

(60) 外ケーブル方式二径間連続はりの曲げ終局耐力について

住友建設(株)	技術研究所	○正会員	梅津健司
同上	同上	正会員	藤田 学
同上	土木設計部	正会員	玉置一清
日本大学	理工学部	正会員	山崎 淳

1. はじめに

外ケーブル構造は内ケーブル構造より曲げモーメント極値付近でコンクリート圧縮縁ひずみが増加する傾向があり、一般的に荷重に伴う外ケーブルの引張応力の増加が少ない場合には、曲げ破壊に至る。これを踏まえ、外ケーブル構造の曲げ耐力算定において、外ケーブルの引張応力の増加を考慮しない方法が安全側を与える設計手法として用いられている。外ケーブルの引張応力増加をいくらか見込んで曲げ耐力を算定する設計手法を採れば、外ケーブル配置量を減らすことができ、経済的となるが、外ケーブルの引張応力増加について定量的な把握した研究実績が少ないため、その手法が一般化されるまで国内では至っていない。本研究は、実構造物を想定した外ケーブル曲線配置の二径間連続はりについて実験・解析を行い、破壊モードやモーメント再分配、引張応力増加等について、定性的・定量的に把握するものである。

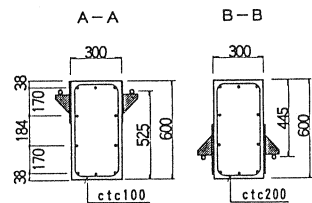
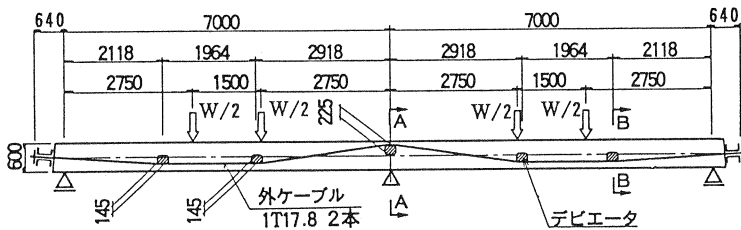
また、新しい構造形式である、支点・支間において外ケーブルを桁高外に配置した大偏心外ケーブル方式についても、その構造の有利性を実験的・解析的に考察するものである。

2. 試験はりの概要

2.1 形状と外ケーブル配置

試験はりは図-1に示すように二体で¹⁾、²⁾、ここでは外ケーブルをはり高以内に配置したはりを「従来型はり」と呼び、主要断面において外ケーブルをはり高外に配置したはりを「大偏心型はり」と呼ぶことにする。

従来型はり



大偏心型はり

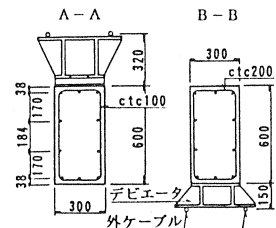
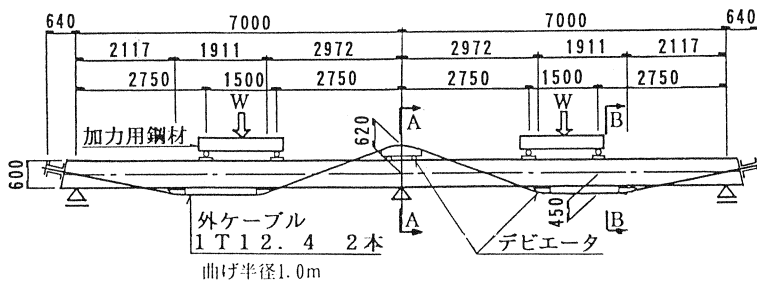


図-1 試験はりの形状寸法、外ケーブル配置

外ケーブルの導入引張応力度は、P C桁での一般的な有効引張応力度を想定し引張強度の50%とした(表-1材料特性参照)。

外ケーブルはコンコーダント配置とし、次の二項目に添って偏心量を設定した。

①従来型はりとは大偏心型はりにおいて、互いの主要断面引張縁におけるプレストレスは表-3②に示すようにほぼ等しくした。

②各はりでは、中央支点断面と支間Mmax断面とで設計荷重時の引張縁応力度を表-3⑤に示すようにほぼ等しくした。

ここに言う設計荷重時とは、中央支点上縁の合成曲げ応力度を0kgf/cm²とする等分布荷重状態と想定し、それと等価な曲げモーメントを与える集中荷重は、図-3、表-3より7.9tf/支間である。終局荷重時は、設計荷重時曲げモーメントの1.7倍を生じさせるW=15.0tf(/支間)載荷時と想定する。(表-2)

