルの摩擦を低減するためにテフロンシートをケーブルとデビエータの間に挿入した。アンボンド式供試体 No.4 およびボンド式供試体 No.5 では、コンクリート内部にシースを配置して、ケーブルを挿入した。アンボンド用ケーブルには PC 鋼より線をポリエチレンシースで被覆し、その間に潤滑剤としてグリースを詰め込んだものを使用した。内外ケーブル併用式供試体 No.6 では、デビエータを300cmの間隔で配置し、コンクリート断面内部にはシースを配置した。内ケーブルについてはプレストレス導入後グラウトを

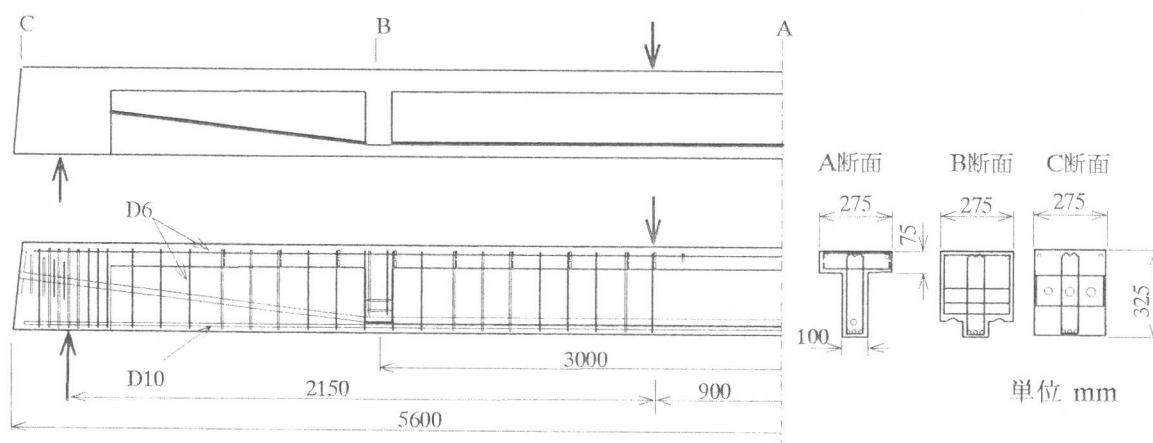


図-1 供試体形状寸法および配筋図

*1 清水建設(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 埼玉大学大学院 MS. (正会員)

*4 ハザマ技術研究所 技術研究部第4研究室、工修 (正会員)

表-1 実験要因

供試体 No.	構造様式	デビエータ 数	デビエータ 間隔 (m)	使用したケーブル	
				外ケーブル	内ケーブル
1	外ケーブル式	2	1. 8	SWPR7A15.2*2	—
2	外ケーブル式	2	3. 0	SWPR7A15.2*2	—
3	外ケーブル式	3	1. 5	SWPR7A15.2*2	—
4	内ケーブル式 (アンボンド)	—	—	—	SWPR19 19.3*1
4	内ケーブル式 (ボンド)	—	—	—	SWPR19 19.3*1
6	内外ケーブル併用式	2	3. 0	SWPR7A12.4*2	SWPR7A12.4*1

行った。P C 鋼材以外の補強筋として引張鉄筋にD10を3本、圧縮鉄筋にD6を4本配置し、せん断補強筋にはD10を10cm間隔で配置した。D6およびD10の異形鉄筋の降伏強度は、それぞれ4073kgf/cm²および4520kgf/cm²であった。

