

鋼構造シリーズ 2

# 座屈設計ガイドライン

土木学会



B 1 1 0 6 6 4 1 B  
土 木 図 書 館

# 座屈設計ガイドライン

登 録	昭和62年12月10日
番 号	第 34313 号
社団 法人	土 木 学 会
附 属	土 木 図 書 館

土木学会

Steel Structures Series 2

---

# Guidelines for Stability Design of Steel Structures

---

*Edited by*

**Yuhshi FUKUMOTO**

*Professor of Civil Engineering  
Osaka University*

*Published by*

Subcommittee on Stability Design  
Committee on Steel Structures  
Japan Society of Civil Engineers  
Yotsuya 1-chome, Shinjuku-ku,  
Tokyo, 160 Japan

October, 1987

# まえがき

座屈荷重に対して構造物を安全なように設計することを目的とする座屈設計は、材料の高性能化、作用応力の増大、薄肉断面の採用といった最近の構造物のとり傾向に対して、ますますその重要性が認識され、また、より複雑な構造システムの発展への新たな対応がせまられている。この座屈設計への背景を支える座屈理論は一般に単純化され、理想化された構造物、支持条件、荷重条件のもとに導かれる座屈解析が基本となっているが、これらの解析結果を構造設計にそのまま適用するには様々な問題があり、実用のための仮定、前提条件、設計基本式、適用範囲へのより実的な吟味や座屈実験による検証などが必要とされる。

土木学会鋼構造委員会においては、昭和57年12月に鋼構造物の座屈に対する安全設計のためのガイドラインの作成を目的とする「座屈設計のガイドライン」作成小委員会が設置された。それ以来、同委員会はガイドラインとして取り上げるべき内容について審議を重ね、全委員が執筆あるいは編集の任にあたりながら、その内容については、構造設計技術者、構造専攻学生、構造設計示方書関係者が座屈現象を正しく理解できるように努め、また、鋼構造部材、板要素およびプレートガーダー、トラス、ラーメン、アーチなどの構造システムの座屈強度、耐荷力に関する最近の研究成果を理解するのに便利なようにまとめ、さらに、鋼構造一般の関連する設計示方書、設計基準に含まれる座屈に関連した各種規定の根拠を明らかにするとともに、設計基本式の適用を誤まることなく、座屈に対して正しく安全照査が行えるように心がけた。また、各章の終りには今後の展望と題して、解決すべき重要な問題点、残された課題などを指摘し、構造設計技術者のみならず、座屈研究者にとっても今後の研究の参考になる有用な情報が得られるようにしてある。

以上のように本書は、鋼構造一般の座屈強度および耐荷力の評価、座屈設計へのガイドラインとして、扱っている内容は極めて多岐にわたっており、わが国を中心とした最新の座屈に関する技術情報が体系的に集約されている。これらが鋼構造設計の分野で正しく理解され、有効に利用されることを希望する次第である。

なお、本書の作成にあたり、各章の主たる執筆協力者は次のようである。ただし最終的なまとめは編集委員会で行った。

1章 西野、福本、倉西、2章 長谷川、宇佐美、3章 依田、西野、林、宇佐美、4章 渡辺、青木、北田、5章 青木、三上、福本、6章 久保、吉田、福本、7章 吉田、崎元、西村、8章 北田、宇佐美、青木、9章 三上、長谷川、北田、10章 西村、増田、倉西、11章 林、西村、12章 崎元、林、倉西、13章 増田、依田、宇佐美、14章 渡辺、久保、長谷川。

昭和62年10月

土木学会鋼構造委員会

座屈設計のガイドライン作成小委員会

委員長 福本 暁 士

## 「座屈設計のガイドライン」作成小委員会構成

(五十音順, 敬称略, ○印編集委員会構成員)

委員長	○福本 暁士	大阪大学工学部
委員	○青木 徹彦	愛知工業大学工学部
〃	○宇佐美 勉	名古屋大学工学部
〃	○北田 俊行	大阪市立大学工学部
〃	久保 全弘	名城大学理工学部
〃	○倉西 茂	東北大学工学部
〃	○崎元 達郎	熊本大学工学部
〃	西野 文雄	東京大学工学部
〃	○西村 宣男	大阪大学工学部
〃	○長谷川 彰夫	東京大学工学部
〃	林 正	長岡技術科学大学工学部
〃	増田 陳紀	武蔵工業大学工学部
〃	三上市 蔵	関西大学工学部
〃	吉田 博	金沢大学工学部
〃	依田 照彦	早稲田大学理工学部
〃	渡辺 英一	京都大学工学部

