

正方形平面の支持架構付きグリッドシェル屋根の形状と部材断面の同時耐震最適化
SIMULTANEOUS SEISMIC OPTIMIZATION OF ROOF GEOMETRY AND ROOF MEMBER SECTION
ON METAL GRIDSHELLS WITH SQUARE PLANES寺澤 友貴^{*1}, 白井 健志^{*2}, 金子 亮太^{*3}, 新美 敦也^{*4}, 竹内 徹^{*5}

Yuki TERAZAWA, Kenji SHIRAI, Ryota KANEKO,

Atsuya NIIMI and Toru TAKEUCHI

A series of the proposed GRSA-based computational morphogenesis subjected to dead load and seismic load was performed for a metal gridshell with square plane to investigate the relationship between the design variables (roof geometry or member section) and the design philosophy (structural or economical rationality). Furthermore, the steel amount, dynamic characteristic, seismic performance and buckling load of the form-founded models were analyzed by linear static analysis, non-linear response history analysis, linear buckling analysis and non-linear buckling analysis.

Keywords: Form finding, Parametric design, Metal gridshell, Seismic response, Buckling load factor, Buckling-restrained brace

形状探索, パラメトリックデザイン, 鉄骨グリッドシェル, 地震応答, 座屈荷重係数, 座屈拘束ブレース

1. 序

構造形態創生^{1),2)}とは、意匠性を含む様々な制約条件を満たしつつ設計荷重に対して価値観に応じた目的関数を最小(最大)化する最適な構造形態を探索する形状最適化の一分野である。構造形態創生はシェル・空間構造物の実験的な設計手法^{例えば3),4)}として誕生し、現在は情報技術を駆使した数値的な設計手法として発展している。

日本では、大森ら・大崎らのグループが固定荷重に対する構造形態創生法の開発を牽引している。まず、大森・山本ら^{5),6)}が、曲げモーメントを生じない形態がシェル構造の理想という通説に基づきその総和を最小化する手法を提案し、次に大崎ら⁷⁾、浜田・大森ら^{8),9)}が、変形の影響を含む総歪エネルギーを最小化(≒剛性を最大化)する手法を提案し、佐々木らの実作¹⁰⁾により有効性が示され、一般的な手法となり、その後はRCシェルの形状と厚みを同時最適化する木村・大森らの手法^{11),12)}や意匠性・施工性を幾何学的制約とする藤田・大崎らの手法^{13),14)}へと発展した。その他にシェル構造で重要な座屈荷重を目的関数とする手法^{15)~18)}も並行して提案されている。

一方、地震荷重に対する構造形態創生法は、対象毎に設定された等価静的地震荷重と静的解析を用いる手法^{例えば19)~21)}が主流であり、汎用性の点で未だ発展途上にある。これに対して寺澤・新美ら²²⁾は、一般化応答スペクトル解析法^{23)~32)}(Generalized Response Spectrum Analysis, GRSA)に基づく構造形態創生手法と3DCAD上の計算環境を提案した。GRSAは複素固有値解析と応答スペクトル法の収斂計算を中核とした数値解析手法であり、現実的な時間範囲で、複雑な振動特性や制振部材を考慮した立体モデルの地震応答評価が可能である。筆者らは同手法を用いて未だ不明な点の多い地震応答に効果

的な構造形態の情報整備を進めており、前報^{22),33)}までに、(1)屋根部応答が励起されやすい条件では振動モードに抵抗する複数の局部的隆起を有する扁平形状が有効、(2)支持架構による地震エネルギー吸収を期待できる条件では固定荷重に対して効果的な屋根全体が単峰で隆起する形状が有効となる場合が多い点を明らかにした。しかし、力学特性に直結する形状の影響のみが分析され、経済性などにも関係する部材断面の影響は未解明である。

本研究は、提案手法²²⁾を用いて、正方形平面の支持架構付きグリッドシェル屋根の形状と部材断面の広範な単目的最適化を行い、各種価値観の指標(構造合理性、経済性)との関係性を議論する。まず、2章では数値解析概要を述べる。次の3章では意匠設計者から恣意的な屋根形状を要求された状況を想定する部材断面の耐震最適化を実施し、続く4章では屋根形状と部材断面の同時耐震最適化を実施し、それぞれ各種パラメータが最適設計案に与える影響を比較分析する。最後の5章では代表的な最適解の座屈荷重安全率を検証する。

2. 数値解析概要

2.1 想定建物の数値解析モデル

Fig.1に想定建物の数値解析モデルを、Table 1に部材諸元を示す。検討対象は前報³³⁾と同様の一辺48mの正方形平面の3層支持架構付単層グリッドシェル構造であり、1~2Fは多目的施設、3Fはアリーナを想定する。屋根架構は3mでグリッド分割して直交材(Grid lattice)、斜材(Diagonal lattice)、外周材(Outer member)を割付け、支持架構外周部には弾性ブレースまたは座屈拘束ブレース(BRB)を配置する。同図のInner supporting structureは多目的施設内部の柱梁骨組

*1 東京科学大学 建築学系 准教授・博士 (工学)

*2 (株) 竹中工務店 修士 (工学) (元東京科学大学 大学院生)

*3 (株) 竹中工務店 修士 (工学)

*4 Arup 修士 (工学)

*5 東京科学大学 名誉教授・博士 (工学)

Assoc. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Institute of Science Tokyo, Dr.Eng.
Takenaka Corporation, M.Eng. (Former Grad. Student, Institute of Science Tokyo)
Takenaka Corporation, M.Eng.

Arup, M.Eng.

Prof. Emeritus, Institute of Science Tokyo, Dr.Eng.

であり、中央部は床スラブを設ける。屋根・外壁荷重は 1.2kN/m^2 、床荷重は 5.0kN/m^2 とする。Table 1 に示すように、屋根斜材は中実円形断面、その他は計算を単純化するため中空円形断面を採用する。Fig.1 の屋根形状(ライズ 7.9m)は 1 次設計用の仮定形状であり最適化の初期解ではないが、本検討の範囲では、屋根形状の変化に伴う支配面積の変化に対して各節点質量は初期形状時で固定とした³³⁾。

Table 1 の def に示す初期部材断面(屋根架構部材、支持架構の柱・梁・弾性ブレース)は、固定荷重と保有水平耐力計算法³⁴⁾の 1 次設計時の地震荷重に対して屋根架構安全率 2.0、支持架構安全率 1.5 で許容応力度設計した。本検討の BRB は合計で 2 次設計時の必要保有水平耐力 Q_{un} (構造特性係数 0.25)を満たす軸力 N で降伏し、全長に対する芯材の塑性化部の長さ比 $L_p/L_0=0.25$ と芯材弾性部に対する塑性化部の断面積比 $A_p/A_e=0.50$ の等価断面積($A_{eq}=A_p/\{(L_p/L_0)+(A_p/A_e)(1.0-L_p/L_0)\}$, LY225)を有する部材で固定する³³⁾。

数値解析モデルでは、屋根斜材と BRB、弾性ブレースはトラス要素でモデル化し、BRB は二次剛性比 2%の単純 Bilinear 型の履歴特性を与える。他の部材は弾性梁要素でモデル化する。部材要素には鋼材のヤング率(205GPa)を適用する。2FL と 3FL には剛床を設定し、1F 柱脚部はピン支持とする。各節点には負担面積分の集中質量を与える。比例減衰は初期の剛性・質量行列に比例する Rayleigh 型とし、1~2 次の減衰比は 2%とする。弾性ブレース付モデルを CB モデル、BRB 付モデルを BRB モデルと呼称する。

2.2 設計変数、目的関数、制約条件ならびに最適化問題の定義

(a) NURBS 曲面を用いた設計変数の表現

Fig.2 に設計変数の概要を、Table 2 に最適化の部材断面リストを示す。屋根の形状と直交材の部材断面分布は、重みが全て同じ 3 次の NURBS 曲面(通常の B-Spline 曲面)を用いて表現し¹¹⁾、形状の制御点鉛直方向座標 R_z と部材断面分布の制御点鉛直方向座標 R_{ai} を最適化問題の設計変数に適用する。Fig.2(b)に示すように、部材断面分布を表現する曲面の鉛直方向座標 R_{ai} は Table 2 の断面種類数で区間を等分(離散化)し、直交材に同座標値区分と対応する一般構造用鋼管(Table 2)を割当てて。本検討では屋根の部材断面最適化は直交材のみを対象とする。なお、同表の S5(initial)や S9(initial)は初期設計時の断面を意味する。

(b) 目的関数の計算に用いる総歪エネルギー U と鋼材重量比 $w(R_a)$

総歪エネルギー U は、固定荷重に対する U_{DL} と地震荷重に対する U_{ELxy} を式(1)で計算して総和し、構造合理性の指標(価値観)とする。

$$U_{DL} \text{ or } U_{ELxy} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{MEM} \frac{A_k l_k}{E_k} ({}_k\sigma_N^2 + ({}_k\sigma_M^2 + ({}_k\sigma_M^2) \quad (1)$$

ここに MEM は屋根部材数、 A は断面積、 l は部材長、 E はヤング率、 σ_N は軸応力度、 σ_M は i 端の曲げ応力度である。 U_{ELxy} は各方向の総歪エネルギーを $1/\sqrt{2}$ 倍した和(斜め 45 度方向入力)として評価する²²⁾。

鋼材重量比 $w(R_a)$ は Fig.1 の形状の鋼材重量 W_0 に対する探索解の鋼材重量 $W(R_a)$ の比 $W(R_a)/W_0$ のべき乗とし、経済性の指標(価値観)とする。

(c) 制約条件

制約条件は屋根形状の制御点鉛直方向座標 R_z 、部材断面分布の制御点鉛直方向座標 R_{ai} 、短期許容圧縮応力度による直交材と外周材の応力制約、直交材と外周材の部材回転角(Rotation Angle, RA)の変形制約($1/150\text{rad}$)、ラチスシェル屋根構造設計指針³⁸⁾に基づく屋根部

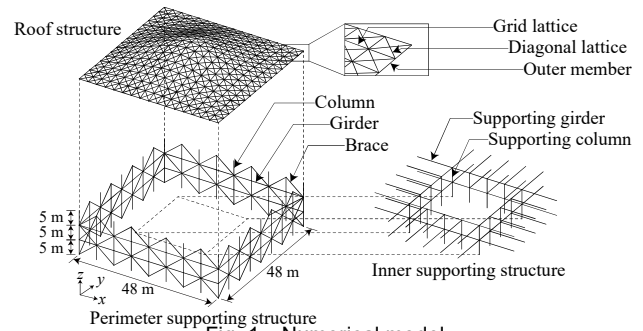


Fig. 1 Numerical model
Table 1 Member specification before seismic optimization
(a) Elastic members

Member		def	Section	
			soft	hard
Roof structure	Grid lattice	$\phi 406.4 \times 16$ (Optimized in Chapter 3, 4)		
	Diagonal lattice	$\phi 26$		
	Outer member	$\phi 406.4 \times 9.5$		
Supporting structure	Column & Girder	$\phi 406.4 \times 16$	$\phi 355.6 \times 11.1$	$\phi 609.6 \times 22$
	Brace	$\phi 216.3 \times 12.7$	$\phi 216.3 \times 5.8$	$\phi 355.6 \times 12.7$
	Supporting column	$\phi 406.4 \times 9.5$	$\phi 318.5 \times 10.3$	$\phi 558.8 \times 19$
	Supporting girder	$\phi 267.4 \times 6$	$\phi 216.3 \times 5.8$	$\phi 355.6 \times 12.7$

(b) Buckling-restrained brace (BRB)

Story	w [kN]	A_i	C_i	Q_u [kN]	Q_{un} [kN]	N [kN]	A_{eq} [mm ²]
3rd	11952	1.54	1.53	23176	5794	236	1676
2nd	11952	1.22	1.21	32858	8215	334	2376
1st	11376	1.00	1.00	38285	9571	389	2769