ここに言う設計荷重時とは、中央支点上縁の合成曲げ応力度を0kgf/cm²とする等分布荷重状態と想定し、それと等価な曲げモーメントを与える集中荷重は、図-3、表-3より7.9tf/支間である。終局荷重時は、設計荷重時曲げモーメントの1.7倍を生じさせるW=15.0tf(/支間)載荷時と想定する。(表-2)

表-2 弾性解による曲げモーメント(tf・m)

	中央支点断面	支間Mmax断面
①自重	-2.75	1.55
②集中荷重(7.9tf/支間)	-9.88	6.98
③設計荷重時(=①+②)	-12.63	8.53
④終局荷重時(=③*1.7)	-21.47	14.50

はり断面積:A=1800cm²、断面定数:Z=18000cm³

表-3 はり主要断面の曲げ応力度 (kgf/cm²)

	従来型はり				大偏心型はり			
	中央支点断面		支間Mmax断面		中央支点断面		支間Mmax断面	
	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
①自重	-15.3	15.3	8.6	-8.6	-15.3	15.3	8.6	-8.6
②プレストレス	70.4	-27.9	-9.0	51.4	68.3	-50.1	-30.7	48.9
③(自重+プレストレス)時(=①+②)	55.1	-12.6	-0.4	42.8	53.0	-34.8	-22.1	40.3
④集中荷重(7.9tf/支間)	-54.9	54.9	38.8	-38.8	-54.9	54.9	38.8	-38.8
⑤設計荷重時(=③+④)	0.2	42.3	38.4	4.0	-1.9	20.1	16.7	1.5

2.2 載荷形態

実験及び解析における載荷ケースを表-4に示す。

両支間二点載荷ケースは、図-3に示すように、はり全長にわたる等分布荷重による曲げモーメント分布とほぼ相似の曲げモーメントが得られる位置に、一支間当たり二点集中漸増載荷した。

片支間一点載荷ケースは、等分布荷重による曲げモーメント最大断面である端支点から2.66mの位置に、片支間のみ一点集中漸増載荷した。

表-4 実験・解析を行った載荷ケース

		両支間二点載荷		片支間一点載荷	
		実験	解析	実験	解析
従来型	実験	○	—	—	—
	解析	○	○	○	○
大偏心型	実験	○	—	—	—
	解析	○	○	○	○

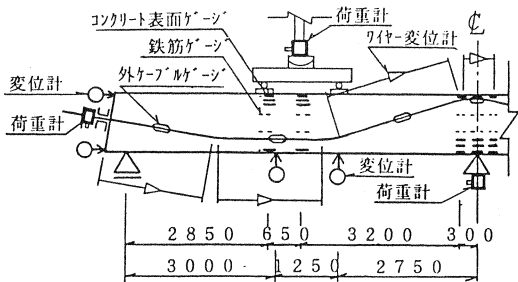


図-2 計測項目

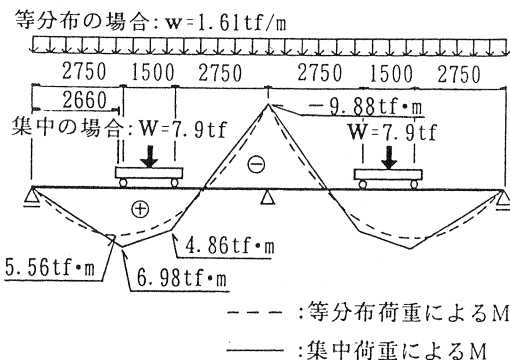


図-3 等分布荷重による曲げモーメントとそれと等価な集中荷重による曲げモーメント

解析には、コンクリート構造物における材料の非線形性と幾何学的非線形性を考慮した、ファイバーモデルによるフレーム解析プログラム『Say-NAP』を用いた。³⁾ プログラムにおける各材料の応力度-ひずみ曲線は、表-1に示した試験成績を基に折れ線近似で入力した。

3. 実験・解析結果及び考察

3.1 たわみおよび外ケーブル張力増加

実験におけるひび割れ発生は、従来型・大偏心型のいずれも中央支点上縁では $W=11\text{tf}$ 載荷時、支間では 15tf 載荷時であった。従来型・大偏心型の荷重とたわみの関係は図-4より、ひび割れ発生前まで同じように推移し、ひび割れ発生後では大偏心型の方が従来型より、ややたわみが大きいことが認められる。

