

論文 安全性と修復性を設計目標とした耐震設計法開発のための基礎的研究

佐々山 茉莉*¹・衣笠 秀行*²・向井 智久*³・大西 直毅*⁴

要旨：現在の耐震設計法では安全性確保の一つの方法として靱性設計法が推奨されている。この方法において、修復性は安全性とトレードオフ関係となる場合があり、大地震時の安全性確保において修復性が切り捨てられるケースが発生しがちである。本研究では、安全性と修復性を目標とする設計法のフローを提案し、この設計法を実際に行う際に必要になる、目標とした安全性・修復性関係を満足する、耐力・剛性・塑性率の算出法および、RC造フレームモデルを例に取り、階高・スパン・柱の寸法・柱主筋量・鉄筋強度がこれら性能に及ぼす影響を考察した。

キーワード：耐震設計、安全性、修復性、トレードオフ関係、耐力、剛性

1.研究目的

現在の耐震設計法では、損傷を建物全体に分散させ、大きな地震エネルギーを吸収することで十分な安全性を確保する設計が推奨されている。しかし、損傷が全層に生じることで修復箇所が広範囲に及び、莫大な修復費用が生じると同時に、修復に長期間を要することで機能回復が困難となることが懸念されている。1995年の兵庫県南部地震の経済損失額は10兆円に達し、近年の地震被害がもたらす経済損失は看過できないものとなってきた¹⁾。修復性は安全性とトレードオフ関係となる場合があり、大地震時の安全性確保において修復性が切り捨てられるケースが発生しがちである²⁾。本研究は、修復性を目標性能の一つに加え、安全性と修復性の両目標値を満足できる耐震設計法の枠組構築と、そのために必要な性能分析法の開発を目的とする。

2.研究概要

2.1 設計法の枠組

2005年に発生した耐震偽装事件では、経済至上主義社会における耐震性能の極端な軽視が白日の下にさらされた。この背景には耐震性能の経済的価値が十分認識されていないこと、また経済社会において、経済価値を見いだせない性能は無視あるいは極端に軽視される現状がある。経済社会において建築物の耐震化を進めるためには、経済性を含めた設計手法の確立が必要不可欠である。

本研究では、目標性能として安全性・修復性・収益性を考慮した図-1に示す設計法の枠組を考えている。以下にこの設計の手順を説明する。

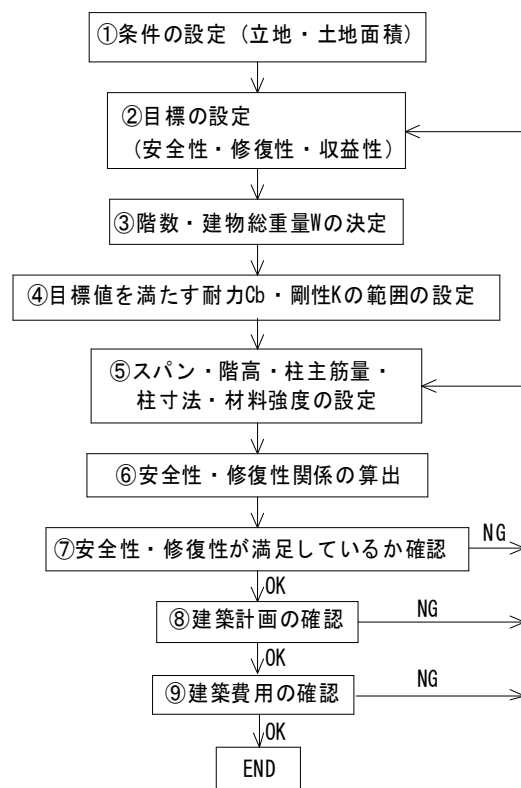


図-1 設計法のフロー

- ① 土地面積と立地を決定する。
- ② 安全性・修復性・収益性の目標値の許容範囲を、施主の希望に沿って設定する。→3.1 図-6（安全性と修復性の目標範囲）参照
- ③ ②で定めた収益性の目標値より、建ぺい率・容積率を決定する。それらを考慮し、階数・建物総重量 W を設定する。