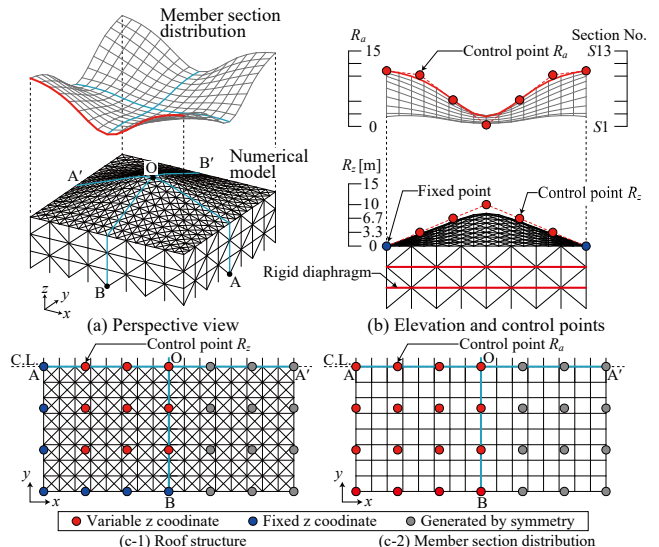


Fig. 2 Design variable schematics
Table 2 Section list of grid lattice member as a design variable
(a) Chapter 3 (b) Chapter 4

Section No. S	Section	A [cm ²]	I [cm ⁴]
S1	$\phi 216.3 \times 4.5$	29.94	1,680
S2	$\phi 318.5 \times 6.9$	67.55	8,200
S3	$\phi 406.4 \times 9.5$	112.4	22,200
S4	$\phi 406.4 \times 12.7$	157.1	30,500
S5 (Initial)	$\phi 406.4 \times 16$	196.2	37,400
S6	$\phi 508 \times 16$	247.3	74,900
S7	$\phi 609.6 \times 16$	298.4	132,000
S8	$\phi 700 \times 16$	343.8	201,000
S9	$\phi 711.2 \times 19$	413.2	248,000
S10	$\phi 812.8 \times 19$	473.8	373,000
S11	$\phi 914.4 \times 19$	534.5	536,000
S12	$\phi 914.4 \times 22$	616.5	614,000
S13	$\phi 1016 \times 22$	687.0	849,000

の鉛直たわみ角(最大鉛直変位/スパン)の変形制約($1/300\text{rad}$)とする。

(d) 構造合理性のみを価値観とする最適化問題

構造合理性(総歪エネルギーの低減)のみを価値観とする最適化問題は、屋根形状のみを最適化する G、直交材断面のみを最適化する M、最適屋根形状に対して直交材断面のみを最適化する G-M、屋根

の形状と直交材断面を同時最適化する G&M として、式(2a)~式(4c)で定義する。応力制約と変形制約はペナルティ p で表現する。

$$\text{形状のみ G)} \quad \text{Minimize} \quad : f(\mathbf{R}_z) = U + p \quad (2a)$$

$$\text{Subject to} \quad : 0 \leq R_{zi} \leq 15 \text{ m} \quad (2b)$$

$$\text{断面のみ M), G-M)} \quad \text{Minimize} \quad : f(\mathbf{R}_a) = U + p \quad (3a)$$

$$\text{Subject to} \quad : 0 \leq R_{ai} \leq 15 \quad (3b)$$

$$\text{形状と断面 G\&M)} \quad \text{Minimize} \quad : f(\mathbf{R}_z, \mathbf{R}_a) = U + p \quad (4a)$$

$$\text{Subject to} \quad : 0 \leq R_{zi} \leq 15 \text{ m} \quad (4b)$$

$$\text{Subject to} \quad : 0 \leq R_{ai} \leq 15 \quad (4c)$$

(e) 構造合理性と経済性を価値観とする最適化問題

構造合理性(総歪エネルギーの低減)と経済性(鋼材重量の低減)を価値観とする最適化問題は、屋根の形状と直交材断面を同時最適化する G&M-W, 直交材断面のみを最適化する M-W とし、鋼材重量比 $w(\mathbf{R}_a)$ に比例して目的関数値が小さくなる式(5a)~式(6b)で定義する。

$$\text{形状と断面 G\&M-W)} \quad \text{Minimize} \quad : f(\mathbf{R}_z, \mathbf{R}_a) = w(\mathbf{R}_a) \times U + p \quad (5a)$$

$$\text{Subject to} \quad : 0 \leq R_{zi} \leq 15 \text{ m} \quad (5b)$$

$$\text{Subject to} \quad : 0 \leq R_{ai} \leq 15 \quad (5c)$$

$$\text{断面のみ M-W)} \quad \text{Minimize} \quad : f(\mathbf{R}_a) = w(\mathbf{R}_a) \times U + p \quad (6a)$$

$$\text{Subject to} \quad : 0 \leq R_{ai} \leq 15 \quad (6b)$$

なお、 $w(\mathbf{R}_a)$ のべき指数は、総歪エネルギーと鋼材重量どちらかの低減に偏らないよう試行錯誤で決定し、3 章の M-W(CB モデル)と 4 章の G&M-W では 1 乗、4 章の M-W(BRB モデル)は 2 乗とした。

(f) 最適化アルゴリズム

最適化アルゴリズムは実数値 GA³⁹⁾を用い、交叉手法には AREX, 世代交代モデルには JGG⁴⁰⁾を適用する。集団サイズ n_{pop} は 4(設計変数次元+1)とし、繰返し計算回数は 200 とする。設計変数次元は 9(問題 G), 16(問題 M), 25(問題 G&M)である。同手法は乱数によりランダム生成した初期集団から最適解を探索する。

(g) 構造形態創生および力学特性評価の計算環境

本研究の構造形態創生および力学特性評価は、前報^{22),33)}と同じ計算環境(3D CAD に Rhinoceros, プリ・ポスト処理に C#の自作プラグイン, 数値解析に Fortran 90/95 の自作プログラム, 計算機には Intel Core i9-7940X と DDR4 メモリを内蔵するワークステーション)にて行った。実数値 GA による構造形態創生は、BRB を考慮しない場合で 3~6 時間(問題 G, M)または 9 時間(問題 G&M), BRB を考慮する場合で 16~28 時間(問題 G, M)または 45 時間(問題 G&M)の要した。最適化計算は複数回行い同じ解に収束することを確認している。

2.3 数値解析手法

数値解析手法は静的応力解析, 振動固有値解析, 時刻歴応答解析(NLRHA), 線形・弾性・弾塑性座屈解析, 一般化応答スペクトル解析(GRSA)を用いる。静的応力解析は固定荷重に対する U_{DL} の算出と得られた設計案の力学特性評価に用いる。振動固有値解析, NLRHA, 線形・弾性・弾塑性座屈解析は設計案の力学特性評価に用いる。NLRHA の増分変位は Newmark β 法($\beta=1/4$)で計算し、弾性・弾塑性座屈解析は弧長増分法を用い、幾何学的・材料非線形性を考慮する。

GRSA は複素固有値解析と応答スペクトル法の収斂計算を中核とする数値解析群であり、Fig.3 に示す地震荷重に対する総歪エネルギー U_{ELsy} の算出に用いる。最大応答値 R_{CQC} は非比例減衰系用の修正 CQC 法³⁰⁾より算出し、主要な減衰比 ξ_0 の応答スペクトル値は外部ファイルから与え、任意減衰比 ξ の応答スペクトル値は、減衰比に近い

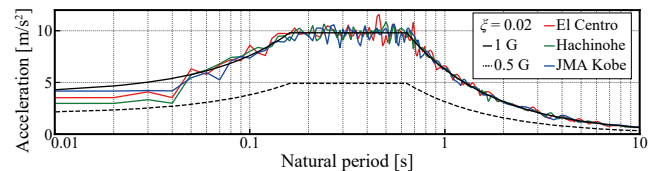


Fig.3 Response spectra

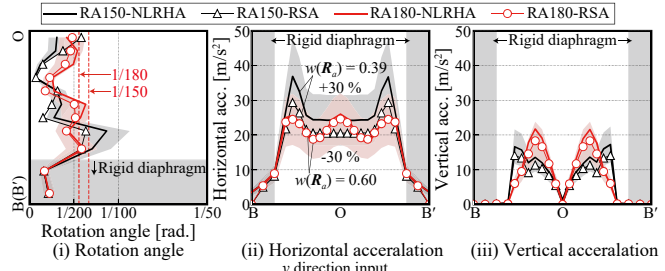


Fig.4 Comparison of NLRHA and GRSA (Opt-G&M-W)

Problem	M	M-W
Minimize	$U+p$	$w(\mathbf{R}_a) \times U+p$
① Roof geometry	DL or Single or Double or Multi	
Variables	$\mathbf{R}_a$	
Seismic load	1 G	
Stiffness	def	
③ Seismic device	CB or BRB	
Z_{cr} [rad.]	1/300	
RA_{cr} [rad.]	1/150	
Subject to	$0 \leq R_{ai} \leq 15 (1 \leq i \leq 16)$	

Fig.5 Model ID (Chapter 3)

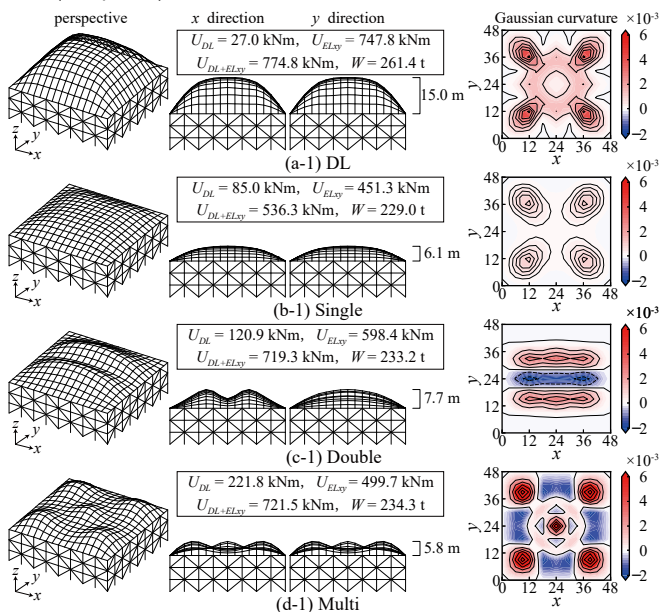


Fig.6 Roof geometries for member section optimization

応答スペクトル値に応答低減効果係数 D_R ³⁷⁾を乗じて換算する。

$$R_{CQC} = \sqrt{\sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n B_s B_r S_s(\omega_s, \xi_s) S_r(\omega_r, \xi_r) \cos(\theta_s - \theta_r) \rho_{sr}} \quad (7)$$

ここに s と r はモード番号, ξ はモード減衰比, ρ は各種モード相関係数, ω は固有円振動数, S は応答スペクトル値, $B = \text{Re}(\lambda^* \beta \phi) / \sin \theta$, $\theta = \tan^{-1}(-\text{Re}(\lambda^* \beta \phi) / \text{Re}(\beta \phi))$, λ は複素固有値, β は複素刺激係数, ϕ は複素固有ベクトル成分, $*$ は複素共役である。

Fig.4 に NLRHA と GRSA における支持架構を含む稜線 BOB' の地震応答値の比較例を示す。地震応答は Fig.3 に示すスペクトル適合 3 波に対する平均値である。同図は部材回転角 RA の変形制約を変更した場合の探索解である。同図黒線と赤線の比較に示すように、この変形制約が緩和されると初期解に対する鋼材重量比 $w(\mathbf{R}_a)$ の小さ

な解を探索できる一方、屋根面外剛性の低下による幾何学的非線形性が強くなると GRSA が部材回転角をやや過小評価し、変形制約を満たさない解に探索が収束する場合が確認されたため、本研究の範囲では、プログラムの設定上の変形制約は最適化問題の定義を概ね満たすように試行錯誤で調整した。以降では、得られた設計案の地震応答は BRB の有無に関係なく NLRHA を用いて評価する。

