

鉄骨露出型柱脚を対象とした 設計支援システム開発研究

増本翔^{†1} 村田遼^{†1} 澤原朝美^{†1}
牛島祐樹^{†2} 原田幸一^{†3} 山成實^{†4}

本研究は、構造設計初学者を対象とした、鉄骨柱脚の設計支援システムの開発を目的としている。鉄骨建築物の柱脚部は、構造的に極めて重要な部位であり、設計上も施工上も十分な配慮が必要である。特に、露出型柱脚の設計は、設計フローおよび計算式が複雑なことから、構造設計初学者にとって設計仕組の理解が比較的困難である。

このような問題に対して、設計処理の透明化、複数解の提供をキーワードとした初学者の設計感覚を養うことのできる構造設計教育援用のシステム開発を行う。

Development of An Education System for Design of Exposed Steel Column-bases Using Method of Acquiring Multiple Solutions

SHO MASUMOTO^{†1} RYO MURATA^{†1} ASAMI SAWAHARA^{†1}
YUKI USHIJIMA^{†2} KOUICHI HARADA^{†3} MINORU YAMANARI^{†4}

This research aims at development of education system for structural design of exposed steel column-bases. A new design concept is included in the system, which is called as “acquisition of multiple-solution”. The exposed steel column-bases are the most popular type of steel column-bases in a steel building. Beginners in the field of structural design must get their knowledge and skill in short term. Therefore, the system was tuned to achieve the aim. Designable space was obtained by means of the system for a demonstration.

1. はじめに

近年、建築構造設計における新人教育にも商用の構造計算プログラムを用いて行われることが常態化している。アンケート調査[1]から設計初学者は商用プログラムに頼りすぎて解をすぐに求めたがる傾向にあり、解の検証ができないまま設計を完了してしまうという事態を生む懸念がある。一貫構造計算プログラムに代表される商用プログラムは、設計処理の自動化が進んだものであり、プログラムの中身がブラックボックスになっていることや設計解がある条件下における解でしかないことから、それらの計算機プログラムは設計初学者を育てるのにはあまり適していないと考えられる。

このような現状に対して著者等の研究は、構造設計初学者にとって設計の流れおよび仕組の理解が深まり、また複数解を得ることから様々な観点での解の吟味を行い、設計感覚を養うことを目的とした処理系のシステム構築を試み、その検討と考察を行うものである。

2. 研究目的

鉄骨柱脚の設計は、計算式が複雑なことから初学者にとって困難である。本論文では露出型柱脚を取り上げ、新しい設計支援システムを提案し、実装した結果について論じる。

露出型柱脚は、図1に示すようなアンカーボルトとベースプレートにより鉄筋コンクリート構造に接合されるもので、アンカーボルト長さ l_b 、ベースプレート板厚 t_b 、ベースプレートのせい D 、ベースプレートの幅 B 、ボルト縁端距離 a を代表寸法にもつ断面である。ここでボルト縁端距離 a とは、ベースプレート縁からアンカーボルトの中心までの距離をいう。

露出型柱脚の設計を行う際に、まずベースプレートの寸法およびベースプレート厚、アンカーボルトの本数および径を選択することから始めなければならない。しかし、その選択をどのような尺度を用いて行うかが明らかでないため、初学者にとってこれは容易ではない。本論文では、初学者にとっての露出型柱脚の設計方法および設計全体の流れの理解と、また設計感覚の育成を支援するシステムの提案と実装を目的としていて、初学者の設計検討において有用な判断材料となることを目指している。

^{†1} 熊本大学大学院自然科学研究科 大学院生
Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ.

^{†2} 熊本大学工学部 学部生
Undergraduate, Faculty of Engineering, Kumamoto Univ.

^{†3} 熊本大学大学院自然科学研究科 大学院生 原田建築設計事務所・所長

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ. Harada Design Lab.

