T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	風荷重を受ける高摩擦弾性すべり支承のスリップ現象に関する実験的検討 その1 ゴム総厚をパラメータとした変位制御実験
Title(English)	Experimental Study on Slip Phenomena in High-Friction Elastic Sliding Bearings Subjected to Wind Loads Part 1: Displacement Control Experiment Using Rubber Thickness as a Parameter
著者(和文)	崎谷俊太, 佐藤大樹, 陳引力, 三須基規, 稲井慎介, 桑素彦, 川又哲也, 得能将紀, 丸尾純也
Authors(English)	Shunta Sakiya, Daiki Sato, Yinli Chen, Motoki Misu, Shinsuke Inai, Motohiko Kuwa, Tetsuya Kawamata, Masaki Tokuno, Junya Maruo
出典 / Citation	日本建築学会関東支部研究報告集， I， ，pp. 557-560
Citation(English)	， I， ，pp. 557-560
発行日 / Pub. date	2026，3
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

2025年度日本建築学会
関東支部研究報告集Ⅰ
2026年3月

風荷重を受ける高摩擦弾性すべり支承のスリップ現象に関する実験的検討
その1　ゴム総厚をパラメータとした変位制御実験

構造－振動

正会員 ○ 崎谷俊太[*1]　正会員　佐藤大樹[*2]
〃　陳引力[*3]　〃　三須基規[*4]
〃　稲井慎介[*5]　〃　桑素彦[*6]
〃　川又哲也[*6]　〃　得能将紀[*6]
〃　丸尾純也[*5]

高層免震建物　高摩擦弾性すべり支承
変位制御実験　低速度領域

1. はじめに

近年，高層建物に免震構造を採用する事例が増えている。高層免震建物では長周期側に卓越したエネルギーをもつ風外力に対して，応答が増大することや，同一規模の基礎を固定した建物に比べ固有周期が長くなる傾向にあることから免震建物における耐風設計の重要性が増している。免震建築物の耐風設計指針[1)]では，風応答時の免震層全体の状態を3ケースに分けて評価している。具体的には，免震層に作用する風荷重に対して，免震層が弾性挙動する範囲に留まるケース，平均成分と変動成分を含めた風荷重全体に対しては弾性領域を超えるが，変動成分に対しては弾性挙動をするケース，および変動成分に対しても弾塑性的な挙動するケースである。この評価では，免震層の支承部材およびダンパー部材の風応答時における特性の把握が重要になる。

主要な免震部材の1つに弾性すべり支承がある。弾性すべり支承は積層ゴム部とすべり材によって構成され，主原料がPTFEのすべり材がよく用いられる[2)]。耐震設計で用いられる高速度領域では摩擦係数は安定した値となるが，低速度領域では速度依存性の影響を受け摩擦係数が低下することが知られている[3~6)]。そのため，耐風設計で地震応答時を想定した摩擦係数を用いると，想定より低い風荷重に対してすべり出す可能性がある。この現象を本報ではスリップ現象と呼ぶ。これに対し，先行研究[7, 8)]では速度・面圧依存性を考慮した弾性すべり支承の解析モデル（以下，非線形3要素モデル）が提案されている。また，近年は高摩擦弾性すべり支承の積層ゴム部のゴム総厚を大きくすることで，初期剛性を高めることなくすべり出し変位を大きくし，耐風設計の自由度を高める研究が行われている[9)]。このように，従来の摩擦係数に着目した研究に加え，水平剛性が応答に与える影響について検討が行われている。

そこで，本報では高摩擦弾性すべり支承の水平剛性が風応答時の特性に与える影響を確認するため，文献7, 8）では検討されていないゴム総厚の異なる縮小試験体を対象に変位制御実験を実施する。また，得られた実験結果と非線形3要素モデルの解析結果を比較することで，当モデルの適用性について検証を行う。

