

集成材アーチ構造物の形状と主せん断応力に関する一考察

INVESTIGATION INTO THE SHAPE OF A GLUED-LAMINATED
TIMBER ARCH AND ITS MAXIMUM SHEARING STRESS

清水英樹*, 久保田努**, 曹西***, 三井康司****
Hideki SHIMIZU, Tsutomu KUBOTA, Xi CAO and Yasushi MITSUI

*工修 大日本コンサルタント(株)北陸支社技術部 (〒 930-0175 富山県富山市願海寺633番地)
** 株式会社長野技研 常務取締役 (〒 390-1241 長野県松本市新村2326)
***工博 信州大学助手 工学部 (〒 380-8553 長野県長野市若里500番地)
****工博 信州大学教授 工学部 (〒 380-8553 長野県長野市若里500番地)

Timber is increasingly widely used as a structural material with modern technological advances in laminated wood fabrication. However, in Japan except for short span footbridges, timber carriage bridges are still less seen, specially long span ones. One reason is that among three allowable stresses of laminated timber, shearing stress is only about 1/9 of compressive and tensile stress. This causes difficulty in the design of a laminated timber bridge and high cost for its construction. In the study, a new shape function to describe laminated timber arch is proposed, which controls the occurrence of the maximum shearing stress, descreases the amount of needed laminated wood, and enables it to construct longer timber bridge. The results of investigation show that the proposed method is very effective.

Key Words : glued-laminated timber arches, maximum shearing stress, finite element meethod
キーワード：集成材アーチ, 主せん断応力, 有限要素法

1. はじめに

本論文は、大規模木造橋梁を設計するにあたっての問題点を挙げ、その改善を試みたものである。具体的には、支間が45m以上の集成材道路橋を目標としている。

今、木造橋に注目する理由として以下のことがあげられる。①集成材製作技術の進歩、②防腐処理法の発達、③耐火性能の向上、④優れた美観と質感、⑤製作と架設が簡単（軽いので大型重機は不要であり、かつ大工や鉄筋工そして型枠工のような熟練労働者を必要としないということ）、⑥凍結融解、融雪剤及び塩害に強い、⑦軽くて軟らかいので、補修、補強、架け替えが容易、⑧衝撃に対してエネルギー吸収能力が大きいので、短時間の過載荷に耐えられる。

このような利点を有するにもかかわらず、我が国では木造集成材アーチ橋（表-2）の架設事例は少なく、現在、国内では車道橋の支間が30.0mを超えるものは2例のみであり、活荷重もB活荷重（25t）を使用していない。規模の大きなものでは、札幌市にある平岡公園歩道橋が、橋長70.0m、支間長45.0mではあるが、使用材がボンゴシと我が国にはない木材となっている。このことから、ボンゴシ等の海外木材ではなく一般的に我が国で生産さ

表-1 構造用集成材の繊維方向の許容応力度⁴⁾

樹 種			等級	許容応力度		
				f _c	f _t	f _s
針葉樹	A1類	べいまつ ソ連からまつ	特級	11.27	10.78	1.176
			1級	10.29	9.31	1.176
			2級	8.82	8.82	1.176
	A2類	ひば・ひのき べいひ	特級	10.29	9.80	1.078
			1級	9.31	8.82	1.078
			2級	7.84	7.35	1.078
	B1類	あかまつ・つが からまつ	特級	9.80	9.31	0.980
			1級	8.82	8.33	0.980
			2級	7.35	6.86	0.980
	B2類	もみ・えぞまつ とどまつ・すぎ べにまつ	特級	8.82	8.33	0.882
			1級	7.84	7.35	0.882
			2級	6.86	6.37	0.882
広葉樹	A類	ぶな・けやき かば・なら	1級	10.29	9.80	1.176
			2級	9.31	8.33	1.176
	B類	ラワン	1級	8.82	8.33	0.980
			2級	7.84	7.35	0.980

f_c:縦圧縮 f_t:縦引張 f_s:せん断 [単位:MPa]

れているスギやマツ等を使用木材とし、支間が45.0m以上で活荷重25tの木造集成材アーチ橋を想定し検証した。

表-2 国内木造アーチ橋事例⁷⁾

名称	所在地	橋種	構造形式	橋長	支間	幅員	荷重	使用材
金峰2000年橋	鹿児島県	車道橋	2ヒンジアーチ橋	42.0m	36.9m	8.5m	25t(A)	スギ、ヒノキ、イタジイ集成材
杉の木橋	宮崎県	車道橋	2ヒンジアーチ橋	38.6m	34.0m	7.0m	25t(A)	スギ、ヒノキ、イタジイ集成材
神の森大橋	愛媛県	車道橋	2ヒンジアーチ橋	26.0m	23.0m	5.0m	20t	地場産スギ集成材
粟飯戸橋	奈良県	車道橋	ハイブリットアーチ橋	24.6m	24.6m	8.0m	20t	集成材ヒノキ、集成材マツ
中央橋	広島県	車道橋	単径間木造上路ローゼ橋	34.0m	21.0m	5.0m	14t	米マツ、スギ、アカマツ集成材
湯ノ又橋	秋田県	車道橋	固定アーチ橋	15.5m	15.5m	6.0m	14t	スギ集成材
岡つみ橋	大分県	歩道橋	ニールセン橋	66.7m	65.0m	3.0m	500kg	ボンゴシ
風穴の里太鼓橋	長野県	歩道橋	2ヒンジアーチ橋	45.0m	45.0m	1.5m	530kg	米マツ大断面集成材
やすらか橋	北海道	歩道橋	ニールセン橋	30.0m	30.0m	1.5m	350kg	米マツ大断面集成材
めおと橋	秋田県	歩道橋	2ヒンジアーチ橋	23.0m	20.0m	1.5m	350kg	秋田スギ大断面集成材
平岡公園歩道橋	北海道	歩道橋	3ヒンジアーチ橋	70.0m	45.0m	3.0m	350kg	ボンゴシ
妙見橋	山形県	歩道橋	2径間アーチ橋	20.0m	10.0m	2.0m	450kg	米マツ大断面集成材
木曽の大橋	長野県	歩道橋	固定アーチ橋	33.0m	33.0m	6.0m		木曽ヒノキ
公園の木橋	岐阜県	遊歩道	単径間アーチ橋	10.0m	10.0m	1.5m	500kg	米マツ大断面、地場産ヒノキ