3. 恣意的なグリッドシェル屋根形状における部材断面の耐震最適化

まず、3 章では、形状を固定したグリッドシェル屋根(意匠設計者から恣意的な形状を要求された状況に相当)を対象に屋根の部材断面のみの耐震最適化を行い、部材断面と構造合理性と経済性の価値観の係数性を分析する。Fig.5 と Table 3 に最適設計案のモデル命名規則と最適化問題のまとめを示す。本章の検討パラメータは①屋根形状、②経済性の価値観の有無、③支持架構の地震エネルギー吸収の有無である。支持架構剛性は標準 *def* とし、地震荷重はスペクトルピーク値 1.0G とする。なお、本章の図版(Fig.7~Fig.10)は各検討パラメータの影響を比較できるように各節を横断してまとめて掲載し、視認性の都合で屋根架構は斜材を省略して示す。

3.1 対象とする屋根形状

Fig.6 に対象とする屋根形状とガウス曲率分布を、Table 4(a) と Fig.9 (i) に最適化前の初期案の特性値(CR_{max} は最大検定値、 $RA_{DL,EL}$ は各荷重に対する RA の最大値、 S_{min}, S_{max} は最小・最大断面)と屋根部稜線の地震応答分布を示す。Fig.6 に示すように、本章が対象とする屋根形状は、(1)固定荷重に対する最適形状 DL³³⁾、(2)近年の建築作品でよくみられる楕円形など扁平かつ隆起が 1 つの形状 Single^{41), 42)}、(3)一方向に波打つ隆起を 2 つ有する Double⁴³⁾、(4)恣意的な隆起を複数持つ Multi⁴⁴⁾ の 4 種類である。Table 4 と Fig.9(i) に示すように、これらは意匠設計者の要求による恣意的な屋根形状を想定しており、初期案の屋根部応答は制約を違反する場合がある。本章では、部材断面の耐震最適化により初期案の構造合理性と経済性の改善を試みる。

3.2 支持架構による地震エネルギー吸収が無い場合の最適設計案

支持架構による地震エネルギー吸収が無い場合の最適設計案を分析する。Table 4(a) に最適設計案の特性値を、Fig.7(a-2)~(d-2)(a-3)~(d-3) に部材断面分布を、Fig.8 に部材回転角 RA 分布を、Fig.9(ii) に同地震応答値を、Fig.10 に卓越固有振動モードを示す。

構造合理性の価値観にのみ従って部材断面を最適化した DL-M, Single-M, Double-M, Multi-M では、Table 4(a), Fig.7(a-2)~(d-2), Fig.9(ii) に例示するように、屋根形状に依らず部材断面を部材断面リストの上限近傍まで増大させる設計案が選択された。これは形鋼の屋根部材の断面積と屋根面外剛性は正の比例関係にあり、断面積の増大が屋根部の総歪エネルギーの低減(=構造合理性の改善)に直結するためである。この結果は屋根の部材断面は構造合理性に影響するものの、その価値観を重んじる屋根設計では、構造形態創生を利用せずとも可能な範囲でより大きな部材断面を選択すれば良いことを示唆する。また、この結果は形状が指定されているグリッドシェル屋根では、初期案から部材断面を減らすことで構造合理性を改善する設計は不可能であることも示す。一方、構造合理性に特化したこれらの設計案は、部材断面が極端に太くなるため経済性(鋼材重量)や美観の点で採用されない可能性は容易に想像される。

これに対して経済性の価値観も考慮して部材断面を最適化した

Table 4 Specifications of optimum models
(a) CB models

Model ID	U_{DL}	U_{ELxy}	U	$W[t]$	CR_{max}	RA_{DL}	RA_{ELx}	RA_{ELy}	S_{min}	S_{max}
DL (initial)	27.0	747.8	774.8	261.4	0.783	1/821	1/149	1/149	S5	S5
DL-M	10.7	102.4	113.1	915.3	0.469	1/2636	1/1240	1/1240	S13	S13
DL-M-W	20.5	646.9	667.4	203.9	0.817	1/757	1/180	1/180	S2	S9
Single (initial)	85.0	451.3	536.3	229.0	0.644	1/344	1/174	1/174	S5	S5
Single-M	28.0	48.7	76.7	801.3	0.302	1/1323	1/2753	1/2753	S12	S13
Single-M-W	75.1	375.8	450.8	179.4	0.969	1/287	1/241	1/244	S2	S8
Double (initial)	120.9	598.4	719.3	233.2	1.492	1/151	1/71	1/162	S5	S5
Double-M	24.4	51.2	75.7	816.3	0.327	1/1056	1/2680	1/2645	S13	S13
Double-M-W	80.0	400.1	480.1	203.9	0.785	1/186	1/187	1/201	S2	S11
Multi (initial)	221.8	499.7	721.5	234.3	1.354	1/89	1/128	1/128	S5	S5
Multi-M	41.9	59.3	101.2	818.9	0.351	1/503	1/1997	1/1997	S12	S13
Multi-M-W	101.2	271.2	372.3	290.1	0.627	1/181	1/309	1/281	S2	S12

(b) BRB models

Model ID	U_{DL}	U_{ELxy}	U	$W[t]$	CR_{max}	RA_{DL}	RA_{ELx}	RA_{ELy}	S_{min}	S_{max}
DL-BRB (initial)	27.0	32.4	59.4	261.4	0.322	1/798	1/1030	1/1028	S5	S5
DL-M-BRB	10.7	7.2	17.9	915.3	0.214	1/2481	1/4459	1/4460	S13	S13
DL-M-W-BRB	34.8	41.1	75.9	68.7	0.589	1/371	1/339	1/296	S1	S4
Single-BRB (initial)	84.8	27.7	112.5	229.0	0.457	1/328	1/1211	1/1211	S5	S5
Single-M-BRB	28.4	3.8	32.3	800.3	0.154	1/1242	1/6490	1/6490	S12	S13
Single-M-W-BRB	76.8	23.7	100.5	99.9	0.690	1/185	1/449	1/442	S1	S8
Double-BRB (initial)	121.1	26.7	147.8	233.2	0.834	1/148	1/523	1/983	S5	S5
Double-M-BRB	24.7	3.9	28.7	816.3	0.188	1/1019	1/6271	1/6297	S13	S13
Double-M-W-BRB	58.2	17.6	75.8	246.2	0.461	1/352	1/1256	1/998	S2	S12
Multi-BRB (initial)	222.6	23.2	245.8	234.3	1.052	1/88	1/979	1/979	S5	S5
Multi-M-BRB	42.5	4.5	47.0	813.6	0.202	1/478	1/6396	1/6396	S12	S13
Multi-M-W-BRB	54.2	9.6	63.7	462.4	0.290	1/233	1/2001	1/2077	S3	S12

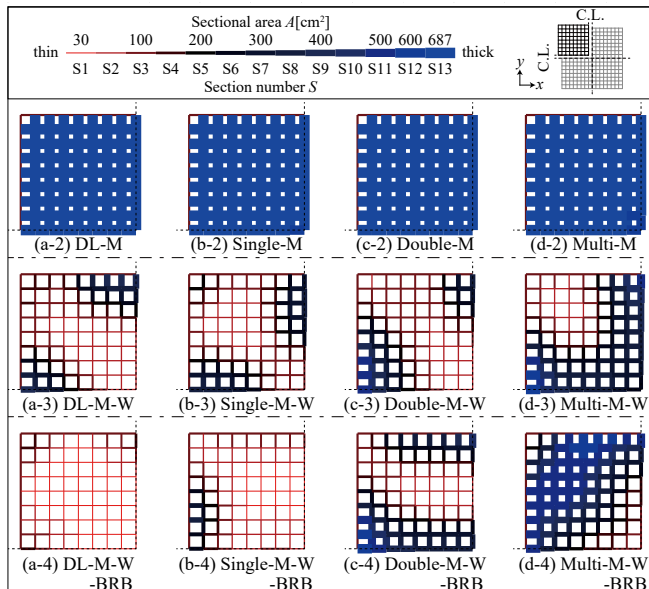


Fig. 7 Cross section distribution

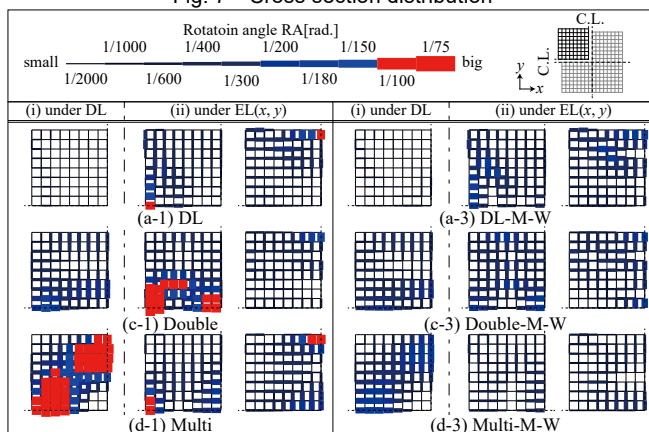


Fig. 8 Rotation angle(RA) distribution

DL-M-W, Single-M-W, Double-M-W, Multi-M-W では、Table 4(a), Fig.7(a-3)~(d-3), Fig.8, Fig.9(iii) に例示するように、初期案の屋根部応答が大きな位置には構造合理性を改善するよう大きな部材断面が

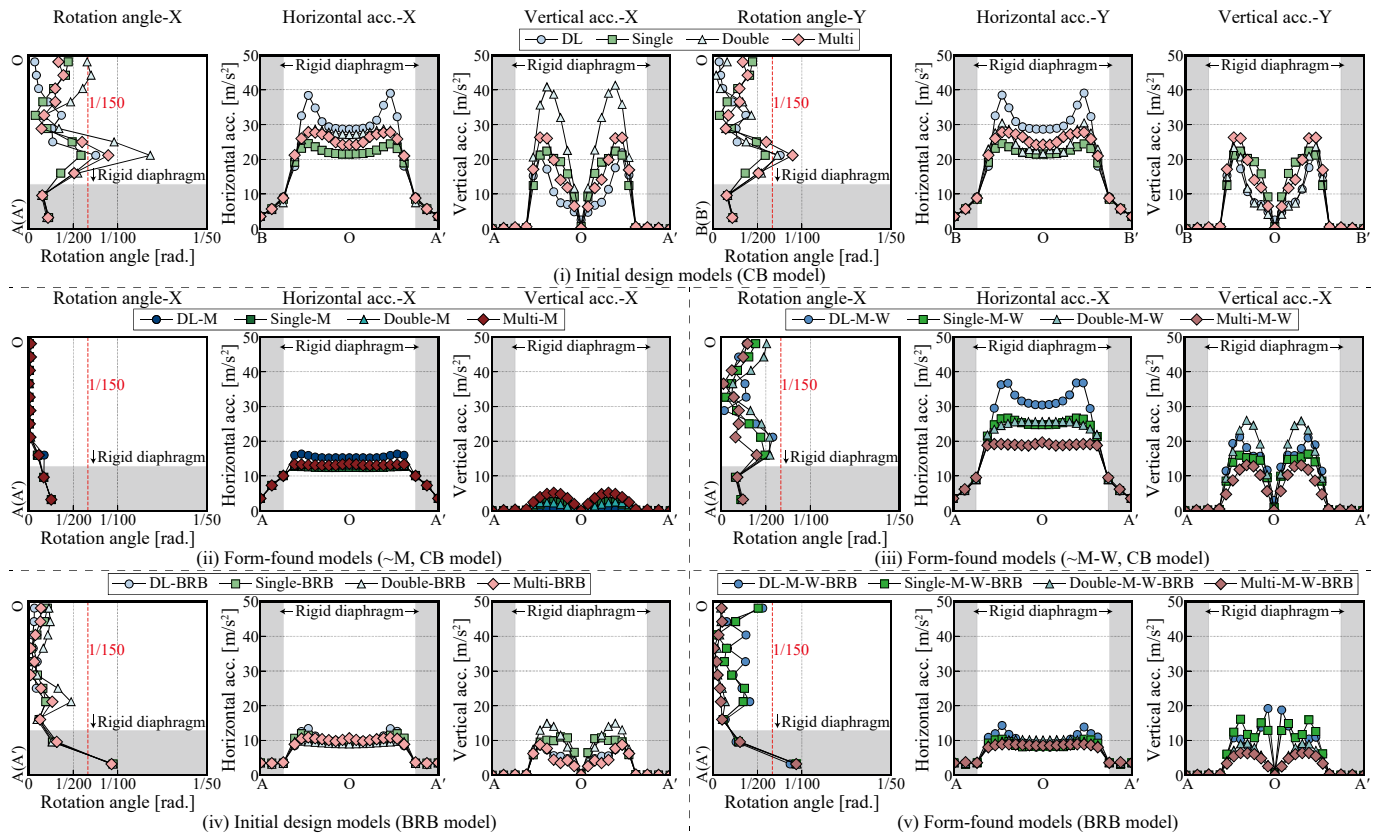


Fig. 9 Seismic response of initial and form-found models

配置され、反対に屋根部応答が小さい位置には経済性が改善するように小さな部材断面が配置され、結果的に屋根形状に依らず鋼材重量を抑えつつ部材回転角 RA や部材検定値を設計クライテリア範囲に納めるより現実的な設計案が選択された。この結果は部材断面が構造合理性と経済性の両方に大きく寄与し、配置される部材断面の大小は構造形態創生時の価値観に依存することを明示している。一方で、Fig.10 に示すように恣意的な屋根形状が与えられる場合の構造形態創生の範囲では、初期案と最適設計案の卓越固有振動モードは概ね一致する傾向にあった。

