

論文

[1191] 組紐状AFRPロッドを用いた実大PRC梁の曲げ性状

正会員○谷垣 正治（三井建設 技術研究所）

正会員 野村 設郎（東京理科大学 理工学部）

正会員 岡本 直（三井建設 技術開発推進部）

正会員 遠藤 克彦（三井建設 技術開発推進部）

はじめに

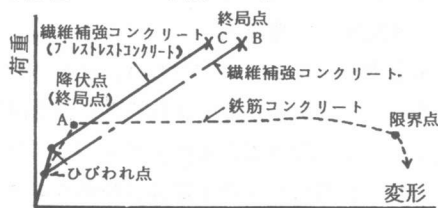
筆者らはこれまでに、組紐状にしたアラミド繊維棒材を主筋および緊張材として用いたプレテンションおよびポストテンション梁の曲げ破壊試験、長期荷重試験を実施し、このような連続状繊維を長期荷重を受けるコンクリート梁の補強筋として用いるための研究を行ってきた^{[1]～[4]}。連続状繊維材のコンクリート補強に関する研究は、近年益々盛んに行なわれるようになり、繊維補強材の構造材料としての適用可能性が明らかにされる一方で、実用化に向けて、繊維補強コンクリート部材の設計法に関する検討もなされ始めている。そこで本論では、まず、限界状態設計法に従って、連続状繊維補強コンクリート梁の特徴を考慮した長期荷重に対する曲げ設計法を提案し、ついで、この設計法を用いて、実大のPRC梁を設計・製作し、曲げ破壊試験および長期荷重試験を行なって、設計手法の妥当性と実用化の可能性について検討した。

1. 限界状態設計法による小梁の設計

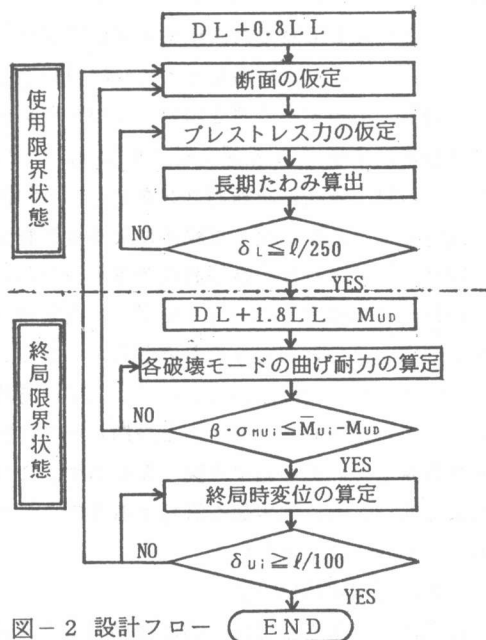
これまでの実験結果に基づいて、繊維補強コンクリート梁の荷重－変形性状の特徴を、鉄筋コンクリート梁と比較して、以下に示す。

- ① 図－1に示す様に、繊維補強コンクリート梁では、鉄筋コンクリート梁に比べ補強筋剛性が低いため、ひびわれ後のたわみが大きくなるが、プレストレスを導入することによって、たわみを抑制することができる。一般に、高強度・低弾性率の材料であるほど、補強量を増して剛性を高めるよりも、プレストレスを導入した方が、たわみ抑制効果が高いものと考えられる。
- ② 長期荷重を対象とした場合、鉄筋コンクリート梁では、図－1中のA点が終局点であり、その時の破壊形式は補強筋の降伏である。繊維補強コンクリート梁では、B、C点が終局点であり、その時の破壊形式は、コンクリートの圧壊、緊張材の破断、主筋の破断の3通りがある。
- ③ 繊維補強コンクリート梁の荷重－変形曲線は、終局点に達するまで正の勾配を持っており、終局時の変形は、鉄筋コンクリートに比べて大きい。

以上に述べた繊維補強コンクリート梁の特徴



図－1 繊維補強コンクリートと鉄筋コンクリートの荷重－変形曲線の比較



図－2 設計フロー

を考慮して、ここでは、限界状態設計法を用いた長期荷重を受ける梁の曲げ設計方法を提案する。その設計手順を図-2に示す。図に示すように、使用限界状態設計では梁の長期たわみを、終局限界状態設計では曲げ耐力と曲げ耐力時の変形を設計対象とした。

