曲げ引張側にボルトを有する接触モデルの設計法

The suggestion for design of a bolt-joint system on the bend-tension side

○荒木昇吾*　久保田努**
ARAKI Shogo, KUBOTA Tsutomu

*工修 ㈱長野技研（〒390-1241　長野県松本市新村 2326）
**㈱長野技研　　（〒390-1241　長野県松本市新村 2326）

ABSTRACT　Recently, Timber-bridges have been attracted from points of view of environmental and energy problems, and the constructions have been increasing. However, the almost were constructed on forestry road, and no comparing with other types of bridge(concrete, metal, and etc). And it cannot compare at present. As this reason, Timber-Bridges Design Code is not equipped yet. This paper, aims to be helpful equipping a part of the design-code, suggests the fittest method of design for a bolt joint system is generally used at Timber-Bridge by applying of a Reinforced-Concrete theory. And the validity of this method is confirmed by comparing with F.E.M. analysis.

Keywords : ボルト接合，曲げ引張，RC理論，FEM解析
bolt-joint system, bend-tension side, RC theory, FEM analysis

1. はじめに

近年，二酸化炭素排出量，製造過程におけるエネルギー消費，周辺環境への影響といった観点から「木橋」が注目されつつあり，架設事例についても増加の傾向にある．しかしながら，そのほとんどは林道または公園において計画され，加えて他の橋種と比較の上で架設されることはほとんどないことが現状である．

その理由として，欧米と異なり道路橋としての設計規準が未整備であることが挙げられる．我が国における「道路橋示方書」[1)]は木橋を橋梁としては規定しておらず，唯一の木構造の規準である「木質構造設計規準」[2)]についても木橋を想定してはいない．

木橋計画は規定や規準といった拘束が少ないために設計技術者単位に担われ，設計手法についても統一が成されていない．反面，設計における自由度が高く，性能設計型と捉えることも可能ではあるが，安全性・耐久性に対する疑心暗鬼の感は否めない．

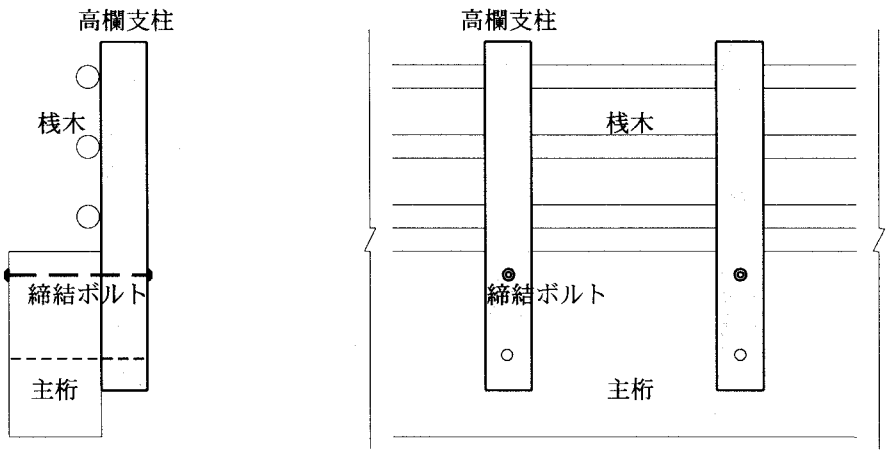
木橋に限らず木質構造物の設計計画における問題点のひとつとしては，接合部の設計が挙げられる．これは，接合部の構造や部材形状が他の構造部材に与える影響が大であるためと思われる．

木橋において一般的に用いられている接合法としては，接着剤等による接着接合，PS 鋼材等によるプレストレス接合，ボルト等による機械的接合が挙げられる．

本論文は設計規準整備の一助を目的とし，ボルト接合形式…曲げ引張側にボルトを有する接触モデル…に関する設計手法を模索するものである．その際，一例として主桁に支柱を取り付ける高欄形式を挙げ，ボルトを有する接触モデルとして取り扱い，鉄筋コンクリートにおける偏心軸引張力が核外に作用する場合の理論を応用することにより，本手法の適用性を論じるものとする．加えて，FEM 解析により上述の設計法の妥当性を判定するものである．