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 大学院生（正会員）

*2 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博（正会員）

*3 独立行政法人 建築研究所 博（工）（正会員）

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 助教 博（工）（正会員）

- ④ ②で設定した安全性・修復性の目標値を満たすために必要な、耐力 Cb (ベースシア係数)・剛性 K の範囲を求める。同時に耐力・変位関係上で降伏点の取り得る範囲も求める。→3.1「図-7, 8」
- ⑤ 建物の計画を行い、スパン・階高・柱主筋量・柱の寸法・材料強度の値を定める。
- ⑥ ⑤で計画した建物の安全性・修復性を求める。
- ⑦ ⑥で求めた安全性・修復性が、②で設定した目標の範囲に入っていることを確認する。更に目標範囲内の性能の中で最も適した性能値となるように、⑤の設計の内容を変更する。この時、4.2の図-11～15で示す結果を変更の目安とすることができる(例えば、スパンの変更の場合(図-11)、鉄筋降伏強度の変更の場合(図-15))。目標の範囲に性能が入らない、または⑤の設計の内容が変更できない場合、②の安全性・修復性の目標値の設定に戻り再検討する。安全性・修復性の目標範囲は、施主の要望で決定しているので、⑤が変更不可能な場合は施主の判断で目標範囲を広げることになる。
- ⑧ 柱本数や階高等が必要な機能性を満足するものか、また目標の収益性を得られるような間取りが実現できているか確認を行う。満足していない場合、②または⑤に戻り、再度検討を行う。
- ⑨ 施主の経済性を考慮し、建築費用が想定内であることを確認する。満足していない場合、②または⑤に戻る。
- 以上のフローを具体化し、これに基づく設計を実施するためには、次の3項目を明らかにする必要がある。

- (1) 安全性・修復性の目標値を満たす耐力 Cb と剛性 K の算定法
- (2) 安全性・修復性関係と、耐力・剛性の組み合わせの関係性
- (3) 建物パラメータ(スパン・階高・柱主筋量・柱の寸法・材料強度等)の変化が安全性・修復性に及ぼす影響

以下では3.1において(1)を、3.2において(2)を、4章において(3)について検討を行う。

2.2 安全性・修復性の定義

本研究では、建物を図-2の様に一質点系にモデル化し、復元力特性に図-3に示す bi-linear 型を用いる。エネルギー一定則に基づき、安全性は建物が吸収できるエネルギー E (図-3の斜線部の面積)で表し、修復性はその時の変形 δ で表す。本来修復性は、修復のための費用あるいは時間で表現すべきであるが、ここでは簡易化し、地震時の変形量で表現することとした。

安全性・修復性関係を図-4のようにプロットした場合、安全性を向上させ、A から A'へプロットが移動す

れば、安全性・修復性ともに向上したと言える。しかし B' から B に移動した場合、エネルギーが大きくなる分安全性は向上するが、変形が大きくなる分修復性は下がるトレードオフの関係となる。