架設事例の少ない理由の一つとして、集成材のせん断応力に関する許容応力度が、圧縮や引張に比べ格段に小さいことがあげられる(表-1)。このことが集成材アーチ橋設計でのネックとなっていると考え、本文では主せん断応力の最大値をできる限り小さくすると想定されるアーチ構造と形状を考察する。

2. 木橋における主せん断応力

(1) 直交異方性

構造用集成材を直交異方性弾性体と考えたとき、平面応力状態での応力とひずみの関係式は、概略すると次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_x}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}}, Q_{22} = \frac{E_z}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{zx}E_x}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}} = \frac{\nu_{xz}E_z}{1-\nu_{xz}\nu_{zx}} = Q_{21} \\ Q_{33} &= \frac{E_xE_z}{E_x(1-\nu_{xz})+E_z(1+\nu_{xz})} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに σ, τ は応力、 ε, γ はひずみ、 E は弾性係数、 ν ポアソン比を表している。

(2) 主せん断応力

一般的な構造材料として、鋼と鉄筋コンクリートがあり、今取り上げている集成材は、単一材で全ての断面力を受けもつので、鉄筋とコンクリートそれぞれで断面力を受けもつ鉄筋コンクリートよりは鋼に近いと考えられる。鋼は圧縮や引張とせん断応力に対する照査の他に、合成

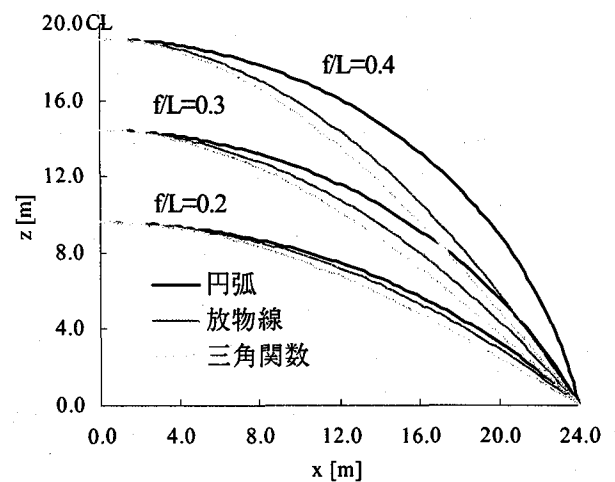


図-1 アーチ形状

応力度による照査がされ、その方法も確立されている。一方、木構造部材では合成応力度の様な照査法が確立されておらず、前章でも述べた様に圧縮や引張に比べせん断応力に関する許容応力度が格段に小さい。そこで設計における初期形状および断面を決定するための1つの方法として、式(3)に示す主せん断応力について取り上げ許容せん断応力で評価を行う。

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_z)^2 + 4\tau_{xz}^2} \quad (3)$$

3. 既存の形状での解析

集成材アーチ構造には固定アーチ、2ヒンジアーチ、3ヒンジアーチ等が考えられ、形状も円弧、放物線、三角関数等がある。まず既存の代表的な構造と形状で、主せん断応力の最大値が小さく抑えられるものを考察する。

