

# エネルギーの釣合に基づくノンコンプレッションブレースの耐震設計法

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*・加藤 孝昌\*\*

(平成19年10月31日受理)

## Earthquake-Resistance Design Method for Non-Compression Brace on Energy Balance

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Takamasa KATO

(Received Oct. 31, 2007)

### Abstract

The authors have proposed a non-compression brace converting a conventional brace by means of a wedge device. The advantages of the braces are the following: 1) No buckling phenomenon happens. 2) No slip phenomenon due to plastic deformation of the brace happens. 3) The restoring force characteristics show spindle-shaped curves.

The non-compression braces are examined on the basis of the energy method.

The following conclusions are obtained from viewpoint of the energy method:

- 1) The non-compression brace is applicable as an energy absorption damper.
- 2) The energy absorption capacity of the brace is estimated easily.
- 3) An earthquake-proof repair method by the non-compression braces can be done very easily.

**Key Words:** wedge device, energy-method, earthquake-resistance design method, restoring force characteristics

### 1. はじめに

現在、ブレースは鋼構造の耐震補強要素として頻繁に採用されている。しかしながら、在来型引張ブレースは圧縮力を受けると座屈を起こし、引張力を受けるとスリップ現象を生じるという2つの問題点を有している。

これらの問題点を克服するために、著者等はブレース端部接合部に楔デバイスを設置するのみで、圧縮力を作用させないことによりブレースは座屈を起こさず、引張力により塑性伸びを生じてスリップ現象を起こさない性状を持つノンコンプレッションブレースを提案している<sup>1)~4)</sup>。

このブレースは次のような利点を有している。

- 1) 圧縮力を受けないため、曲げ座屈や局部座屈を起こさない。

- 2) 引張力による塑性伸びを生じてスリップ現象を生じない。

- 3) 対にして使用すれば、紡錘型復元力特性を示す。

- 4) 在来型ブレース端部接合部に楔デバイスを設置するのみで、ノンコンプレッションブレースに容易に変換できる。

しかしながら、楔デバイスを用いて補強を行っても降伏耐力や弾性剛性については、補強前と比較して変化しないため、許容応力度等計算法および保有水平耐力計算法においては、ノンコンプレッションブレースで補強することによる優位性を明確に主張できなかった。

一方、平成17年6月28日に公布され、同年9月1日より施行された「エネルギー法」が、限界耐力計算法と同等以上の建築物の耐震安全性を確かめることができる構造計算

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学工学研究科建設工学専攻

表1 試験体素材特性

	E (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y/\sigma_u$ (%)	$\epsilon_{st}$ (%)	主要寸法 (mm)
プレート	205	303	427	71.0	2.08	$\phi_g = 10.8, A_g = 91.6$ (mm <sup>2</sup> )
柱梁架構	205	292	408	71.6	2.71	柱:H-100x100x6x8, 梁:H-150x75x5x7