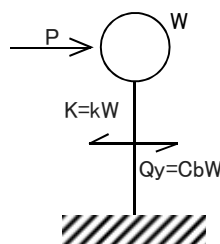


図-2 一質点概念図

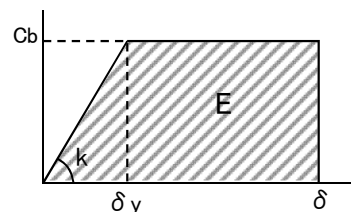


図-3 仮定した復元力特

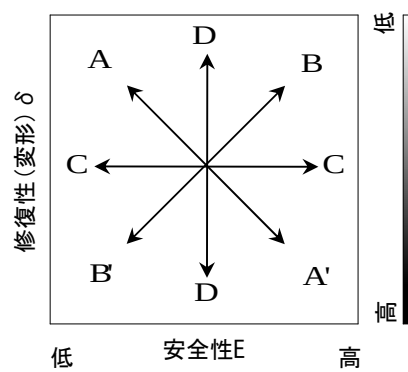


図-4 安全性-修復性関係

3.安全性・修復性関係に関する分析

3.1 安全性・修復性と耐力・剛性の関係

限界塑性率 μ と耐力 Cb ・剛性 K ・重量 W を与えると、式(1), (2)により安全性 E と、その時の変形量 δ がそれぞれ次式で求められる。

$$\delta = \mu Cb W / K \quad (1)$$

$$E = (2\mu - 1)(Cb W)^2 / 2K \quad (2)$$

式(1),(2)より、 δ と E の関係を求めると、式(3),(4)となる。

$$\delta = \frac{2\mu E}{(2\mu - 1)Cb W} \quad (3)$$

$$\delta = \mu \sqrt{\frac{2E}{K(2\mu - 1)}} \quad (4)$$

式(3)は Cb を、式(4)は K をパラメータとした式となっている。この2式をグラフ化したものを図-5に示す。式(3)は耐力 Cb によって傾きが変化する直線であり、式(4)は剛性 K によって変化する曲線である。 δ - E 関係上のある目標点を定める時、両式を用いることで目標点に対応する適切な Cb ・ K の組み合わせを導き出すことが可能である。式(1),(2)より δ の目標値を $\delta \leq \delta_0$ 、 E の目標値を $E \geq E_0$ (図-6の斜線部)として Cb について解くと、式(5),(6)のようになる。

$$Cb \leq \frac{\delta_0 K}{\mu W} \quad (5)$$

$$Cb \geq \sqrt{2K \cdot E_o / (2\mu - 1)W^2} \quad (6)$$

式(5),(6)から2式の交点の座標を求めると次のようになる。

$$Cb = 2E_o \cdot \mu / (2\mu - 1)W \cdot \delta_o \quad (7)$$

$$K = 2E_o \cdot \mu^2 / (2\mu - 1)\delta_o^2 \quad (8)$$

以上より、 δ と E の目標範囲を図-6の斜線部とすると、それを満たす設計をする際に必要な Cb と K の範囲が、式(5),(6)を用いて図-7の赤の斜線部のように求められる。その時の荷重・変形関係上の降伏点(δ_y , Q_y)の取り得る範囲は式(9),(10)から、図-8の赤の斜線部となる。

$$\delta_y \leq \delta_o / \mu \quad (9)$$

$$Q_y \geq 2E_o / (2\mu - 1) \cdot \delta_y \quad (10)$$

なお、式(9)は、 $\delta_y = CbW/K$ の関係を用いて式(5)を変形したものであり、式(10)は $Q_y = CbW$ の関係を用いて式(7)を変形し求めたものである。

また、図-7の式(5),(6)、図-8の式(9),(10)それぞれの交点(図中の黒丸)が目標の最小値の $\delta \cdot E$ (図-6中の黒丸)を満たす $Cb \cdot K$ または $Q_y \cdot \delta_y$ の値となる。

ここまでの定式化では、地震入力エネルギーは建物周期に関わらず一定(=E)であるとしている。そこで、図-9に示すように、短周期領域での入力エネルギーを低減し、この領域が加わることによってこれまで示した結果にどのような影響を及ぼすかについてさらに考察する。図-9では、速度換算エネルギースペクトルをbi-linear型でモデル化しており、その折れ曲がり点の周期をコーナー周期 T_c とすると、 $T \leq T_c$ の領域の周期特性を考慮した入力エネルギー E' は式(11)のように表せる。

$$E' = E \cdot (T_c/T)^2 \quad (T \leq T_c) \quad (11)$$

また、式(11)に式(2),(12)を代入し、 $E' \geq E_o$ として Cb について解くと式(13)のようになる。

$$T = 2\pi \sqrt{m / (K/\mu)} \quad (12)$$

$$Cb \geq \pi / WT_c \sqrt{8\mu m E_o / (2\mu - 1)} \quad (13)$$

また式(12)を $T \leq T_c$ として K について解くと式(14)のようになる。

$$K \geq 4\pi^2 \mu m / T_c^2 \quad (14)$$

T が T_c を下回った場合の $Cb \cdot K$ の範囲は図-7の赤の斜線部に加え黒の斜線で示された部分が拡張される。また、式(13)に W を乗じる事により、降伏点の範囲も図-8の黒の斜線部分が拡張される。

なお、図-5~8は重量 $W=140000\text{kN}$ 、塑性率 $\mu=1.5$ の一質点を想定している。図-5では $Cb=0.1 \sim 0.6$ 、 $K=5000 \sim 30000\text{kN/cm}$ とした時の安全性・修復性の取り得る範囲、そして図-6~8では安全性の目標値を $E_o \geq 1.0 \times 10^5\text{kNcm}$ 、修復性の目標値を $\delta_o \leq 5.0(\text{cm})$ 、 $T_c=0.5(\text{s})$ とした時の範囲を示している。