^{†4} 熊本大学大学院自然科学研究科 准教授・工博
Assoc. Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

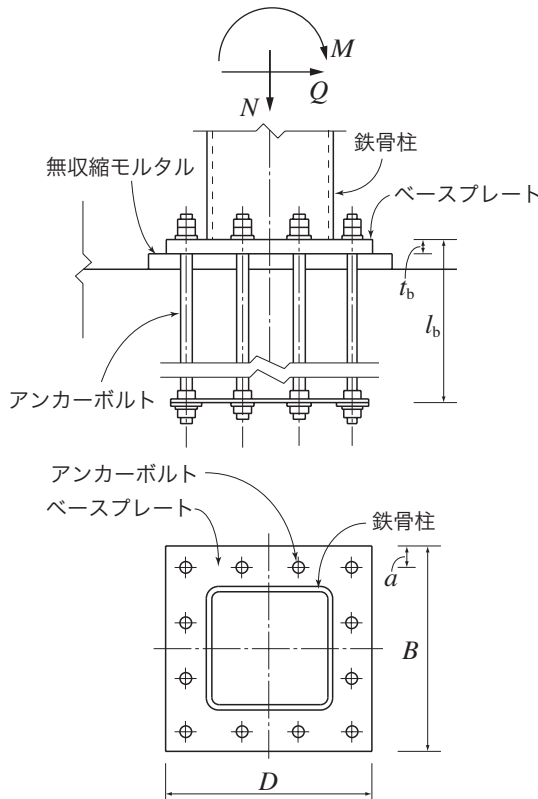


図1 鉄骨露出型柱脚

3. 露出型柱脚の断面算定および検討

露出型柱脚の断面算定および検討は「鋼構造接合部設計指針」[2]に則って以下の検討を行う。

1) 準備計算

(a) 応力状態の判定

中立軸が引張側アンカーボルト重心位置より外側か内側かを判定するために、曲げモーメント M を等価な偏心圧縮力に置換したときの偏心距離 e と断面の核（圧縮力作用させたときに断面に引張応力が発生しない範囲）との関係を調べる。偏心距離 e は次式より求める。（図2）

$$e = \frac{M}{N} \quad \dots(1)$$

(b) 中立軸位置 x_n の計算

中立軸の位置 x_n は、中立軸まわりの力の釣合から導かれる次式より求める。⁽³⁾

$$x_n^3 + 3\left(e - \frac{D}{2}\right)x_n^2 - \frac{6n \cdot a_t}{B}\left(e + \frac{D}{2} - d_t\right)\left(D - d_t - x_n\right) = 0 \quad \dots(2)$$

偏心距離 e と中立軸位置 x_n ここで、 n はコンクリートに対する鋼材のヤング係数比で、慣用値として $n=15$ が用いられる。また、 a_t は引張側アンカーボルトの総断面積(mm^2)、 d_t は引張側アンカーボルト群重心からベースプレートの最外縁までの距離(mm)である。

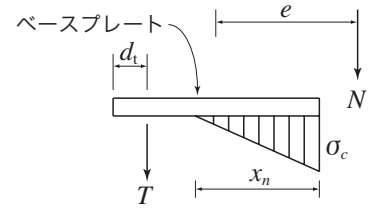


図2 偏心距離 e と中立軸位置 x_n

2) 断面設計

露出型柱脚には、アンカーボルト、基礎コンクリートおよびベースプレートにそれぞれ応力が作用する。以下に各応力に対する検討について述べる。

(a) アンカーボルトの引張力に対する検討

アンカーボルトに作用する引張力 T は、偏心距離 e の値に応じ、表1に示す各式により求められる。

表1 アンカーボルトに作用する引張力

	$e \leq \frac{D}{6} + \frac{d_t}{3}$	$\frac{D}{6} + \frac{d_t}{3} < e$
T	0	$\frac{N\left(e - \frac{D}{2} + \frac{x_n}{3}\right)}{D - d_t - \frac{x_n}{3}}$

引張側アンカーボルトの降伏耐力 aP_y およびアンカーボルトの引張応力度検定比 R_t は次式より求められる。

$$aP_y = i \cdot A_{be} \cdot F_{by} \quad \dots(3. a)$$

$$R_t = \frac{T}{aP_y} \leq 1.0 \quad \dots(3. b)$$

(b) アンカーボルトのせん断力に対する検討

せん断降伏耐力 Q_y およびせん断応力度検定比 R_s は、次式より求められる。

$$Q_y = 0.4(N + T) \quad \dots(4. a)$$

$$R_s = \frac{Q}{Q_y} \leq 1.0 \quad \dots(4. b)$$

ここで、 i は引張側アンカーボルトの本数、 A_{be} はアンカーボルトねじ部有効断面積(mm^2)、 F_{by} はアンカーボルトの降伏強さ(N/mm^2)である。