2. 一般的設計法

曲げ引張力を受けるボルト接合部の一例として，主桁に直接支柱を取り付ける場合の高欄形式を**図－1** に示す．

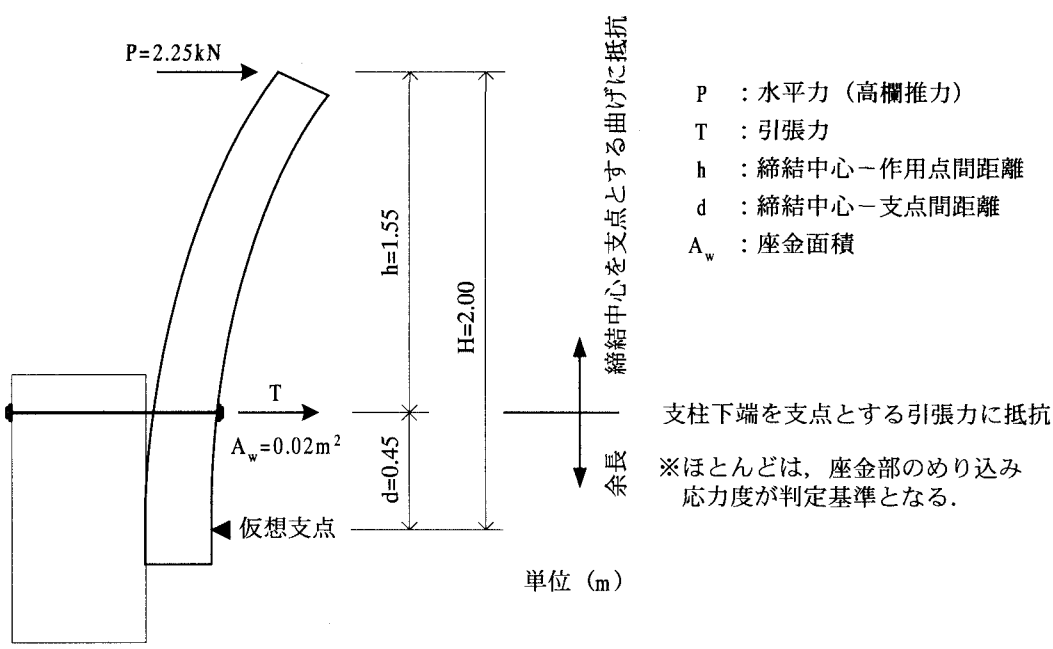


図－1　高欄形式

図－1 に示す高欄を設計する場合，支柱および桟木について水平・鉛直方向の検討を行うことにより部材断面を決定する．

本論文においては，設計法の理論展開を明瞭にするために桟木および鉛直方向の検討は省略し，高欄支柱部の水平方向の検討を行うことにより，曲げ引張力を受けるボルト接合部の設計法を検証するものである．

一般的に支柱部の水平方向の検討は，引張側のボルトのめり込み応力度によって照査されてきた．この支持機構および計算例の参考寸法を**図－2** に示す．



図－2　支持機構および参考寸法

締結ボルトに作用する引張力Tは，高欄支柱頂部に作用する水平力を引張ボルトと仮想支点（例えば，下側留めボルト）間距離で除すことにより決定される．

$$T = P \times H / d = 2.25 \times 2.00 / 0.45 = 10.0 \quad (\mathrm{kN}) \tag{1}$$