1. 1 設計条件

想定部位は図-3に示す小梁部分でスパンが9.6m、支配幅が2.5mである。設計断面は図-2に示すように梁幅35cm、梁せい80cmで、主筋と緊張材にアラミド繊維棒を用いる。荷重条件は、表-1に示すように固定荷重を小梁、スラブ、仕上げを含めて $DL = 0.56 \text{ t/m}^2$ 、積載荷重を $LL = 0.5 \text{ t/m}^2$ とした。荷重係数は、使用限界状態設計時で $DL + 0.8LL$ 、終局限界状態設計時で $DL + 1.8LL$ とした。

1. 2 使用限界状態設計

使用限界状態としては、たわみ、ひびわれ幅等が考えられるが、ここでは長期たわみを設計対象とし、その限界値を支持スパンの $1/250$ とした。長期たわみの算定は引張側コンクリートを無視しプレストレス力を考慮した断面割線剛性について、圧縮側コンクリートのクリープ、乾燥収縮を考慮した修正ヤング係数法^[4]を用いた。なお、算定にあたっては、材料特性として表-2に示す平均値を用い、プレストレスの有効率は文献^[3]の結果に基づいて0.8とした。この算定方法は圧縮側コンクリートを弾性と仮定しているが、縮小試験体による長期載荷試験^{[2][4]}によれば、長期載荷荷重がひびわれ荷重程度であれば、この方法を用いて長期たわみを推定することができるものと考えられる。図-4に示した設計断面について、上記の方法によって有効プレストレス力と長期たわみの関係を算定した。その結果を図-5に示す。この図より長期たわみ限界値を満足する有効プレストレス力を50tとした。

1. 3 終局限界状態設計

終局限界状態としては、曲げ終局耐力と終局

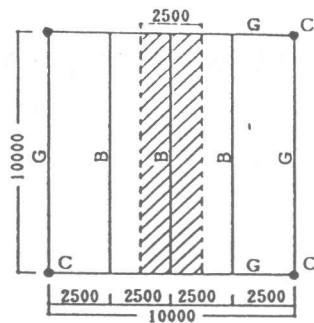


図-3 試設計部位

表-1 荷重条件

固定荷重 DL	0.57t/m ²
積載荷重 LL	0.50t/m ²
使用限界状態設計荷重	DL+0.8LL
終局限界状態設計荷重	DL+1.8LL

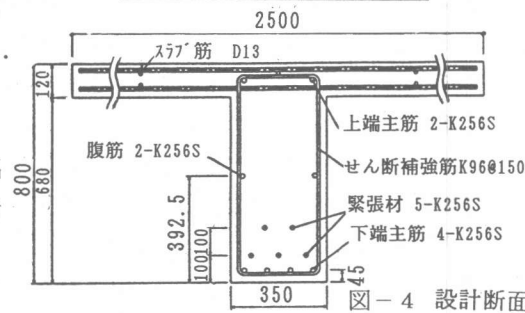


図-4 設計断面

表-2 材料特性とそのバラツキの仮定

a) 繊維棒材

棒材	断面積 (mm ²)	引張耐力 (t)		弾性係数 (kg/cm ²)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
K96	75	10.1	0.36	5.9 × 10 ⁵	3.3 × 10 ⁴
K256S*	200	27.0	1.45		

* K256の表面に珪砂が接着されている

b) コンクリート

材料特性	平均 ($\bar{x}$)	標準偏差 (σ)
圧縮強度 (σ_c)	366 (kg/cm ²)	46.8 (kg/cm ²)
圧縮歪み (ϵ_{cu})	4160 (μ)	534 (μ)