(c) 基礎コンクリートの検討

基礎コンクリートの圧縮応力度 σ_c の値は、偏心距離 e の値に応じ、表2に示す各式により求められる。

コンクリートの降伏圧縮応力度 F_{cy} は、短期許容圧縮応力度 cfc とすると、

$$F_{cy} = cfc = \frac{2}{3}F_c \quad \dots(5)$$

また、基礎コンクリート圧縮応力度検定比 R_c は次式より求められる。

$$R_c = \frac{\sigma_c}{F_{cy}} \leq 1.0 \quad \dots(6)$$

表2 基礎コンクリート圧縮応力度

	$e \leq \frac{D}{6}$	$\frac{D}{6} < e \leq \frac{D}{6} + \frac{d_t}{3}$	$\frac{D}{6} + \frac{d_t}{3} < e$
σ_c	$\frac{N}{b \cdot D} \left(1 + \frac{6e}{D}\right)$	$\frac{2N}{3b \left(\frac{D}{2} - e\right)}$	$\frac{2N \left(e + \frac{D}{2} - d_t\right)}{b \cdot x_n \left(D - d_t - \frac{x_n}{3}\right)}$

(d) ベースプレートの検討

圧縮側：

ベースプレートの圧縮側部分は、柱フランジから外に突出した圧縮部分を片持梁とみなして検討する。圧縮側のベースプレートに作用する曲げモーメント ${}_bM$ 、降伏耐力 ${}_bM_y$ および曲げ応力度検定比 R_{b1} は、単位幅 1mm 当たりについて、次式より求められる。

$${}_bM = \frac{1}{2} \sigma_c \cdot s_d^2 \quad \dots(7. a)$$

$${}_bM_y = Z_y \cdot {}_bF_y \quad \dots(7. b)$$

$$R_{b1} = \frac{{}_bM}{{}_bM_y} \leq 1.0 \quad \dots(7. c)$$

引張側：

次に、ベースプレートの引張側部分においては、ベースプレートの面外曲げ剛性を十分確保するために、ベースプレートはアンカーボルト軸部が降伏するまで降伏しないようにする。引張側のベースプレートに作用する曲げモーメント ${}_bM$ 、降伏耐力 ${}_bM_y$ および曲げ応力度検定比 R_{b2} は、次式より求められる。

$${}_bM = a_t \cdot f_t \cdot a \quad \dots(8. a)$$

$${}_bM_y = Z_y \cdot {}_bF_y \quad \dots(8. b)$$

$$R_{b2} = \frac{{}_bM}{{}_bM_y} \leq 1.0 \quad \dots(8. c)$$

(e) 終局耐力の検討

露出型柱脚の終局曲げ耐力 M_u 、終局せん断耐力 Q_u は、次式より求められる。

終局曲げ耐力 M_u ：

$N_u \geq N \geq N_u - T_u$ のとき

$$M_u = N \cdot d_t \left(\frac{N_u}{N} - 1 \right) \quad \dots(9)$$

$N_u - T_u \geq N > -T_u$ のとき

$$M_u = T_u \cdot d_{t2} + \frac{(N + T_u) \cdot D}{2} \cdot \left(1 - \frac{N - T_u}{N_u} \right) \quad \dots(10)$$

$-T_u \geq N > -2T_u$ のとき

$$M_u = (N + 2T_u) \cdot d_{t2} \quad \dots(11)$$

ここで、 N_u は基礎コンクリートの終局圧縮耐力 (N)、 d_{t2} は柱断面図心より引張側アンカーボルト断面群図心までの距離 (mm) である。

終局せん断耐力 Q_u ：

$N_u \geq N \geq N_u - T_u$ のとき

$$Q_{fu} = 0.5N \quad \dots(12. a)$$

$$Q_{su} = 2S_u \quad \dots(12. b)$$

$N_u - T_u \geq N > -T_u$ のとき

$$Q_{fu} = 0.5(N + T_u) \quad \dots(13. a)$$

$$Q_{su} = S_u \left\{ 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_u} \right)^2} \right\} \quad \dots(13. b)$$