ここに，ボルトの許容引張耐力[2)]は式(2)の内，小さい方の値で与えられる．

$$P_{t1} = 0.50 \cdot F \cdot A_z$$

$$P_{t2} = f_e \cdot A_w \tag{2}$$

P_t;ボルトの許容引張耐力
F;ボルトの基準強度
A_z;ボルトの軸断面積
f_e;木材の許容めり込み応力度
A_w;座金面積

よって，引張力Tがボルトの許容引張耐力P_tを超過しないように，ボルト径，座金径および高欄支柱の余長（締結ボルト下側）を決定する必要がある．

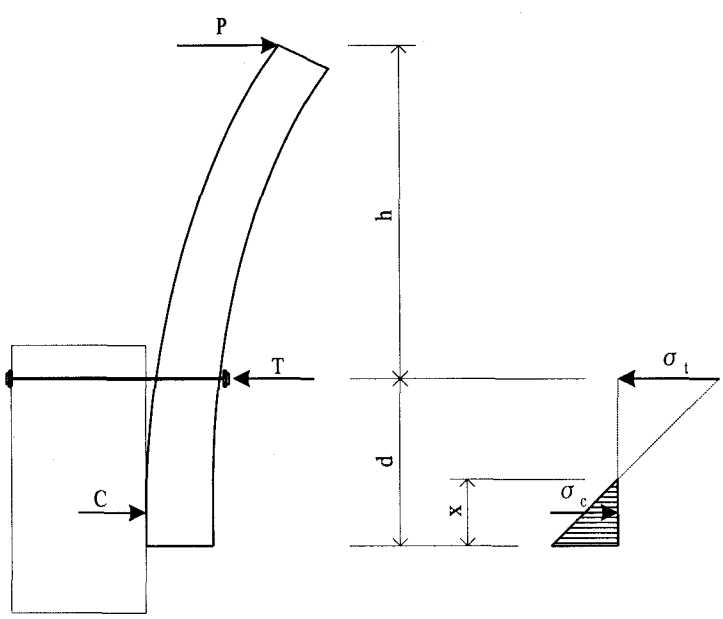
また，引張耐力の照査はそのほとんどが木材のめり込み応力度が判定基準となるために，木材のめり込み応力度でのみ照査する場合は次式で決定される．

$$6_t = T / A_w = 10.0 / 0.02 = 500 \quad (\mathrm{kN/m^2}) \qquad 6_t;\text{めり込み応力度} \tag{3}$$

3. 設計法の一案

前節で示した設計例は仮想支点を設けることにより成立する．しかしながら，経験的手法の枠内に留まり，理論的証明は成されていないと思われる．

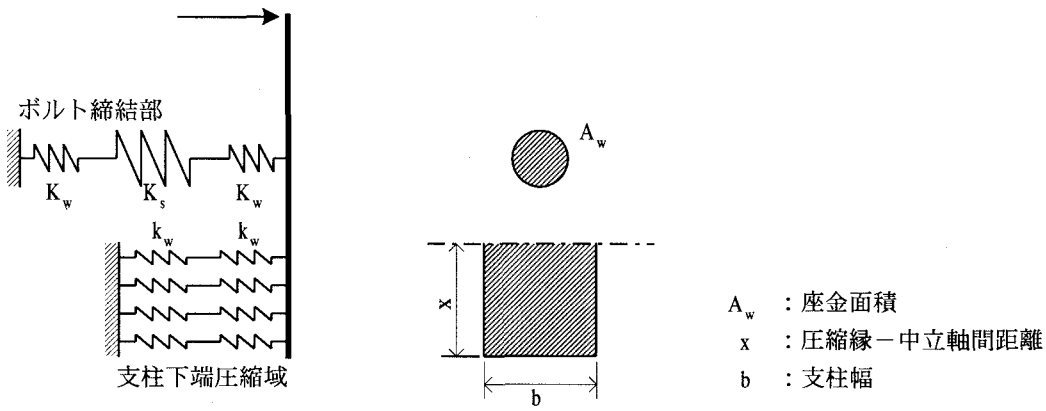
ここに，高欄支柱頂部に水平力（高欄推力）が作用すると考え，この支持機構を**図－3** に示すようなものと仮定する．



P　：水平力（高欄推力）
T　：引張力
C　：圧縮力
h　：引張中心－作用点間距離
d　：引張中心－圧縮縁間距離
x　：圧縮縁－中立軸間距離
σ_t　：引張応力度
（めり込み応力度）
σ_c　：圧縮応力度

図－3　支持機構

よって，支持機構は**図－4** に示すような円と矩形を組み合わせた形状の，且つ矩形側は引張力に抵抗できない断面の問題と捉えられ，鉄筋コンクリートの偏心軸方向引張力を核外に受ける断面の解法 [3]と同様に考えることができる．ただし，鉄筋および鉄筋断面積に該当するものはボルトではなく，座金面積と等しい面積の木材である．



