

積層ゴム支承の下部コンクリートにおける支圧耐力

東京科学大学 土肥 佐奈子

1. はじめに

免震部材を安定的に機能させるためには下部コンクリートを含む周辺部材の健全性確保が必要不可欠である。積層ゴム支承は長期荷重時に基準面圧 10~15MPa で建物を支え、地震時にはその 2 倍程度の面圧が作用する。さらに積層ゴム支承のせん断変形に伴う有効断面積 A_e の減少により、局所的には 4 倍以上の圧縮応力が下部コンクリートに作用する可能性がある (図 1)。しかしながら、平面的に広がりのあるコンクリートに作用する局所的な圧縮力に対しては、一般に支圧応力度として圧縮強度以上の強度を期待できる¹⁾。本研究では、せん断変形時における積層ゴム支承の下部コンクリートの支圧耐力に着目して 2 段階の実験を行い、その評価方法を検討する。

2. 下部コンクリートの寸法の実態調査

実験計画に先立ち、書籍、論文、実建物の設計図面、および実建物の実測から情報を収集し、一般的な積層ゴム支承と下部コンクリートの寸法の間関係をまとめる。調査項目は積層ゴム支承の種類、ゴム直径 ϕ 、下部コンクリートの幅 B 、および高さ H である。ゴム直径 ϕ と下部コンクリートの幅 B および高さ H の関係を図 2、図 3 に示す。下部コンクリートの幅 B および高さ H は、ゴム直径 ϕ に対して概ね比例関係となっており、ゴム直径 ϕ に対する比は正規分布の様相を呈している。それぞれの比の平均は $\phi : B : H = 1.00 : 1.79 : 0.41$ であり、これを基に試験体となる下部コンクリートの寸法を設定する。

3. 鋼板を用いた下部コンクリートの実験

3.1 実験計画

本章では、第 1 段階の検討として、積層ゴム支承を模した鋼板を用いた下部コンクリートの実験を行い、支圧耐力を把握する。試験体の概要と

セットアップを図 4 に示す。試験体は 2 章で示した寸法の比率に準じた高さ $H=100\text{mm}$ 、平面形状 $350 \times 350\text{mm}$ の無筋コンクリートである。積層ゴム支承はゴム直径 $\phi=200\text{mm}$ を想定し、仮定した有効断面積の形状を有する載荷用鋼板 (図 5) によって再現する。実験パラメータは、積層ゴム支承のせん断変形 (以後、想定せん断変形) γ に応じた載荷用鋼板の形状、およびコンクリートの圧縮強度 σ_c である (表 1)。想定せん断変形 γ は 0、100、200、300、400% の 5 種類を、コンクリート強度 σ_c は 20、30、60MPa 相当の 3 種類 (表 2) をそれぞれ用意する。

実験は 2000kN 万能試験機に下部コンクリートを据え、その上に載荷用鋼板を介して圧縮荷重を

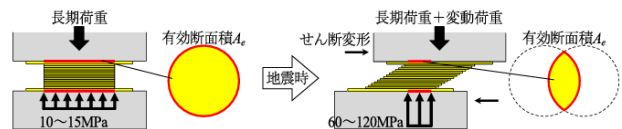


図1 積層ゴム支承の地震時における支圧応力度

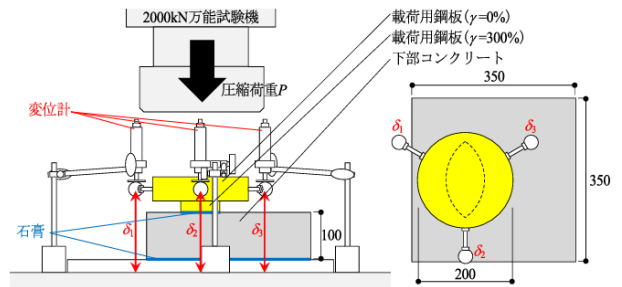


図4 試験体の概要とセットアップ

表1 実験のパラメータ

σ_c [MPa]	想定せん断変形 γ [%]				
	0	100	200	300	400
20	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○
60	○	○	○	○	○