$-T_u \geq N > -2T_u$ のとき

$$Q_{fu} = 0 \quad \dots(14. a)$$

$$Q_{su} = S_u \sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_u} \right)^2} \quad \dots(14. b)$$

ここで、 S_u は引張側アンカーボルトの終局せん断耐力 (N) である。

4. 露出型柱脚設計支援システムの構成

露出型柱脚に関して断面算定を行うシステムを構築した。これは、合理的な設計や設計解の選択を容易に行えるように複数の設計解候補を提供する。ここでは、図1に示すような角形鋼管柱に各設計応力 (N , M , Q) が作用している柱脚を設計対象としている。

4.1 設計計算処理の記述

本システムは、OS を Windows とするパーソナルコンピュータを計算機環境とし、データフロー言語 DSP[3] を用いてシステムを構築した。DSP は個々のプログラムをモジュールという単位で表現しており、それぞれで求められた設計解を集約することができる。このように階層化された仕組をもち、分割された仕事を統合することで計算処理を行うことができる。これより、プログラム開発の省力化が図れる。

手続き処理型の言語では、処理順序が明示されなければならないため、記述に労力を要する。それに対し、DSP に代表されるデータフロー言語は、処理手続き順序を気にせ

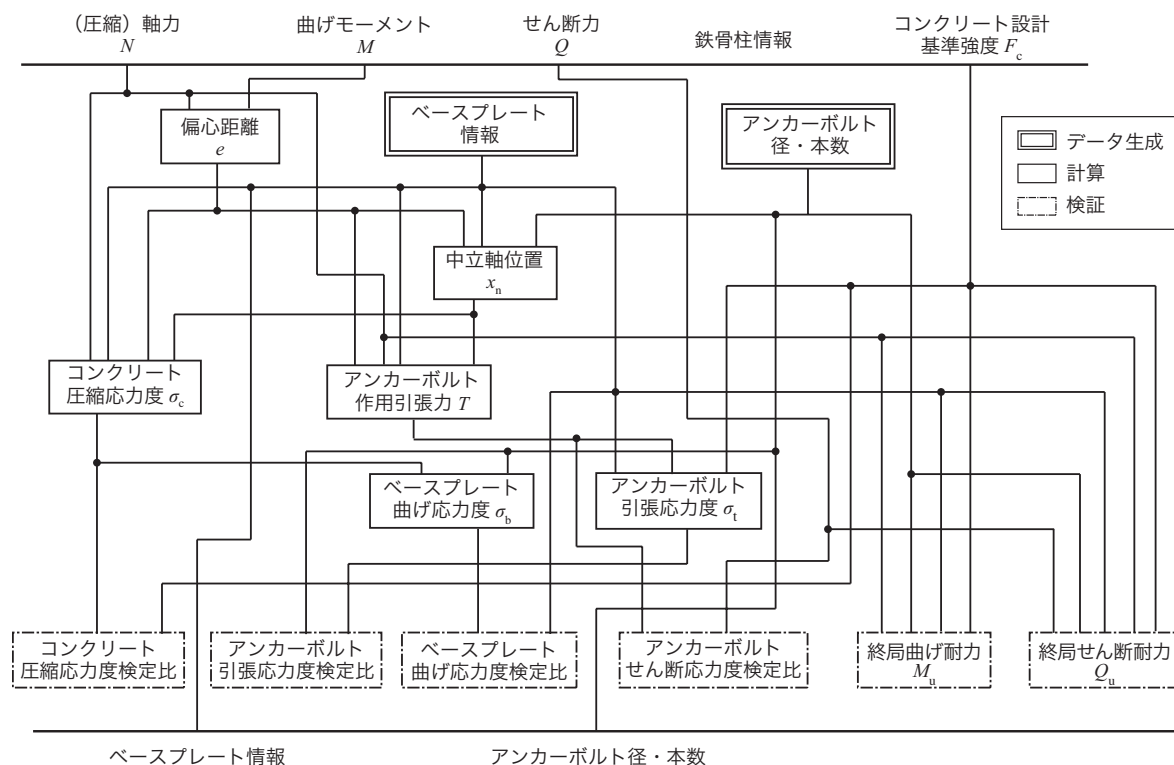


図3 データフロー図

ずに記述することを可能としており、設計者はモジュールの内容を容易に把握することができる。また、モジュールは設計規準の書法に則って記述することができるため、規準の改正に伴う改訂を容易に行うことができる。