3.3 支持架構による地震エネルギー吸収が有る場合の最適設計案

支持架構による地震エネルギー吸収が有る場合の最適設計案を分析する。Table 4(b)に最適設計案の特性値を、Fig.7(a-4)~(d-4)に部材断面分布を、Fig.9(v)に同地震応答値を示す。

Table 4(b)と Fig.9(iv)に示すように、支持架構による地震エネルギー吸収が有る場合では、恣意的な屋根形状の初期案でも屋根部応答は設計クライテリアを満たすため、Fig.7 と Fig.8 の関係する図版の比較に示すように、構造合理性と経済性の価値観を考慮する DL-M-W-BRB, Single-M-W-BRB, Double-M-W-BRB, Multi-M-W-BRB の最適設計案では、固定荷重時の RA 分布に対応した部材断面分布が得られる傾向にある。一方、Table 4(b)の S_{min} , S_{max} に例示するように、構造合理性の価値観のみにしたがって部材断面を最適化した DL-M-BRB, Single-M-BRB, Double-M-BRB, Multi-M-BRB では、支持架構による地震エネルギー吸収が無い場合と同様に屋根部の剛性を極限まで高めるよう部材断面リストの上限近傍が選択され、鋼材重量は顕著に増大した。この結果は支持架構によるエネルギー吸収の有無は構造合理性に特化した部材断面の選択に影響しないことを示す。

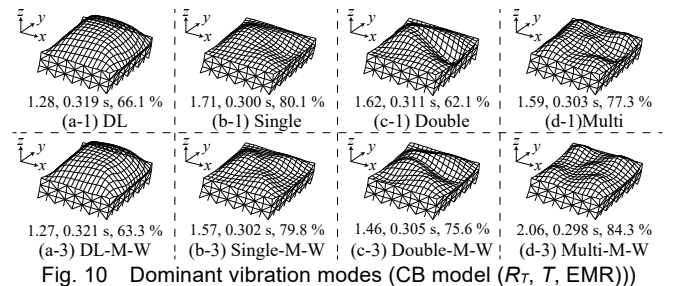


Fig. 10 Dominant vibration modes (CB model (R , T , EMR))

Opt-G&M				
① (-W-0.5G-soft-BRB)				
②	③	④	⑤	
G	N/A	N/A	1G	
G&M	W	0.5G		
G-M				
④	N/A: def soft hard	N/A: CB BRB		

Fig. 11 Model ID (Chapter 4)

Table 5 Optimization problem(Chapter 4)

Problem	G	G&M	G&M-W	G-M
Minimize	$U+p$	$w(R_g) \times U+p$	$U+p$	
① Variables	R_z	R_z, R_g	R_g	
③ Seismic load	1 G or 0.5 G	1 G	1 G	
④ Stiffness	def or hard or soft	def		
⑤ Seismic device	CB or BRB	CB or BRB	CB	
Z_{cr} [rad.]	1/300			
RA_{cr} [rad.]	1/150			
Subject to	$0 \leq R_z \leq 15 \text{ m} (1 \leq i \leq 9)$			
	$0 \leq R_{gt} \leq 15 (10 \leq i \leq 25)$			

以上より、意匠設計者から恣意的な屋根形状を要求された状況では、(1)構造合理性と経済性の両方の価値観を考慮した屋根部材断面の最適化を実施する、(2)制振部材など支持架構のエネルギー吸収によって初期案のまま屋根部応答を設計クライテリアに抑える、(3)(1)と(2)の併用、の設計アプローチが現実的かつ有効と考えられる。

4. グリッドシェル屋根の形状と直交材断面の同時耐震最適化

次に4章では、意匠上の制約は無視できると仮定し、グリッドシェル屋根の形状と直交材断面の広範な耐震最適化を行う。Fig.11 と Table 5 に最適設計案のモデル命名規則と最適化問題のまとめを示す。本章では、①屋根部の最適設計の対象、②経済性の価値観の有

無, ③地震荷重レベル(応答スペクトルピーク値が1.0Gか0.5G), ④支持架構水平剛性(2.1節の初期設計を標準 *def* として1/2倍の場合 *soft*, 5倍の場合 *hard*), ⑤BRBによる支持架構の地震エネルギー吸収の有無が最適設計案に与える影響を比較分析する。ただし, Table 2(a)に示すように, 4章では屋根部材は初期設計時から断面積が減少する範囲を探索し, 形状操作が許容された状況において初期案から部材断面を減らすことで構造合理性を改善できる可能性を調査する。なお, 4.1節~4.4節の図版(Fig.14~Fig.18)は各検討パラメータの影響を比較できるように各節を横断してまとめて掲載する。

4.1 屋根の形状と部材断面と構造形態創生の価値観の関係性

まず, 屋根の形状と部材断面と構造形態創生の価値観の関係性について分析する。Fig.12に4.2節の全探索解の総歪エネルギー-鋼材重量関係を, Fig.13に全最適設計案の総歪エネルギーと鋼材重量の比較を, Fig.14とFig.15とTable 6に全最適設計案の形状と部材断面分布と特性値をそれぞれ示す。Fig.12とTable 6に示すように, 屋根の形状のみを探索する Opt-G(灰色マーカー)と最適化された屋根形状に対して部材断面のみを探索する Opt-G-M(赤色マーカー)の解空間はそれぞれ総歪エネルギーまたは鋼材重量に偏って広がり, 両者の最適設計案の総歪エネルギーに差異は殆ど無い。また, 屋根の形状と部材断面を同時探索する Opt-G&M(青色マーカー)や経済性の価値観を加えた Opt-G&M-W(緑色マーカー)の解空間の総歪エネルギーは Opt-G-M の解空間の総歪エネルギーを殆ど超えない。この結果は(a)屋根の形状は主に構造合理性に影響すること, (b)部材断面は構造合理性と経済性に影響するもの, 形状操作が許容される状況においても部材断面の低減による構造合理性の改善は微小であることを示唆する。また, Fig.14とFig.15に示すように, Opt-G系とOpt-G&M系の最適設計案の屋根形状と部材断面分布は殆ど変わらず, 部材断面は経済性の価値観が含まれる場合(Opt-G&M-W系)に顕著に変化する。この結果は体積制約の無い本検討の構造合理性の観点では, 最適な屋根形状と断面分布は独立関係にあることを示す。

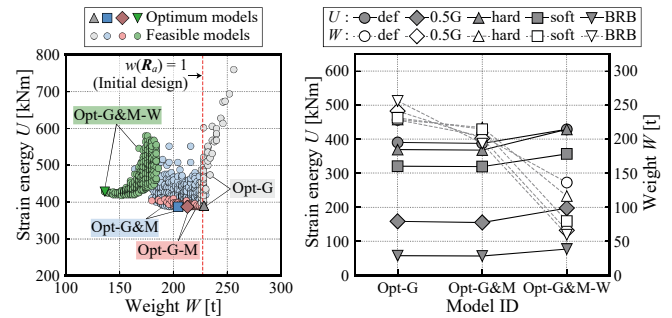


Fig. 12 U - W relationships Fig. 13 U and W of form-found model

Table 6 Summary of characteristic value

Model ID	U_{DL}	U_{ELxy}	U	W [t]	CR_{max}	RA_{DL}	RA_{ELx}	RA_{ELy}	S_{min}	S_{max}
Opt-G	122.1	268.1	390.2	228.3	0.847	1/176	1/652	1/156	S9	S9
Opt-G-M	124.4	263.3	387.8	213.0	0.821	1/166	1/640	1/150	S6	S9
Opt-G&M	119.2	268.4	387.6	204.4	0.838	1/173	1/597	1/154	S8	S9
Opt-G&M-W	113.8	314.9	428.8	136.2	0.999	1/180	1/198	1/180	S3	S9
Opt-G-0.5G	58.2	100.0	158.2	241.3	0.631	1/336	1/154	1/774	S9	S9
Opt-G&M-0.5G	57.3	97.6	154.8	201.4	0.591	1/330	1/150	1/760	S7	S9
Opt-G&M-W-0.5G	56.1	141.2	197.2	65.9	0.996	1/274	1/182	1/197	S1	S6
Opt-G-hard	96.3	272.8	369.1	228.9	0.999	1/262	1/352	1/150	S9	S9
Opt-G&M-hard	93.9	273.9	367.8	216.9	0.999	1/259	1/324	1/150	S8	S9
Opt-G&M-W-hard	104.9	323.8	428.7	116.2	0.999	1/180	1/180	1/196	S2	S8
Opt-G-soft	85.1	235.1	320.3	231.3	0.588	1/250	1/391	1/392	S9	S9
Opt-G&M-soft	84.8	234.4	319.2	214.5	0.589	1/239	1/368	1/368	S8	S9
Opt-G&M-W-soft	94.2	262.4	356.5	79.6	0.989	1/182	1/181	1/181	S1	S8
Opt-G-BRB	28.5	28.8	57.4	256.2	0.346	1/614	1/1271	1/1263	S9	S9
Opt-G&M-BRB	27.0	29.2	56.2	193.6	0.357	1/590	1/991	1/967	S5	S9
Opt-G&M-W-BRB	42.4	34.4	76.8	59.4	0.803	1/340	1/365	1/425	S1	S5

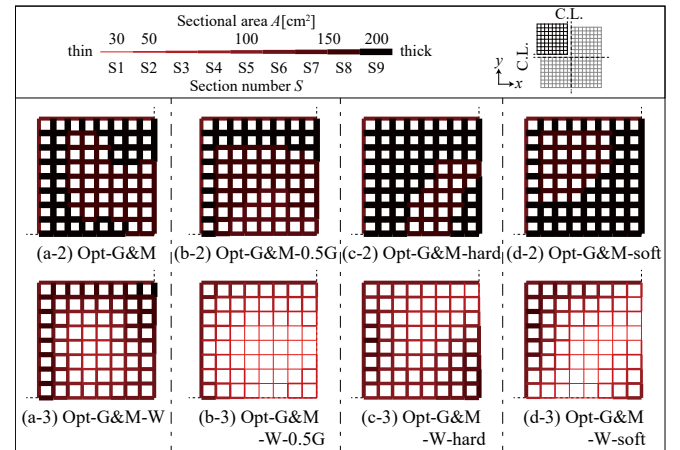


Fig. 15 Cross section distribution (Elastic brace CB model)