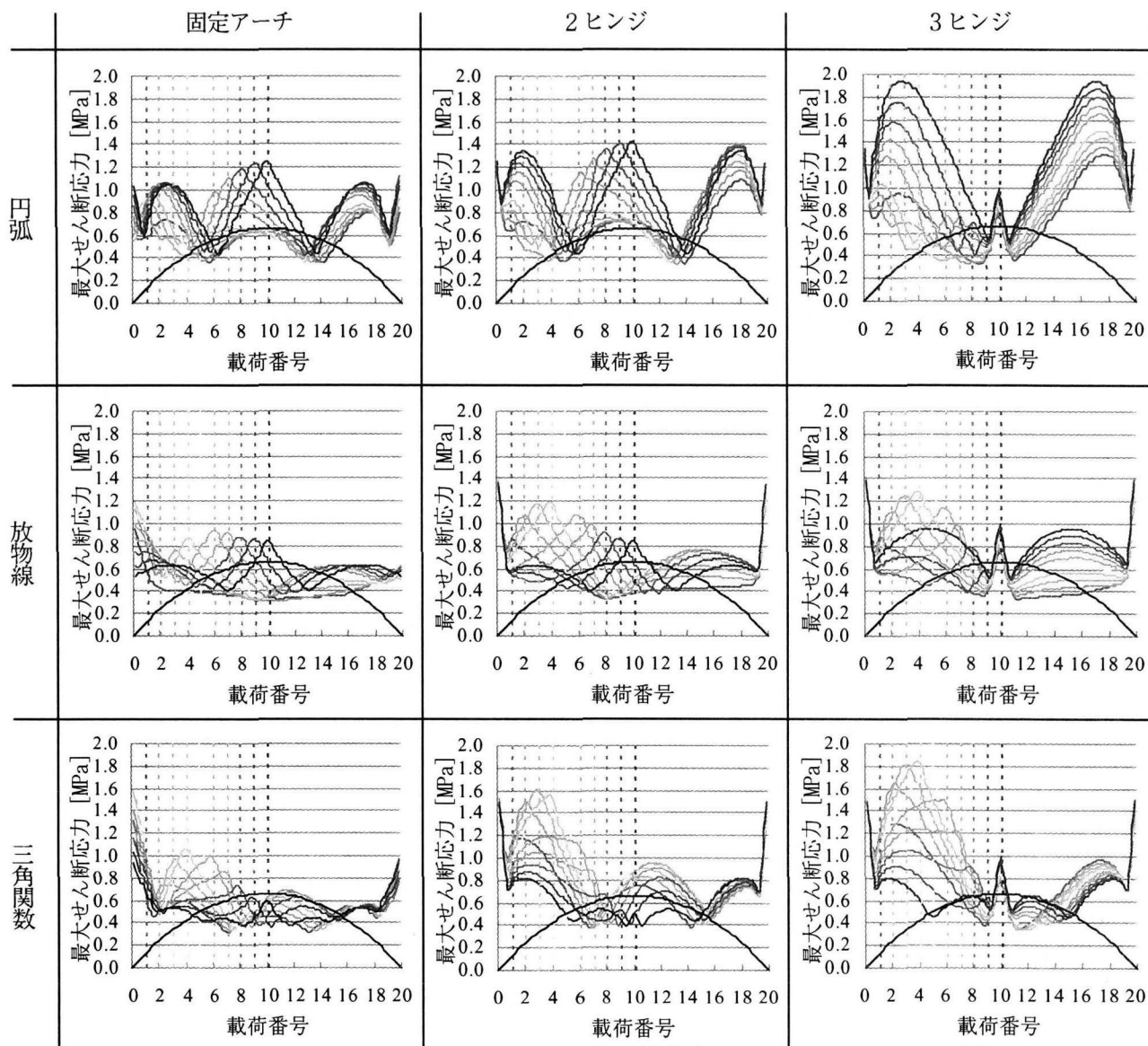


図-3 主せん断応力分布 ($f/L=0.3$)

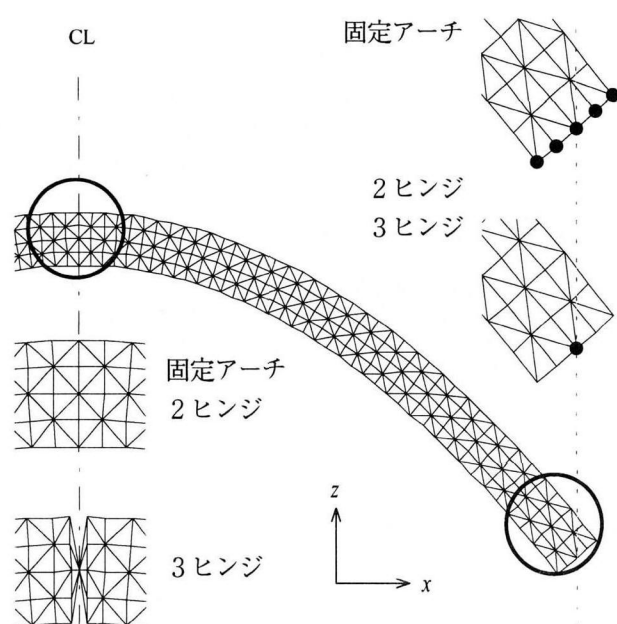


図-2 要素分割図

(1) 解析条件

集成材の弾性係数⁹⁾を $E_x=9310\text{MPa}$, $E_z=8820\text{MPa}$, ポアソン比¹⁰⁾を $\nu_{xz}=0.475$, $\nu_{zx}=0.450$ とし, アーチの支間 L は 48m , 桁厚 w' は 1.0m , 桁高 h は 2.4m , ライズ比 f/L を $0.2, 0.3, 0.4$ の 3 種類とする. アーチ形状関数は図-1 に示す円弧, 放物線, 三角関数とし, ヒンジ条件を固定アーチ, 2 ヒンジ, 3 ヒンジとする. 荷重については死荷重を集成材自体の比重を 0.5 とし, 床版その他の荷重を 588GPa とする. 活荷重は L25A とし幅員は 8.0m で, 部分等分布荷重は支間を 20 等分し, 片側 10 箇所について載荷する.

(2) 要素分割と境界条件

基本的な要素分割と, ヒンジ条件に対する境界条件を図-2 に示す. 黒丸は x 方向, z 方向ともに変位を拘束している.

表-3 主せん断応力の最大値 [MPa]

曲線	ライズ比	固定アーチ	2 ヒンジ	3 ヒンジ
円弧	0.4	1.3845	1.8484	2.6184
	0.3	1.2459	1.4215	1.9429
	0.2	1.3139	1.7767	1.8806
放物線	0.4	1.0629	1.1669	1.2422
	0.3	1.1896	1.3869	1.3917
	0.2	1.5065	1.8280	1.8986
三角関数	0.4	1.4671	1.5328	1.8029
	0.3	1.5817	1.6021	1.8437
	0.2	1.8664	1.9703	1.9847

(3) 解析結果

前述の27モデル (f/L を3種, 形状関数を3種, ヒンジ条件を3種) を解析した結果, 主せん断応力の最大値が小さく抑えられたものは, 表-3 に示すとおり固定アーチ構造で, 形状はライズ比が0.2で円弧, その他は放物線である。図-3の点線は部分等分布荷重載荷位置で, 同色の実線がそのときの主せん断応力のアーチ軸線上での最大値の分布状況を示している。全般に, 支点付近で主せん断応力の上昇が見られるが, 下部構造との接合に集成材以外の部材(鋼材)を使用すると考え, アーチ端部を除いた場合, 荷重載荷位置による, 主せん断応力の最大値の変化が少ないのが放物線固定アーチである。以上のことにより, 集成材アーチ橋には, 放物線固定アーチが適していると考えられる。