著者等の既往の研究においてデータの透明性を唱えているが、データフロー言語によってプログラムを記述することは、プログラム書法に対応したデータの表示（インスタンス）が得られるため、利用者は容易にデータのトレースができる。これは処理およびデータの透明性を保証しており、DSPによる設計支援システムは初学者の教育において有効であると考えられる。

4.2 実装

本システムは、DSPを用いたシステムを実装した。これは設計可能空間内[4]に存在する規準を満足する複数の設計解候補を設計者に提示し、その中から設計者が最も設計目的に適している設計解の決定を促す仕組みをもつ。

図3に露出型柱脚設計のデータフロー図を示す。初学者が各設計応力、鉄骨柱情報およびコンクリート設計基準強度を入力する。さらにベースプレート厚に許容範囲を与えるようにした。これより、システムがベースプレート寸法およびベースプレート厚、アンカーボルト本数および径を自動生成することで、様々な組み合わせの設計解を検討することができる。ここで、アンカーボルト配置は図4に示

すような3種類のパターンとする。『ボルト○』の○はアンカーボルトの本数を表す。また、応力度検定比に許容範囲を与えて、設計空間内より設計可能空間の抽出を行う。設計目的に沿った解の集合を小規模範囲で表示することで解の数の爆発を防ぎ、設計解決の判断をより容易にする。

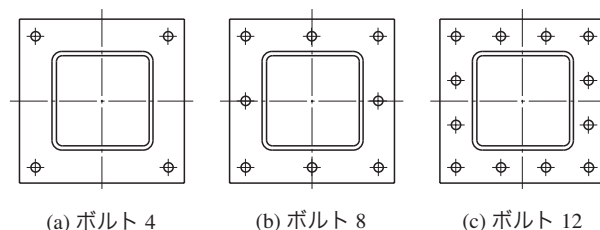


図4 アンカーボルトの配置パターン

5. 設計例と検討

構築した露出型柱脚の設計支援システムを用いた設計例を示し、設計解に対する検討を行う。また、露出型柱脚の断面算定および検討は「鋼構造接合部設計指針」、鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説[5]および「2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書」[6]に則って行う。

5.1 設計条件

露出型柱脚の設計に必要とされる入力情報を表3に示す。制約条件として、応力度検定比を0.5~1.0とした。ここで、

応力度検定比 R は、各応力度検定比の最大値とした。これらをシステムに入力することで、設計システムは、知識ベースに蓄えられているアンカーボルトおよびベースプレートの断面情報を含む情報群から規準を満たす設計解を複数個抽出する。

表3 入力情報

鉄骨柱		□ - 450×450×19	
設計応力	圧縮軸力	N (kN)	1800
	曲げモーメント	M (kNm)	850
	せん断力	Q (kN)	480
コンクリート設計基準強度		F_c (N/mm ²)	30
制約条件 (応力度検定比)		R	0.5 ~ 1.0

5.2 設計評価尺度

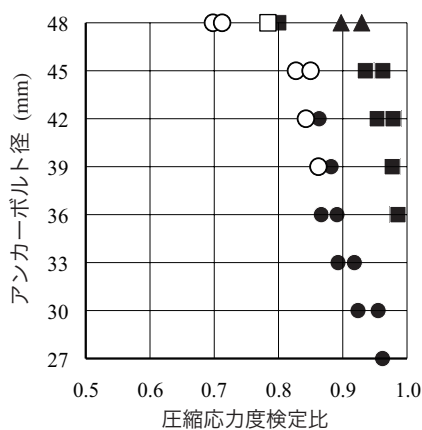
設計評価尺度は設計判断に必要なものである。設計評価尺度は、アンカーボルト、基礎コンクリートおよびベースプレートのそれぞれに作用する応力度検定比、アンカーボルト径および総重量とした。アンカーボルト径は施工性および納まりに関係し、アンカーボルト総重量はコスト面に直接的に関係する。なお、アンカーボルト総重量はアンカーボルトの必要定着長さ(径の20倍)を考慮して算定する。これらを重要な設計評価尺度とした。