2.2 実験要因

実験要因を表-1に示す。供試体No.1およびNo.2はデビエータ間隔がそれぞれ180cmおよび300cmの外ケーブル式P Cはりである。No.3は部材変形にともなう外ケーブルの位置変化を防ぐ目的で、はり中央部にもデビエータを配置し、計3ヶ所デビエータを有する外ケーブル式P Cはりである。No.4はアンボンド式P Cはり、No.5はボンド式P Cはり、No.6は内ケーブルと外ケーブルを併用した供試体である。各供試体においてケーブル断面積がほぼ等しくなるよう供試体No.1, 2, 3にはP C 鋼より線SWPR7Aφ15.2を2本使用し、供試体No.4, 5には、P C 鋼より線SWPR19φ19.3を1本使用した。また、内外ケーブル併用式供試体には、P C 鋼より線SWPR7A12.4を外ケーブルに2本、内ケーブルに1本使用した。緊張材に使用したP C 鋼より線の材料特性（規格値）を表-2に示す。全ての供試体に対しプレストレス導入量は27tfに設定し、その時の各ケーブルにおけるプレストレス導入率は55～59%の範囲とした。実験時におけるコンクリート圧縮強度の平均値は385kgf/cm²であった。

2.3 実験方法

載荷方法は油圧ジャッキによる静的2点載荷とし、等曲げモーメント区間を90cm、スパンを520cmとした。載荷時には、はり中央部およびデビエータ位置の変位の測定および中央断面におけるコンクリート歪の測定を行った。コンクリート歪の測定には歪ゲージおよび検長10cmのπゲージを使用した。外ケーブルおよびアンボンドケーブルについては両端にロードセルを設置してケーブル張力の測定を行い、ケーブルに貼付した歪ゲージによる歪の測定も行った。また、載荷時にひび割れを目視により確認しマーキングを行った。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

表-3は実験により得られたひび割れ発生荷重、最大耐力、終局時ケーブル張力および計算により得られた最大耐力を示したものである。ひび割れ発生荷重は5.0tfから5.5tfとなりほぼ全供試体

表-3 実験結果および計算結果

供試体 No.	ひび割れ 発生荷重 (tf)	終局時 ケーブル張力 (tf)	最大耐力 (tf)			
			実験値	精算法[1]	Naaman[2]	示方書
1	5.5	37.4	9.3	9.3 (1.00)	11.1 (1.19)	8.1 (0.87)
2	5.5	38.6	8.6	8.6 (1.00)	11.1 (1.29)	8.1 (0.94)
3	5.5	41.8	10.3	10.6 (1.03)	11.1 (1.08)	8.1 (0.81)
4	5.0	36.6	10.0	10.6 (1.06)	10.6 (1.06)	7.8 (0.78)
5	5.0	39.5以上	10.9	10.8 (0.99)	—	11.1 (1.02)
6	5.0	40.7以上	9.5	9.6 (1.01)	—	—

(): 解析値/実験値

で一致していた。最終的な破壊はどの供試体も圧縮部コンクリートの歪が約0.4%に達した時点でのコンクリートの圧壊によるもので、破壊は非常に急激に生じ、供試体はいずれも完全に崩壊した。最大耐力に関しては、ボンド式供試体No.5が最も大きく10.9tfに達した。アンボンド式供試体No.4とデビエータを3個所有する外ケーブル式供試体No.3の最大耐力はほぼ等しくボンド式供試体の92~94%であった。デビエータ間隔の異なる外ケーブル式供試体No.1, 2では、それぞれボンド式供試体の最大耐力に対し85%および79%となりデビエータ間隔の狭いものの方が最大耐力が大きくなった。内外ケーブルを併用した供試体No.6では外ケーブルのみの場合よりも最大耐力は大きくなりボンド式供試体の87%であった。

表-3に示した計算結果は、変形の適合条件およびケーブル位置変化を考慮した解析手法である精算法[1]、Naaman等によって提案されているアンボンド式P Cはりの終局時緊張材応力算定式[2]および土木学会コンクリート標準示方書に示されているアンボンドP C鋼材を使用した場合の曲げ耐力の考え方により得られたものである。コンクリート標準示方書に示されている考え方は、付着のある場合の曲げ耐力より30%減ずることでアンボンド式P Cはりの曲げ耐力を求めるものであるが、この方法ではアンボンド式供試体No.4の曲げ耐力をかなり低く推定することになる。これに対し、Naaman等の算定式により終局時緊張材応力を求め、曲げ耐力を推定した場合、供試体No.4に対して良い結果が得られている。しかしながら、外ケーブル式供試体No.1, 2に対してはかなり過大に評価している。これは、外ケーブル式P Cはりにおいて生じるケーブル位置変化が考慮されていないためであり、この点を考慮している精算法では解析値と実験値では非常によい一致を示している。従って、外ケーブル式P Cはりの曲げ耐力を精度良く求めるためには、ケーブル位置変化を考慮した算定式が必要になると考えられる。