表2 コンクリート強度

設計基準強度 F_c [MPa]	18	21	40
実験期間の平均の圧縮強度 σ_c [MPa]	23.2	29.9	59.6

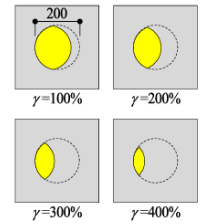
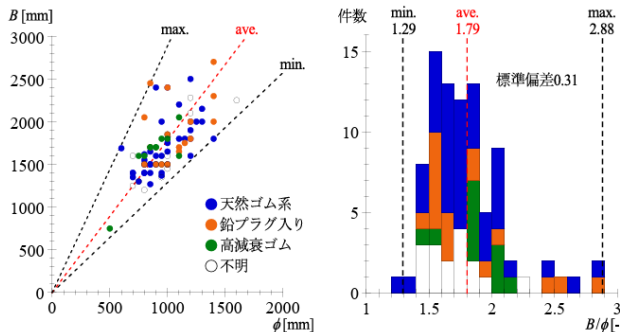
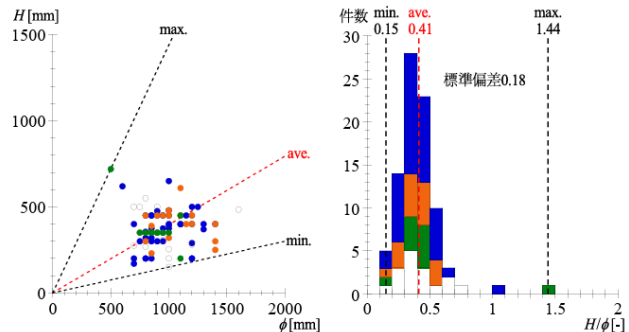


図5 載荷用鋼板



(a) ゴム直径 ϕ との関係 (b) B/ϕ のヒストグラム
図2 下部コンクリートの幅 B



(a) ゴム直径 ϕ との関係 (b) H/ϕ のヒストグラム
図3 下部コンクリートの高さ H

与えて行う(図4)。また、万能試験機に内蔵されたロードセルでの計測値を鉛直荷重 P 、試験機と計測用具の相対鉛直変位の平均値を変形 δ として得る。

3.2 実験結果と考察

荷重-変形関係の一例を図6(a)に示す。一般的なコンクリートの圧縮試験と同様の挙動を示し、最大荷重近傍では放射状のひび割れが観察された(図6(b))。本研究では、荷重-変形関係から最大荷重 P_{max} (●) および弾性限荷重 P_e (○) を評価し、それぞれを有効断面積 A_e で除した値を、弾性限応力度 σ_e および最大応力度 σ_{max} として以降の分析に用いる。

3.3 許容支圧応力度および終局支圧応力度

実験結果の評価式は『プレストレストコンクリート設計施工規準』²⁾(以後、PC規準)に準じ、(1)式の許容支圧応力度 f_n 、および(1)式から低減係数である0.6を除いた終局支圧応力度 f_u ((2)式)を用いる。

$$f_n = 0.6F_{no}\sqrt{A_c/A_1} \quad \dots (1)$$

$$f_u = F_{no}\sqrt{A_c/A_1} \quad \dots (2)$$

式中の F_{no} は支圧基準強度、 A_1 は支圧面積、 A_c は支承面積である。本研究では、支圧面積 A_1 は有効断面積 A_e と同一とし、支承面積 A_c はコンクリ

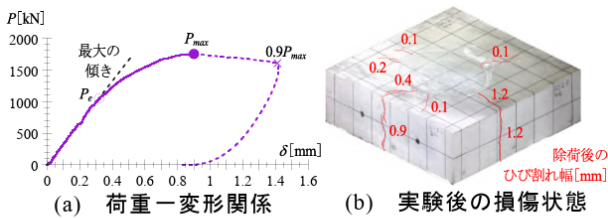


図6 実験結果の一例 ($F_c=30\text{MPa}$ $\gamma=100\%$)