# 座 屈 設 計 ガイドライン

## 目 次

### まえがき

### 第1章 序論

1.1 座屈問題の重要性	1
1.2 終局限界状態と座屈設計	2
1.3 構造物の安定照査	3
1.4 座屈設計指針の各国の現状	4
1.5 本書の構成	5
参考文献	5

### 第2章 記号・定義

2.1 座標	7
2.2 記号	7
2.3 定義	10

### 第3章 構造物の安定・不安定

3.1 概説	11
3.1.1 構造物の挙動	11
3.1.2 構造物の解析	13
3.1.3 構造物の不安定現象	15
3.2 安定・不安定の判別	16
3.2.1 安定・不安定の概念	16
3.2.2 エネルギーの変化による安定・不安定の判別	18
3.2.3 つり合い状態の変化による安定・不安定の判別	22
3.3 線形座屈解析	25
3.3.1 座屈問題の線形化	25
3.3.2 エネルギー法	26
3.3.3 マトリックス変位法	27
3.4 数値計算法	28
3.4.1 線形座屈解析	28
3.4.2 非線形構造解析	29
3.4.3 非線形座屈解析	31

3.5 構造物の弾性安定の一般論	32
3.5.1 構造物の安定条件	32
3.5.2 特異点の分類	34
参考文献	35

#### 第4章 構造物の材料強度と初期不整

4.1 概説	37
4.2 材料強度	37
4.2.1 鋼材の機械的性質の変動の要因	37
4.2.2 鋼材の機械的性質のばらつきと適合分布	39
4.3 初期たわみ	41
4.3.1 構造部材の初期たわみと偏心	41
4.3.2 各国の初期たわみ規定	57
4.4 残留応力	60
4.4.1 概説	60
4.4.2 残留応力の大きさと分布	60
4.4.3 残留応力の計測法	73
4.5 今後の展望	74
参考文献	74

#### 第5章 柱

5.1 概説	77
5.2 柱の挙動と不完全性	77
5.2.1 オイラーの座屈荷重	77
5.2.2 荷重偏心および初期たわみのある柱	79
5.2.3 接線係数荷重	80
5.2.4 残留応力の鋼柱強度への影響	82
5.2.5 剛塑性柱	84
5.3 鋼柱の強度	85
5.3.1 熱間圧延柱	85
5.3.2 溶接柱	87
5.3.3 鋼管柱	88
5.4 鋼柱の基準耐荷力	89
5.4.1 伝統的な設計式	89
5.4.2 複数柱曲線	90
5.5 弾性拘束された柱	93
5.5.1 有効座屈長	93
5.5.2 弾性拘束された柱の弾性座屈	95

5.5.3	弾性拘束された柱の弾塑性座屈	95
5.5.4	中間で支持された柱	97
5.6	局部座屈と全体座屈の連成強度	98
5.6.1	まきがき	98
5.6.2	局部座屈強度	99
5.6.3	局部座屈と全体座屈の連成強度	99
5.7	変断面柱	101
5.8	今後の展望	102
	参考文献	103

## 第6章 はり

6.1	概説	105
6.2	はりの曲げ挙動	105
6.2.1	曲げモーメントと曲率の関係	105
6.2.2	断面の全塑性強度	107
6.3	はりの横ねじれ座屈	109
6.3.1	弾性横ねじれ座屈強度の一般式	110
6.3.2	材端モーメントを受けるはり	112
6.3.3	中間荷重を受けるはり	112
6.3.4	片持ばり	113
6.3.5	断面形状の影響	115
6.3.6	材端支持条件の影響	115
6.3.7	中間拘束されたはり	116
6.3.8	連続ばり	120
6.3.9	変断面はり	120
6.3.10	断面変形と局部座屈の影響	121
6.3.11	曲りばり	123
6.4	はりの曲げ耐荷力	124
6.4.1	残留応力を考慮した非弾性横ねじれ座屈強度	124
6.4.2	荷重偏心と初期変形を考慮した横ねじれ耐荷力	127
6.4.3	実験強度に基づく耐荷力曲線の評価	129
6.5	今後の展望	130
	参考文献	130