3.2 ひび割れ性状

ひび割れ状況を図-2に示す。ひび割れの分散性に関してはケーブルの付着の有無によって差が生じておりボンド式供試体No.5および内外ケーブル併用式供試体では、はり中央から130cmまでひび割れが分散している。これに対しアンボンド式供試体No.4では中央から100cm、外ケーブル式供試体No.2では90cm程度となっており、ひび割れがはり中央に集中した。ひび割れ間隔に関してもボンド式および内外ケーブル併用式供試体ではひび割れ間隔が5cm程度であるのに対し、コンクリートと付着の無い外ケーブル式およびアンボンド式供試体では間隔が広く8~10cmであった。

3.3 荷重-変位関係

a) ボンド式、アンボンド式および外ケーブル式供試体の比較

外ケーブル式供試体No.2、アンボンド式供試体No.4およびボンド式供試体No.5の実験により得られ

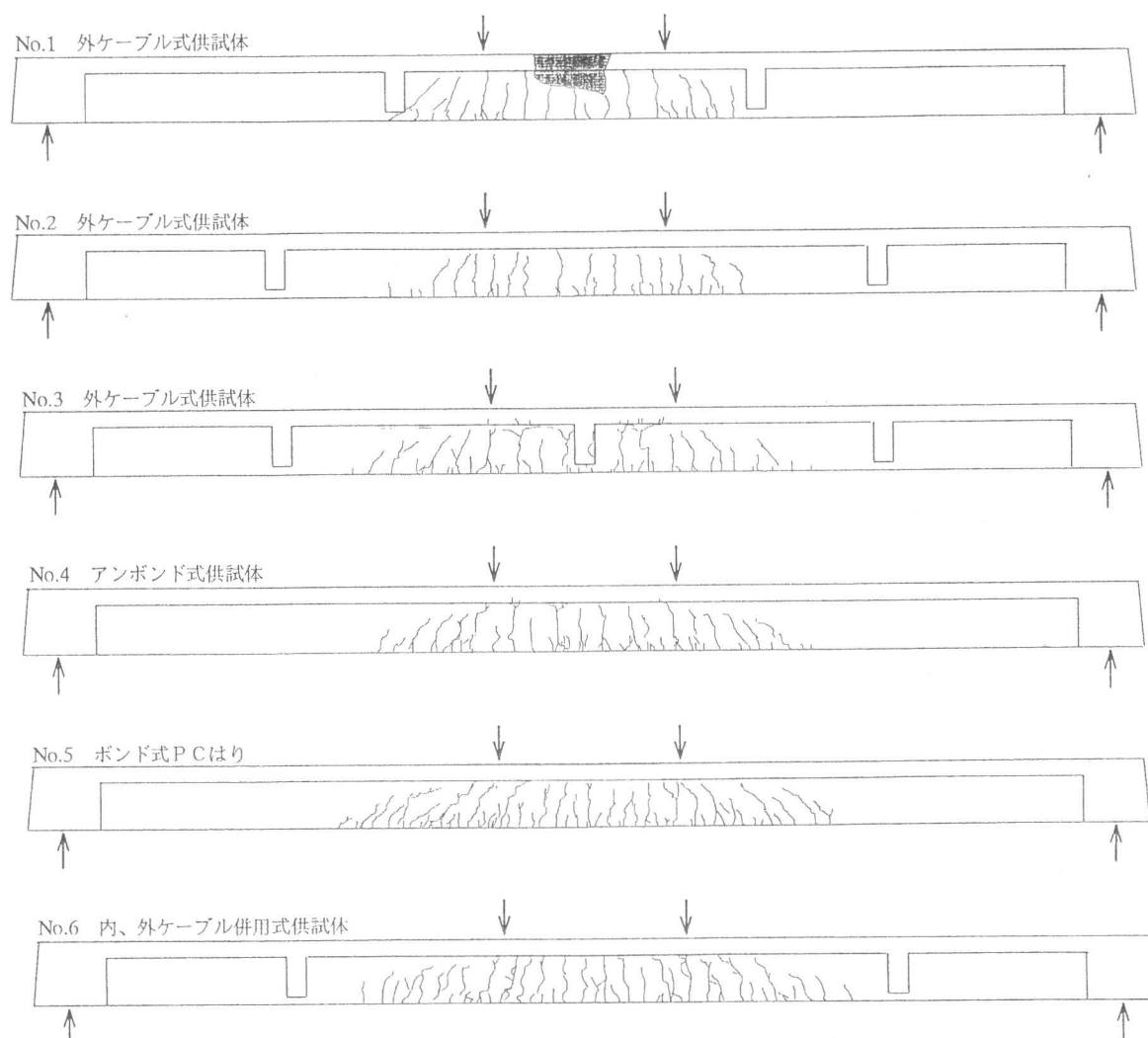


図-2 ひび割れ状況

た荷重-変位関係を図-3(a)に示す。いずれの供試体もひび割れ発生後部材の剛性が低下した。外ケーブル式供試体およびアンボンド式供試体では荷重が8tfに達するとコンクリート内に配置した鉄筋が降伏し、さらに剛性が低下し変形が大きく進行した。これに対し、ボンド式供試体では内ケーブルが降伏するまで剛性はほぼ一定のままで、荷重が10tfに達し内ケーブルが降伏すると変形のみが進行した。アンボンド式供試体では鉄筋が降伏した後は荷重と変位が一定の割合で増加し、最終的にボンド式供試体の耐力の92%まで達した。外ケーブル式供試体では部材変形にともなうケーブル位置変化が生じたために変形がはり中央部に集中し、荷重の増加は小さく、変位もボンド式供試体の84%であった。