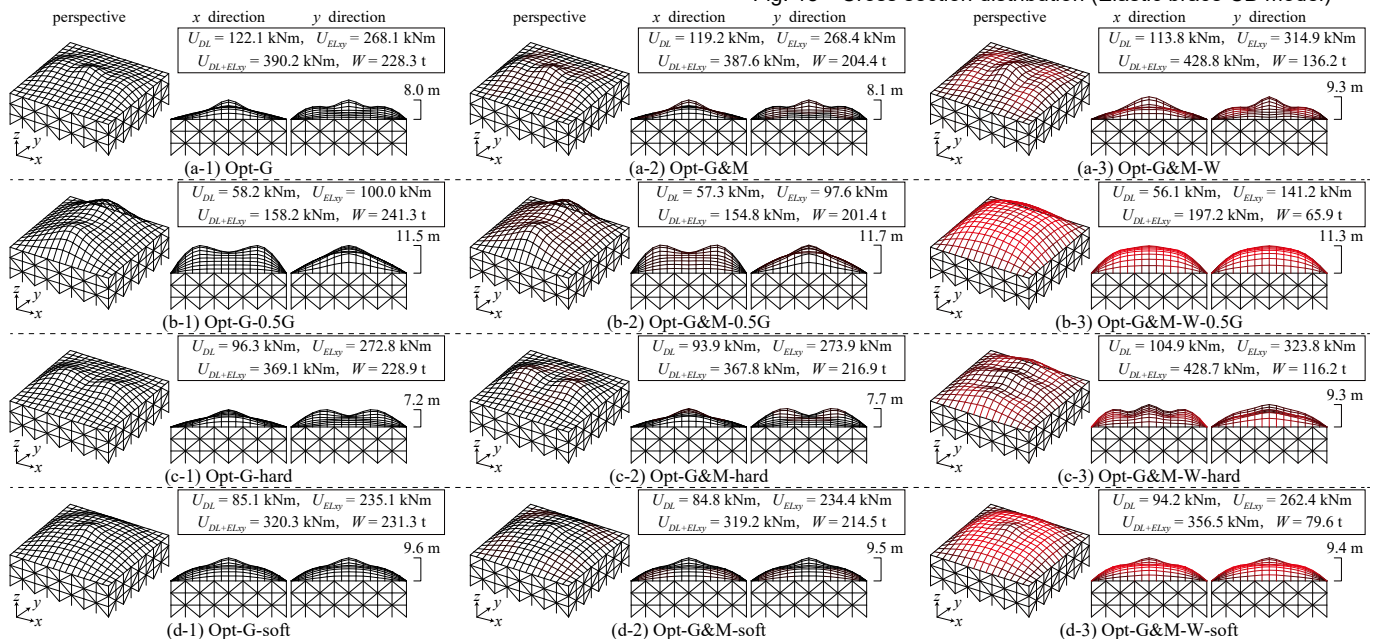


Fig. 14 Geometry of form-found models (Elastic brace CB model)

4.2 支持架構によるエネルギー吸収が無い標準的な最適設計案

次に支持架構によるエネルギー吸収が無い標準的な最適設計案(支持架構剛性は標準 *def* か地震荷重レベルは 1.0G)を分析する。Fig.14(a-1)~(a-3)に最適設計案の屋根形状を, Fig.15(a-2)(a-3)に同部材断面分布を, Fig.16 に同部材力分布を, Fig.17(a-2)(a-3)に同卓越振動モードを, Fig.18(i)に同地震応答を示す。Fig.14(a-1)~(a-3)に示すように, 屋根部の変形・応力制約を加えた結果, 標準的な最適設計案の屋根形状は3つの局部的隆起を有する扁平形状が得られた。また, 構造合理性の観点で屋根形状と断面分布は独立関係にあるため, Fig.14~Fig.18 の関係する箇所に示すように, 構造合理性の価値観のみに従って形状のみを最適化した Opt-G と形状と部材断面を最適化した Opt-G&M では, ほぼ同等の形状・断面分布の設計案が選択され, 屋根部の部材力や地震応答は殆ど等価な結果が得られた。一方, これに対して Opt-G&M-W では, 経済性の価値観が含まれるため部材断面(Fig.15(a-3))と鋼材重量(Table 6)は小さくなり, その代償として屋根部の部材力(Fig.16(a-3))や地震応答(Fig.18(i))や検定比(Table 6)は構造合理性の価値観のみに従って探索された Opt-G や Opt-G&M より増大し, 同じ3つの局部的隆起を有する扁平な屋根形状といえども固有振動特性(Fig.17(a-2)(a-3))は顕著に異なる設計案が得られた。この結果は最適設計案の形状や部材断面分布, 力学特性は, 設計変数だけでなく最適化の価値観の指標(経済性, 構造合理性)の選択にも強く影響を受けることを示唆する。なお, 本節で述べた傾向は検討パラメータに依らず同様であった。

一方, Fig.13 と Table 6 に示すように, その他と比較して Opt-G&M-W 系の最適解の鋼材重量は顕著に低減しており, 構造合理性と経済性を両立する最適化問題の定式化(総歪エネルギーに鋼材重量比 $w(R_d)$ を乗じて目的関数とする)の有効性が示唆される。なお, Fig.12 の Opt-G-M や Opt-G&M-W の解空間に示すように, 本検討の範囲では, 総歪エネルギー(構造合理性)と鋼材重量(経済性)の間に明快なトレードオフ関係が確認されないため多目的最適化は実施しない。

4.3 地震荷重レベルの影響

支持架構剛性は標準 *def* として地震荷重レベル(応答スペクトルピーク値で 1.0G→0.5G)が最適設計案の屋根形状に与える影響を分析する。Fig.14(b-1)~(b-3)に最適設計案の屋根形状を, Fig.15(b-2)(b-3)に

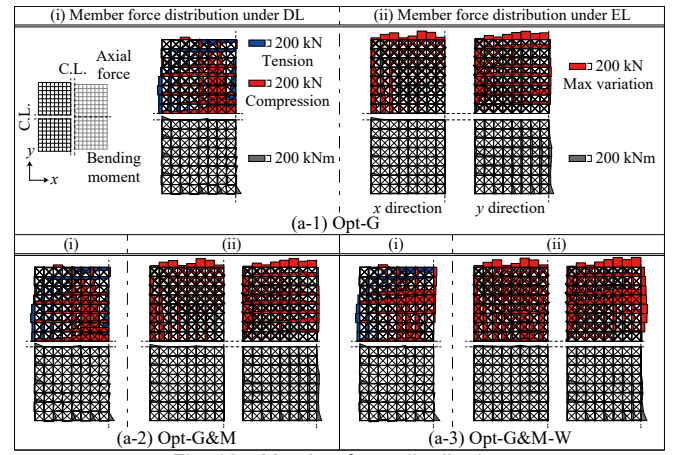


Fig. 16 Member force distribution

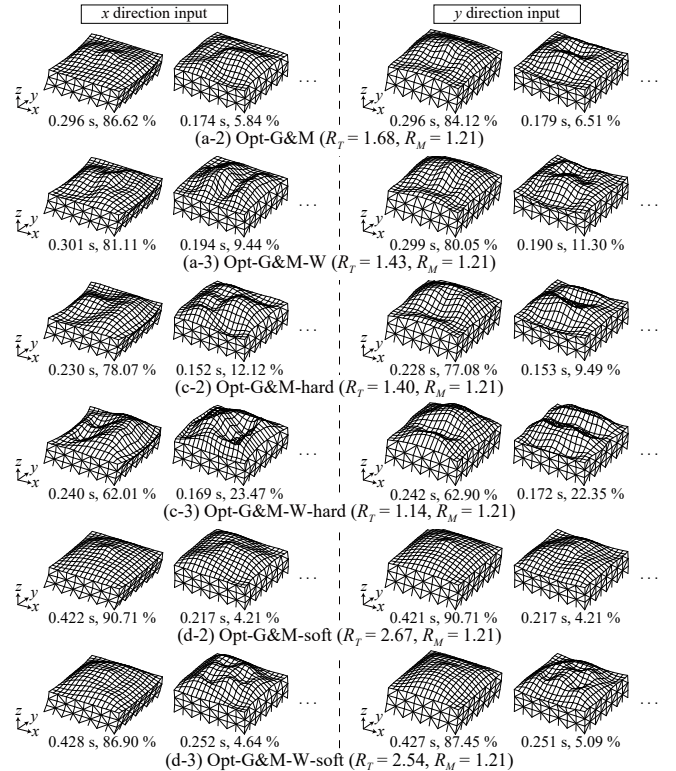


Fig. 17 Dominant vibration modes of form-found models (Elastic brace CB model (T, EMR))

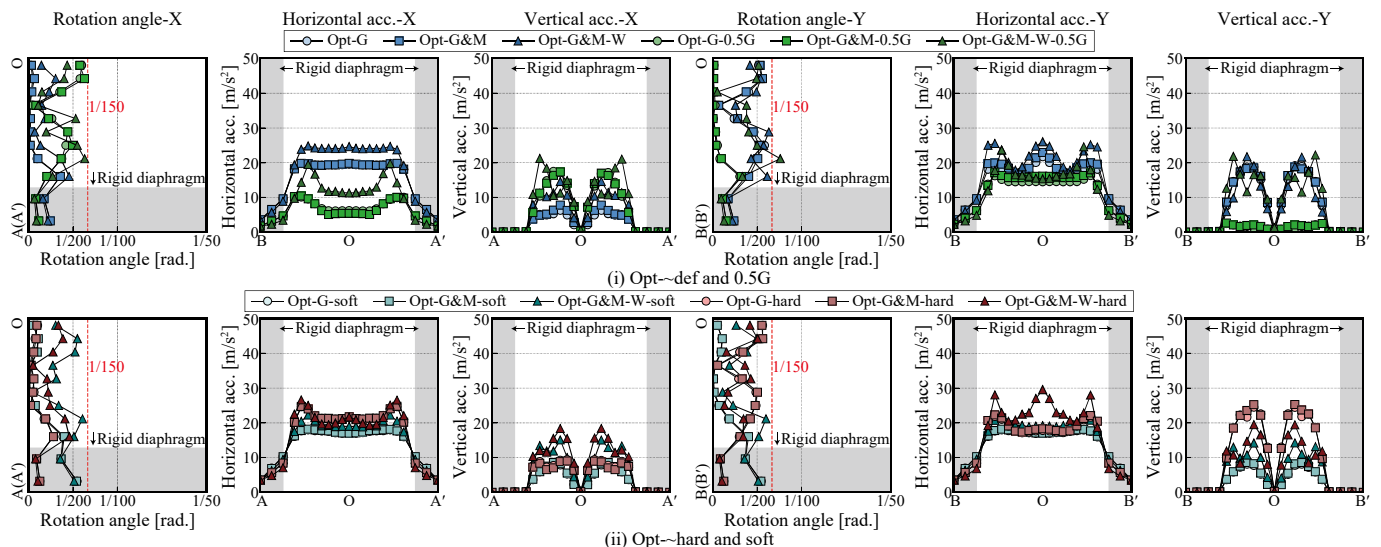


Fig. 18 Seismic response of form-found models (Elastic brace CB model)

同部材断面分布を、Fig.18(i)に地震応答を示す。ピーク 0.5G の地震荷重に対する探索結果は、日本より地震荷重レベルの低い地域の場合や、弾性ブレース付き支持架構のまま剛性が変動せず付加的な減衰機構により屋根部入力が半減された場合に対応する。