図－4　RC 理論の適用

RC 理論を応用すると，ボルト締結部のめり込み応力度 σ_t および，支柱下端の圧縮応力度 σ_c は以下のように導くことができる．

外力と内力の釣合条件より，

$$P = T - C = \frac{\sigma_c}{x}(G_t - G_c) \qquad (4)$$

G_t : 座金部分の断面1次モーメント

G_c : 支柱下端圧縮域の断面1次モーメント

中立軸に関するモーメントの釣合条件から，

$$P(h + d - x) = \frac{\sigma_c}{x}(I_c - I_t) \qquad (5)$$

I_t : 座金部分の断面2次モーメント

I_c : 支柱下端圧縮域の断面2次モーメント

(5)式に(4)式の P を代入し x について整理すると，

$$I_c - I_t - (G_t - G_c)(h + d - x) = 0$$

$$\frac{bx^3}{3} + A_w(d - x)^2 - \left\{A_w(d - x) - \frac{bx^2}{2}\right\}(h + d - x) = 0$$

$$-\frac{1}{6}bx^3 + \frac{1}{2}bdx^2 + \frac{1}{2}bhx^2 + A_w hx - A_w dh = 0$$

$$x^3 - 3(d + h)x^2 - \frac{6A_w h}{b}x + \frac{6A_w dh}{b} = 0 \qquad (6)$$

(6)式を解いて x を決定すれば，σ_c および，σ_t は次のように導かれる．

$$\sigma_c = \frac{Px}{G_t - G_c} = \frac{Px}{A_w(d - x) - \frac{bx^2}{2}} \qquad (7)$$

$$\sigma_t = \frac{\sigma_c}{x}(d - x) \qquad (8)$$

または，C および T を求めると，

$$C = \frac{Ph}{d - \frac{x}{3}} \quad , \quad T = \frac{P\left(h + d - \frac{x}{3}\right)}{d - \frac{x}{3}} \tag{9}$$

よって，

$$\sigma_c = \frac{2C}{bx} \quad , \quad \sigma_t = \frac{T}{A_w} \tag{10}$$

となる．

また，これらの理論式が成立するためには，以下の仮定が必要となる．

①支柱の曲げによる変形を考慮しないこと．（曲げ剛性 EI=∞）

②引張側のバネ定数 K_w と圧縮側のバネ定数 k_w が次の関係を有すること．

$$K_w = k_w \cdot A_w$$

鉄筋コンクリートのヤング係数比 n のような係数を導入し，$K_w = n' \cdot k_w \cdot A_w$ としたいが，n'を決定するには多くのパラメータ処理が必要となり，また非線形となることが予想されるために困難であると思われる．よって本仮定においては，n'=1.0 とした．

4. 理論値の算出

高欄支柱の照査項目としては，

①水平力（高欄水力）による曲げモーメント

②ボルト締結部のめり込み応力度

③支柱下端の圧縮応力度

以上が挙げられるが，ここでは，上記②および③について算定する．

ここに，対象が**図－5** に示す寸法を有するとき，式**(6)**は次式のように表現される．

$$x^3 - 6.000x^2 - 0.930x + 0.418 = 0 \tag{11}$$

解いて，

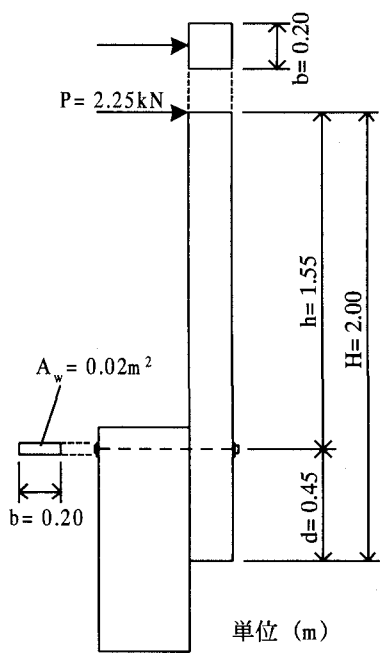
$$x = 0.200 \tag{12}$$

よって，σ_c，σ_t はそれぞれ式**(7)**，**(8)**より，

$$\sigma_c = \frac{2.25 \times 0.200}{0.02 \times (0.45 - 0.200) - \frac{0.20 \times 0.200^2}{2}} = 450\text{kN/m}^2 = 0.45\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_t = \frac{450}{0.200} \times (0.45 - 0.200) = 563\text{kN/m}^2 = 0.56\text{N/mm}^2$$

