

論文 中心圧縮におけるコンクリート充填角形鋼管の拘束効果

小椋 紀行^{*1}・市之瀬 敏勝^{*2}

要旨：角形鋼管で補強されたコンクリートが中心圧縮をうけた場合の一軸圧縮強度の上昇について、下界定理を用いた塑性解析によりコンクリートと鋼管の強度比・幅厚比の影響を調べ、既往の実験と比較検討を行った。結果として1) 一軸圧縮強度はコンクリートと鋼管の強度比が増加すると増加し、2) 幅厚比が増加すると減少する。3) 既往の実験と良い対応を示す。4) 既往の実験式と異なる結果を示した。

キーワード：正方形鋼管、中心圧縮、拘束効果、コンクリートの破壊基準

1. 始めに

中心圧縮をうける場合、鉄筋や鋼管で補強されたコンクリートの圧縮強度が上昇することは、既往の研究 [1, 2] により知られている。正方形鋼管をもちいた補強については、多くの実験がなされ、松村・伊藤 [3] により実験式 (1) が、崎野・孫 [4] により実験式 (2) が提案されている。

$$\sigma_{cc} = \sigma_B \left\{ 1 + k \frac{4\sigma_y}{\sigma_B} \left(\frac{t}{B} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

ここで、 σ_{cc} ：コンファインドコンクリートの一軸圧縮強度、 σ_B ：コンクリートのシリンダー強度、 k ：松村らの行った実験結果により定めた定数 (=12.2)、 σ_y ：鋼管の降伏点応力、 t ：鋼管の厚さ、 B ：鋼管の幅である。

$$\sigma_{cc} = \sigma_B \left\{ 1 + \kappa \frac{\sigma_y \rho_h}{2\sigma_B} \left(\frac{t}{B} \right) \right\} = \sigma_B \left\{ 1 + \kappa \frac{2\sigma_y}{\sigma_B} \left(\frac{t^2(B-t)}{B(B-2t)^2} \right) \right\} \approx \sigma_B \left\{ 1 + \kappa \frac{2\sigma_y}{\sigma_B} \left(\frac{t}{B} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、 κ ：崎野らの行った実験結果により定められた定数 (=21.0)、 ρ_h ：コンクリートに対する鋼管の体積比である。

これらの実験式では、圧縮強度の上昇が鋼管の曲げ剛性に比例するとしている。つまり、鋼管とコンクリートの強度比 σ_y / σ_B に比例し、幅厚比の2乗 $(B/t)^2$ に反比例する（厳密に言えば、崎野らの実験式は補強筋体積比 ρ_h に比例し、幅厚比に反比例する。）としている。

本論文では正方形鋼管により補強されたコンクリートの強度上昇について、強度比・幅厚比の影響を解析的に解明することを目的とする。解析方法として、1) コンクリート、鋼管ともに剛塑性とする。2) 応力場を簡単な釣合機構（以下本論文ではモードと称する）を組み合わせる。以上2つの解析仮定を用いて、下界定理を用いた塑性解析を行う。また、既往の実験と比較検討を行う。

2. 解析方法

2.1 破壊条件の仮定

* 1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻, 工修 (正会員)

* 2 名古屋工業大学教授 社会開発工学科, 工博 (正会員)

コンクリートの破壊条件として、簡単で一般的によく用いられる Mohr - Coulomb の基準 [5] と多少複雑ではあるが現在提案されている破壊条件としては最も正確な改良 Willam - Warnke [5] の基準の2種類の基準を用いる。ただし、本解析において Mohr - Coulomb の破壊基準の係数には Richart ら [6] が実験より得た係数 ($m=4.1$) 用いる。また、改良 Willam - Warnke の基準の材料試験結果から決まる係数 [7] には大沼・青柳ら [8] が実験により得た値を用いた。

2.2 応力場の仮定

図1に示すように X, Y, Z 軸をとる。そして、コンクリートの応力場全域での破壊条件を満たすものとする。

さて、実際の応力場はかなり複雑なものと思われる。そこで以下に示す2種類のモードを各々複数個ずつ組み合わせて応力場を仮定する。

2.3 モード

図2 (a) (b) に2種類のモードの全体図を示す。以下、これらのモードをその形状から各々水平アーチモード、鉛直アーチモードと称する。この図に示すように、鉛直アーチモードは水平アーチモードの X と Y を入れ替えたものになる。