Fig.14 と Fig.15 と Table 6 の関係する箇所(1.0G と 0.5G)の比較に示すように、地震荷重に対する総歪エネルギー U_{ELxy} の負担が低減した結果として、最適設計案の屋根形状はいずれも地震荷重 1.0G の場合よりライズが高くなる傾向³³⁾にある一方、構造合理性の価値観のみに従う Opt-G-0.5G や Opt-G&M-0.5G では局部的隆起を有し地震応答に抵抗する扁平形状³³⁾が依然として選ばれるが、経済性の価値観を含む Opt-G&M-W-0.5G では屋根全体が単峰で隆起する固定荷重により効果的な形状³³⁾が選ばれた。この結果は構造合理性と経済性を考慮する構造形態創生では、地震荷重レベルによっては地震応答に不利だが経済的(部材断面を小さくできる)な設計案が選ばれる場合があることを示す。

4.4 支持架構剛性の影響

支持架構剛性が最適設計案の屋根形状に与える影響を分析する。

Fig.14(c-1)~(c-3)(d-1)~(d-3)に最適設計案の屋根形状を、Fig.15(c-2)(c-3)に同部材断面分布を、Fig.17(c-2)(c-3)(d-2)(d-3)に同卓越振動モードを、Fig.18(ii)に地震応答を示す。

Fig.14 と Fig.15, Fig.17 の関係する図版に示すように、支持架構剛性が高い場合(*hard*)では、屋根部に対する支持架構の周期比 R_T が 1.0 に近接して屋根部応答が励起されやすくなるため、最適設計案の屋根形状は複数の局部的隆起を有する地震応答に効果的な形状が選ばれる。反対に支持架構剛性が低い場合(*soft*)では、支持架構のスウェイモードが卓越し屋根部応答が励起されにくくなるため、最適設計案の屋根形状は屋根全体が単峰で隆起する固定荷重に効果的な形状が選ばれる。この傾向は広範な多目的最適化のパレート解を分析した前報³³⁾の知見と同様である。したがって、この結果は構造形態創生に適用する最適化の価値観の指標が支持架構剛性変動時の最適設計案の屋根形状に与える影響は軽微であることを示す。ただし、屋根形状に対する影響は軽微である一方、Table 6 に示すように、経済性の価値観を含む Opt-G&M-W 系の鋼材量は、屋根部応答が励起されにくい支持架構剛性が低い方がより抑えられる傾向にある。

4.5 支持架構による地震エネルギー吸収の影響

支持架構による地震エネルギー吸収が最適設計案の屋根形状に与える影響を分析する。Fig.19 に最適設計案の屋根形状と部材断面分布を、Fig.20 に最大変位応答時の等価複素剛性行列と初期質量行列より評価した卓越振動モードを、Fig.21 に地震応答を示す。

Fig.19~Fig.21 と Table 6 に示すように、支持架構による地震エネルギー吸収が有る場合では、支持架構(本検討では BRB)の塑性化に伴う長周期化と付加減衰効果により、地震荷重レベルのみが変動した場合(4.3 節)より屋根部応答が劇的に低減されるため地震荷重に対する総歪エネルギー U_{ELxy} は地震エネルギー吸収が無い場合と比べて顕著に低下し、結果として構造形態創生に適用する最適化の価値観の指標(構造合理性、経済性)が支持架構の塑性化時の最適設計案の屋根形状に与える影響は軽微であり、どの最適化問題でも屋根全体が単峰で隆起する固定荷重に効果的な形状が選ばれた。その一方で、Fig.19 と Table 6 に示すように、支持架構による地震エネルギー吸収がある場合の Opt-G&M-W-BRB の鋼材量は 4 章の最適化問題の

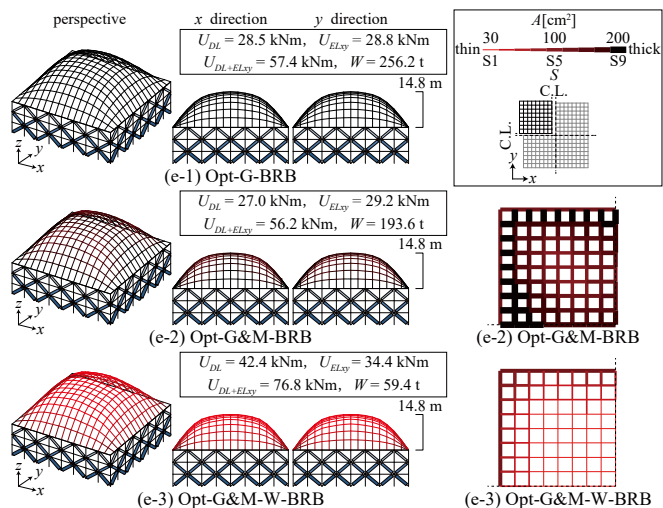


Fig. 19 Geometry of form-found models (BRB model)

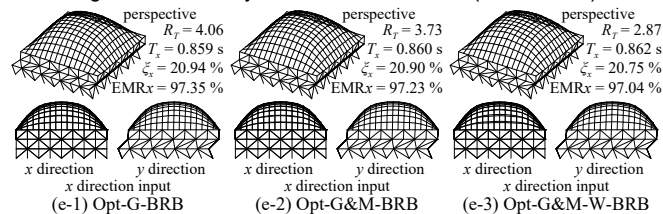


Fig. 20 Fundamental vibration modal shape (BRB models)

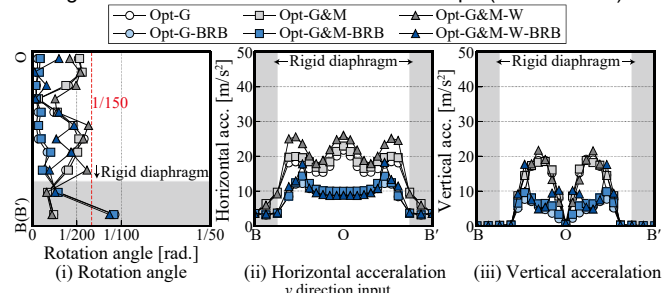


Fig. 21 Comparison of seismic response

中でも最も小さく抑えられており、屋根の形状と断面を同時に操作する場合においても、支持架構への制振部材(BRB)の導入は屋根部設計の経済性の観点で有益であることが改めて確認された。

5. 最適解の座屈荷重係数

最後に座屈解析を用いて最適化前の初期案と最適設計案の線形座屈モードと座屈荷重係数を分析する。また、実務設計では、弾性・弾塑性座屈解析を実行することは未だ容易でないため、最適屋根形状の力学特性評価の代用として、ラシスシェル屋根構造設計指針³⁸⁾が提案する弾塑性座屈荷重係数の簡易評価法の適用性も検証する。

5.1 座屈解析の対象とする最適屋根形状と荷重分布

本章では、3 章の初期案と経済性の価値観を考慮する最適設計案(M-W)ならびに 4 章の全ての最適設計案を対象とする。各種の座屈解析は最適設計案から屋根部を抽出した屋根モデルに対して実行する。Fig.22 に想定する荷重分布を示す。座屈荷重を検証する荷重分布は、探索時の固定荷重と同様の等分布荷重(Pattern U, Fig.22(a)), 固定荷重 ω (1.2kN/m²)を 2 倍にして X または Y 方向どちらかの片側に集中させた偏載荷重(Pattern X, Y, Fig.22(b)(c))とする。

5.2 座屈解析の概要と座屈荷重の定義

屋根モデルでは、直交材は一次元有限要素(軸方向分割数 2, 周方

向分割数 16, 板厚方向分割数 1, 復元力特性は冷間成形時の加工硬化を考慮して降伏応力度 295N/mm², 二次剛性比 1%の Bilinear 型とする)でモデル化し, 中間節点を設けて個材座屈を表現する。斜材と外周材も同様に一次元有限要素でモデル化するが復元力特性は弾性とする。屋根外周部はピン支持とする。また, 弾性・弾塑性座屈解析では, 最大振幅を屋根スパンの 0.1%(本検討では 48 mm)に調整した 1 次の線形座屈モード形状の初期不整³⁸⁾を節点座標に与える。特に等分布荷重時の弾性座屈解析では, 弾性座屈荷重低減係数(線形座屈荷重係数 λ_{cr}^{lin} に対する弾性座屈荷重係数 λ_{cr}^{el} の低減率)の初期不整感度を調査するため, 0.1%以上の初期不整量も検討する。

線形座屈荷重係数 λ_{cr}^{lin} は線形座屈解析の固有値とする。弾性座屈荷重係数 λ_{cr}^{el} は弾性座屈解析時の接線剛性行列の固有値が 1.0 となった時点の荷重係数とする。弾塑性座屈荷重係数 λ_{cr}^{elpl} は弾塑性座屈解析時の接線剛性行列の固有値が 1.0 となった時点, または計算が収束しない場合はその時点の荷重係数とする。ここで荷重係数は各荷重分布(Fig.22)に対する屋根の座屈安全率を意味する。

5.3 線形座屈モード

Fig.23 に代表的な最適解の 1 次の線形座屈モードを示す。同図(i)(ii)(iii)は線形座屈モードの山谷のパターン(+が山, -が谷)を表す。ここでは複数の局部的隆起を有する屋根形状の例として 4.2 節の Opt-G (Fig.23 (a)), 4.2 節の Opt-G&M-W (Fig.23(b)), 3.2 節の Double-M-W (Fig.23(c)), 3.2 節の Multi-M-W (Fig.23(d))を, 屋根全体が単峰で隆起する屋根形状の例として 4.4 節の Opt-G-soft (Fig.23(e)), 4.4 節の Opt-G&M-W-soft (Fig.23(f)), 3.2 節の DL (Fig.23(g)), 3.3 節の DL-M-W-BRB (Fig.23(h))を示す。特に Opt-G&M-W (Fig.23(b)), Opt-G&M-W-soft (Fig.23(f))は DL-M-W-BRB (Fig.23(h))は, 屋根の部材断面の耐震最適化により鋼材重量が大きく低減された最適設計案である。

Fig.23 に示すように, 屋根の形状と断面を耐震最適化する場合では, 正方形平面を有する単層グリッドシェルの最適設計案の線形座屈モードは, 前報³³⁾で明らかにした屋根形状のみを対象とする場合の 3 パターン(平面を循環する逆対称 1 波モード系のパターン A, 平面に対して一方方向の対称 1.5 波モード系のパターン B, 平面中央をピークとして全方向に広がる対称 1.5 波モード系のパターン C)に加えて, 鋼材重量が大きく低減された場合に局所的に変形が集中する線形座屈モード (Fig.23(b)(f)(h))に大別される。最適設計案ごとに分類すると, 複数の局部的隆起を有する場合 (Fig.23(a)(b)(c)(d))やライズ約 10m 以下で屋根全体が単峰で隆起する場合 (Fig.23(e) (f))にはパターン A または B の線形座屈モードが卓越し, ライズ約 10m 以上で屋根全体が単峰で隆起する場合 (Fig.23(g)(h))にはパターン C の線形座屈モードが卓越し, 鋼材重量が大幅に低減されている場合 (Fig.23(b)(f)(h))には局所的に変形が集中する線形座屈モードが卓越する傾向にある。

5.4 座屈荷重係数(各荷重分布に対する屋根の座屈安全率)

Table 7 に各荷重分布における座屈荷重係数のまとめを, Fig.24 に初期不整量に対する弾性座屈荷重低減係数 α_0 を示す。線形座屈荷重係数は等分布荷重時より偏載荷重時の方が小さくなる傾向にあり, この結果は部分球形など従来型の屋根形状に対する座屈荷重の知見³⁸⁾が, 構造最適化した自由形状のグリッドシェル屋根にも有効であることを示す。