荷重に伴う外ケーブル張力増加量は、図-5より支間にひび割れが発生した $W=15\text{tf}$ 直後は、大偏心型の方が従来型より大きく、 $W=27\text{tf}$ 頃等しくなり、その後逆転し従来型の方が大きくなっている。これは、載荷モーメントと鈎合う、主にコンクリートが負担する圧縮合力： $(C + \Delta C)$ と鋼材(外ケーブル・鉄筋)が負担する引張合力： $(T + \Delta T)$ とによる抵抗モーメント： M の式(1)により確認できる結果と符号するものである。⁴⁾

$$M = (C + \Delta C) \cdot z = (T + \Delta T) \cdot z \quad (1)$$

ここに C : 漸増載荷前の圧縮力、 ΔC : 圧縮力の増加分
 T : 漸増載荷前の引張力、 ΔT : 引張力の増加分
 z : アーム長

表-5に曲げ破壊時の実験値を示す。従来型・大偏心型とも曲げ破壊時の外ケーブル張力増加は、あまり差異がなかった。そのため両者の外ケーブル引張応力度増加量： $\Delta \sigma$ の比は、外ケーブル断面積の逆数比にほぼ等しい。

特に配置ケーブル断面積の極めて小さい大偏心型は、引張応力度の増加が鋭敏で、はりの曲げ破壊時には降伏点を超えていたことが、図-6より観察される。

3.2 はり軸方向のコンクリートひずみ分布

図-7に大偏心型における 25tf 載荷時のコンクリートひずみ分布を示すが、曲げモーメント極値付近においてコンクリートひずみの増大が顕著である。これは外ケーブル構造はりに見られる特徴のひとつで、次のような機構のためである。ひび割れ発生区間において引張鋼材がコンクリートと付着があり、かつ弾性域の場合、曲げモーメント変化分布に対して式(1)の鋼材張力の分布が変化する。これに対し外ケーブル構造では、ケーブル張力が軸方

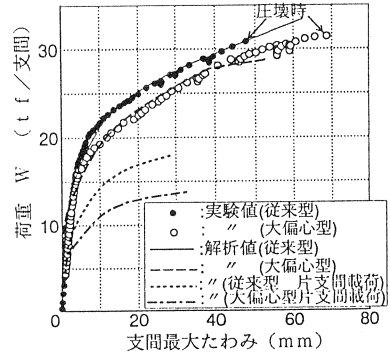


図-4 荷重-たわみ図

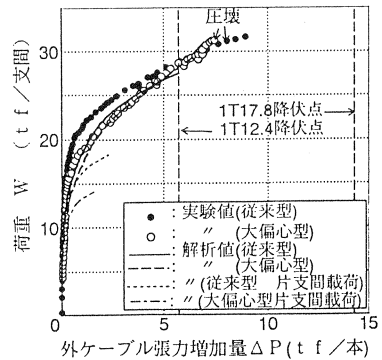


図-5 荷重-外ケーブル張力増加図

表-5 従来型はり和大偏心型はりの曲げ破壊時の実験値

	従来型	大偏心型
荷重 $W(\text{tf}/\text{支間})$ (両支間二点載荷)	30.8	31.5
中央支断面曲げモーメント ($\text{tf}\cdot\text{m}$)	-37.5	-38.0
支間 M_{max} 断面曲げモーメント ($\text{tf}\cdot\text{m}$)	30.2	31.0
外ケーブル張力増加量 ΔP ($\text{tf}/\text{本}$)	7.8	7.3
” $\Delta \sigma$ (kgf/mm^2)	37	79
支間最大たわみ (mm)	48	69
端支点図心の水平移動 (mm)	8	10

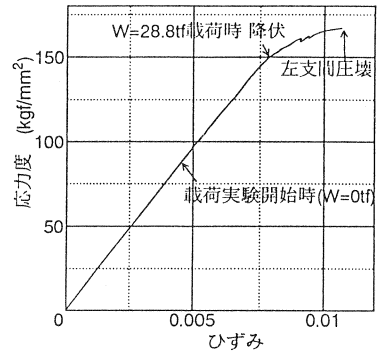


図-6 載荷実験時における外ケーブルの応力度-ひずみ履歴図

向に関して一定であるため、式(1)の引張鋼材から圧縮合力作用位置までの距離(アーム長: z)の分布が変化する。そのため、コンクリート圧縮縁ひずみ及びはりの曲率が卓越することになる。