さらに具体的に説明するため、図3に水平アーチモードの詳細を示す。鋼管による拘束力は BC ($=x$) と CE ($=y$) に 1MPa の等分布で加わるとし、コンクリートの応力場は以下の4つの領域からなると仮定する。[9]

- 1) 領域 ABD: z 軸方向のみの一軸圧縮状態
- 2) 領域 BCE: 静水圧をうける三軸圧縮状態
- 3) 領域 BEFD: 境界線 BD, EF が放物線であるアーチ状の3軸圧縮状態。主応力の方向は放物線 BD に垂直になるとし、主応力の大きさは位置により変化する。
- 4) 領域 EHG: Y 軸・Z 軸方向の二軸圧縮状態。

また、鉛直アーチモードも同様である。

2.4 モードの合成

コンクリートの応力 σ は水平アーチモード $\underline{H} (i=1,2,\dots,n)$ と鉛直アーチモード $\underline{V} (i=1,2,\dots,n)$ を組み合わせることにより式 (3) で得られる。

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot (\underline{H}_i + \underline{V}_i) \quad (3)$$

ここで、 λ_i は展開係数であり、各モードの寄与分を表す。さらに、破壊条件を考慮することにより最大主応力 (つまり Z 軸方向応力) σ_3 が得られる。最後に σ_3 を用いることによ

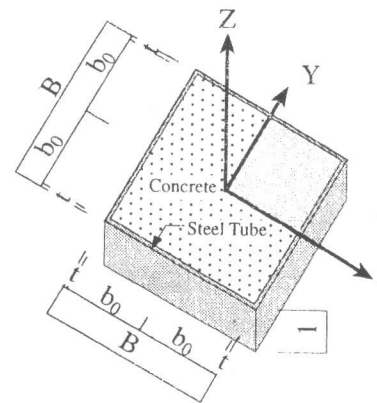
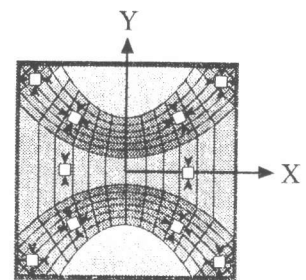
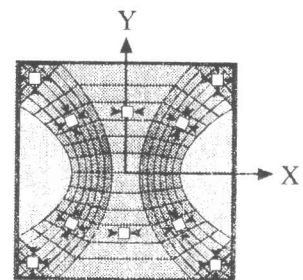


図1 座標軸



(a) 水平アーチモード



(b) 鉛直アーチモード

図2 モード全体図

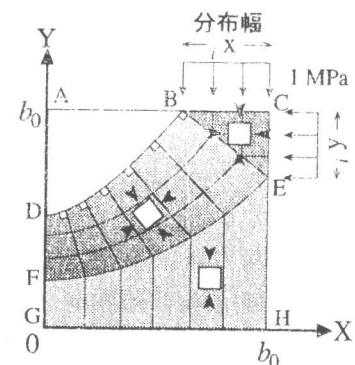


図3 水平アーチモード詳細

り、Z軸方向の平均応力 σ_z が式(4)で得られる。

$$\sigma_z = b_0^{-2} \iint \sigma_3 dx dy \quad (4)$$

一方、鋼管は図4に示す様に、各々のモードによるコンクリートの応力が作用する。そして、すべてのモードの合計のモーメントMと引張力Tは釣合条件から得られる。

2.5 応力場の決定

実際の角形鋼管による拘束は、鋼管の曲げ抵抗により生ずると考えられる。そこで、図5に示すように塑性ヒンジが生じた場合を鋼管による拘束の限界とする。ただし、塑性ヒンジ部断面では完全塑性状態とする。この時、ヒンジ部におけるモーメント M_p と引張力 T_p の関係は以下の降伏関数式(5)で得られ、図6の様に表される。

$$M_p = \frac{\sigma_y}{4} \left(t^2 - \frac{T_p^2}{\sigma_y^2} \right) \quad (5)$$