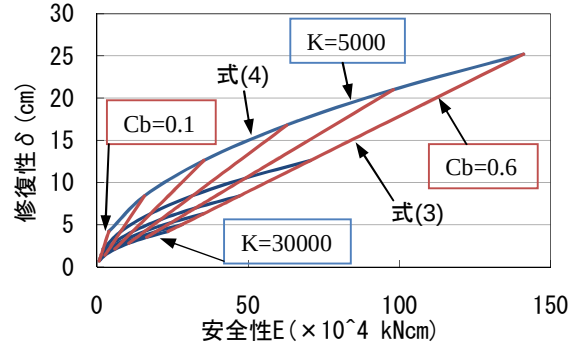


図-5 目標性能と剛性・耐力

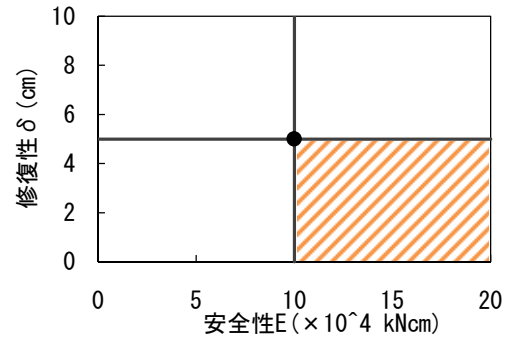


図-6 安全性・修復性の目標範囲

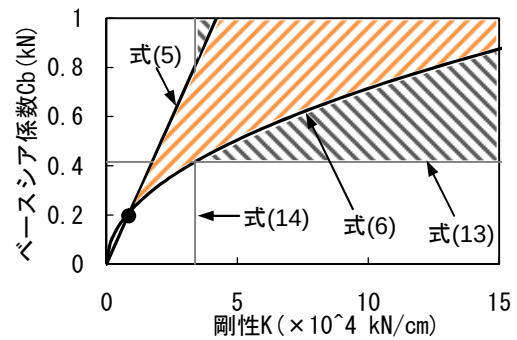


図-7 目標範囲を満たす耐力・剛性関係

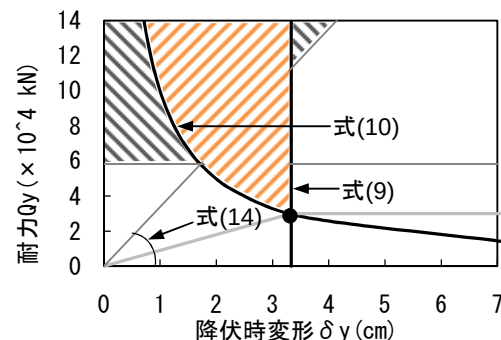


図-8 目標範囲を満たす降伏点

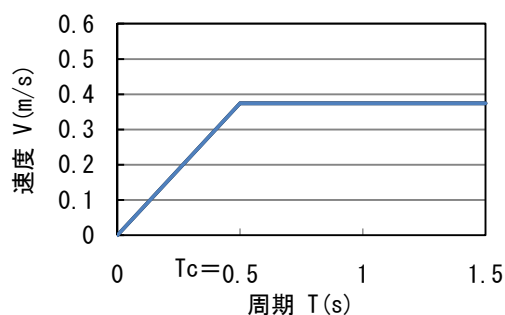


図-9 速度換算エネルギースペクトル

3.2 目標性能の変更と耐力・剛性の関係

目標性能 (δ - E 関係の座標) を図-4 の 4 方向に動かすために必要な耐力と剛性の与え方を求める。耐力を a 倍、剛性を b 倍とする場合、式(1),(2)より δ と E の値が δ は a/b 倍、 E は a^2/b 倍となる。よって以下の①～⑤に示す a と b の条件のもとで耐力 Cb と剛性 K の値を動かすことは、 δ - E 関係 (図-4) における 5 方向に動かすことに対応している。