3. 3 破壊形態

図-8に最終ひび割れ状況、図-9に荷重-圧縮縁コンクリートひずみ関係を示す。解析によればコンクリート圧縮縁ひずみは、従来型では支間より中央支点の方が先に限界ひずみ(3500 μ)に到達し、大偏心型ではその逆である。しかし実験では、従来型・大偏心型とも支間上縁での曲げ圧縮破壊となった。つまり従来型では圧縮破壊を起こした箇所が、解析と実験とで異なったのであるが、この原因は次に述べる中央支点付近における三軸の拘束効果のためと考えられる。中央支点小縁付近は、①はり軸方向からの圧縮力、②支間に比べ倍ピッチで配置されているスターラップ(D13ctc100)による面外方向の拘束力、③中央支点反力による鉛直方向圧縮力により、三方向から拘束された状態であった。そのため破壊に伴う膨張が抑制され、圧壊が起こりにくくなっており、拘束度の小さい支間中央付近で圧壊したものと思われる。

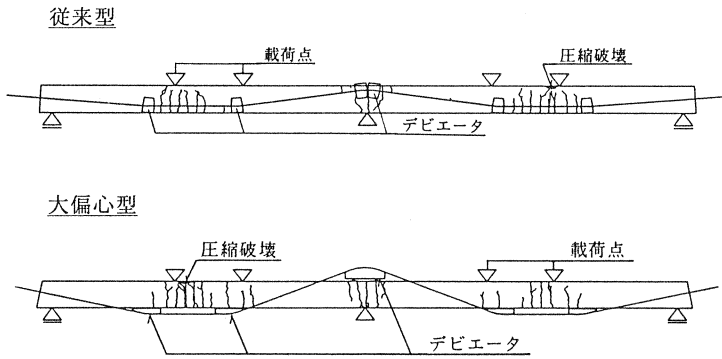


図-8 最終ひび割れ状況

3. 4 変形の適合条件

変形の適合条件⁵⁾「荷重による外ケーブルの伸び δ は、部材全長に関する外ケーブル位置でのコンクリートひずみ増加 ϵc の総和に等しい」は、式(2)で表せられる。

$$\delta = \sum \epsilon_{pi} \cdot \Delta L_i = \int_L \epsilon c(\ell) d\ell \quad (2)$$

- ここに、 ϵ_{pi} : 荷重による外ケーブルのひずみ
- ΔL_i : デビエータ区間の外ケーブル長
- L : 外ケーブル全長 (= $\sum \Delta L_i$)
- ℓ : 外ケーブル定着端からの距離

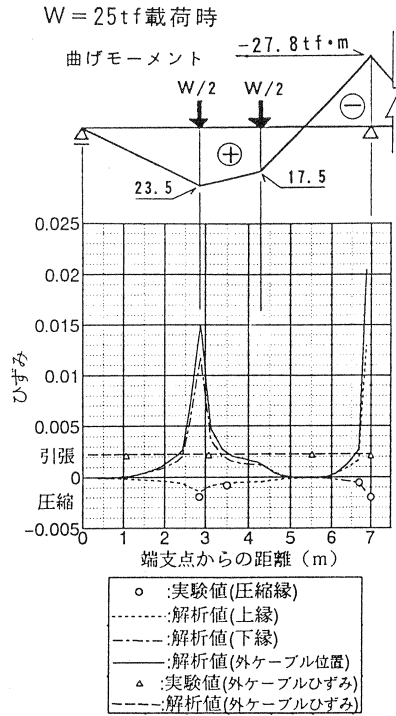


図-7 コンクリートひずみ分布

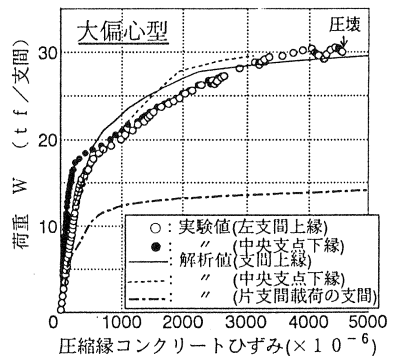
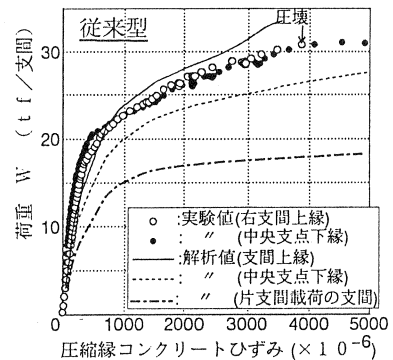