以上のような仮定・条件のもとで応力場を決定する。つまり、図6に示す様に鋼管のモーメントMと引張力Tが降伏関数内にあるという範囲で、各モードの寄与分 λ と拘束力の分布幅 (x, y) を任意に変化させ、そのときの平均応力 σ_z のうちで最大のものを一軸圧縮強度 σ_{cc} とする。以下、一軸圧縮強度をシリンダー強度で基準化したもの (σ_{cc} / σ_B) を“強度上昇比”と称する。

3. 解析結果

3.1 解析条件

表1に解析条件を示す。この表に示すようにコンクリートの破壊条件はMohr-Coulombの破壊基準と改良Willam-Warnkeの破壊基準の2つの場合を行った。また、モードは水平・鉛直アーチモードともに1~3つずつの3パターンを行った。さらに、解析パラメータとして鋼管の降伏点応力をコンクリートのシリンダー強度で基準化したもの (σ_y / σ_B) ：強度比と鋼管の厚さを柱の幅で基準化したもの (t/B) ：厚幅比を用いた。ただし、強度比を変化させる場合は $t/B = 0.011$ とし、厚幅比を変化させる場合は $\sigma_y / \sigma_B = 14.23$ とした。

解析の結果、本論文で用いた全ての解析対象において、鋼管が降伏することにより強度が決定された。

表1 解析条件一覧表

コンクリートの破壊条件	モード (水平・鉛直アーチ)	強度比 (σ_y / σ_B)	厚幅比 (t/B)
Mohr - Coulombの基準 改良Willam - Warnkeの基準	1 Mode (1つずつ)	0 ~ 40 ($t/B = 0.011$)	0 ~ 0.03 ($\sigma_y / \sigma_B = 14.23$)
	2 Mode (2つずつ)		
	3 Mode (3つずつ)		

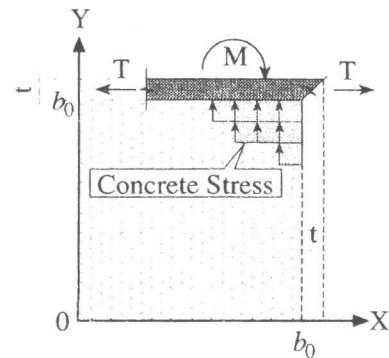


図4 鋼管に加わる応力

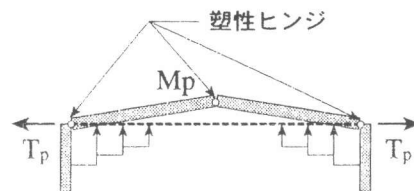


図5 鋼管の塑性ヒンジ

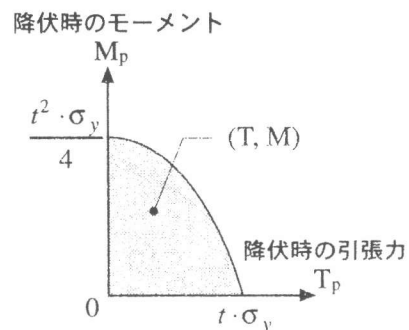


図6 降伏関数

3.2 Mohr - Coulomb の破壊基準を用いた場合の解析結果

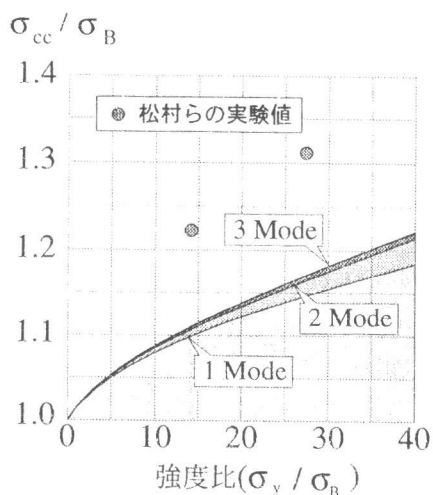
図7 (a) に強度上昇比と強度比の関係を示す。同図に松村らによる実験結果も示す。図に示すように強度比が増加すると、強度上昇比が増加する。しかし、その増加率は強度比が増加するにつれ緩やかになってゆく。図7 (b) に強度上昇比と厚幅比の関係を示す。図に示すように厚幅比が増加すると強度上昇比はほぼ一次関数的に増加する。

また、強度比・厚幅比を変化させた場合ともに、モードの数を増やしてゆくと2 Mode (水平・鉛直モードともに各モード2つずつ使用) 以降は強度上昇比にほとんど変化がなかった。