- ①A から A' に動かす場合 $a < b$ かつ $a^2 > b$
- ②B から B' に動かす場合 $a < b$ かつ $a^2 < b$
- ③B' から B に動かす場合 $a > b$ かつ $a^2 > b$
- ④C の方向に動かす場合 $a = b$
- ⑤D の方向に動かす場合 $a^2 = b$

目標性能を①～⑤の方向に動かす時に Cb と K に乗じる倍率 a , b をそれぞれ縦軸と横軸に取り図に表すと、図-10 の a - b 関係のようになる (図中に動かす方向①～⑤を示した)。図-1 に示す設計法のフローの⑦が満足しなかった場合、安全性と修復性の目標値を満足するように設計の内容を変更する。その時、図-4,7,10 が、耐力・剛性の変更の目安となる。次章では実際に建物を想定し、階高 H 、スパン L 、柱の寸法 $B \times D$ 、引張側柱主筋量 a_t 、鉄筋降伏強度 σ_y などを具体的にどのように変えれば意図した性能変化がもたらされるのか検討する。なお、図-10 は、本来ならば図-7, 8 の黒の斜線部で示した短周期領域のエネルギー低減を考慮すべきであるが、次章で扱う建物モデルでは短周期領域に入るものはないためここではこの効果を省略して示している。

4.建物想定モデルによる安全性・修復性関係分析

ここでは、2.1 の最後で述べた「(3)建物パラメータの変化が安全性・修復性に及ぼす影響」について検討する。

4.1 基本建物モデル

本研究では、鉄筋コンクリート造を対象としたフレームモデルを扱う。表-1 に基本情報を示す。

4.2 建物パラメータが安全性・修復性関係に及ぼす影響

建物パラメータとして、階高 H 、スパン L 、柱の寸法 $B \times D$ 、引張側柱主筋量 a_t 、鉄筋降伏強度 σ_y の 5 つを挙げ

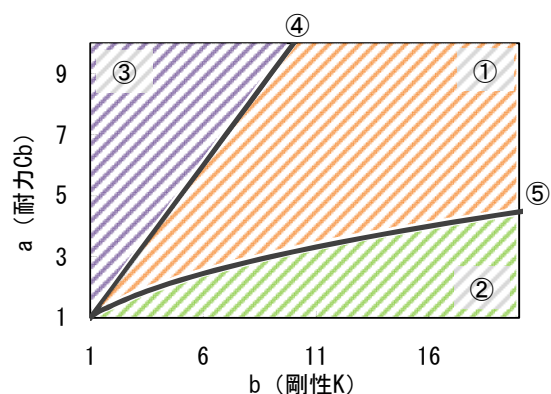


図-10 a(耐力)と b(剛性)の関係

表-1. 建物基本情報

建物概要	-	1 層	
延べ床面積	F	m ²	10000 (梁間方向, 桁行方向とも 100m)
単位床重量	w	kN/m ²	14
階高	H	m	6
スパン	L	m	10
引張側柱主筋量	a_t	mm ²	15018
柱寸法	$B \times D$	mm $\times$ mm	500 $\times$ 500
鉄筋降伏強度	σ_y	N/mm ²	235
ベースシア係数	Cb	-	0.2
塑性率	μ	-	1.5
破壊モード	-	柱の曲げ破壊	

る。図-11～15 はそれぞれ、上で述べた基本建物モデルのこれらパラメータの一つだけが変化した時の安全性・修復性関係と a - b 関係の動きを示している。この 2 つの関係性を明らかにすることによって、図-1 の設計法のフローに示す⑤の判断を行う際の目安として活用することができる。

(1) スパン L (10m→8.3m→6.25m→5m)

スパンを短くした時の安全性・修復性関係と a - b 関係

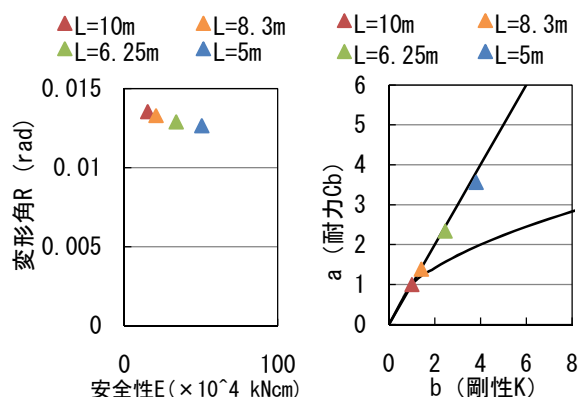


図-11 スパン L を変化させた時の安全性・修復性関係と a - b 関係

の動きを図-11に示す。安全性・修復性関係を見ると図-4のA→A'の方向に動く効果を持っていることがわかる。すなわち、スパンを短くすることによって安全性と修復性をともに改善することができ、性能改善方法として有効なものと言える。またa-b関係は図-10の①領域内を動いており、3.2で述べた考察の妥当性が示されている。