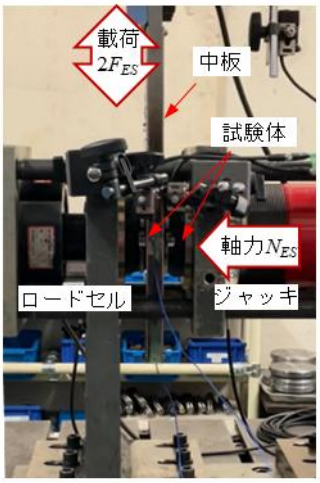


図1　弾性すべり支承実験セットアップ

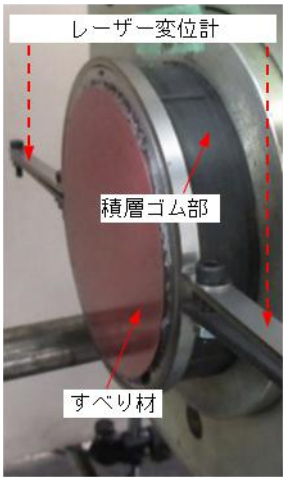


図2　弾性すべり支承実験試験体詳細

2. 変位制御実験概要

図1に弾性すべり支承実験のセットアップを，図2に試験体詳細をそれぞれ示す。試験体のすべり材は，直径90 mmの充填剤入りPTFEであり，基準面圧20 MPaにおいて地震時を想定した正弦波40 cm/s時に摩擦係数0.094を発揮する弾性すべり支承（高摩擦タイプ）である。試験体のゴム部材には，ゴム総厚8 mmと12 mmの天然ゴム系積層ゴム（せん断弾性率$G_E = 0.78\mathrm{N/mm^2}$）を用い，ゴム総厚の異なる試験体を2種類使用した。積層ゴム部の試験体仕様は表1に示し，形状係数S_2は式（1）で表される。なお，dは総厚，Lは外径を表す。

$$S_2 = L/d \tag{1}$$

Experimental Study on Slip Phenomena in High-Friction Elastic Sliding Bearings Subjected to Wind Loads
Part 1: Displacement Control Experiment Using Rubber Thickness as a Parameter

Shunta SAKIYA, Daiki SATO, Chen YINLI, Motoki MISU, Shinsuke INAI, Motohiko KUWA, Tetsuya KAWAMATA, Masaki TOKUNO, Junya MARUO

図 1 より，中板は動的アクチュエーターと繋がっており，中板にはステンレス鋼のすべり板が取り付けられている。試験体は同じ形状のものを 2 体用いており，図 1 に示すようにそれぞれで中板を挟むように配置した。実験ではジャッキを用いて軸力N_{ES}をかけながら，動的アクチュエーターによって変位を制御して加振した。計測項目は，アクチュエーター変位，載荷荷重F_{ES}，軸力N_{ES}であり，ロードセル（図 1）により軸力N_{ES}を測定した。ゴム変形u_Eについてはジャッキ側の試験体とロードセル側の試験体それぞれに対して，試験体の左右から伸びている鋼材をターゲットにレーザー変位計を当てることで測定しており，計4 点を測定した（図2）。実験詳細については文献 7）を参照されたい。

表 2 に変位制御実験の加振条件を示す。表 2（a）が総厚 8 mm の場合の加振条件であり，表 2（b）が総厚 12 mm の場合の加振条件である。それぞれ，アクチュエーターの目標最大変位（以下，振幅）は文献 7）で行われた総厚 4 mm での実験とひずみを統一させるように決定した。実験は全て正弦波加振とし，速度および面圧の値を変化させた複数の加振条件を設定した。最大速度をパラメータとして設定し，範囲は 0.1 cm/s から 2.0 cm/s までとした。面圧は 10 MPa から 30 MPa まで 10 MPa 刻みで設定した。総厚ごとに振幅およびサイクル数は共通とし，これらを組み合わせた計 24 個の条件での実験を実施した。

実験での水平剛性K_Eは 20 MPa の全ての加振条件において，以下の式（2）によって算出した剛性を平均した値である。なお，t_0は加振直後の時刻を，t_1は弾性範囲内と考えられる$u_E = 0.6$cm（総厚 8 mm），$u_E = 0.9$cm（総厚 12 mm）における時刻を表す。

$$K_E = \frac{F_{ES}(t_1) - F_{ES}(t_0)}{u_E(t_1) - u_E(t_0)} \tag{2}$$

3. 非線形 3 要素モデル

3.1 モデル概要

1 章で述べたように耐震設計においては摩擦係数が安定した速度領域を対象としているため，弾性すべり支承はすべり材を剛塑性ばねで，積層ゴム部を弾性ばねでそれぞれ表現してモデル化されることが多い [6]。一方で本報では耐風設計，つまり低速度領域を対象としているため，図 3 に示すように，すべり材をすべり荷重の下限値を表す F_{F0}（一定値）とすべり材の速度依存を表す非線形ダッシュポット（C_D，α）を並列にしてモデル化し，それと積層ゴム部を表現する弾性ばね（K_E）を直列に結合した非線形 3 要素モデル [7] を用いる。