4. 新たなアーチ形状での解析

3章で考察したように, 主せん断応力の最大値が小さい形状は放物線となるが, ライズ比の小さなおとこで円弧が良いという結果になる。図-1よりライズ比が0.2のとき, 放物線と円弧は非常に似かよった曲線をしており, 円弧の方がわずかに外側にふくらんでいる。このことからアーチ形状関数として, 式(4)に示す新たな関数を用い, 桁高 h を3種, ライズ比 f/L を21種, 次数 n を21種の計1323タイプの解析を行う。

(1) 解析条件

集成材の弾性係数とポアソン比, アーチの支間と桁厚は3章と同じものを用い, 桁高を1.6, 2.4, 3.2mの3種, ライズ比は0.1~0.6の間を0.025きざみで21種, ヒンジ条件は固定アーチとする。アーチ形状関数は図-4に示す2次放物線を含む関数を式(4)とし, 次数 n は1.5~2.5の間を

$$\begin{cases} z = -\left(\frac{2x}{L}\right)^n f + f & \left(0 \leq x \leq \frac{L}{2}\right) \\ z = -\left(\frac{-2x}{L}\right)^n f + f & \left(-\frac{L}{2} \leq x < 0\right) \end{cases} \quad (4)$$

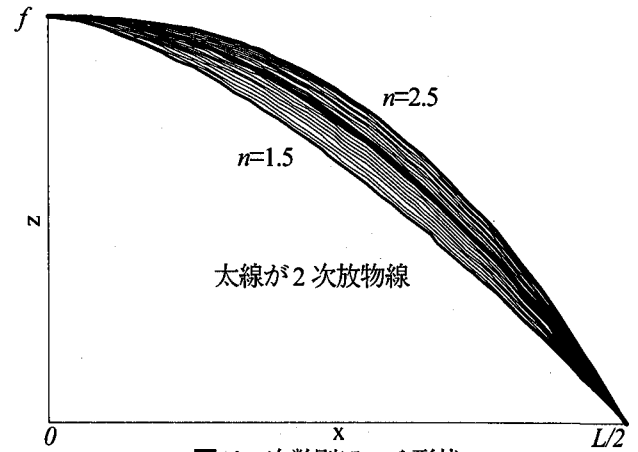


図-4 次数別アーチ形状

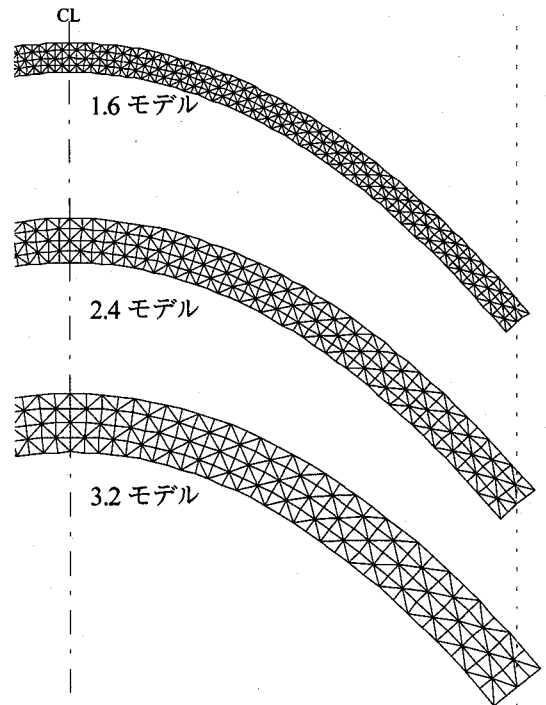


図-5 各モデルの要素分割図

0.05 きざみの21種とする。

荷重は, 死荷重と活荷重 (L20, L25B) とし, これらを集中荷重, 部分等分布荷重, 等分布荷重, 自重の4つに分けて解析する。集中荷重と部分等分布荷重中心は, 支間を20等分し片側10箇所に載荷する。

(2) 要素分割と境界条件

基本的な要素分割を図-5に示し, 境界条件は図-2のように固定とする。なお, 桁高 h が1.6mのモデルを1.6モデル, 2.4mのモデルを2.4モデル, 3.2mのモデルを3.2モデルとする。

(3) 解析結果 (単位荷重)