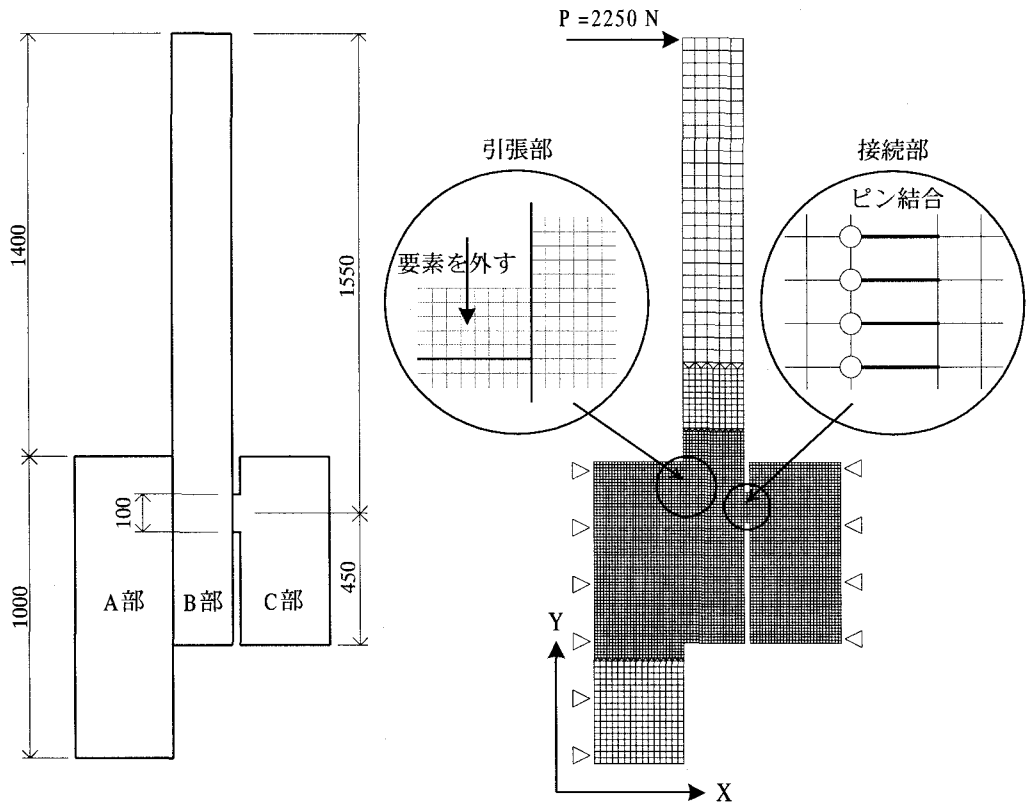
以上のように算定される．



図－5　適用例

5. 解析モデル

上述の設計法の妥当性を確認するために FEM 解析を行った．**図－6** に本論文の解析モデル，および解析条件を示す．尚，本解析は対象を二次元直交異方弾性体と考え，汎用有限要素解析プログラム FEMLEEG/LISA により行うものとする．



(各部物性値)

A部；主桁部（N/mm²）
Ex =320

B部；高欄支柱部（N/mm²）
Ex =320, Ey =8000

C部；支柱支持部（N/mm²）
Ex =320

(解析順序)

① 接触部に引張応力(X方向)が生じる
↓
② 接触部の引張要素を外す
↓
③ 接触部に引張応力が生じない
↓
④ 解析終了

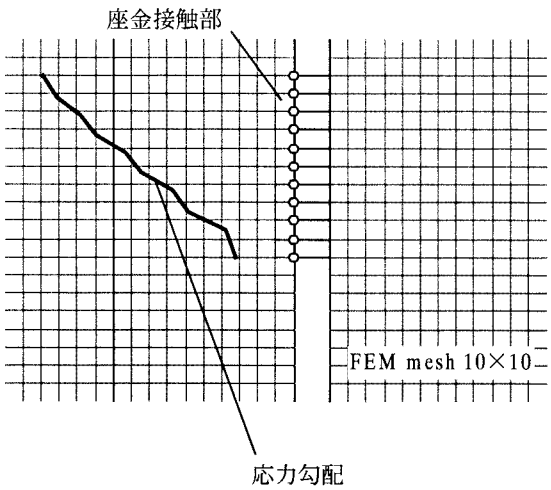
図－6 解析諸条件

図－6 より，本解析モデルにおいて支柱頂部に水平力が作用するとき A，B 連結部付近（図中，引張部と表記）において，X 軸方向の引張応力が生じる．しかし，実際には A，B 部は独立した部材であるために引張応力は生じない．よって，本解析においては引張応力の生じた A 部の要素を除去することにより，接触機構を表現するものとした．