## 第7章 はり一柱

7.1	概説	135
7.2	軸力と曲げを受ける断面（短いはり一柱）の性状	137
7.2.1	断面の強度	137

7.2.2	曲げモーメントと曲率の関係	143
7.3	はり一柱の強度	143
7.3.1	はり一柱の初期降伏強度	143
7.3.2	材端モーメントを受けるはり一柱	145
7.3.3	横荷重を受けるはり一柱	147
7.3.4	はり一柱の横ねじれ座屈強度	148
7.3.5	変断面はり一柱	150
7.3.6	2軸曲げを受けるはり一柱	152
7.3.7	節点変位のあるはり一柱	156
7.4	今後の展望	158
	参考文献	158

## 第8章 板要素

8.1	概説	161
8.1.1	範囲	161
8.1.2	板要素の座屈挙動	161
8.2	一様圧縮を受ける板要素	164
8.2.1	無補剛板	164
8.2.2	補剛板	169
8.3	圧縮と面内曲げを受ける板要素	176
8.3.1	無補剛板	177
8.3.2	補剛板	179
8.4	圧縮と曲げを受ける薄肉箱形短柱	181
8.4.1	無補剛箱形断面の相関曲線	182
8.4.2	補剛箱形断面の相関曲線	183
8.5	座屈実験法	184
8.5.1	実験方法	184
8.5.2	供試体	186
8.5.3	実験結果の評価	186
8.6	今後の展望	189
	参考文献	189

## 第9章 プレート・ガーダーおよびボックス・ガーダー

9.1	概説	193
9.2	プレート・ガーダーの耐荷力と設計法	194
9.2.1	道路橋示方書の設計手順	195
9.2.2	曲げ耐荷力	196
9.2.3	斜張力場理論	199

9.2.4	せん断耐荷力	202
9.2.5	曲げ・せん断耐荷力	203
9.3	板パネルの極限強度	204
9.3.1	周辺単純支持パネル	204
9.3.2	片辺支持パネル	207
9.4	直交異方性板への換算	208
9.4.1	圧縮を受ける場合	208
9.4.2	曲げを受ける場合	208
9.4.3	せん断を受ける場合	209
9.5	部分パネルの極限強度	210
9.5.1	圧縮を受ける場合	210
9.5.2	曲げを受ける場合	210
9.5.3	せん断を受ける場合	211
9.5.4	組み合わせ応力を受ける場合	212
9.6	全体パネルの極限強度	212
9.6.1	圧縮を受ける場合	212
9.6.2	曲げを受ける場合	212
9.6.3	せん断を受ける場合	213
9.6.4	組み合わせ応力を受ける場合	214
9.7	プレート・ガーダーの耐荷力の照査	214
9.7.1	曲げ耐荷力	214
9.7.2	せん断耐荷力	215
9.7.3	曲げ・せん断耐荷力	215
9.8	腹板の補剛材	216
9.8.1	中間垂直補剛材	216
9.8.2	水平補剛材	218
9.8.3	荷重集中点垂直補剛材	218
9.8.4	補剛材のないプレート・ガーダー	219
9.9	ボックス・ガーダーの耐荷力	220
9.9.1	補剛フランジの極限強度	220
9.9.2	補剛腹板の極限強度	221
9.9.3	ボックス・ガーダーの耐荷力	221
9.9.4	大型模型実験	222
9.9.5	シアラグ	222
9.9.6	ダイヤフラム	222
9.10	今後の展望	222
9.10.1	斜張橋の鋼桁	223
9.10.2	上下非対称プレート・ガーダー	223

9.10.3	部分緑荷重を受けるプレート・ガーダー	223
9.10.4	曲線プレート・ガーダー	223
9.10.5	曲線ボックス・ガーダー	224
9.10.6	斜め補剛材を有するプレート・ガーダー	224
9.10.7	変断面プレート・ガーダー	224
	参考文献	224

## 第10章 トラス

10.1	概説	235
10.2	トラス圧縮部材の極限強度と設計法	236
10.2.1	設計法の現状	236
10.2.2	圧縮部材の挙動と極限強度	238
10.2.3	偏心圧縮を受ける弾性拘束柱	240
10.2.4	圧縮部材の有効長さ係数法	243
10.2.5	鉄塔支柱の有効長さ係数	244
10.3	たわみを弾性拘束された圧縮弦材	245
10.3.1	力学モデル	245
10.3.2	極限強度特性	246
10.3.3	有効座屈長さ係数	247
10.3.4	横ラーメンの限界剛性	248
10.4	トラス桁の全体横ねじれ座屈	249
10.4.1	研究と設計法の現状	249
10.4.2	全体横ねじれ座屈荷重の計算式	249
10.4.3	鉛直分布荷重を受けるトラス桁の極限強度	252
10.4.4	死荷重と風荷重の組合せ状態に対するトラス桁の極限強度	254
10.5	今後の展望	254
	参考文献	255