全モデルについて単位荷重を載荷し, 桁厚と体積(桁厚のみ変化)がそれぞれ一定で, 桁高ごとに主せん断応力の最大値が低く抑えられる形状を表-4に示す。荷重条

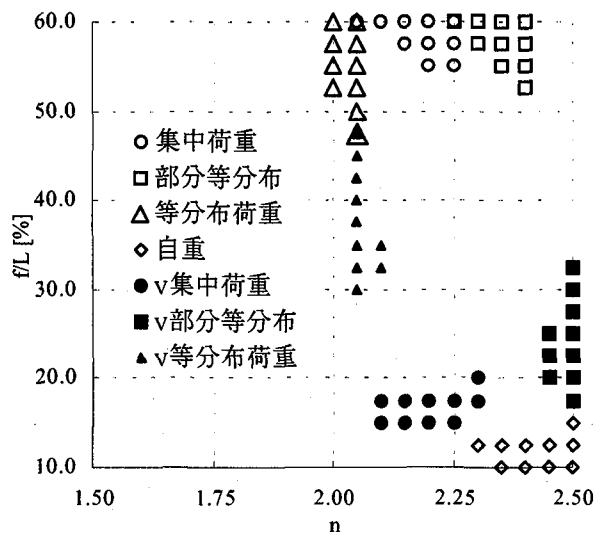


図-6 1.6 モデル $\min_{10}$

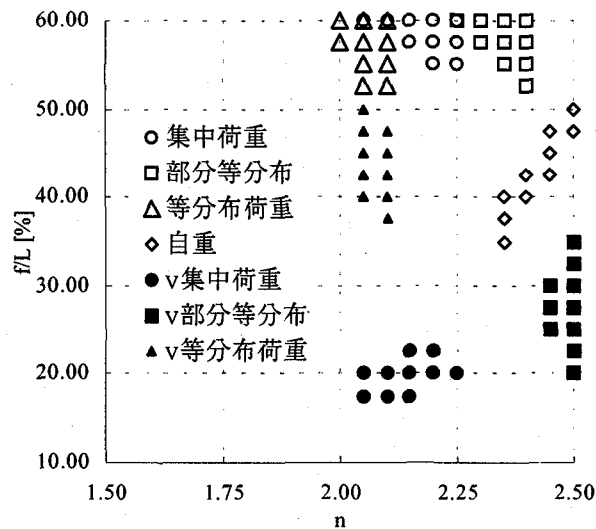


図-7 2.4 モデル $\min_{10}$

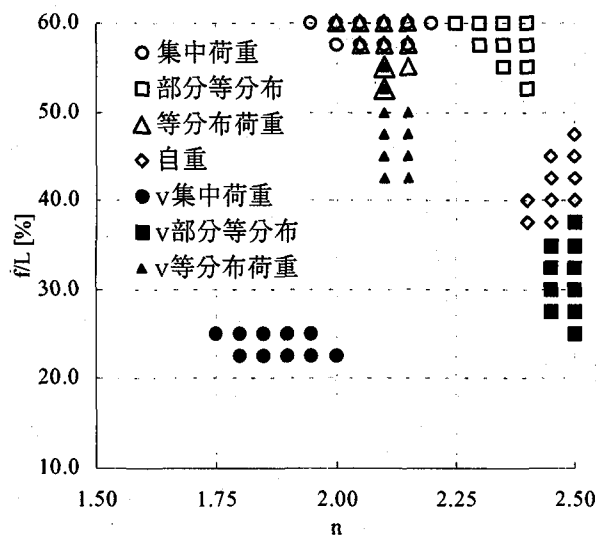


図-8 3.2 モデル $\min_{10}$

表-4 主せん断応力の最大値が最少の形状

	1.6 モデル	2.4 モデル	3.2 モデル
集中荷重	1.0000	0.4422	0.2625
p_s	2.25 .600	2.25 .600	2.05 .600
部分等分布	1.0000	0.4545	0.2618
p_d	2.35 .600	2.35 .600	2.35 .600
等分布荷重	1.0000	0.6426	0.4768
p_t	2.00 .600	2.05 .600	2.10 .600
自重	1.0000	0.2266	0.2260
p_i	2.50 .125	2.40 .400	2.50 .400
v 集中荷重	1.0000	0.6986	0.5725
vp_s	2.25 .175	2.20 .200	1.80 .225
v 部分等分布	1.0000	0.6970	0.5459
vp_d	2.50 .225	2.50 .275	2.50 .300
v 等分布荷重	1.0000	1.0236	1.0573
vp_t	2.05 .375	2.10 .450	2.10 .475

形状…	1.6 モデルを1としたときの $\tau_{\max}$ の値
次数 n	ライズ比 f/L

表-5 2次放物線からの主せん断応力平均減少率 [%]

荷重	1.6	2.4	3.2	平均	
p_s	1.324	1.128	0.516	0.989	桁厚一定平均
p_d	12.108	10.934	10.554	11.199	
p_t	6.736	8.851	9.092	8.226	
p_i	9.576	29.532	25.278	21.462	体積一定平均
vp_s	0.499	0.382	0.453	0.445	
vp_d	10.643	9.464	9.089	9.732	
vp_t	6.555	8.485	8.564	7.868	
	総平均				10.173

件の前に v と付くのが体積一定の場合で、自重以外は、体積（一定）＝側面積×桁厚 w' のとき主せん断応力は $(w/w')\tau_{\max}$ で求められ、自重に関しては桁厚を変化させ

ても主せん断応力は一定である。次数とライズ比について主せん断応力の最大値の小さな方から 10 個取り出して図示したのが図-6-8 である。

桁厚が一定のとき、主せん断応力の最大値が小さくなる形状は、自重以外、ライズ比の大きなところで、これはライズ比が大きいと、一定の荷重を、多くの集成材（ライズ比が大きくなると集成材体積が大きくなる）で支えたためと考えられる。このことから体積を一定にして比較すると、主せん断応力の最大値が小さくなる形状は自重は次数が 2.35~2.50 でライズ比にはあまり関係なく、集中荷重はライズ比が 15%~25% と比較的小さく、次数は 1.75~2.30 と幅が広い。等分布荷重もライズ比によらず次数が 2.05~2.15 と 2 次放物線に近い形状で、主せん断応力が最小になる、部分等分布荷重は次数が 2.50 以上で最小になると思われる。

表-5 は 2 次放物線と比較したものであり、各ライズ 21 種の主せん断応力が最小になった次数で、それぞれ次数

表-6 応力添字対応表

	x 方向応力	z 方向応力	せん断応力
p_s	σ_x^s	σ_z^s	τ_{xz}^s
p_d	σ_x^d	σ_z^d	τ_{xz}^d
p_t	σ_x^t	σ_z^t	τ_{xz}^t
p_j	σ_x^j	σ_z^j	τ_{xz}^j