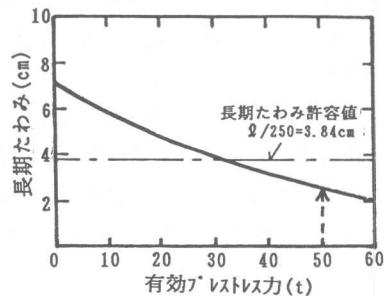


図-5 有効プレストレス力と長期たわみの関係

時変位を設計対象とした。繊維補強コンクリート梁の曲げ破壊形式には、圧縮コンクリートの圧壊、緊張材の破断、主筋の破断の3通りがある。曲げ耐力および破壊形式は終局時の断面のひずみ分布を図-6のように仮定し、式(1)~(3)より算定できる^[2]。しかしこれはあくまで各材料特性の平均値を用いる方法であり、実際にはコンクリート圧壊の場合には主にコンクリートの材料特性のパラッキ^[3]、補強筋破断の場合には主に補強材強度のパラッキにより、梁の曲げ耐力は変動する。したがって破壊形式によって耐力分布は異なるため、各破壊形式の耐力の平均値を比較するだけで曲げ耐力、破壊形式を決定することに疑問が生ずる。そこで以下のような方法を用いて、曲げ破壊に対する安全性を評価した。各材料特性が正規分布するとして材料試験結果に基づいて表-2のように仮定し、各破壊形式の曲げ耐力の平均値 M_{ui} および標準偏差 σM_{ui} をモンテカルロ法によって計算した。その結果を図-8に示す。曲げ破壊に対する安全性は下式によって判定することができる。

$$\beta \cdot \sigma M_{ui} \geq M_{ui} - M_{uD} \quad \dots (4)$$

ここで、 β は各破壊形式に共通な安全性指標であり、設計のグレードによって定められる。図-8に示すように、本設計では β が9程度であっても(4)式は満たされるので、曲げ破壊耐力については、かなり余裕のある設計になっている。

繊維補強材を用いた梁では変形が増加すれば耐力も増大するので、長期荷重を対象とした場合、破壊時のたわみを目視できる程度確保しておけば、使用者に破壊の前兆を認知させることも可能である。ここでは、終局たわみ目標値をスパンの $1/100$ とした。図-4に示す設計断面について、ファイバーモデルを用いて求めた曲げモーメント曲率関係から、終局時の梁の中央たわみを、各破壊形式ごとに算定した結果を表-3に示す。緊張材破断の場合が、最も終局たわみ量が少なく、22.3cm(スパンの約 $1/43$)であった。

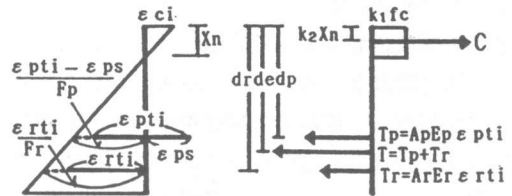


図-6 終局時の断面ひずみ・応力分布の仮定

$$k_1 \cdot b \cdot X_{ni} \cdot f_c = A_p \cdot E_p \cdot \varepsilon_{pti} + A_r \cdot E_r \cdot \varepsilon_{rti} \quad (1)$$

$$M_{ui} = k_1 \cdot b \cdot X_{ni} \cdot f_c \cdot (d_o - k_2 \cdot X_{ni}) \quad (2)$$

$$M_u = \min(M_{ui}) \quad (i=1, 2, 3) \quad (3)$$

$i=1$:コンクリート圧壊時, $i=2$:緊張材破断時, $i=3$:主筋破断時
 f_c, ε_{cu} :コンクリートの圧縮強度, 終局圧縮ひずみ
 $A_p, E_p, \varepsilon_{pti}, \varepsilon_{pu}, \varepsilon_{ps}, F_p$:緊張材の断面積, 弾性係数, ひずみ, プレストレスひずみ, ひずみ適合係数
 $A_r, E_r, \varepsilon_{rti}, \varepsilon_{ru}, F_r$:主筋の断面積, 弾性係数, ひずみ, ひずみ適合係数

$k_1=0.83, k_2=0.42$
 X_{ni} :中立軸位置 d_o :引張合力中心位置
 M_{ui} :終局曲げモーメント

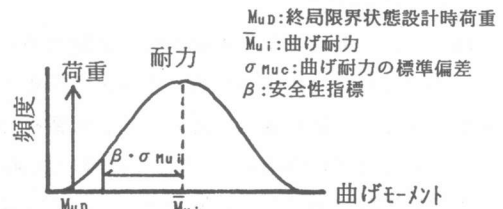


図-7 設計荷重と部材耐力

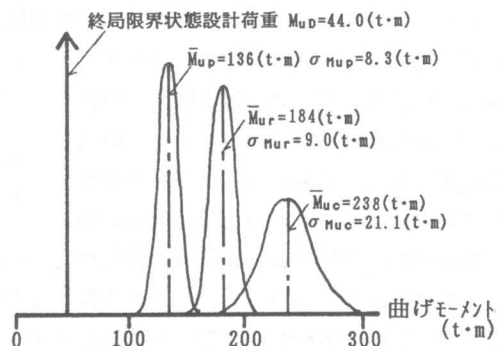


図-8 設計荷重と仮定断面の耐力との関係

表-3 終局時変位の算定結果

破壊モード	終局時変位 δ_u	$\delta_u \geq 2/100$?
コンクリート圧壊	57.3cm	OK
緊張材破断	22.3cm	OK
主筋破断	32.0cm	OK