E:ヤング係数  $\sigma_y$ :降伏応力度  $\sigma_u$ :引張強さ

$\epsilon_{st}$ :ひずみ硬化開始ひずみ度  $\phi_g$ :軸部直径  $A_g$ :軸部断面積

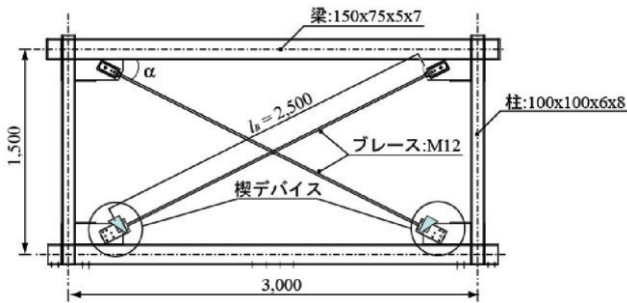


図1 試験体概要図

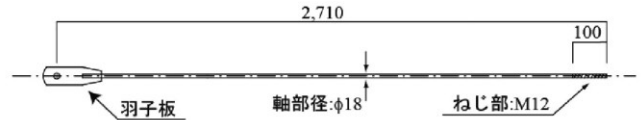


図2 プレース詳細図

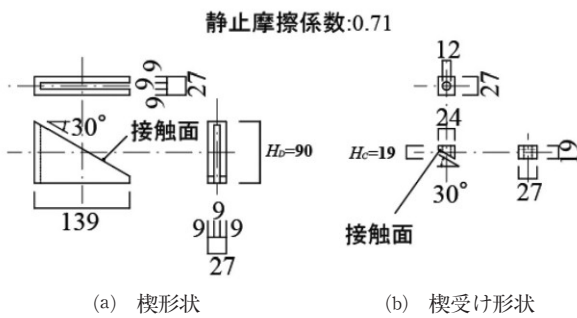


図3 楔デバイス

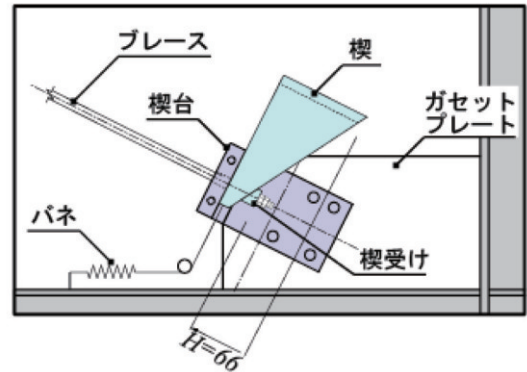


図4 楔デバイス設置図

法として適用可能となった<sup>5),6)</sup>。「エネルギー法」による建築物の耐震性能検証法は、各層において保有エネルギー吸収量が必要エネルギー吸収量を超過していることを確認することである。

本論文においては、ノンコンプレッションプレースを、「エネルギー法」の観点から、耐震性能を検討し、耐震設計法の考えについて示す。その方法としては、実験を行い、得られた復元力特性を示し、これを用いて繰返し水平載荷下のエネルギー吸収性能を検討するものとする。

## 2. 実験

ノンコンプレッションプレース付き鉄骨架構の正負交番繰返し載荷実験を行い、ノンコンプレッションプレースの性能確認を行う。

### 2.1 試験体概要

図1, 2にノンコンプレッションプレースを設置した試験体の設置状況および試験体形状、プレース形状を示す。表1に試験体の素材特性を示す。

試験体は、1層1スパンの柱・梁ラーメン架構に、ノン

コンプレッションプレースをX型に配置した試験体を用意する。

柱にはH-100x100x6x8(SS400材)、梁にはH-150x75x5x7(SS400材)を使用し、通し柱型となるように柱と梁を完全溶込み溶接接合する。

また、プレース取付け用のガセットプレート:PL-9を、柱と梁に全周隅肉溶接する。プレース材には、軸部の十分な塑性伸び能力を確保できる転造ねじアンカーボルトを使用する<sup>7)</sup>。

### 2.2 ノンコンプレッションプレース

図3~5に楔デバイス形状、楔デバイス設置状況およびノンコンプレッションプレースの機能を示す。楔デバイスは、楔、楔受け、楔台およびバネから構成されており、片面摩擦で貫入角度30度のものを用いる。設置方法は、楔と楔受けをナットと楔台との間に設置するのみであり、非常に簡便な方法となっている。

楔および楔受けは、プレースから伝達される圧縮力によって滑らないようにするため、接触面には発錆処理を施

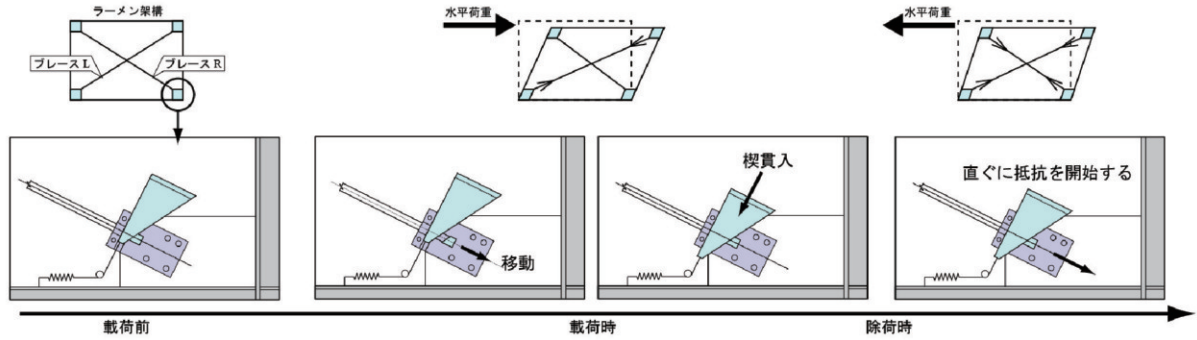


図5 楔デバイス作動概念

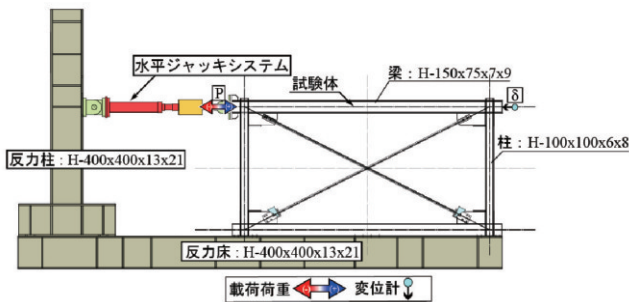


図6 載荷装置概要

し、静止摩擦係数を増大させる必要がある。

ノンコンプレッションプレースは、X型にプレースを配置し、プレース下端部に楔デバイスを設置する。

在来型のプレース付ラメン架構においては、地震外力により、図5のようにラメン架構が変形すると、左側のプレース(プレースL)は伸び変形を起こし、一方、右側のプレース(プレースR)は縮み変形を生じる。そのため、引張側プレースは塑性伸びを生じてスリップ現象の原因となり、圧縮側プレースは座屈を生じる。