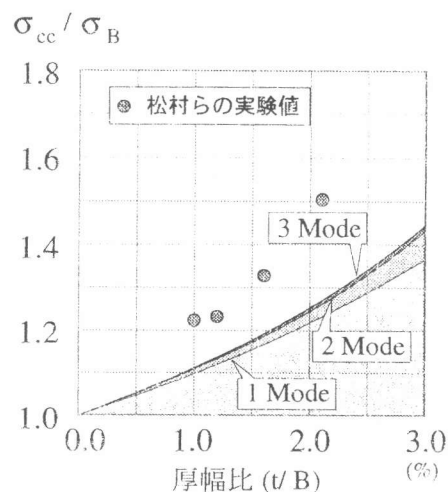
一方、実験値と比較すると解析値は6~7割程度であり、やや低めの値となった。

3.3 Willam - Warnke の破壊基準を用いた場合の解析結果

図8 (a) に強度上昇比と強度比の関係を示す。図8 (b) に強度上昇比と厚幅比の関係を示す。図に示すように Mohr - Coulomb の破壊基準を用いた場合とほぼ同様の傾向を示した。しかし、Mohr - Coulomb の破壊基準を用いた場合よりも全体的に強度上昇比が大きく、実験値と比較すると非常によい対応を示している。

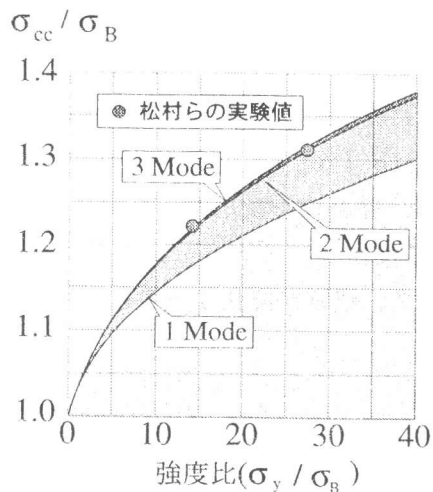


(a) 強度上昇比と強度比の関係

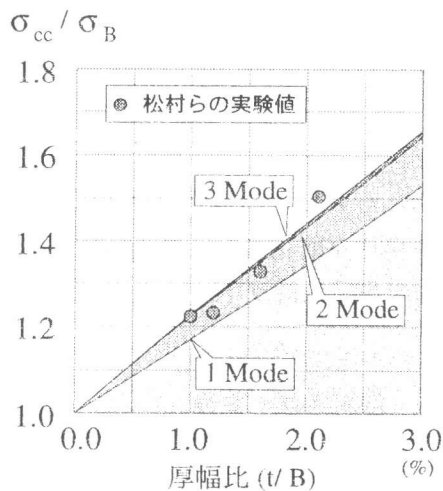


(b) 強度上昇比と厚幅比の関係

図7 Mohr - Coulomb の破壊基準を用いた場合



(a) 強度上昇比と強度比の関係



(b) 強度上昇比と厚幅比の関係

図8 Willam - Warnke の破壊基準を用いた場合

図9に (a) に強度比 $\sigma_y / \sigma_B = 10$ の場合、(b) に強度比 $\sigma_y / \sigma_B = 40$ の場合の最大強度時における 2 Mode の z 軸方向の主応力 σ_3 の分布状態を示す。また、図10 (a) に厚幅比 $t/B = 0.01$ の場合、(b) に厚幅比 $t/B = 0.03$ の場合の 2 Mode の z 軸方向の主応力 σ_3 の分布状態を示す。

これらの図に示すように強度比や厚幅比の小さい (a) の場合は、鋼管による拘束をうける幅が狭い。そのため拘束力を伝えるアーチの幅が狭い。それに対して強度比や厚幅比が大きい (b) の場合は、拘束をうける幅が大きいためアーチの弧の幅が大きい。また、鋼管によりうけた拘束力が柱断面をやや対角線状に流れてゆく。

3.4 既往の実験式との比較

図11 (a) に強度比を変化させた場合、(b) に厚幅比を変化させた場合の 3 Mode の解析結果を松村ら、崎野らの実験式とともに示す。前述したように両実験式では圧縮強度の上昇が鋼管の曲げ