図-9 荷重-圧縮縁コンクリートひずみ図

これを図-7で説明すると、外ケーブル伸びに相当するx軸と---で囲まれた面積と、外ケーブル位置でのコンクリートひずみ増加の総和に相当するx軸と—で囲まれた面積が等しいということである。

はりの曲げ圧縮破壊は図-7において、漸増載荷に従いコンクリートひずみが増加し、いずれかの断面の圧縮縁ひずみが限界ひずみ(設計値:3500 μ)に達したとき生じる。これより、コンクリートひずみ分布が局所的に卓越せずはり全長に均等であれば、限界ひずみに達するのが遅くなり、変形の適合条件より外ケーブル伸びが大きくなる。従来型・大偏心型はりの両支間二点載荷ケースにおける以下の特徴、

- ①等分布荷重的に載荷したので、集中荷重を支間に一ヶ所だけ載荷した場合より、はり全体の曲げモーメント分布及びひずみ分布が比較的なだらかであったこと
- ②外ケーブルの配置形状を、発生する曲げモーメント分布と相似形にしたので、外ケーブルがはり全長に関して、部材引張域に効率的に配置されていたこと
- ③左右径間で中央支点に関して対称荷重を載荷したので、外ケーブルは中央支点断面において滑らず、固定したのと等しかったこと

は、この性質に適応していたので、曲げ破壊時の張力増加は表-5に示したように大きく発揮された。

3. 5 モーメント再分配

荷重に伴う中央支点断面の曲げモーメントの推移を図-10に示す。従来型・大偏心型ともよく似たモーメント履歴をたどっており、支点及び支間にひび割れが発生した11~15tf載荷時にモーメント再分配の始まりが見られる。どちらも曲げ破壊時では中央支点断面において弾性解の曲げモーメントに対する発生曲げモーメントの比率は90%であるので、-10%のモーメント再分配が見られる。

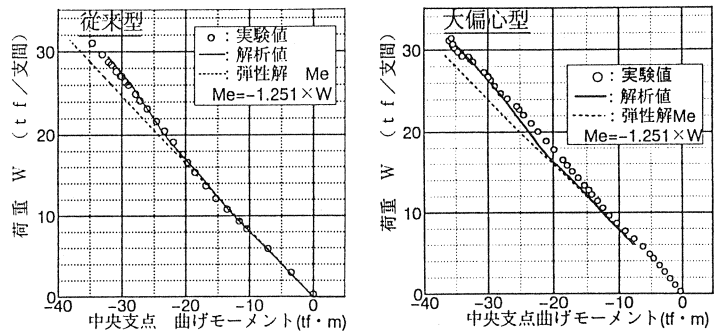


図-10 荷重-中央支点曲げモーメント図

3. 6 曲げ耐力

表-7に曲げ耐力の実験値・計算値を示す。

1) 両支間二点載荷ケース

従来型・大偏心型は、外ケーブルの張力増加が大きかったため曲げ耐力が増大し、ほぼ等しい曲げ耐力実験値であった。実験値・解析値とも、現行の設計法である、付着有鋼材を用いた場合の曲げ耐力の70%掛けや、外ケーブルの張力増加を考慮せずに算定した曲げ耐力を上回り、安全側となった。特に大偏心型の実験値は外ケーブルが降伏したため、付着有鋼材を用いた場合の曲げ耐力計算値と同等となった。

2) 片支間一点載荷ケース

曲げ耐力解析値は、付着有鋼材を用いた場合の曲げ耐力計算値の70%掛けを、わずかであるがやや下回った。

片支間載荷ケースの両支間載荷ケースに対する曲げ耐力比率について、従来型と大偏心型を比べると、表-6に示すように72~75%とほぼ等しい。

表-6 支間Mmax断面における曲げ耐力解析値の比較

載荷ケース	従来型		大偏心型	
	両支間二点載荷	片支間一点載荷	両支間二点載荷	片支間一点載荷
曲げ耐力 (tf·m)	33.5 (100%)	25.1 (75%)	28.6 (100%)	20.7 (72%)
外ケーブル引張応力度増加量 (kgf/mm ²)	59 (100%)	9 (15%)	65 (100%)	14 (22%)
支間たわみ (mm)	63 (100%)	27 (43%)	51 (100%)	32 (63%)