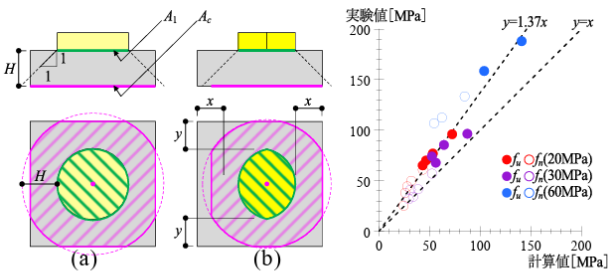


図7 支圧面積(有効断面積) A_1 と支承面積 A_c の考え方

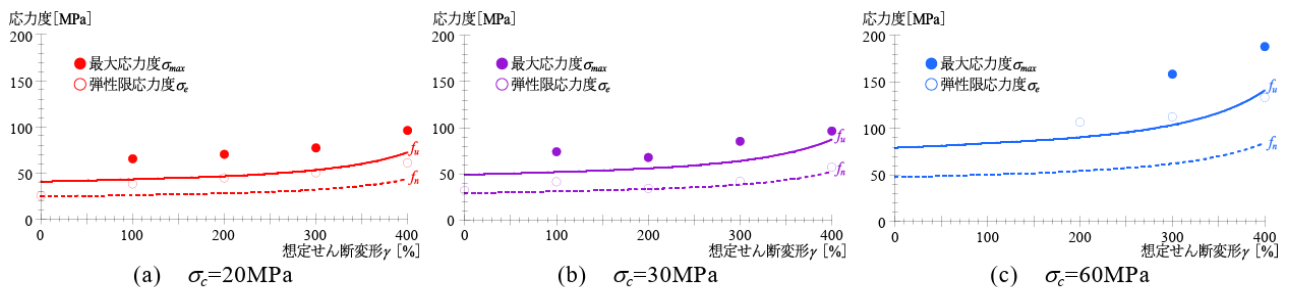


図8 実験結果と許容支圧応力度、終局支圧応力度の比較

ート内にて有効断面積から応力が 45° の傾きをもって円錐状に広がると仮定してコンクリート台の底面に達した時の断面積とする(図7)。

3.4 実験値と計算値の比較

想定せん断変形 γ と弾性限応力度 σ_e および最大応力度 σ_{max} との関係を図8に示す。いずれのコンクリート強度においても想定せん断変形 γ の増加に伴い、実験値である弾性限応力度 σ_e および最大応力度 σ_{max} は、計算値である許容支圧応力度 f_n および終局支圧応力度 f_u と同様に緩やかに増加している。また、弾性限応力度 σ_e および最大応力度 σ_{max} は、許容支圧応力度 f_n および終局支圧応力度 f_u をそれぞれ上回っている。すなわち、PC規準²⁾および本研究の支圧面積 A_1 、支承面積 A_c の仮定に基づけば、実験結果における支圧耐力を安全側に評価できるといえる。また、全試験体において実験値/計算値の値は平均1.37となっている(図9)。

4. 積層ゴム支承を用いた下部コンクリートの加振実験

4.1 実験計画

本章では、第2段階の検討として、実大の積層ゴム支承を用いた下部コンクリートの加振実験を行い、前章で構築した支圧耐力を検証する。試験体の概要とセットアップを写真1および図10に、積層ゴム支承の諸元を表3に、下部コンクリートの諸元を表4にそれぞれ示す。積層ゴム支承にはゴム直径 ϕ が600mmと1100mmの天然ゴム系積層ゴムを用いる。下部コンクリートの寸法は2章の比率に準じて設定し、 $\phi 600$ 用は高さ $H=300\text{mm}$ かつ平面形状 $1050 \times 1050\text{mm}$ 、 $\phi 1100$ 用は高さ $H=550\text{mm}$ かつ平面形状 $1925 \times 1925\text{mm}$ であり、内部には最低限の主筋、帯筋、幅止め筋を配している。加振実験当日におけるコンクリートの圧縮強度 σ_c は、 $\phi 600$ 用が 24.4MPa 、 $\phi 1100$ 用が 27.4MPa である。

実験は、実大免震試験機 E-Isolation の上下加振台の間に積層ゴム支承および下部コンクリートを固定し、鉛直荷重を一定に維持した状態で、実速度による水平加振を行う。なお、積層ゴム支承-下部コンクリート間は埋め込みボルト、下部コンクリート-試験機間はアンカーボルトにより接合している。

実験中は、加振台の水平荷重、水平変位、鉛直荷重と、コンクリートおよび鉄筋のひずみを計測する。加振台の水平変位、鉛直荷重は試験機の制御値を用い、水平荷重は試験機の計測値より得る。ただし、水平変位を積層ゴム支承のゴム総厚で除した値をせん断変形 γ 、鉛直荷重を積層ゴム支承の全断面積で除した値を面圧 σ と称する。