2. 曲げ破壊試験

2. 1 試験体および試験方法

前節で設計されたプレストレストコンクリート梁を製作し、曲げ破壊試験を行った。配筋は図-4と同様であるが、試験装置の関係でスラブ幅を150cmとした。緊張材として用いたアラミド繊維棒には、ポストテンション方式により一本あたり12.5tのプレストレス力、打設後21日に導入した。有効率を0.8とすると、コンクリート下縁の有効プレストレス圧縮応力度は48.9kg/cm²となる。試験体に用いた各材料の試験結果を表-4に示す。コンクリートには普通ポルトランドセメントを用い水セメント比を45%とした。加力は一方向繰返し載荷で、図-9に示すように支持スパンは9.6m、加力スパンは1.92mである。

2. 2 試験結果

図-10に荷重と梁の中央たわみの関係を示す。初ひびわれ発生後終局点に至るまで荷重と変形の関係はほぼ直線的であること、残留変形が少ないこと等の特徴は、これまでの縮小試験体での曲げ試験結果^{[1][2]}と同様である。プレストレス導入から曲げ試験までの材令が5日と短かったため、初ひびわれ荷重の実験値は、プレストレス有効率を0.8とした設計時の計算値を若干上回っている。同図中に使用限界状態設計荷重および終局限界状態設計荷重を2点集中荷重に換算した値を示す。破壊は緊張材、主筋の破断、コンクリートの圧壊がほぼ同時に起こったが、破壊直前のひずみ実測値から判断すると緊張材の破断が先行したものと考えられる。設計時の計算では、緊張材が破断する時の曲げ耐力平均値は70.8t、終局変位は22.3cmであった。実験結果では、曲げ耐力は71.2t、終局たわみは19.6cmであり、計算値とほぼ一致している。

図-11に梁の中央たわみがスパンの1/500、1/100時のひびわれ状況を示す。曲げひびわれは分散して生じており、繊維補強材の付着は良好であったものと考えられる。

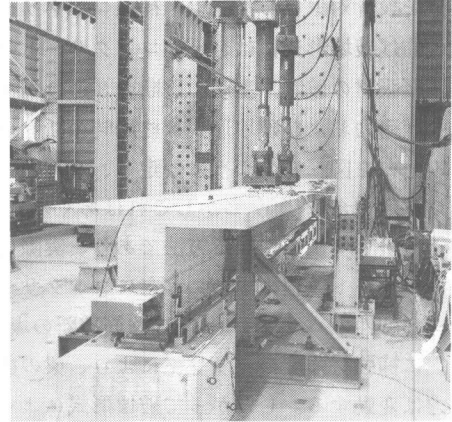


写真-1 加力状況

表-4 材料試験結果

a) コンクリート

	コンクリート		グラウト材
	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 ×10 ⁵ (kg/cm ²)	圧縮強度 (kg/cm ²)
プレストレス導入時	357	—	—
曲げ破壊試験時	371	3.25	293