図 4 に積層ゴム部の F_E - u_E 関係を，図 5 にすべり材の F_S - v_S 関係をそれぞれ示す。なお，F_E はせん断方向の荷重，F_S，v_S はすべり材の摺動方向の荷重と速度を表す。また，40 cm/s における摩擦係数μ_{d40}の値については，面圧依存式が$5\ \text{MPa} \le \sigma_S \le 40\ \text{MPa}$の範囲で式（3）のように提案されている [6]。

$$\mu_{d40}(\sigma_S) = 0.094(-0.4388\ln(\sigma_S) + 2.3094) \tag{3}$$

表 1　積層ゴム部の試験体仕様

総厚[mm]	d	4	8	12
外径[mm]	L	100		
形状係数	S_2	25	12.5	8.3
備考		文献9)	–	–

表 2　変位制御実験加振条件一覧

（a）ゴム総厚 8 mm

実験名	波形	振幅 [cm]	面圧 [MPa]	サイクル数	最大速度 [cm/s]
DC-A-1	正弦波	±4.0	10	4	0.1
DC-A-2					0.5
DC-A-3					1.0
DC-A-4					2.0
DC-B-1	正弦波	±4.0	20	4	0.1
DC-B-2					0.5
DC-B-3					1.0
DC-B-4					2.0
DC-C-1	正弦波	±4.0	30	4	0.1
DC-C-2					0.5
DC-C-3					1.0
DC-C-4					2.0

（b）ゴム総厚 12 mm

実験名	波形	振幅 [cm]	面圧 [MPa]	サイクル数	最大速度 [cm/s]
DC-D-1	正弦波	±6.0	10	4	0.1
DC-D-2					0.5
DC-D-3					1.0
DC-D-4					2.0
DC-E-1	正弦波	±6.0	20	4	0.1
DC-E-2					0.5
DC-E-3					1.0
DC-E-4					2.0
DC-F-1	正弦波	±6.0	30	4	0.1
DC-F-2					0.5
DC-F-3					1.0
DC-F-4					2.0

式（4）およびすべり材実験に関する先行研究 [7] より，すべり荷重の下限値 F_{F0} は式（4）で表される。

$$F_{F0} = 0.33 N_{ES} \mu_{d40}(\sigma_S) \tag{4}$$

続いて，非線形 3 要素モデルにおける，適合条件および各要素の構成則を式（5）～（9）に示す。

$$u_S(t) + u_E(t) = u_{ES}(t) \tag{5}$$

$$v_S(t) + v_E(t) = v_{ES}(t) \tag{6}$$

$$F_S(t) = F_E(t) = F_{ES}(t) \tag{7}$$

$$F_S = \mathrm{sgn}\big(v_S(t)\big)\big(F_{F0} + C_D|v_S(t)|^{\alpha}\big) \tag{8}$$

$$F_E(t) = K_E u_E(t) \tag{9}$$

ここで，v_E，v_{ES} は積層ゴム部，非線形 3 要素モデル全体のそれぞれの速度を，u_{ES}，F_{ES} は非線形 3 要素モデル全体の変形および荷重を表す。また，非線形ダッシュポットの減衰係数C_Dおよび非線形ダッシュポットのべき乗の係数αは文献 7）の値（$\alpha = 0.26$）を用いる。式（5）～（9）より微分方程式（10）を得る。

$$v_{ES}(t) = \frac{\dot{F}_{ES}(t)}{K_E} + \mathrm{sgn}\big(F_{ES}(t)\big)\left\{\frac{\big|F_{ES}(t) - \mathrm{sgn}\big(F_{ES}(t)\big)F_{F0}\big|}{C_D}\right\}^{\frac{1}{\alpha}} \tag{10}$$