なお、本報告では、露出型柱脚の力学的特徴が特に表れている結果について述べる。

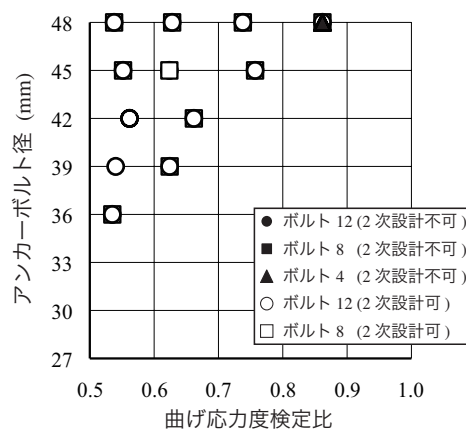
5.2.1 応力度検定比とアンカーボルト径の関係

縦軸にアンカーボルト径、横軸に応力度検定比をとったグラフを図5に示す。基礎コンクリートに作用する圧縮応力度検定比を同図(a)、引張側ベースプレートに作用する曲げ応力度検定比を同図(b)に示す。なお、引張側とは、曲げを受ける鋼管柱がベースプレートに伝える力の向きに対応する。

同図(a)では、圧縮応力度検定比が1.0付近に設計解が分布しているものが多い。したがって、露出型柱脚の設計は、



(a) 基礎コンクリート



(b) 引張側ベースプレート

図5 応力度検定比とアンカーボルト径

基礎コンクリートが設計を支配していることが分かる。

さらに、同図(a)では、アンカーボルト径が小さくなるにつれて、応力度検定比は1.0付近に集中することから、基礎コンクリートの圧縮応力度検定比はアンカーボルト径に影響する。一方、同図(b)ではアンカーボルト径が大きくなると、曲げ応力度検定比の分布が広がる。これは柱から引張を受ける側のベースプレートがアンカーボルトより先に降伏してしまうためである。したがって、一次設計において、アンカーボルト径が大き過ぎる設計は、設計不可になる要因となる。

また、保有耐力接合を満たす解は、コンクリート圧縮応力度検定比に余裕があり、アンカーボルト径は比較的大きい値となることが分かる。

5.2.2 応力度検定比とアンカーボルト総重量

縦軸にアンカーボルト総重量、横軸に応力度検定比をとったグラフを図6に示す。アンカーボルトに作用する引張応力度検定比を同図(a)、基礎コンクリートに作用する圧縮応力度検定比を同図(b)に示す。

図5中の線は図5, 7と視覚的に比較し易いように、アンカーボルト径が48mmの設計解を結んで示したものである。

同図(a), (b)では、設計解を結んだ線を含む設計解の分布が右下がりになっていることから、アンカーボルトと基礎コンクリートの応力度検定比は、アンカーボルト総重量と強い関係がある。

また、図5と同様、保有耐力接合を満たす解は、コンクリート圧縮応力度検定比に余裕があり、アンカーボルト総重量は比較的大きい値となることが分かる。

5.2.3 アンカーボルト径と重量

縦軸にアンカーボルト総重量、横軸にアンカーボルト径をとったグラフを図6に示す。

ボルト12では小径のアンカーボルトで設計が可能である。一方、ボルト4は大きな径を必要とするためアンカーボルト総重量がボルト12に比べて約2倍になるが、アン

カーボルトの本数はボルト12に比べて1/3の本数で設計が可能である。

また、保有耐力接合を満たす解は、アンカーボルト径および重量が大きい値となることが分かる。

以上の評価尺度を用いて、アンカーボルト径および総重量と各応力度検定比の関係を視覚的に把握できる。また、露出型柱脚の設計がどの設計評価項目で決定しているのか、また、保有耐力接合を満たす解はどのような解かという検