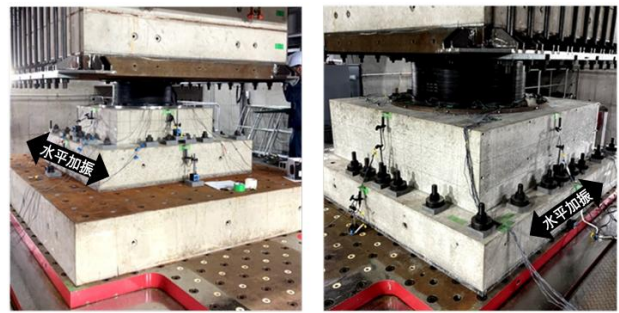
加振パラメータを図 12 に示す。図の縦軸は積層ゴム支承の面圧 σ 、横軸は各加振サイクルにおける最大のせん断変形すなわち振幅 γ である。図中では、 $\phi 600$ のパラメータを●、 $\phi 1100$ のパラメータを○にて示している。また、3.3 節と同様に算定した許容支圧応力度 f_n を水色の線、終局支圧応力度 f_u を赤色の線にて示し、積層ゴム支承の限界性能曲線を黒色の線で示している。さらに、ここでは許容支圧応力度 f_n 以下の領域を領域I、許容支圧応力度 f_n ～終局支圧応力度 f_u の領域を領域II、終局支圧応力度 f_u 以上の領域を領域IIIと称する。

4.2 許容支圧応力度および終局支圧応力度との関係

まず、実験後の下部コンクリートにおける損傷状態を図 13(a)および図 14(a)に示す。 $\phi 600$ 、 $\phi 1100$ のいずれも放射状のひび割れが見られ、特に加振方向の損傷が大きい。領域IIIまで加振を行った $\phi 600$ ではひび割れ幅 3.0mm 以上のひび割れが多く見られ、最大ひび割れ幅は 8.0mm にまで達している。一方、領域IIまで加振を行った $\phi 1100$ ではひび割れ幅は最大でも 0.45mm に収まっている。したがって、許容支圧応力度 f_n および終局支圧応力度 f_u は、下部コンクリート表面に現れる損傷の程度を評価する上で有効な指標であるといえる。

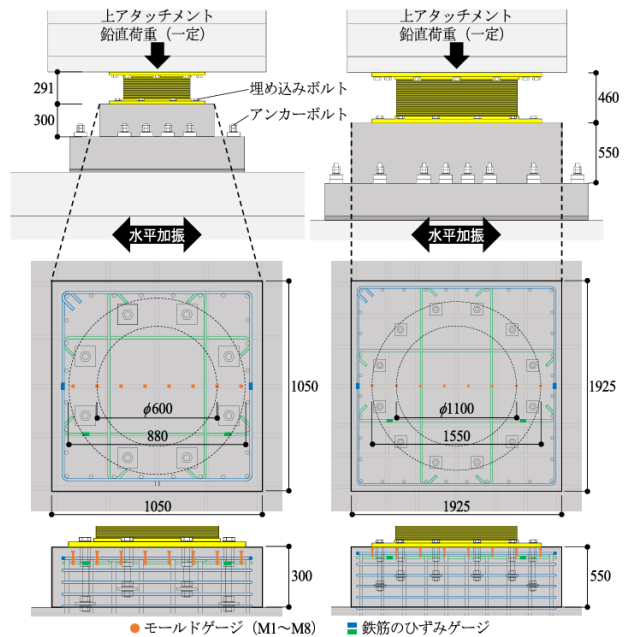
次いで、鉄筋の最大のひずみを図 13(b)および図 14(b)に示す。図の縦軸は各加振で計測された鉄筋の最大のひずみ $\epsilon_{w,max}$ であり、横軸は加振パラメータである。図中では、帯筋および幅止め筋に用いたSD295の規格降伏強度より算出した降伏ひずみを黒色の破線にて併せて示している。 $\phi 600$ 、 $\phi 1100$ のいずれも、領域Iでは鉄筋の最大のひずみ $\epsilon_{w,max}$ はほとんど変化しないが、領域IIではわずかな増加が確認でき、領域IIIでは鉄筋の降伏ひずみに達している。したがって、許容支圧応力度 f_n および終局支圧応力度 f_u は、下部コンクリート内部の損傷を評価する上でも有用であるといえる。