式（10）を Runge-Kutta 法により解くことで，F_{ES} を得ることが出来る。Runge-Kutta 法を用いた解析に関する詳細は文献 7）を参照されたい。

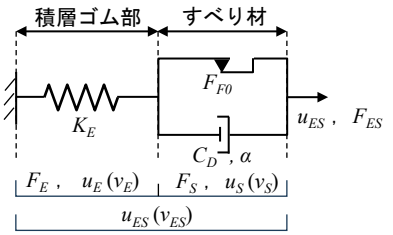


図 3　非線形 3 要素モデルの模式図

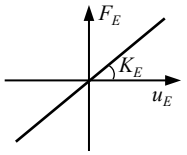


図 4　積層ゴム部の
F_E － u_E関係

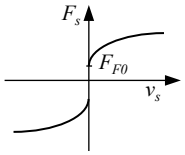


図 5　すべり材の
F_S － v_S関係

3.2 数値計算アルゴリズム

図 6 に非線形 3 要素モデルの数値計算アルゴリズムを示す。図 6 より，数値計算アルゴリズムでは，すべり荷重の下限値 F_{F0} とモデル全体の荷重 F_{ES} の大小関係より解析手法を分岐させる。モデル全体の荷重 F_{ES} が剛塑性ばねの折れ点荷重 F_{F0} を上回る場合は，3.1 節に示した Runge-Kutta 法により F_{ES}を計算する。F_{ES}が F_{F0}を下回る場合は式（11）より，積層ゴム部のみを用いた弾性範囲での数値計算アルゴリズムとしている。そのため，X 軸付近では弾性範囲（$u_E = u_{ES}$）での数値計算となる。

$$F_{ES}(t) = u_{ES}(t)K_E \qquad (11)$$

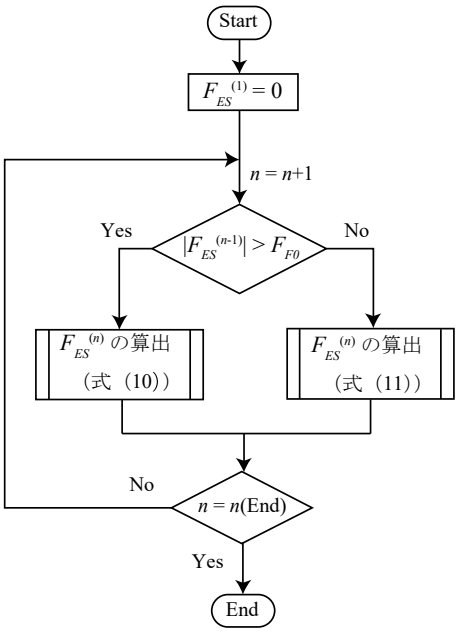
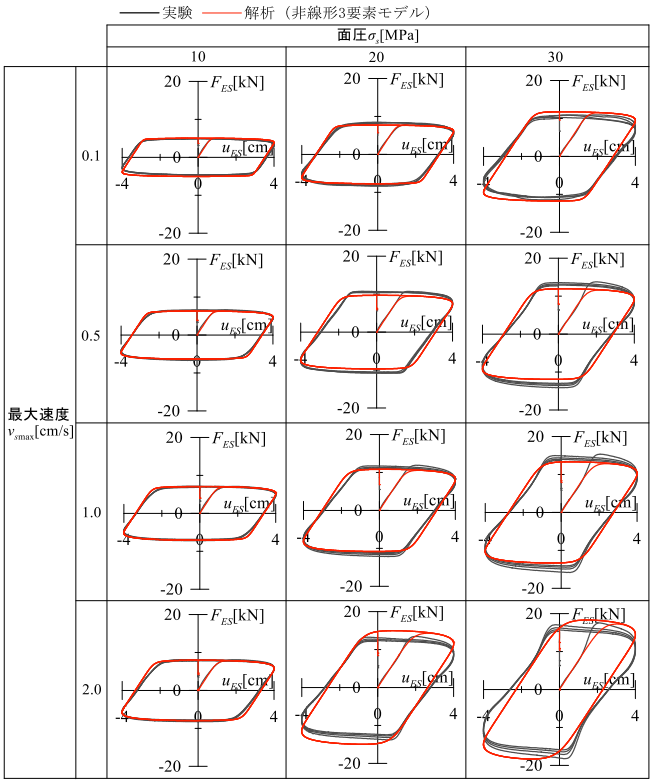