(2) 柱主筋量 a_r (15018→18021→22527→30035mm²)

引張側柱の主筋量を増やすことで、a-b関係は図-10の①の方向に動き、図-12に示すように、安全性・修復性関係は、スパンを変化させた時と同様に、図-4のA→A'の方向に動いている。しかしながら、スパンを変化させた場合と比較すると、安全性の増加よりも修復性の向上が顕著であり、主に修復性の改善に効果がある方法と言える。これは、スパンを短くする方法に比べ、耐力の増加量が小さいためと考えられる。

(3) 階高 H (6m→5m→4m→3.6m)

階高を低くすることで、a-b関係は図-10の②の方向に動き、図-13に示すように、安全性・修復性関係は図-4のB→B'の方向に動いている。修復性は改善されるものの、安全性は低下してしまうことが分かる。これは塑性率が1.5で一定としているために、階高を低くすることにより降伏点剛性が大きくなることで変形能力が小さくなり、建物の変形に伴うエネルギー吸収能力が低下するためである。

(4) 柱断面 $B \times D$ (500→600→700→800mm)

柱の寸法を大きくすることで、a-b関係は図-10の②の方向に動き、安全性・修復性関係は図-4のB→B'方向に動いている(図-14)。階高を変化させたケースとほぼ同様の効果を性能に及ぼしていると言える。柱断面を大きくすることにより耐力は上昇するが、階高変化と同様の理由で変形能力は低下し、安全性の上昇に繋がらなかったと思われる。

(5) 鉄筋降伏強度 σ_y (235→295→345→390N/mm²)

鉄筋降伏強度を強くすると、a-b関係は図-10の③の方向に動き、安全性・修復性関係は図-4のB'→B方向に移動していることがわかる(図-15)。このことは、鉄筋降伏強度を大きくすることにより、安全性を最大限に発揮する時点での変形量が増加するためと考えられる。安全性を改善する効果は大きい、修復性が著しく低下しており、鉄筋強度による安全性向上を行う場合には許容される損傷量に充分配慮する必要があることがわかる。