b) デビエータ間隔および個数が異なる供試体の比較

外ケーブル式供試体No.1, 2, 3およびアンボンド式供試体No.4の実験により得られた荷重-変位関係を図-3(b)に示す。供試体No.1とNo.2ではデビエータ間隔が異なり、荷重-変位関係において鉄筋が降伏し部材の変形が顕著となる辺りから供試体No.1とNo.2の挙動に違いが生じ、最終的に荷重で8%の差が生じた。この差はケーブル位置変化の大きさの違いによって生じたと考えられる。また、供試体No.3はデビエータをはり中央部に配置し外ケーブルの位置変化を防ぐ構造となっているため、アンボンド式供試体No.4とほぼ同じ曲げ挙動を示しており、供試体No.2と比較しても最大耐力および終局時変位が約1.2倍となっている。これらの結果から外ケーブル式PCはりの曲げ耐力にはデ

ビエータ間隔が大きく影響し、ケーブル位置変化を防ぐことにより大幅に曲げ性状が改善できるといえる。

d)内外ケーブル併用式供試体の荷重-変位関係

外ケーブル式供試体No.2、ボンド式供試体No.5および内外ケーブル併用式供試体No.6の荷重-変位関係を図-3(c)に示す。内外ケーブル併用式供試体No.6では荷重8tfでコンクリート内部の鉄筋が降伏し、荷重8.5tfで内ケーブルが降伏した。その後は外ケーブル式供試体と同様に部材剛性が低下し荷重の増加は少なく変形が大きく進んだ。供試体No.6においても外ケーブル式供試体No.2と同じくケーブル位置変化が生じ、そのために内ケーブル降伏後は荷重の増加がわずかであったといえる。