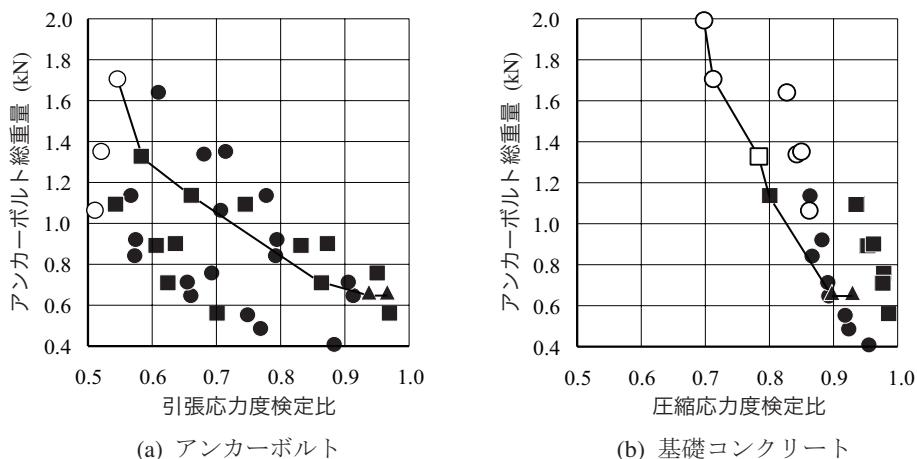


図6 応力度検定比とアンカーボルト総重量

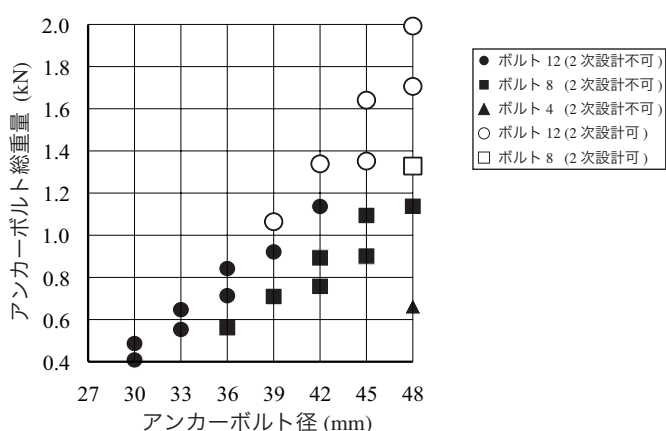


図7 アンカーボルト径と総重量

者にとって設計を困難とする露出型柱脚の設計において一度に複数解を得ることのできる設計支援システムを実装することで、設計感覚を養う有用なツールとなることを示した。

参考文献

- [1] 江口翔, 原田幸一, 山成實: 九州地区における建築構造設計技術者のコンピュータ支援設計システムに関する意識調査, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, pp.109-114, 2009.11
- [2] 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2012
- [3] 梅田政信, 長澤勲, 樋口達治, 永田良人: 設計計算のプログラム書法, 電子情報通信学会技術研究報告集, AI 91-60, pp.25-32, 1991
- [4] 原田幸一, 澤原朝美, 山成實: 初学者のための新しい概念を組込んだ鉄骨小梁のコンピュータ援用設計システム, 鋼構造論文集, 第19巻第74号, pp.1-10, 2012.6
- [5] 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2010
- [6] 国土交通省他監修: 2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2007

討ができ、初学者にとっての設計感覚を養う上で有用な判断材料となるシステムを構築することができた。

6. おわりに

ここで示した設計支援システムは、複数の設計解を取得することで設計者自身の設計判断をより明確にして解の決定を促す仕組みとなるため、初学者教育において有効な機能を有している。以下に、このシステムを利用することで初学者の学習に役立つ事柄をまとめる。

- 1) 基礎コンクリートの圧縮応力度検定比が最も厳しい値をとるので、露出型柱脚の設計は、一次設計において、基礎コンクリートの検討が設計解を決定する。
- 2) アンカーボルト径が大き過ぎる設計は、一次設計において、設計不可にする要因である。
- 3) 保有耐力接合を満たす解は、コンクリート圧縮応力度検定比に余裕があり、アンカーボルト径および総重量が比較的大きなものとなる。

結論として、ここで紹介したシステムは、構造設計初学