(): 両支間二点載荷の場合の値を100%としたときの比率

表-7 曲げ耐力の実験値・計算値一覧 (tf・m)

		中央支点	支間Mmax	備考		
従 来 型 は り	曲 げ 耐 算 値	実験値(両支間二点載荷)	-37.5	30.2	30.8tf載荷、支間 $\epsilon_{cu}=3870\mu$ 時	
		計 算	非線形解析(両支間二点)	-30.9	26.2	26.0tf載荷、支点 $\epsilon_{cu}=3500\mu$ 時
			非線形解析(両支間二点)	-38.7	33.5	33.5tf載荷、支間 $\epsilon_{cu}=3500\mu$ 時
			非線形解析(片支間一点)	-	25.1	17.8tf載荷、支間 $\epsilon_{cu}=3500\mu$ 時
		付着有鋼材の場合	-43.3	37.3	$\epsilon_{cu}=3500\mu$ 時	
		付着有鋼材の場合×0.7	-30.3	26.1	"	
		張力増加=0とした場合	-26.2	23.2	"	
	終局荷重時作用力〔設計値〕		-21.5	14.5	表-2より	
	付着有鋼材の場合、 曲げ破壊時PC鋼材ひずみ計算値		0.021 (塑性域)	0.018 (塑性域)	降伏ひずみ：0.008	
	曲げ破壊時外ケーブルひずみ実験値		0.0065	0.0065	弾性域	
大 偏 心 型 は り	曲 げ 耐 算 値	実験値(両支間二点載荷)	-38.0	31.0	31.5tf載荷、支間 $\epsilon_{cu}=4540\mu$ 時	
		計 算	非線形解析(両支間二点)	-34.8	28.6	28.7tf載荷、支間 $\epsilon_{cu}=3500\mu$ 時
			非線形解析(片支間一点)	-	20.7	13.8tf載荷、支間 $\epsilon_{cu}=3500\mu$ 時
			付着有鋼材の場合	-36.7	31.1	$\epsilon_{cu}=3500\mu$ 時
		付着有鋼材の場合×0.7	-25.7	21.8	"	
		張力増加=0とした場合	-22.1	19.3	"	
		終局荷重時作用力〔設計値〕		-21.5	14.5	表-2より
	付着有鋼材の場合、 曲げ破壊時PC鋼材ひずみ計算値		0.070 (塑性域)	0.057 (塑性域)	降伏ひずみ：0.008	
	曲げ破壊時外ケーブルひずみ実験値		0.011	0.011	降伏直後	

4. まとめ

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- ①はり軸方向コンクリートひずみ分布を、局所的に卓越させず均等に近づけるような、分布荷重的な載荷、外ケーブルの配置であれば、曲げ破壊に至るまでの引張応力増加は大きく発揮される。
- ②支点を跨いで複数の支間に連続的に外ケーブルを配置した連続はりにおいて、一支間のみ一点集中載荷した場合の曲げ破壊時外ケーブル引張応力増加量は、分布荷重的に載荷した場合の引張応力増加より少ない。
- ③従来型外ケーブル配置とプレストレスによる引張縁応力度を同一とし、偏心を大きくして外ケーブル量の減少を図った大偏心型配置は、従来型はりと同様な曲げ耐力、たわみ性能を発揮するので、経済的な構造である。

参考文献

- 1) 梅津・藤田・玉置・山崎：外ケーブル方式二径間連続はりの曲げ終局耐力に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 2, pp. 743~748, 1995. 6
- 2) 梅津・藤田・玉置・新井・山崎：大偏心外ケーブル方式PC連続はりの曲げ破壊実験と解析、土木学会第50回年次学術講演会、1995. 9
- 3) 玉置一清・新井英雄・板井栄次・山崎淳：非線形プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について、プレストレストコンクリート技術協会第5回シンポジウム論文集
- 4) 若林登・沼田昌一郎・一樹久允・玉置一清：外ケーブル構造の曲げ終局耐力に関する一考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp. 1021~1026, 1994. 6
- 5) 六車熙・渡辺史夫・西山峰広：アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol. 26, NO. 1, pp. 10~16, 1984. 1