3.4 荷重-ケーブル張力関係

a)外ケーブル式およびアンボンド式供試体による比較

外ケーブル式供試体No.1, 2, 3およびアンボンド式供試体No.4の荷重-張力関係を図-4に示す。荷重に対するケーブル張力の増加は、ひび割れ発生まではいずれの供試体についても小さく、ひび割れ発生後ケーブル張力は増加し、コンクリート内部の鉄筋が降伏した後はケーブル張力の増加の割合が大きくなる。デビエータを2個有する供試体No.1, 2では、ともに終局時ケーブル張力は約38tfであり、このことからこの2体における曲げ耐力の差はケーブルの位置変化によるものであるといえる。アンボンド式供試体No.4およびデビエータを3個有する供試体No.3においてケーブル張力はそれぞれ降伏荷重の93%および100%とほぼ降伏点に達している。そのため、ケーブル位置変化の生じないアンボンド式供試体とデビエータを3個有する外ケーブル式供試体では、ボンド式供試体とほぼ等しい曲げ耐力になったといえる。

b)内外ケーブル併用式供試体の荷重-ケーブル応力関係

内外ケーブル併用式供試体No.6の荷重-ケーブル応力関係を図-5に示す。ひび割れ発生までの外ケーブルの応力増加は少なく、内ケーブルの応力増加の方が大きい。ひび割れ発生後も内ケーブルが降伏し部材の変形が大きくなるまでは内ケーブルに比べると外ケーブルの応力増加は小さい。鉄筋降伏後外ケーブルの応力増加は大きくなるものの、終局時のケーブル応力は内ケーブルの75%であった。

3.5 ケーブルの歪低減係数 (Ω) に関する検討

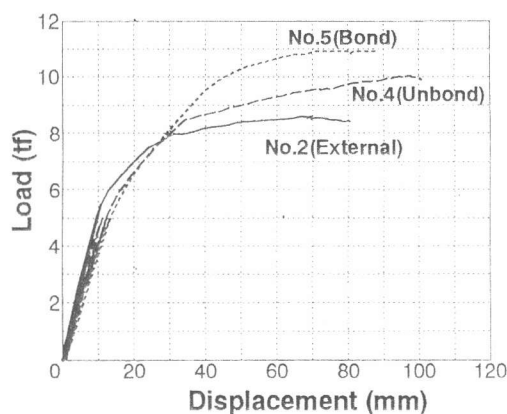


図-3(a) 荷重-変位関係 (各構造様式での比較)

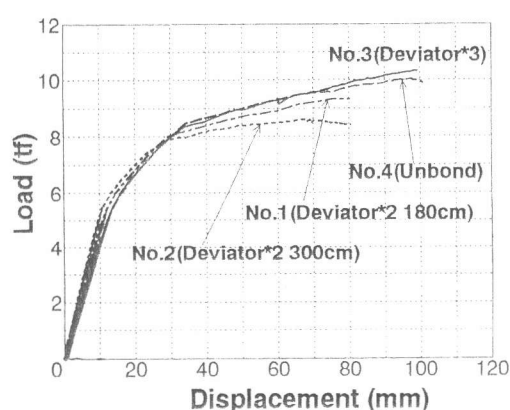


図-3(b) 荷重-変位関係 (デビエータの影響)

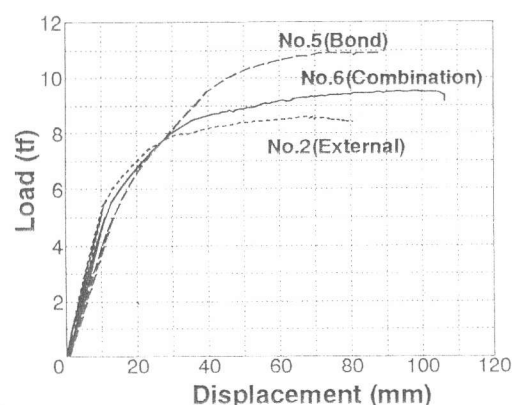


図-3(c) 荷重-変位関係 (内外ケーブル併用式供試体)

アンボンド式供試体No.4、外ケーブル式供試体No.2
および内外ケーブル併用式供試体No.6の荷重-歪低減
係数（ Ω ）関係を図-6に示す。ここで、 Ω は次式
によって表される。

$$\Omega = \Delta \varepsilon_{ps} / \Delta \varepsilon_{cps}$$

$\Delta \varepsilon_{ps}$: ケーブル歪の増加量

$\Delta \varepsilon_{cps}$: はり中央断面のケーブル位置コンクリートの歪の増加量

終局時における Ω の値はNaaman等のアンボンド式
P Cはりの曲げ耐力算定式で用いられている。実験結
果を見るといずれの供試体においても Ω の値はひび割
れ発生後、荷重の増加とともに減少する傾向を示し、
鉄筋の降伏後その傾向が進む。終局時において供試体
No.2で0.078、No.4で0.125、No.6で0.132の値を示し、
構造様式により Ω の値も異なることが明らかとなった。