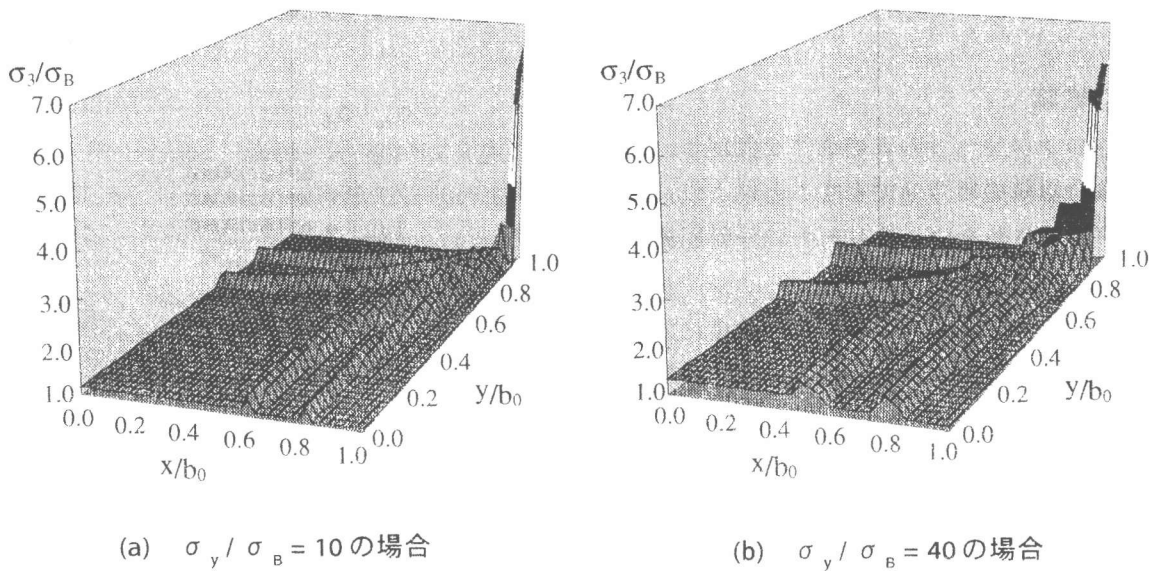


図9 強度比の異なる場合の主応力 σ_3 の分布

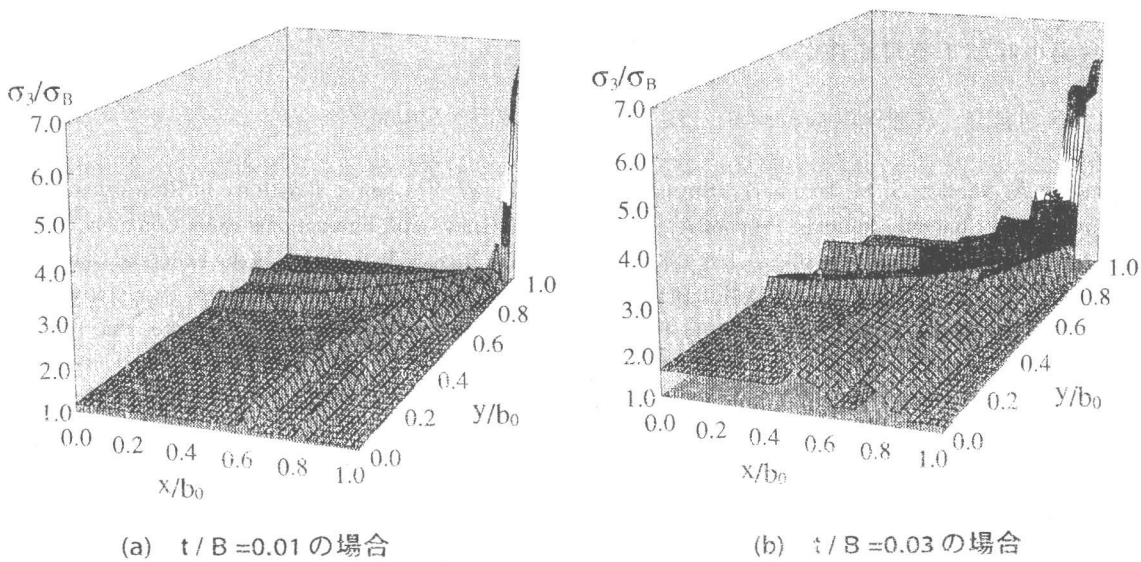


図10 厚幅比の異なる場合の主応力 σ_3 の分布

剛性に比例するとしているため、図に示すように強度比と厚幅比の2乗に比例している。それに対して、解析値ではそのような傾向は見られず、強度比が増加すると強度上昇比の増加率が徐々に緩やかになってゆき、厚幅比が増加すると強度上昇比はほぼ一次関数的に増加している。さらに、実験値と比較してみると、両実験式がかなり低めの値を取るのに対して、解析値はよく対応している。