図 6　数値計算アルゴリズム

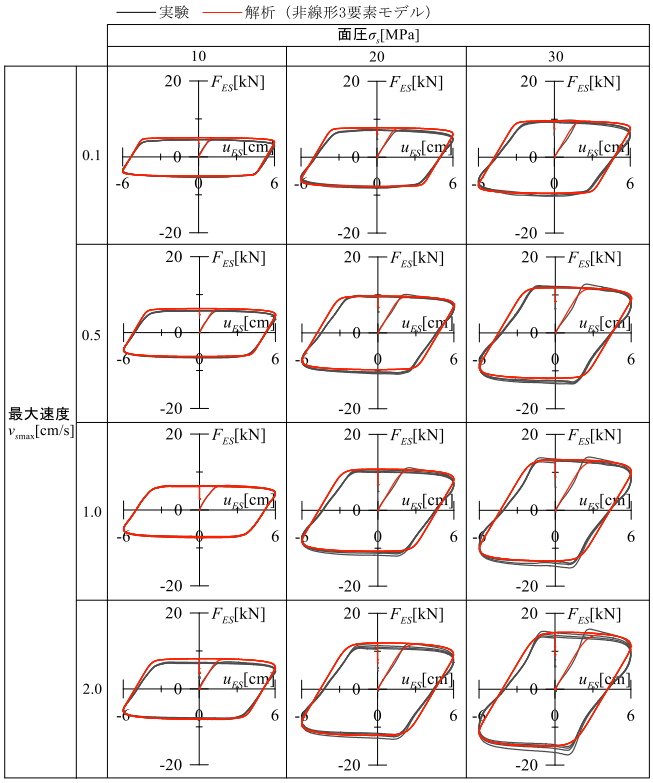
4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 履歴曲線

図 7 に履歴曲線の比較を示す。面圧，最大速度が大きくなるとやや履歴曲線が一致しない箇所も見られるが，概ね良好に対応していることが確認できる。



（a）ゴム総厚 8 mm

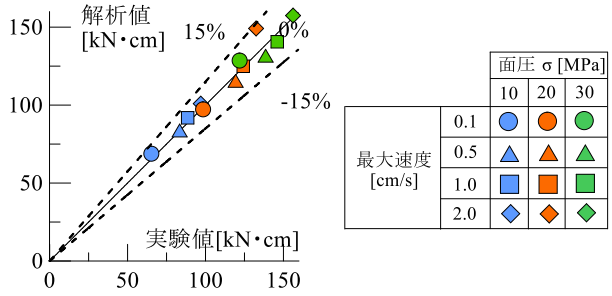


（b）ゴム総厚 12 mm

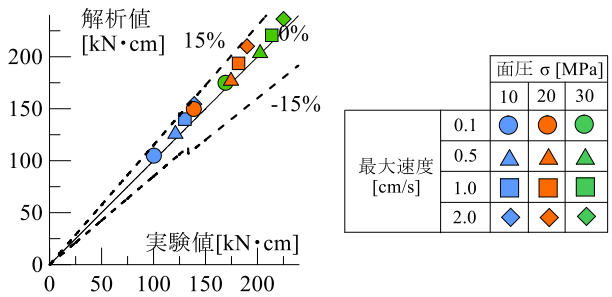
図 7　履歴曲線（F_{ES} － u_{ES}関係）比較

4.2 エネルギー吸収量

図 8 にエネルギー吸収量の比較を示す。本報では文献 7）と同様に 1 サイクル当たりのエネルギー吸収量を算出している。なお，エネルギー吸収量の算出には 3 サイクル目を用いている。それぞれのエネルギー吸収量は全て誤差 15 %以内に収まっていることが確認できる。以上より，積層ゴム部のゴム総厚が異なる試験体に対しても，非線形 3 要素モデルの適用性が定量的に確認された。