表-7 使用集成材量の少ない形状

	モデル	1.6	2.4	3.2
L20	n : f/L	2.10 : 350	2.15 : 400	2.20 : 425
	w [mm]	1423.5	736.5	475.4
	V [m ³]	208.6	114.0	75.7
	減少率[%]	13.30	14.80	13.49
L25	n : f/L	2.25 : 325	2.25 : 375	2.30 : 425
	w [mm]	2383.7	1204.7	718.9
	V [m ³]	342.5	182.4	115.0
	減少率[%]	19.09	17.84	17.44

が2.00からの主せん断応力減少率の平均を示したものである。総平均で 10.2%減少しており、特に自重の 21.5% が大きい。集中荷重が 1%以下なのに対して、部分等分布荷重が 10%前後の減少率となっており、式(4)に示す関数は L20 より L25B に適していると考えられる。

5. 集成材使用量の少ない形状

(1) 各条件と解析方法

活荷重は L20 と L25B の 2 種、床版幅 8.0m、アーチは橋軸方向床版両端にあるものとし、集成材アーチの比重を 0.5、床版その他の死荷重を 588GPa とする。その他の条件は 4 章と同様とする。これによりアーチに載荷される荷重は、集中荷重 $P_s=330.75\text{kN}$ 、部分等分布荷重 $P_d=79.380\text{kN/m}$ 、等分布荷重 $P_t=46.673\text{kN/m}$ 、自重 $P_j=4.90\text{kN/m}^3$ 、となる。

次に桁幅 w' を未知数とし、許容応力度 $\tau_k=0.98\text{MPa}$ で

主せん断応力がこれを越えない w' を求め、 x - z 面での面積は既知より、許容応力度限界でのアーチ部材の体積を知ることができる。このことから使用集成材量の少ない形状を求めた。

桁幅の求め方は以下のようにした。

$w=1.0\text{m}$ のときの応力は 4 章で既知なので、L 荷重によ

る応力は (表-6 参照 L20 は $P_d=0$, L25B は $P_s=0$)

$$\sigma'_x = \frac{w}{w'} (P_s \sigma_x^s + P_d \sigma_x^d + P_t \sigma_x^t) + P_j \sigma_x^j \quad (5)$$

$$\sigma'_z = \frac{w}{w'} (P_s \sigma_z^s + P_d \sigma_z^d + P_t \sigma_z^t) + P_j \sigma_z^j \quad (6)$$

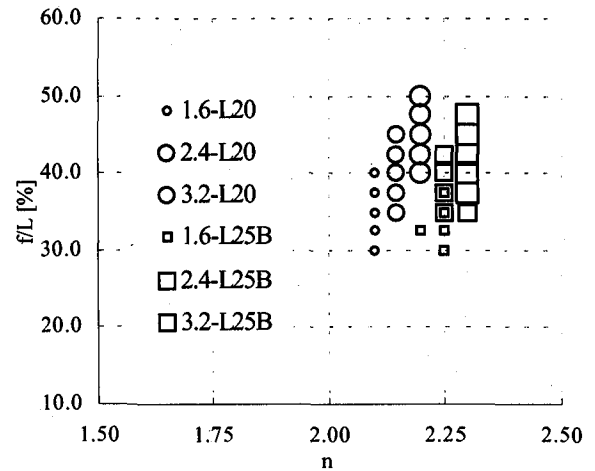
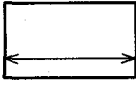
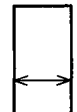
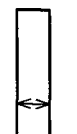


図-9 集成材使用量の少ない形状

表-8 断面と断面 2 次モーメント

	h=1.60m	h=2.40m	h=3.20m
L20			
	1423.5mm $I=5.83\text{m}^4$	736.5mm $I=10.18\text{m}^4$	475.4mm $I=15.58\text{m}^4$
L25B			
	2383.7mm $I=9.76\text{m}^4$	1204.7mm $I=16.65\text{m}^4$	718.9mm $I=23.56\text{m}^4$

$$\tau'_{xz} = \frac{w}{w'} (P_s \tau_{xz}^s + P_d \tau_{xz}^d + P_t \tau_{xz}^t) + P_j \tau_{xz}^j \quad (7)$$

で表され、式(3)より、

$$\tau_k = \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma'_x - \sigma'_z)^2 + 4\tau_{xz}'^2} \quad (8)$$

これに式(5)~(7)を代入し w' について解く。

(2) 解析結果 (L 荷重)

使用集成材量の少ない形状は表-7 のようになり、減少率は 2 次放物線と比較しての体積減少率で L20 が 14%前後に対し、L25B は 17~19%減少している。この結果からも式(4)に示す関数は、L20 より L25B に適していると考えられる。集成材使用量の少ない形状を桁高ごとに上位 5 個について示した図-9 も勘案すると、桁高が大きくなるほど次数、ライズ比ともに大きくなる傾向があるが、形状を決定する要因は、ライズ比よりも次数によるところが大きい。これは L20 でライズ比に関係なく桁高で次数が決まり、L25B でもほぼ同様の結果が得られることからである。使用集成材量と断面の関係 (表-7, 8) では、当然桁高が高いほど使用量が少なくてすむが、桁高が高