## 第11章 ラーメン

11.1	概説	257
11.2	柱の有効座屈長	259
11.3	門形・ $\pi$ 形ラーメンの座屈	259
11.3.1	水平移動座屈	259
11.3.2	水平拘束座屈	260
11.3.3	近似式	261
11.4	長方形ラーメンの座屈	261
11.4.1	近似公式	261
11.4.2	近似値	263

11.4.3	近似公式の応用	264
11.5	変断面ラーメンの座屈	266
11.5.1	座屈特性とパラメータ	266
11.5.2	近似値と等価剛性	267
11.6	斜柱を有するラーメンの座屈	268
11.6.1	台形・ $\pi$ 形ラーメン	268
11.6.2	座屈特性	269
11.7	その他のラーメンの座屈	271
11.7.1	柱高・剛比・荷重の非対称性	271
11.7.2	柱脚の固定度の影響	273
11.7.3	筋かいの補剛効果	274
11.8	曲げ荷重を受けるラーメンの座屈	275
11.8.1	曲げ荷重による座屈	275
11.8.2	門形ラーメン	275
11.8.3	$\pi$ 形ラーメン	276
11.8.4	山形ラーメン	277
11.9	ラーメンの耐荷力	278
11.9.1	$P-\delta$ 効果	278
11.9.2	非弾性座屈	279
11.9.3	ラーメン柱の設計耐荷力	281
11.9.4	曲げ荷重を受けるラーメンの耐荷力	282
11.10	今後の展望	284
	参考文献	285

## 第12章 アーチ

12.1	概説	287
12.2	面内座屈強度と耐荷力	289
12.2.1	弾性分岐座屈	289
12.2.2	鋼アーチの面内耐荷力	290
12.2.3	面内終局強度の評価法	293
12.2.4	断面決定法と終局強度	296
12.3	面外座屈強度と耐荷力	298
12.3.1	単一アーチの座屈強度	298
12.3.2	複弦鋼アーチの面外座屈強度	302
12.3.3	座屈強度の評価法	305
12.4	面内および面外荷重を受ける鋼アーチの耐荷力	306
12.4.1	全長にわたり横溝を有する複弦鋼アーチ	307
12.4.2	端部に開口部を有する複弦鋼アーチ	308

12.5	リングの座屈	309
12.5.1	円形リングの面内座屈	309
12.5.2	円形リングの面外座屈	311
12.6	今後の展望	311
	参考文献	311

## 第13章 パイプおよびシェル

13.1	概説	315
13.2	パイプおよび円筒シェルの座屈	316
13.2.1	座屈挙動総論および記号の規約	316
13.2.2	軸圧縮力による座屈	318
13.2.3	せん断力による座屈	322
13.2.4	曲げモーメントによる座屈	322
13.2.5	ねじりモーメントによる座屈	323
13.2.6	外圧による座屈	324
13.2.7	組合せ荷重による座屈	326
13.3	初期不整の影響	334
13.3.1	パイプおよび円筒シェルの製作方法	334
13.3.2	材料の力学的特性	334
13.3.3	初期不整の程度	335
13.3.4	理論座屈強度と実測座屈耐荷力との比較	335
13.3.5	初期たわみを有する円筒シェルの軸圧縮座屈強度	335
13.3.6	初期たわみを有する円筒シェルの外圧による座屈	337
13.4	シェル・曲面板およびシェル状構造物の座屈	338
13.4.1	外圧を受ける回転体シェルの座屈	338
13.4.2	曲面板の座屈	339
13.4.3	シェル状構造物の座屈	339
13.5	補剛円筒シェルの座屈耐荷力	341
13.5.1	補剛円筒シェルの座屈様式	341
13.5.2	直交異方性シェル近似	341
13.5.3	補剛材間の座屈	343
13.5.4	外圧による非弾性座屈	343
13.6	数値計算の要点	343
13.7	今後の展望	344
	参考文献	344

## 第14章 冷間成形材

14.1	概説	349
------	----	-----

14.2 柱・板の座屈.....	349
14.2.1 柱の座屈.....	349
14.2.2 板の座屈.....	348
14.3 耐荷力.....	348
14.3.1 曲げ部材の耐荷力.....	348
14.3.2 圧縮部材.....	354
14.4 今後の展望.....	356
参考文献.....	356
索引.....	357