4. まとめ

1)外ケーブル式P Cはりとアンボンド式P Cはりの曲
げ性状の違いは、部材の変形にともなうケーブル位置
変化によるものであり、ケーブル位置変化を防ぐため
のデビエータをはり中央に配置することで、その曲げ
性状をアンボンド式P Cはりと同等に改善することが
できる。

2)外ケーブル式P Cはりの曲げ耐力を精度良く推定す
るためには、ケーブル位置変化の影響を考慮した算定
式が必要である。

3)内ケーブルと外ケーブルを併用したP Cはりの場合、
ひび割れ性状はボンド式P Cはりとほぼ等しくなり、
変形能に関しては外ケーブルのみの場合より大きく改
善される。

謝辞

本研究を行うにあたり、埼玉大学大学院生山口統央
君、高橋博威君、元埼玉大学学生木次淳子さん、島崎勝樹君には多大な協力を頂いた。また、(株)
住友電工からP C鋼材を提供して頂いた。さらに、日本道路公団高松建設局の松田哲夫氏、紫桃
孝一郎氏から貴重な御助言を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- [1]土田、睦好、谷口、町田：新素材を外ケーブルに用いたP Cはり部材の曲げ解析、土木学会第4
8回年次学術講演会概要集第5部、pp.758～759
- [2]Naaman,Antoine E.,and Alkhairi,Fadai M., "Stress at Ultimate in Posttensioning Tendons
-Part 1:Proposed Methodology",ACI Structural Journal,Vol 88,No.6,Nov-Dec.1991,pp.683-692.

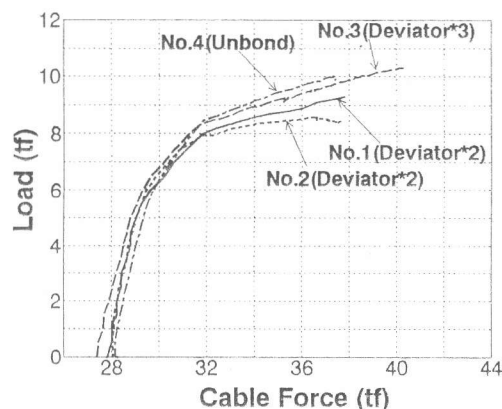


図-4 荷重-ケーブル張力関係

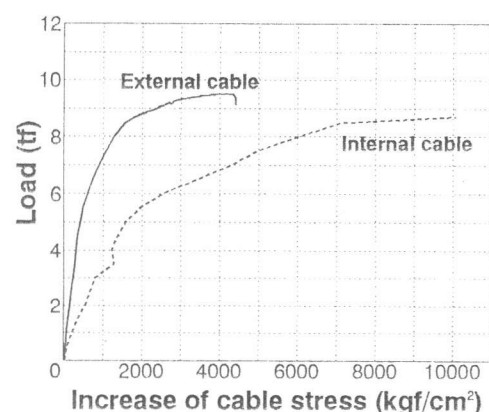


図-5 荷重-ケーブルの応力増加関係

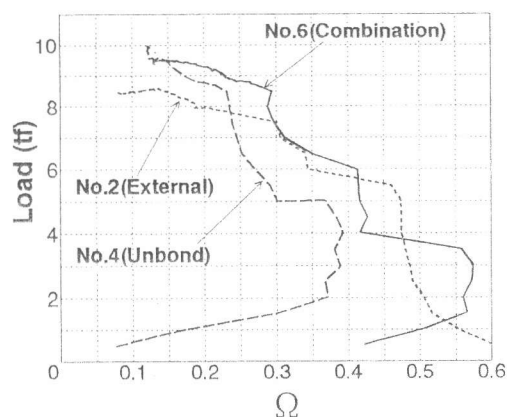


図-6 荷重-歪低減係数（ Ω ）関係