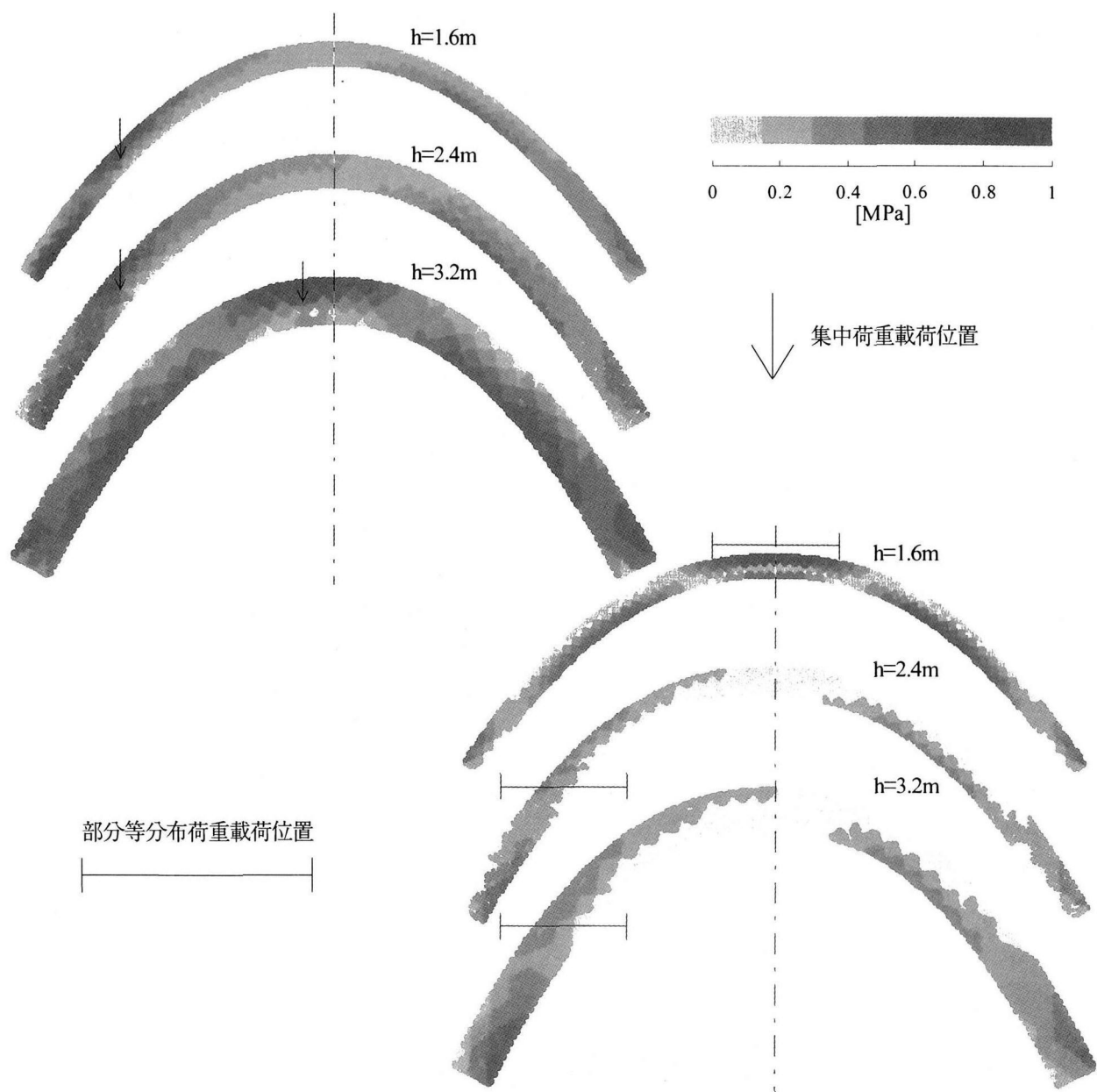


図-10 桁高別主せん断応力分布

くなると風荷重等の面外からの力が無視できなくなり適用が難しくなる。

主せん断応力分布は、桁高別使用集成材量の少ない形状のものを図-10に示し、その中で桁高が2.4mでL25B荷重を受けるとき部分等分布荷重載荷位置ごとと、最大値を抽出したものを図-11に示す。全般に主せん断応力の最大値は、アーチ端部つまり支点近くで発生するものが多く、次にアーチクラウン付近上部である。使用集成材量の少ない形状では、支間の15%、45~50%の位置に

集中荷重ないし部分等分布荷重中央が載荷されるのが、主せん断応力に対して不利である。その間15~45%で主せん断応力の最大値の発生場所が変わるが、このときの最大値の変化が少ないものが有利である。最大値を抽出したものでは、支点付近上下、アーチクラウン上部、支点とアーチクラウンの中間点下部に主せん断応力の大きなものがあり、この場所をせん断許容応力度の大きな材料を使用すべきと考察される。