以上のことから、圧縮強度の上昇は鋼管の曲げ剛性に直接は比例しないことがわかる。そのため、強度比・厚幅比の小さい場合、実験式は強度上昇比を過小評価する可能性がある。

4 結論

1) コンクリートの破壊条件を仮定し、応力場を簡単な釣合機構の組合せで表すことにより、正方形鋼管により補強されたコンクリートの一軸圧縮強度を算定することができた。

2) コンクリートのシリンダー強度に対する鋼管の降伏点応力の増加に伴い、一軸圧縮強度は増加する。しかしその増加率は徐々に減少してゆく。

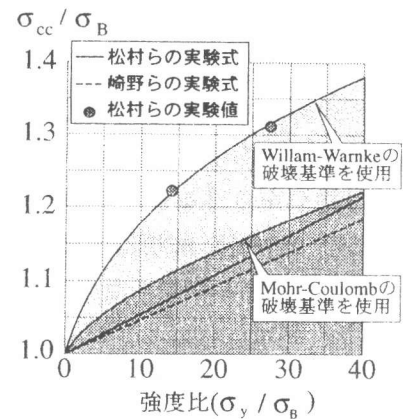
3) 柱幅に対する鋼管の厚さに増加に伴い、一軸圧縮強度はほぼ一次関数的に増加する。

4) 実験値と比較して、Mohr - Coulomb の破壊条件を用いた場合はやや低めの値となるが Willam - Warnke の破壊条件を用いた場合は良い対応を示す。

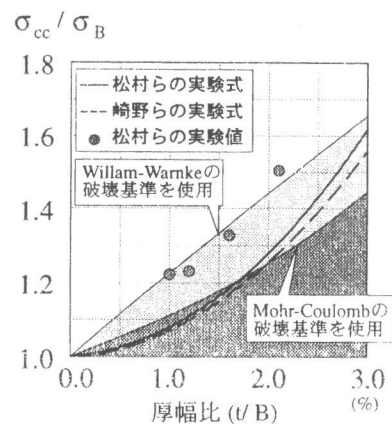
5) 既往の実験式は鋼管の降伏点応力や厚さの小さい場合過小評価する可能性がある。

参考文献

- [1] Shamin A. Sheikh, S. M. Uzumeri : Strength and Ductility of Tied Concrete Columns, Proc. of A. S. C. E., ST 5, Vol. 106, pp. 1079-1102, 1980
- [2] 加藤勉：コンクリート充填鋼管短柱の圧縮強さ，変形能力，日本建築学会構造系論文集，日本建築学会，第468号，pp. 183 - 191，1995年2月
- [3] 松村弘道，伊藤茂樹：角形鋼管に充填されたコンクリートの圧縮強度，日本建築学会学術講演梗概集，日本建築学会，pp. 1627-1628, 1989
- [4] 崎野健治，孫玉平：正方形鋼管で横補強されたコンクリートの中心圧縮性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学会，13-2，pp. 945-950，1991
- [5] W. F. Chen : Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw - Hill International Book Company, 1982
- [6] Richart, F. E. "Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, University of Illinois Engineering Experimental Station, No. 185. 104 pp. 1928
- [7] 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，日本建築学会，第474号，pp. 163 - 170，1995年8月
- [8] 大沼博志，青柳征夫：三軸圧縮応力下におけるコンクリートの強度特性，電力中央研究所報告，No. 381021, 1981, 12
- [9] Peter Marti : Basic Tools of Reinforced Concrete Beam Design, ACI Journal, pp. 46 - 56, Jan - Feb 1985



(a) 強度上昇比と強度比の関係



(b) 強度上昇比と厚幅比の関係

図 11 実験式，実験値との比較