Fig.23 と Table 7 に示すように, 経済性の価値観に従って鋼材重量

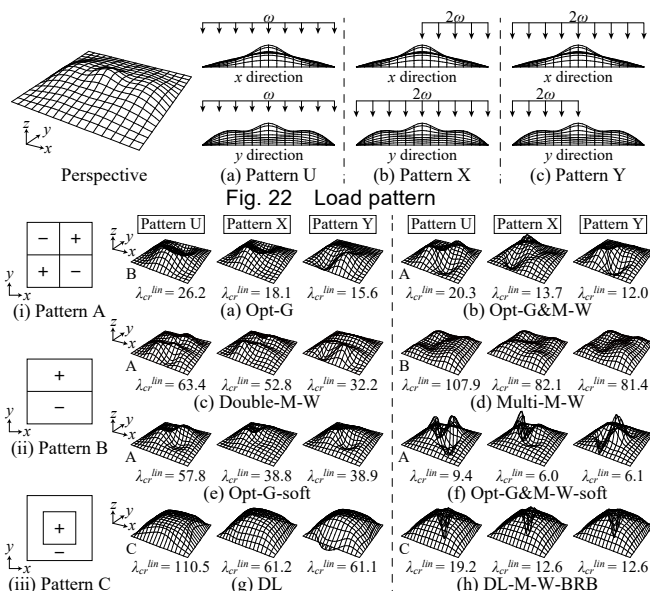


Fig. 22 Load pattern

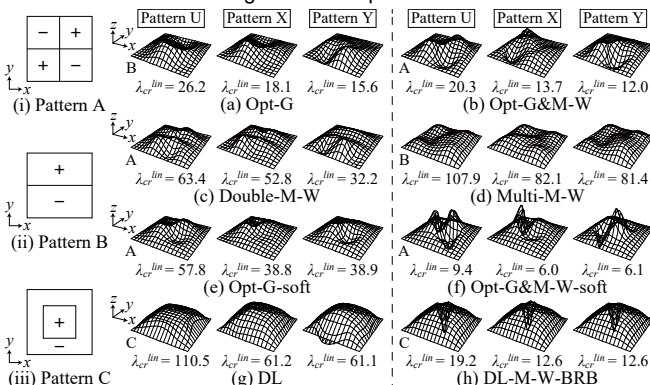


Fig. 23 Fundamental linear buckling mode and buckling pattern

Table 7 Linear, elastic and elasto-plastic buckling load factor

Model	Pattern U			Pattern X			Pattern Y		
	λ_{cr}^{lin}	λ_{cr}^{el}	λ_{cr}^{elpl}	λ_{cr}^{lin}	λ_{cr}^{el}	λ_{cr}^{elpl}	λ_{cr}^{lin}	λ_{cr}^{el}	λ_{cr}^{elpl}
DL	110.5	115.6	36.7	61.2	48.2	17.8	61.1	48.2	17.8
DL-M-W	66.6	44.6	14.1	46.2	35.0	9.2	44.8	31.5	8.8
DL-M-W-BRB	19.2	8.2	4.5	12.6	5.6	2.6	12.6	5.1	2.5
Single	47.5	28.7	21.9	32.3	19.6	13.8	32.3	19.6	13.8
Single-M-W	46.6	33.8	16.6	33.5	18.5	10.1	33.4	18.2	10.1
Single-M-W-BRB	11.9	6.1	5.0	8.0	4.8	3.3	6.3	5.8	2.5
Double	69.9	67.0	24.4	56.8	33.9	10.5	38.1	38.9	12.9
Double-M-W	63.4	54.0	17.4	52.8	40.8	8.7	32.2	26.9	7.8
Double-M-W-BRB	60.7	74.2	14.8	45.1	51.2	9.8	30.1	36.9	7.4
Multi	57.6	38.7	17.2	44.6	35.0	12.5	44.6	35.2	12.5
Multi-M-W	107.9	60.9	27.0	82.1	44.1	19.0	81.4	44.2	18.2
Multi-M-W-BRB	156.7	161.0	39.3	108.5	145.7	25.5	103.4	141.9	25.5
Opt-G	26.2	21.8	11.8	18.1	17.7	7.6	15.6	14.5	5.8
Opt-G&M	23.5	19.3	10.6	16.2	15.0	6.9	14.9	9.9	5.2
Opt-G&M-W	20.3	14.7	9.0	13.7	9.1	5.4	12.0	6.0	4.0
Opt-G-0.5G	28.1	33.9	14.4	17.4	32.9	12.7	23.9	23.2	10.7
Opt-G&M-0.5G	31.1	17.6	14.9	18.0	25.3	5.8	25.5	33.5	10.9
Opt-G&M-W-0.5G	16.3	8.8	5.4	9.8	4.5	2.7	9.1	3.7	2.7
Opt-G-hard	22.7	15.2	12.3	19.1	19.6	8.1	15.5	12.9	6.9
Opt-G&M-hard	21.2	22.5	11.1	18.1	19.4	8.0	14.6	13.6	7.1
Opt-G&M-W-hard	31.6	29.2	10.8	22.2	17.4	6.3	17.8	13.1	6.1
Opt-G-soft	57.8	54.6	29.3	38.8	30.8	15.6	38.9	30.7	15.6
Opt-G&M-soft	56.1	52.3	27.3	37.5	28.8	14.5	37.5	28.8	14.5
Opt-G&M-W-soft	9.4	7.8	4.8	6.0	3.9	2.3	6.1	3.4	2.5
Opt-G-BRB	151.9	85.5	45.0	87.5	47.1	23.6	87.0	46.9	23.3
Opt-G&M-BRB	115.3	62.1	35.3	67.6	37.2	21.6	63.0	30.3	17.8
Opt-G&M-W-BRB	29.6	11.9	9.1	15.4	6.0	4.3	15.2	6.3	4.4

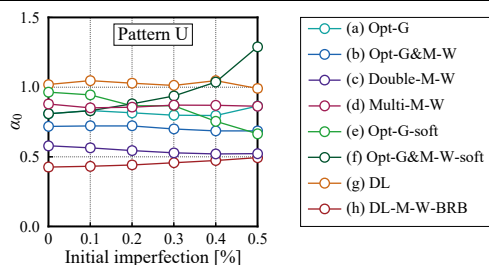


Fig. 24 Elastic-to-linear buckling load reduction factor α_0

(=屋根面外剛性)が低減された最適設計案(特に DL-M-W-BRB, Opt-G&M-W-soft, Opt-G&M-W-BRB)では, 局所的に変形が集中する線形座屈モードが卓越し, 各種の座屈荷重係数がその他と比較して大幅に低下する傾向にあるが, この様な場合を含めても提案手法を用いて探索した自由形状の正方形平面単層グリッドシェルの弾塑性座屈荷重係数(座屈荷重安全率)は, 等分布荷重時で最低 4.5 以上, 偏載荷重時で最低 2.3 以上確保できることが確認された。

Fig.24 に示すように, 殆どの場合で弾性座屈荷重低減係数 α_0 はス

パンの 0.5%の初期不整量までラチスシェル屋根構造設計指針の推奨下限値0.5³⁸⁾を上回る一方、Opt-G&M-W-BRBのみ同推奨下限値0.5を下回った。この結果は屋根部応答に有利な支持架構と荷重レベルの条件下で、特に座屈荷重上の制約を設けずに経済性を考慮して最適設計案を探索する場合では、弾塑性座屈荷重の簡易評価においては、 α_0 に例えば0.45など推奨下限値未満の値を用いるなど慎重な対応を行うべきであることを示唆していると考えられる。

5.5 弾塑性座屈荷重係数の簡易評価法の適用性

ラチスシェル屋根構造設計指針³⁸⁾が提案する弾塑性座屈荷重係数の簡易評価法の適用性を検証する。同指針では、弾性座屈荷重 P_{cr}^{el} と幾何学的線形・材料非線形の静的増分解析の降伏荷重 P^{pl} から屋根架構の座屈に関する正規化細長比 Λ_s を計算し、長柱の曲げ座屈荷重と同様な手続きで弾塑性座屈荷重 P_{cr}^{elpl} を求める簡易評価法が提案されている。また、そのカラムカーブには修正ダンカレー式(8)や鋼構造許容応力度設計規準⁴⁵⁾に準ずる式(9)が提案されている。

$$P_{cr}^{elpl} = \frac{2P^{pl}}{\sqrt{k_{SB}^2 \Lambda_s^4 + 4 + k_{SB} \Lambda_s^2}} \quad \because \Lambda_s = \sqrt{\frac{P^{pl}}{P_{cr}^{el}}} \quad (8)$$

$$\frac{P_{cr}^{elpl}}{P^{pl}} = \begin{cases} \frac{1 - 0.24\Lambda_s^2}{1 + \frac{4}{15}\Lambda_s^2} & \text{for } \Lambda_s \leq \frac{1}{\sqrt{0.6}} \\ \frac{9}{13\Lambda_s^2} & \text{for } \Lambda_s \geq \frac{1}{\sqrt{0.6}} \end{cases} \quad (9)$$

ここに k_{SB} は弾性座屈の部分安全率(=13/9)である。座屈荷重と降伏荷重は面積あたりの値とし、固定荷重で除した荷重係数とする。

Fig.25 に等分布荷重時の座屈荷重の解析結果(丸マーカー)と評価式の比較を示す。解析結果の座屈荷重は、ラチスシェル屋根構造設計³⁸⁾より弾塑性座屈荷重を式(10)の安全率 $F_B(\Lambda_s)$ で除した値で計算し、正規化細長比 Λ_s の評価には $\alpha_0=0.5$ (推奨下限値)を適用した。

$$F_B(\Lambda_s) = \begin{cases} 1 + \frac{4}{15}\Lambda_s^2 & \text{for } \Lambda_s \leq \frac{1}{\sqrt{0.6}} \\ \frac{13}{9} & \text{for } \Lambda_s \geq \frac{1}{\sqrt{0.6}} \end{cases} \quad (10)$$

5.4 節で述べたように、経済性の価値観を考慮した場合では、 α_0 が推奨下限値を下回る場合(Opt-G&M-W-BRB)があるもの、本検討の範囲では、ラチスシェル屋根構造設計指針³⁸⁾が提案する弾塑性座屈荷重の評価式は解析結果を安全側で評価し、同簡易評価法は形状または部材断面を耐震最適化した正方形平面の単層グリッドシェル屋根に適用可能であることが確認された。

6. 結

本研究の範囲で得られた結論は以下の通りである。

- 1) グリッドシェル屋根の形状は主に構造合理性の改善に影響する一方、部材断面は構造合理性と経済性の改善に影響する。部材断面の増大は構造合理性の改善(総歪エネルギーの低減)に、断面の減少は経済性の改善(鋼材重量を低減)に寄与する。
- 2) 構造合理性の価値観に特化した構造形態創生では、屋根形状の操作の有無に依らず、部材断面は屋根面外剛性が最大化されるように選択可能な範囲で最大の断面が割当てられる傾向にあり、仮定の初期案から部材断面を低減することで構造合理性を改善することは難しい。一方、経済性の価値観も考慮する構造形態創生では、

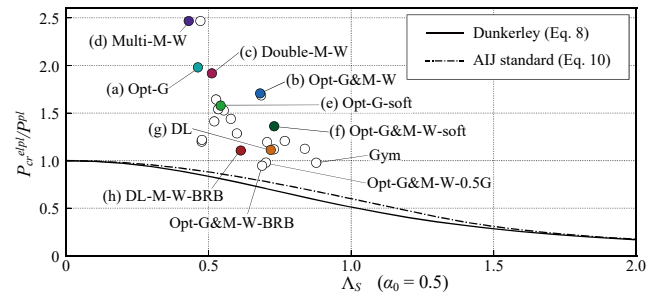


Fig.25 Estimation of elasto-plastic buckling load

初期案の屋根部応答が大きな位置には構造合理性を改善するよう大きな部材断面が配置され、反対に屋根部応答が小さい位置には経済性が改善するように小さな部材断面が配置され、結果的に屋根形状に依らず鋼材重量を抑えつつ屋根部応答を設計クライテリア範囲に納めるより現実的な設計案が選択される。