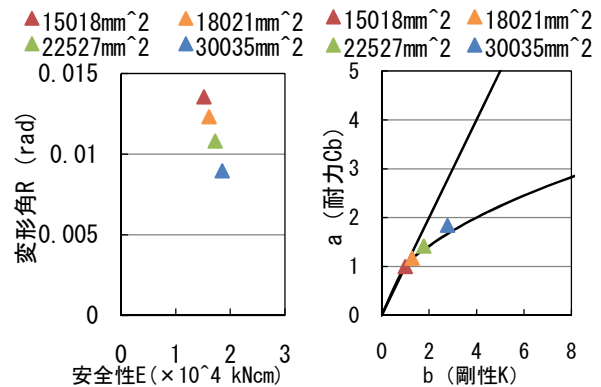


図-12 柱主筋量 a_r を変化した時の安全性・修復性関係と a-b 関係

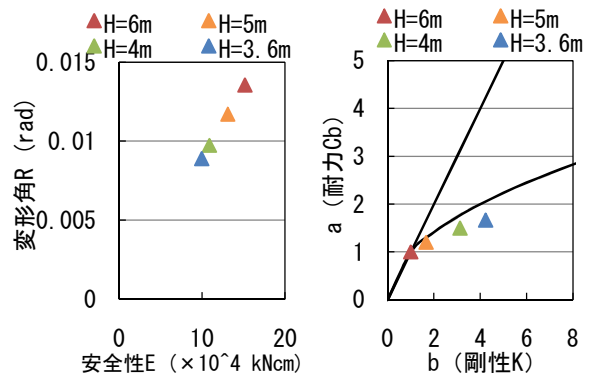


図-13 階高 H を変化した時の安全性・修復性関係と a-b 関係

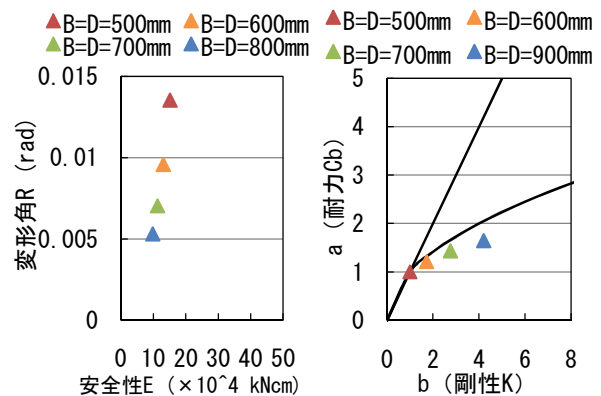


図-14 柱寸法 $B \times D$ を変化した時の安全性・修復性関係と a-b 関係

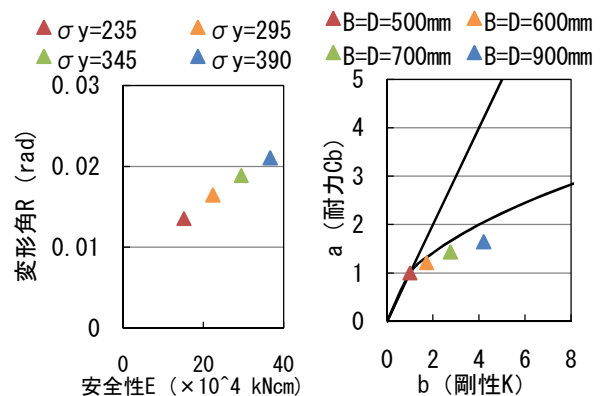


図-15 鉄筋強度 σ_y を変化した時の安全性・修復性関係と a-b 関係

5.総括

安全性と修復性を目標とする設計法のフローを提案した。また、この設計法を実際に行う際に必要となる目標とした安全性・修復性を満足する、耐力・剛性・塑性率の算出法を示し、RC造フレームモデルを例に取り、階高・スパン・柱の寸法・柱主筋量・鉄筋強度がこれらの性能に及ぼす影響を考察し、以下の知見を得た。

- (1) 安全性と修復性の目標範囲を満たす、耐力 Cb と剛性 K の組み合わせの範囲を示した。(図-6, 7 参照)
- (2) 耐力と剛性の倍率をそれぞれ a 倍, b 倍とし, $a < b$ か $a^2 > b$ の条件で耐力・剛性を変化させることで、安全性と修復性の両方を向上させることが可能である。
- (3) スパンを小さくする、および、柱主筋量を多くすることにより、安全性と修復性の両方を向上させることが可能である。
- (4) 階高・主筋強度を大きくする、および、柱寸法を小さくする方法は、安全性は向上するものの修復性は低下するトレードオフ関係を発生させる。このような方法によって安全性を向上させる際には、許容される損傷量を明確にし、修復性を考慮した構造計画が特に重要となる。

これらにより、施主の希望に沿った安全性・修復性を

実現するために必要な項目とその条件をおおよそ明らかにすることができた。しかし、性能に及ぼす影響の大きい階高やスパン、柱寸法等の変更は基本計画の終了した建物では難しい。これら性能を満足するためには、構造設計者が企画設計から参加する必要があると言える。

本研究では、提案する設計法の定性的な特徴を得るため、シンプルなエネルギー一定則を使用して性能評価を行った。現在、エネルギー一定則に代えて、実際に設計に使われている限界耐力計算法やエネルギー法を適用した場合の検討を進めており、これらから得られる結果が今回の結果と定性的に近い結果となっていることを確認している。これについては別の機会に報告する予定である。

参考文献

- 1) 中央防災会議：「東海地震に関する専門調査会報告」，「東南海・南海地震等に関する専門調査会報告」，「首都直下地震対策専門調査会報告」
- 2) 株式会社新井組：新井組技術研究報告集第8号，特集平成7年兵庫県南部地震被災調査報告「ジュネス六甲」，1995.10