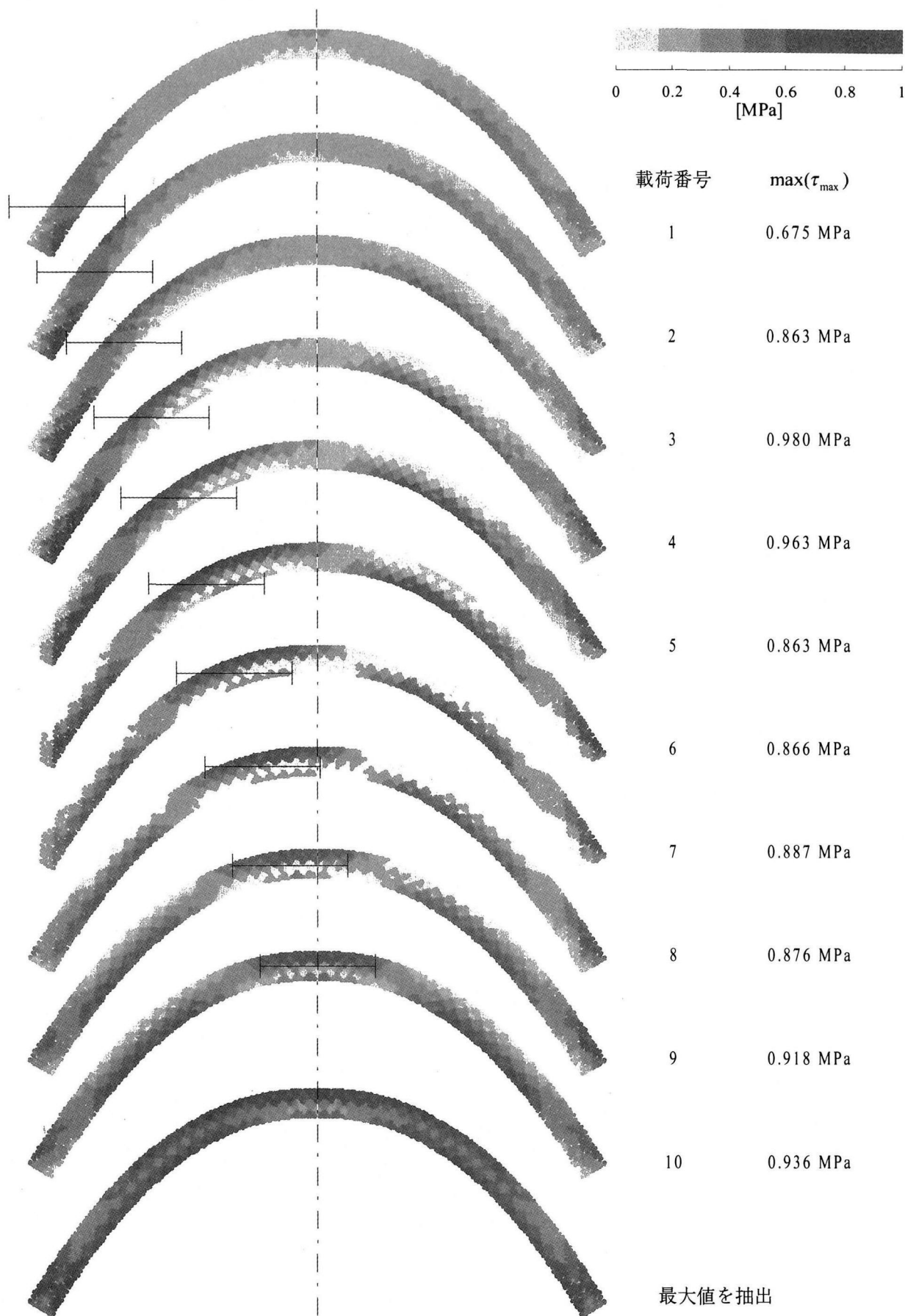


図-11 桁高 $h=2.4\text{m}$ の場合の载荷位置別主せん断応力分布および主せん断応力最大値

6. まとめ

本研究では、集成材を使用したアーチ構造物におけるアーチ形状関数とライズ比を変化させ、有限要素法による数値解析を行い、集中荷重、部分等分布荷重、等分布荷重、自重での主せん断応力の最大値が小さくなる形状と、それらを重ね合わせたL20, L25B 荷重での使用集成材量の少ない形状を考察した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 既存のアーチ形状と構造では、放物線固定アーチが主せん断応力の最大値が低く抑えられる。
- 2) 式(4)に示す関数を用いたアーチ構造物では、2次放物線に比べ主せん断応力の最大値が単位荷重平均で10.2%減少しており、特に自重の21.5%が大きい。
- 3) 式(4)の関数は2次放物線からの主せん断応力の最大値平均減少率で、集中荷重より部分等分布荷重が10倍以上減少している。L20よりL25Bに適していると考えられる。
- 4) 2次放物線と式(4)の関数を使用した場合の体積減少率を比較するとL20が14%前後L25Bは17~19%減少している。
- 5) 以上のことにより、集成材アーチ構造物に式(4)の関数を用いることはかなり有効であるとともに、L20よりL25Bに適していると考えられることができる。

参考文献

- 1) 薄木征三：現代木橋技術，土木学会誌 Vol.82, pp.8~10,1997.
- 2) 久保田努，渡辺浩志，三井康司：プレストレスによる木桁の接合法，構造工学論文集 Vol.43A, pp.1103~1110,1997.
- 3) 深山静六，渡辺浩志，久保田努，三井康司：プレストレス導入による集成材の新接合方法に関する研究，土木学会論文集 No.616/VI-42, pp91-102,1999.3
- 4) (財)日本住宅・木材技術センター編著：木橋づくり新時代，(株)ぎょうせい，1995.
- 5) 土木施工編集委員会編：橋梁 / 景観とデザイン，(株)培風館，1998.
- 6) Michael A. Ritter：Timber Bridges Design, Construction, Inspection and Maintenance, United States Department of Agriculture Forest Service, 1990.
- 7) 監修・林野庁 編集指導・薄木征三：近代木橋の時代，(株)龍源社，1995.
- 8) 福田博，邊吾一：複合材料の力学序説，(株)古今書院，1989.
- 9) 木質構造研究会編：木質構造建築読本，(株)井上書院，1988.
- 10) (社)日本建築学会：木構造計算規準・同解説，(社)日本建築学会，1988.
- 11) L.J.Gibson, M.F.Ashby, 大塚正久 訳：セル構造体 多孔質材料の活用のために，(株)内田老鶴圃，1993.

(2000年9月14日受付)