（a）総厚 8 mm



（b）総厚 12 mm

図 8　エネルギー吸収量の比較

5. まとめ

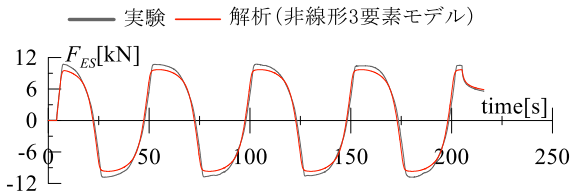
本報その 1 では，ゴム総厚の異なる弾性すべり支承縮小試験体を対象に荷重制御実験を実施し，非線形 3 要素モデルの適用性について検証した。その結果，解析値は実験結果を精度よく捉えられていることを確認した。また，エネルギー吸収量の比較により非線形 3 要素モデルの妥当性を定量的に評価した。以上より，本実験の範囲ではあるが，ゴム総厚が異なる弾性すべり支承に対しても非線形 3 要素モデルが適用可能であることを確認した。

参考文献

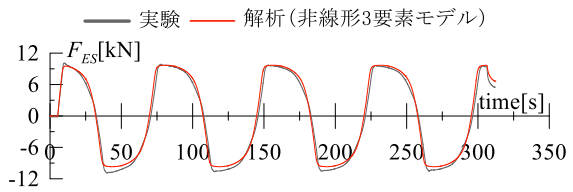
1) 日本免震構造協会：免震建築物の耐風設計指針（2023），2023.3
2) 日本免震構造協会：免震構造　部材の基本から設計・施工まで，2022.2
3) 松川宏：摩擦の物理，岩波書店，2015.6
4) 渡辺真，笠原又一，関口勇，広中清一郎：高分子トライボマテリアル，共立出版，1990.11
5) 日本トライボロジー学会固体潤滑研究会：固体潤滑ハンドブック，株式会社養賢堂，2010.3
6) 日本免震構造協会：免震部材標準リスト 2023，pp.351-383，2023.5
7) 佐藤大樹，牧平康也，シガイ・アレックス，三須基規，稲井慎介，桑素彦，川又哲也，石田琢志，得能将紀，丸尾純也：低速度領域における摩擦係数の変化を考慮した弾性すべり支承の解析モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第 89 巻，第 821 号，pp.719-726，2024.7
8) 崎谷俊太，佐藤大樹，陳引力，三須基規，稲井慎介，桑素彦，川又哲也，得能将紀，丸尾純也：風応答を対象とした弾性すべり支承解析モデルにおける弾性領域の精度向上のための数値計算アルゴリズムの修正，日本建築学会技術報告集，第 32 巻，第 80 号，pp.116-120，2026.2
9) 得能将紀，丸尾純也，桑素彦，稲井慎介，三須基規，柳勝幸，佐藤大樹，小林正人：高ゴム総厚弾性すべり支承を用いた免震建物に関する研究　その 3　実大試験体の載荷実験，日本建築学会学術講演梗概集，構造-Ⅱ，pp.835-836，2025.7

附録 A 荷重 F_{ES} の時刻歴波形の比較

本報では，変位制御で実験および解析を実行しているため，算出された全体の荷重F_{ES}を時刻歴波形で比較する。図 A に荷重F_{ES}の時刻歴波形を示す。なお，示しているケースは，代表して各総厚の面圧 20 MPa，最大速度 0.5 cm/s のケースとしている（DC-B-2，DC-C-2，表 2 参照）。図 A より，いずれも実験と解析結果は概ね一致しており，非線形 3 要素モデルは実験結果を精度よく再現できていることが時刻歴波形からも確認できる。また，図 6 に示す通り，弾性範囲で解析を分岐させることで，すべり出し荷重を下回っている範囲でも実験結果を模擬できていることが確認できる。



（a）DC-B-2



（b）DC-C-2

図 A　荷重 F_{ES} の時刻歴波形

*1 東京科学大学環境・社会理工学院　大学院生
*2 東京科学大学 総合研究院 准教授・博士（工学）
*3 東京科学大学 総合研究院 助教・博士（学術）
*4 SWCC 株式会社
*5 戸田建設株式会社　技術研究所
*6 戸田建設株式会社　構造設計部

Grad. Student, School of Environment and Society, Institute of Science Tokyo
Associate Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Dr. Eng.
Assistant Professor, IIR, Institute of Science Tokyo, Ph.D.
SWCC Corporation
Technology Research Institute, TODA Corporation
Structural Design Division, TODA Corporation