b) 繊維棒材

	断面積 (mm ²)	耐力 (ton)	弾性係数 (kg/cm ²)
K256	200	25.4	0.62×10 ⁶
K96*	75	8.8	0.62×10 ⁶

* スパイラル筋の直線部

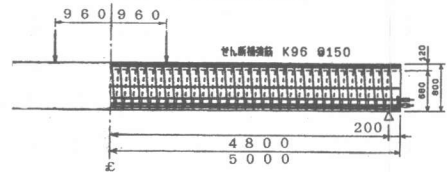


図-9 試験体と加力方法

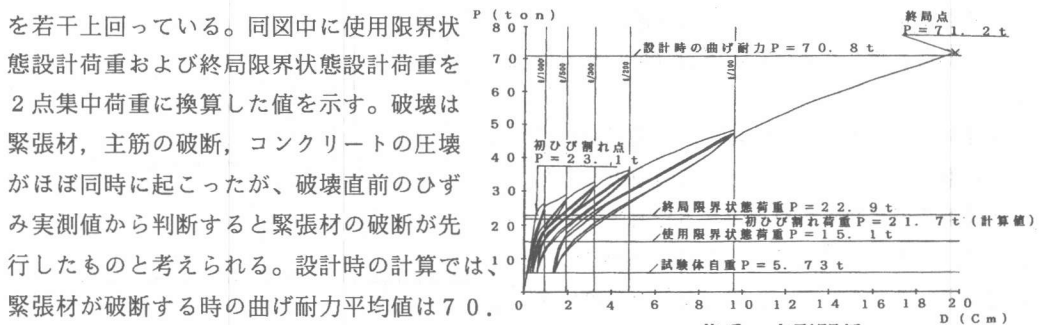


図-10 荷重-変形関係

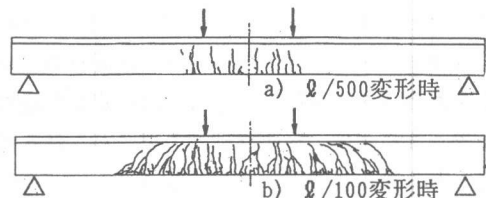


図-11 ひびわれ図

3. 長期載荷試験

3. 1 試験体および加力方法

長期載荷試験体として表-5に示す2体を製作した。L-1試験体は曲げ破壊試験体F-1と同様であり、L-2試験体はL-1、F-1試験体と同形状であるが、荷重を作用させた時点で初ひびわれが発生するように有効プレストレスを22.2tとした試験体である。加力は、写真-2、図-12に示すようにコンクリート製品をおもりとして用い、使用限界状態設計時荷重 $DL+0.8LL=1.42\text{ t/m}$ を作用させた。コンクリートはF-1試験体と同様である。載荷時(材令51日)のコンクリートの材料特性を表-6に示す。試験体の製作および載荷は屋外で行い、載荷終了後小屋がけし室温を 25°C に保った。

3. 2 試験結果

載荷直後L-2試験体では、曲げひびわれが1本発生し、その後数本の曲げひびわれの発生が見られた。L-1試験体では、載荷から500時間経過した時点でも曲げひびわれの発生は見られなかった。図-13に両試験体の中央部たわみと時間の関係を示す。同図に全断面有効と考えた場合のたわみの弾性計算値1と長期たわみ計算値2, 3を併せて示す。長期たわみの算定は、前述した修正ヤング係数法によって行い、L-1試験体については、表-7に示すように設計時の条件と試験体製作載荷過程に即した条件の2通りについて求めた。両試験体とも、ひびわれ間コンクリートの引張抵抗力が残存しているため、たわみの進行は緩やかである。800時間経過後たわみの弾性計算値に対する比はL-1試験体で2.5, L-2試験体で3.0であり、プレストレスによるたわみ抑制効果が見られる。計算値2, 3を比較すると、無限時間後の乾燥収縮ひずみは、計算値3の場合では計算値2の約半分であり、その結果、長期たわみが27%程度小さくなっている。したがって、乾燥収縮量が載荷後の長期たわみに及ぼす影響は大きいものと考えられる。

表-5 試験体の構成

試験体名称	導入緊張力(t/本)	有効プレストレス応力(kg/cm^2)	長期載荷荷重(t/m)
L-1	12.5	48.9	1.42 (0.67Pcr)
L-2	5.6	21.7	1.42 (1.0Pcr)

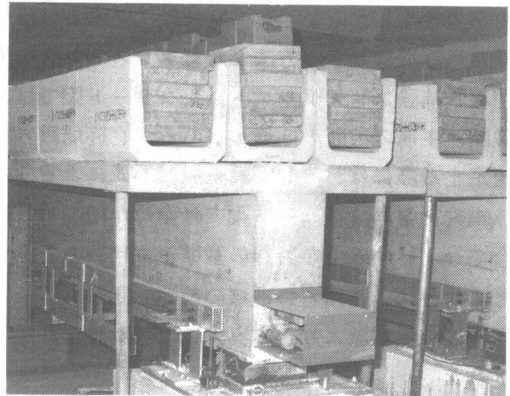


写真-2 長期載荷試験状況

表-6 材料特性

コンクリート		グラウト材
圧縮強度(kg/cm^2)	弾性係数 $\times 10^5$ (kg/cm^2)	圧縮強度(kg/cm^2)
455	3.50	363