最後に、積層ゴム支承の履歴曲線を図 13(c)および図 14(c)に示す。図では本実験の結果を実線にて示し、本実験と同一の積層ゴム支承を用いて単体で加振を行った結果を破線にて併せて示している。領域I、IIにあたる面圧 $\sigma=15\text{MPa}$ 、振幅 $\gamma=100\sim 350\%$ では本実験と単体実験の結果に大きな違いは見られない。一方、領域IIIにあたる面圧



(a) $\phi 600$ (b) $\phi 1100$

写真1 セットアップ



(a) $\phi 600$ (b) $\phi 1100$

図10 試験体の概要とセットアップ

表3 積層ゴム支承の諸元

	S_1	S_2	せん断弾性係数	鉛直剛性	水平剛性
	-	-	MPa	$\times 10^4 \text{kN/m}$	$\times 10^4 \text{kN/m}$
$\phi 600$	33	5.1	0.39	2850	0.95
$\phi 1100$				5170	1.73

表4 下部コンクリートの諸元

	圧縮強度 σ_c [MPa]	主筋	帯筋	幅止め筋
	$\phi 600$	24.4	28-D16	D10-@60
$\phi 1100$	27.4	36-D25	D16-@100	4-D16

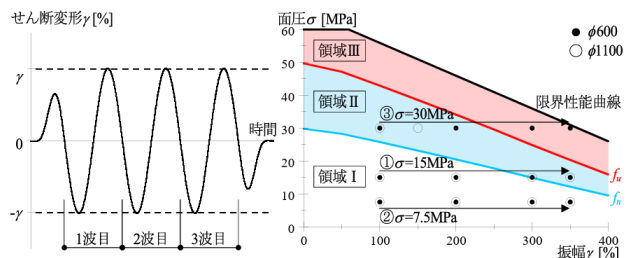
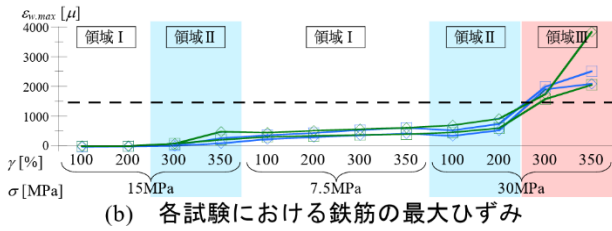


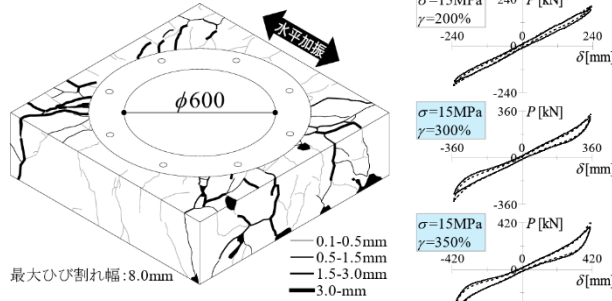
図11 加振サイクル

図12 加振パラメータ

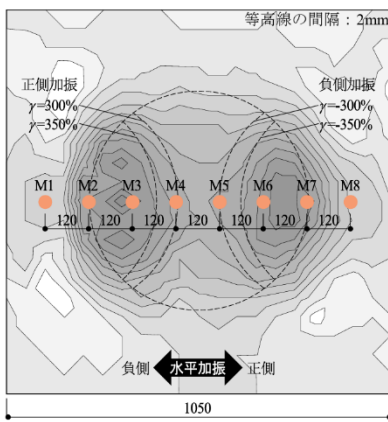
$\sigma=30\text{MPa}$ 、振幅 $\gamma=300\sim 350\%$ では本実験の履歴曲線のみを負勾配が現れ、単体実験の履歴曲線と大きな差異が生じている。したがって、局所応力が終局支圧応力度 f_u 以上になると、下部コンクリートに損傷が生ずるだけでなく、積層ゴム支承の挙動にも影響が現れることがわかった。