- 3) 意匠設計者から恣意的な屋根形状を要求された状況では、(1)構造合理性と経済性の両方の価値観を考慮した屋根部材断面の最適化を実施する、(2)制振部材など支持架構のエネルギー吸収によって初期案のまま屋根部応答を設計クライテリアに抑える、(3)(1)と(2)の併用、の設計アプローチが現実的かつ有効である。
- 4) 構造合理性の価値観に特化した構造形態創生では、屋根の形状のみまたは形状+部材断面分布どちらを操作しても同様の最適設計案が得られ、構造合理性の観点では、最適な屋根形状と部材断面分布は独立関係にある。ただし、構造合理性と経済性を考慮する構造形態創生では、地震荷重レベルによっては地震応答に不利だが経済的(部材断面が小さな)設計案が選ばれる場合がある。また、構造形態創生に適用する最適化の価値観の指標が、支持架構剛性変動時や支持架構によるエネルギー吸収が有る場合の最適設計案の屋根形状に与える影響は軽微である。ただし、屋根部応答が励起されにくい支持架構剛性の場合や支持架構の塑性化に伴う長周期化と付加減衰効果がある場合では、経済性の価値観を考慮した構造形態創生の鋼材重量は効果的に低減できる傾向にある。
- 5) 提案手法を用いて探索した自由形状の正方形平面単層グリッドシェルの弾塑性座屈荷重の安全率は等分布荷重時で最低 4.5 以上、偏載荷重時で最低 2.3 以上確保できる。一方、経済性の価値観に従って鋼材重量を大幅に低減したグリッドシェル屋根では、局所的に変形が集中する線形座屈モードが卓越し、各種の座屈荷重係数はその他と比較して大幅に低下し、弾性座屈荷重低減係数 α_0 はラチスシェル屋根構造設計指針の推奨下限値 0.5 を下回る場合がある。ただし、その場合を含んでも、 $\alpha_0=0.5$ を適用した弾塑性座屈荷重の評価値は解析結果を安全側評価し、同簡易評価法は形状または部材断面を耐震最適化した正方形平面の単層グリッドシェル屋根に適用可能である。

なお、本検討では、経済性の価値観の考慮/非考慮による最適解を分かりやすく比較するため、構造合理性の価値観を重視する部材断面最適化問題(M, G-M)では体積制約を設けず、結果として断面を上限まで大きくする解が得られた。体積制約を設けた場合では、より合理的な設計解が得られると予想される一方、最適化の価値観を構造合理性に固定した検討や屋根形状に応じて屋根重量を変化させる検討が別途必要と考えられ今後の課題とする。

謝辞

本研究は JSPS 基盤研究(A)(No.21H04581)の助成を戴きました。

参考文献

- 1) Ohmori, H.: Computational morphogenesis: Its current state and possibility for the future, Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures, 2008.
- 2) Adriaenssens, S., Block, P., Veenendaal, D. and Williams C.: Shell Structures for Architecture Form Finding and Optimization, Routledge, Oxon and New York, 2014.
- 3) Isler, H.: Generating Shells Shapes by Physical Experiments, Bulletin of the IASS, Vol.34, pp.53-63, 1993.
- 4) Otto, F.: NATURLICHE KONSTUKTIONEN, Deutsche Verlags-Anstalt GmbH, 1982.
- 5) Ohmori, H. and Yamamoto, K.: Shape optimization of space structures for specified stress distribution: Part 1 Application for shell structures, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.62, No.496, pp.67-73, 1997.7 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.62.67_2
- 6) Ohmori, H. and Yamamoto, K.: Shape optimization of space structures for specified stress distribution: Part 2 Application for space frame structures, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.63, No.503, pp.77-83, 1998.2 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.63.77_1
- 7) Ohsaki, M., Nkamura, T. and Kohiyama, M.: Shape optimization of a double-layer space truss described by a parametric surface, Int. J. Space Structures, Vol.12(2), pp.109-119, 1997. DOI:10.1177/026635119701200205
- 8) Hamada, H. and Ohmori, H.: Computational morphogenesis of free surface shells considering both designer's preference and structural rationality: Part 1 Heuristic approach by multi-objective genetic algorithm, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.71, No.609, pp.105-111, 2006.12 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.71.105_1
- 9) Hamada, H. and Ohmori, H.: Computational morphogenesis of free surface shells considering both designer's preference and structural rationality: Part 2 Theoretical approach by optimality condition, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.72, No.618, pp.143-150, 2007.5 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.72.143
- 10) Sasaki, M.: FLUX STRUCTURE, TOTO publishing, 2005.
- 11) Kimura, T. and Ohmori, H.: Simultaneous optimization with respect to both shape and thickness and its application, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.74, No.640, pp.1091-1098, 2009.7 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.74.1091
- 12) Kimura, T. and Ohmori, H.: Structural topology finding problem by simultaneous optimization with respect to shape and thickness, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.75, No.648, pp.367-376, 2010.3 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.75.367
- 13) Fujita, S. and Ohsaki, M.: Shape optimization of shells considering strain energy and algebraic invariants of parametric surface, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.74, No.639, pp.857-863, 2009.6 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.74.857
- 14) Fujita, S. and Ohsaki, M.: Shape optimization of latticed shell defined by parametric surface for uniform member length and maximum stiffness, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.78, No.685, pp.495-502, 2013.4 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.78.495
- 15) Yamamoto, K., Minagawa, Y. and Ohmori, H.: Shape optimization of space structures for buckling load, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.68, No.564, pp.95-102, 2003.2 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.68.95_1
- 16) Yamamoto, K., Minagawa, Y. and Ohmori, H.: Shape optimization of single layer truss domes for linear buckling load using block-diagonalization, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.69, No.578, pp.51-58, 2004.5 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.69.51_1
- 17) Ogawa, T., Ohsaki, M. and Tateishi, R.: Shape optimization of single-layer latticed shells for maximum linear buckling loads and uniform member lengths, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.68, No.570, pp.129-136, 2003.8 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.68.129_2
- 18) Kimura, T. and Ohmori, H.: Shape optimization for linear buckling load, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.78, No.686, pp.733-741, 2013.5 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.78.733
- 19) Michiels, T., Adriaenssens, S. and Dejong, M.: Form finding of corrugated shell structures for seismic design and validation using non-linear pushover analysis, Engineering Structures, Vol.181, pp.362-373, 2019.2, DOI:10.1016/j.engstruct.2018.12.043
- 20) Hayashi, Y., Takeuchi, T. and Ogawa, T.: Shape optimization of single-layer lattice shell roofs focusing on buckling strength under seismic load, Journal of structural engineering B, Vol.59B, pp.479-488, 2013.3 (in Japanese)
- 21) Shigeta, Y., Kobayashi, A., Minowa, K., Ogawa, T. and Kato, S.: Optimization of shape and member stiffness distributions for single-layer reticulated shells of rectangular plan, Journal of IASS, Vol.57, No.4, pp.173-186, 2015.12.
- 22) Terazawa, Y., Niimi, A., Nair, D. and Takeuchi, T.: Generalized response spectrum analysis based computational morphogenesis for metal gridshells with buckling-restrained braces subjected to seismic loading, Computers and Structures, Vol.275, 106914, 2023, DOI:10.1016/j.compstruc.2022.106914
- 23) Terazawa, Y. and Takeuchi, T.: Generalized Response Spectrum Analysis for Structures with Dampers, Earthquake Spectra, EERI, 2018.5., DOI:10.1193/092217EQS188M
- 24) Terazawa, Y. and Takeuchi, T.: Optimal damper design strategy for braced structures based on generalized response spectrum analysis., Jpn Archit Rev., 2019:00:1-17., DOI:10.1002/2475-8876.12122
- 25) Terazawa, Y., Sano, W. and Takeuchi, T.: Design method of seismically isolated structures based on generalized response spectrum analysis, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.85, No.775, pp.1187-1197, 2020.9 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.85.1187
- 26) Terazawa, Y., Fujishima, M. and Takeuchi, T.: Optimal mixed placement and capacity distribution of buckling-restrained braces and conventional braces on a large metal spatial structure without rigid diaphragm assumption, Frontiers in Built Environment, Vol.8, 2022.7. DOI:10.3389/fbuilt.2022.954117
- 27) Ishibashi, Y., Terazawa, Y., Tanaka, H., Yokoyama, R., Mizuno, H. and Takeuchi, T.: A novel damped braced tube system for tall buildings in high seismic zones, The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2022, e1926, DOI:10.1002/tal.1926
- 28) Terazawa, Y., Tanaka, H. and Takeuchi, T.: Optimal seismic response control of damped braced tube system with focus on cost performance of introducing energy-dissipation devices, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.87, No.801, pp.1082-1092, 2022.11 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.87.1082
- 29) Terazawa, Y., Ishibashi, Y., Tanaka, H., Yokoyama, R., Mizuno, H. and Takeuchi, T.: Numerical investigation of dynamic response characteristic of damped braced tube system with different damped slit configuration, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.87, No.802, pp.1247-1256, 2022.12 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.87.1247
- 30) Terazawa, Y., Asai, T., Ishibashi, Y. and Takeuchi, T.: Effect of design parameters on dynamic response characteristic of single damped outrigger system incorporating linear viscous dampers, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.85, No.774, pp.1067-1077, 2020.8 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.85.1067
- 31) Asai, T., Terazawa, Y., Miyazaki, T., Lin, P.C. and Takeuchi, T.: First mode damping ratio oriented optimal design procedure for damped outrigger systems with additional linear viscous dampers, Engineering Structures, Vol.247, 2021.11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113229>
- 32) Terazawa, Y., Ishibashi, S., Omura, H., Asai, T. and Takeuchi, T.: Non-linear dynamic response characteristic of single-damped outrigger systems with oil dampers or elasto-plastic dampers considering design earthquake levels, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.87, No.791, pp.149-165, 2022.1 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.87.149
- 33) Terazawa, Y., Kaneko, R., Niimi, A. and Takeuchi, T.: Form-finding of metal gridshells focusing on the tradeoff relationship between strain energy for dead load and seismic load, Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), Vol.89, No.823, pp.967-978, 2024.9 (in Japanese) DOI:10.3130/aijs.89.967
- 34) Manual for structural engineering of building standard law, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2015. (in Japanese) 2015 年版構造関係技術基準同解説書, 国土交通省, 2015.

- 35) Notification No. 1457 of the Ministry of Construction, 2000.5 (in Japanese)
建設省告示第 1457 号, 2000.5
- 36) Sinha, R. and Igusa, T.: CQC and SRSS methods for non-classically damped structures, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 24, pp. 615-619, 1995. DOI:10.1002/eqe.4290240410
- 37) The Japan Society of Seismic Isolation: Manual for Design and Construction of Passively-Controlled Buildings 3rd Edition, Daioh Co., Ltd, 2013 (in Japanese)
日本免震構造協会: パッシブ制振構造設計施工マニュアル第 3 版, 2013
- 38) AIJ: AIJ Recommendation for Design of Latticed Shell Roof Structures, 2016.11 (in Japanese)
日本建築学会: ラチスシェル屋根構造設計指針, 2016.11
- 39) Akimoto, Y., Nagata, Y., Sakuma, J. Ono, I. and Kobayashi, S. : Proposal and Evaluation of Adaptive Real-coded Crossover AREX, *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, Vol.24, No.6, 2009.11
DOI: 10.1527/tjsai.24.446
- 40) Kobayashi, S. : The Frontiers of Real-coded Genetic Algorithms, *Journal of Japanese Society for Artificial Intelligence*, Vol.24, No.1, pp.147-162, 2009.1
DOI: 10.1527/tjsai.24.147
- 41) Shinkenchiku 2011:1 (in Japanese)
新建築 2011 年 1 月号, 2011.1
- 42) Tekkogyjutsu 2013:8, Vol.26, No.303 (in Japanese)
鉄構技術 2013 年 8 月号, Vol.26, No.303
- 43) <https://www.zaha-hadid.com/>
- 44) Shinkenchiku 2018:7 (in Japanese)
新建築 2018 年 7 月号, 2018.7
- 45) AIJ: AIJ Standard for Allowable Stress Design of Steel Structures, 2019.
日本建築学会: 鋼構造許容応力度設計規準, 2019.

(2025 年 1 月 8 日原稿受理, 2025 年 5 月 23 日採用決定)