また，座金部の支柱木材による支持を表現するために支柱部に等しい剛性を有する C 部を設定した．B，C 連結部（図中，接続部と表記）については曲げが生じずに軸力のみが伝達すると考えられることからピン構造とした．

6. 解析結果

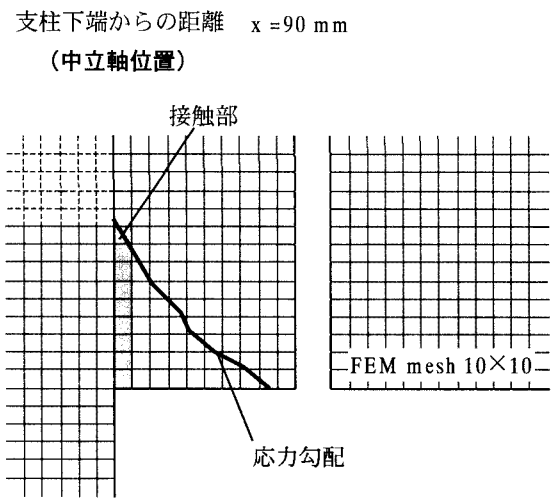
FEM 解析結果と理論値を比較する．以下に FEM 解析から得られたボルト締結部（座金部）のめり込み応力度 σ_t を**図－7** に示す．



No.	σ_t (N/mm^2)
1	164.1
2	157.6
3	142.4
4	127.7
5	115.9
6	97.8
7	79.3
8	69.9
9	44.3
10	39.7
Σ	1038.7
av.	103.9
支柱幅200mm換算	0.52

図－7　めり込み応力度

図－7 より，めり込み応力度 σ_t=0.52N/mm^2 が得られた．次に中立軸位置 x，支柱下端圧縮応力度 σ_c を**図－8** に示す．



No.	σ_c (N/mm^2)
1	12.4
2	21.2
3	39.7
4	55.0
5	69.2
6	84.0
7	100.4
8	123.4
9	144.3
Σ	649.6
av.	72.2
支柱幅200mm換算	0.36

図－8　中立軸・下端圧縮応力度

図－8 より，中立軸位置 x=90mm，支柱下端圧縮応力度 σ_c=0.36N/mm^2 が得られた．**表－1** に理論値と FEM 解析値の比較を示す．

表－1　理論値と解析値の比較

	中立軸位置 x（mm）	めり込み応力度 σ_t（N/mm^2）	圧縮応力度 σ_c（N/mm^2）
理論値	200	0.56	0.45
解析値	90	0.52	0.36

7. おわりに

本論文は，曲げ引張側にボルトを有する接触モデルの設計法について，木橋計画において一般的に用いられる高欄形式…主桁に高欄支柱を直接取り付ける形式…を例に挙げ，一案を示したものである．以下に本論文の結論および今後の課題を述べる．

曲げ引張側にボルトを有する接触モデル（高欄支柱）の設計を行うに当たり，鉄筋コンクリートにおける偏心軸引張力が断面核外に作用する場合の理論 [3]を応用した．また，理論値の妥当性を確認するために，FEM 解析を行った．

理論値と解析値を比較すると，中立軸 x，めり込み応力度 σ_c および，支柱下端圧縮応力度 σ_t に誤差が認められ，妥当性の確認には至らなかったと思われる．

これは，RC 理論の適用の際に設けた以下の仮定，

①支柱の曲げ変形を考慮しないこと．

②引張側と圧縮側のバネ定数の相関性を引張側面積比にのみ依らせたこと．

これらの仮定条件および FEM 解析条件から発したものであると推測される．

今後，FEM の三次元解析への拡張および，上述の仮定の再検討を行うことにより，本対象モデルの汎用的設計法の確立に努める必要があると思われる．

また，本論文で扱った曲げ引張側にボルトを有する接触モデルは木構造の機械的接合部において用いられる頻度が高く，さらに接合部の構造寸法は他の構造部材の形状への影響が大であると思われる．

よって，早急な設計法の確立が必要であり，またそれを望むと共に本論文の結びとする．

参考文献

1) 道路橋示方書・同解説，日本道路協会，2002.
2) 木質構造設計規準・同解説，日本建築学会，2002.
3) 岡田清：鉄筋コンクリート工学，朝倉書店，1977.