(b) 各試験における鉄筋の最大ひずみ

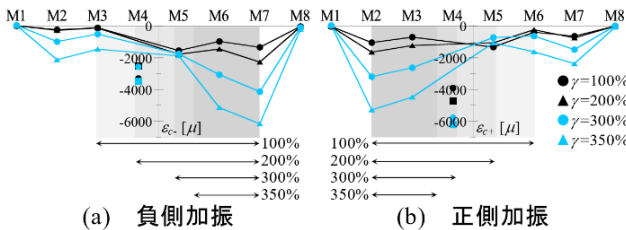


(a) 実験後の損傷状態



(d) 実験後のへこみ

図13 φ600用下部コンクリートの実験結果



(a) 負側加振

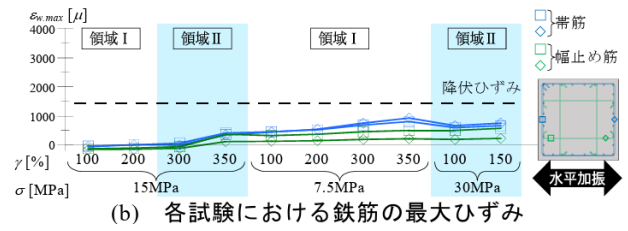
(b) 正側加振

図15 コンクリートの最大ひずみ(φ600, σ=15MPa)

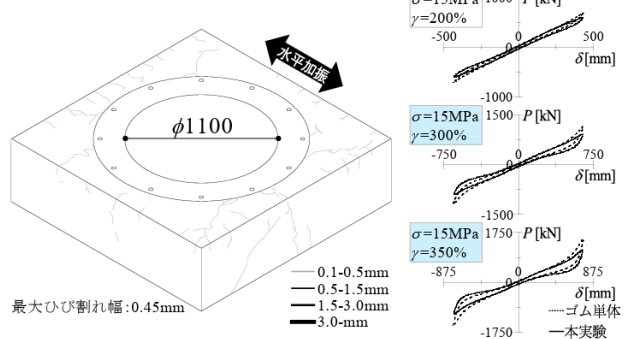
4.3 積層ゴム支承のせん断変形時における有効断面

全ての加振パラメータを終了した後、φ600のみ、下部コンクリート表面に大きなへこみが観測された。へこみを高さ2mm間隔の等高線にて表して図13(d)に示す。へこみの形状は、3.1節にて仮定したせん断変形γ=300~350%時の有効断面と類似している。したがって、下部コンクリートに大きな損傷を与えると考えられる領域IIIにおいては、仮定した有効断面が実際の応力伝達分布を近似的に表現できているといえる。

次いで、コンクリートのひずみ挙動として、面圧σ=15MPa、振幅γ=300%におけるモールドゲージM3およびM6の計測結果を図13(e)に例示する。図の縦軸はコンクリートのひずみε_cであり、



(b) 各試験における鉄筋の最大ひずみ



(a) 実験後の損傷状態

(c) 履歴曲線

図14 φ1100用下部コンクリートの実験結果

横軸はせん断変形γである。せん断変形γが負側と正側で増大すると、それぞれで圧縮側となるひずみε_cが増大している。ここで3波目かつせん断変形γが負側、正側最大変形時のコンクリートのひずみε_c、ε_{c+}について、面圧σ=15MPa、振幅γ=100~350%における結果を図15に示す。図の縦軸はコンクリートの最大ひずみε_c、ε_{c+}であり、横軸は計測位置(図13(d))である。図には、各せん断変形γにおける有効断面と重なる領域を灰色の背景にて併せて示している。せん断変形γが小さい場合にはコンクリートの最大ひずみε_c、ε_{c+}は比較的広範に分布しているのに対し、せん断変形γが大きくなるにつれて断面の端部付近に集中する傾向がみられる。したがって、領域IIIだけでなく、領域Iおよび領域IIにおいても、せん断変形γの増大に伴って、仮定した有効断面に対応する形で実際の応力分布が推移していることが実証できたといえる。

5. まとめ

本論文では、せん断変形時における積層ゴム支承の下部コンクリートにおける支圧応力度に着目した実験を行った。2段階の実験結果より、PC規準²⁾における許容支圧応力度式が下部コンクリートの損傷評価に有効であること、また、仮定した有効断面が積層ゴム支承から下部コンクリートへと伝達される応力の分布形状を近似できることがわかった。

【参考文献】

- 1) 坂田博史ほか：コンクリートの支圧応力カーメり込み変形特性に関する研究 支圧強度式の提案と許容応力度の検証、構造工学論文集、Vol.56B、pp.81-86、2010.3
- 2) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、第5版、pp.35-40、pp.171-187、2022.3