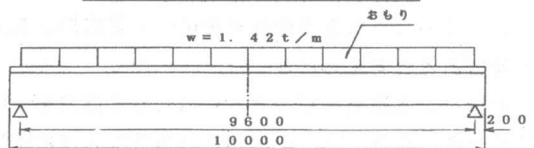


図-12 長期載荷試験体と加力方法



図-13 梁中央たわみと時間の関係

表-7 長期たわみ算定上の仮定

	スラブ巾(cm)	たわみ計算開始時	載荷時	
			材令(日)	コンクリート弾性係数
計算値2(設計時)	250	コンクリート打設時	21	$2.78 \times 10^5 \text{ kg}/\text{cm}^2$
計算値3(試験時)	150	載荷直前	51	$3.50 \times 10^5 \text{ kg}/\text{cm}^2$

4. まとめ

限界状態設計法を用いた繊維補強プレストレストコンクリート梁の曲げ設計手法を提案し、それによって設計した実大P R C梁の曲げ破壊試験および長期載荷試験を行った。設計に際しての基本的な考え方および実験により得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 一般に高強度低弾性率の材料である程、補強量を増して梁の剛性を高めるよりもプレストレス力を大きくした方が変形抑制効果に対する材料の利用効率は高いと考えられるので、ここでは長期たわみを抑制する方法としてプレストレスを導入する方法を採った。
- 2) 繊維補強プレストレストコンクリート梁では、破壊形式としてコンクリートの圧壊、緊張材の破断、主筋の破断の3通りがあるが、終局限界状態設計において曲げ破壊耐力に対する安全率を決定するには、それぞれの破壊形式による曲げ耐力分布の相違を考慮する必要がある。
- 3) 繊維補強コンクリート梁では変形が増加すれば耐力も増大するので、長期荷重を対象とした場合でも、終局変位を設計の基準値に用いることができる。破壊時のたわみを目視できる程度確保しておけば、使用者に破壊の前兆を認知させることも可能である。
- 4) 曲げ破壊試験より、本実大梁が設計時に想定した部材耐力・変形能力を有していることが確認された。
- 5) 使用限界状態設計荷重作用下でのたわみは、800時間経過後で弾性たわみの2.5倍程度であり、プレストレスによるたわみ抑制効果が見られた。また、計算結果によれば、乾燥収縮ひずみの長期たわみへの影響は大きい。したがって、プレストレス力および乾燥収縮を調整することによって、長期たわみはコントロールできるものと考えられる。

以上より、長期荷重に対して、限界状態における安全性、機能性の判断基準値が設定されていれば、このような繊維補強材を用いて要求機能を満足できるような梁部材を十分設計することが可能であると考えられる。

最後に、本研究を実施するに当たりご協力を頂いた東京理科大学卒論生、岡田映子、小阪淳也、佐藤元彦、芹澤丈晴、平尾明星の各氏ならびに試験体製作にご協力頂いた神鋼鋼線工業㈱の関係各位に深く感謝致します。

<参考文献>

- [1] 岡本，遠藤，松原，谷垣 「アラミド繊維による組紐状棒材を用いたP R Cはりの曲げ性状」
コンクリート工学年次論文報告集 10-2, pp.671, 1988
- [2] 谷垣，野村，岡本，遠藤 「組紐状A F R P ロッドを用いたP R Cはりの曲げ性状」
コンクリート工学年次論文報告集 11-1, pp.801, 1989
- [3] 谷垣，野村，岡本，遠藤 「アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その8．P R C梁の曲げ性状Ⅳ M- ϕ 関係のモデル化について）」
日本建築学会学術講演梗概集 C pp.151 1989
- [4] 岡本，野村，遠藤，谷垣 「アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その9．P R C梁の長期載荷性状）」 日本建築学会学術講演梗概集 C pp.153 1989
- [5] 「鋼構造荷重・耐力係数設計法試案」 日本建築学会 昭和61年3月