ノンコンプレッションプレースにおいては、プレースLは引張抵抗するが、プレースRでは端部が移動して圧縮力は作用しない。また、端部が移動することにより生じた間隙に、楔デバイスが貫入して間隙を埋める。そのため、圧縮力は作用せず、更に、いかなる変形下においても伸び変形が作用すると直ぐに抵抗を開始する。尚、バネは楔を水平移動させる程度のバネ定数を有していれば良い。

以上の機能を地震時に発揮させるために、楔デバイスの寸法は、以下の条件を満たすように設計するのが望ましい。

- 1) 楔受けは、使用するボルトの座金より一回り大きい平面を有する。
- 2) 図3(b)に示す $t_c$ の高さは、使用するボルトの座金の厚さ以上を有する。
- 3) 接触面の静止摩擦係数により、力の平衡を十分に保てる楔貫入角度： $\theta_b$ を有する。
- 4) 楔の貫入限界高さ： $H_{lim}$ は、楔の高さ： $H_D$ から、楔受

け高さ： $H_C$ を差し引いた高さとなる ( $H_{lim}=H_D-H_C$ )。ボルトの材料特性から算定した塑性伸び量、あるいは、必要なエネルギー吸収量から算定した塑性伸び量より、 $H_{lim}$ を決定する。

### 3. 実験概要と結果

図6に、実験で用いる載荷装置を示す。鉄骨架構の下梁を反力フレームに固定し、反力柱の柱頭部にピンを介して接合した油圧ジャッキにより水平載荷を行う。載荷は、柱頭部水平変位： $\delta$ を制御値とした、正負交番漸増繰返し載荷とする。

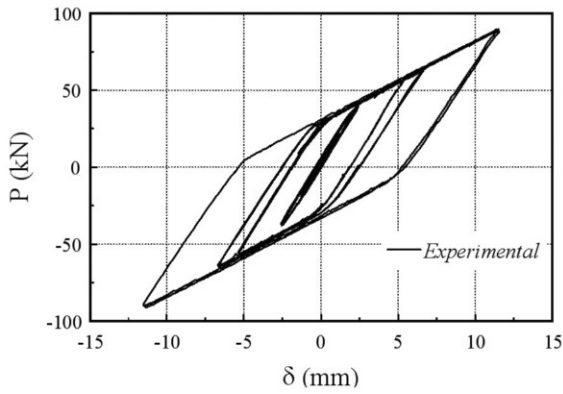
変位計測は、柱頭部水平変位： $\delta$ を計測する。荷重計測は、ジャッキ先端に設置したロードセルにより水平荷重： $P$ を計測する。尚、柱および梁は終始弾性範囲に留まり、プレースのみが塑性変形を被る。

また、初期載荷時に楔が貫入して弾性剛性が変化することを防ぐために、プレースには予め降伏軸力の50%を初期張力として導入している。

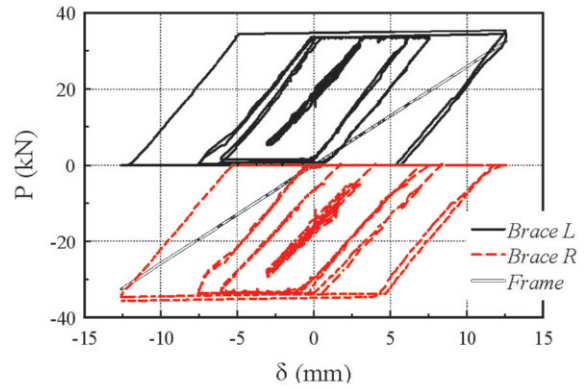
図7にノンコンプレッションプレース付ラメン架構の実験結果を、図8に、実験結果より求めた復元力特性モデルを示す。図7(a)には、水平荷重： $P$ と水平変位： $\delta$ の関係を示す。図7(b)には、せん断力： $Q$ と水平変位： $\delta$ の関係を示す。図7に示す荷重-変形関係は、紡錘型の復元力特性を示している。これは、ノンコンプレッションプレースは座屈を起こさないことと、楔が貫入することによりプレースが引張力にすぐ抵抗できるため、スリップ現象を解消できることに基因する。図8に示すように、水平力を架構と左右のプレースが負担するせん断力に分解した場合には、架構は弾性状態であり、プレースのみが塑性化してエネルギーを吸収している。また、プレースに予め初期張力を導入しておくことで、プレース2本分の抵抗剛性を初期剛性とできる。

### 4. エネルギー法

「エネルギー法」は次の4つの定理に基づく耐震設計法と考えることできる。

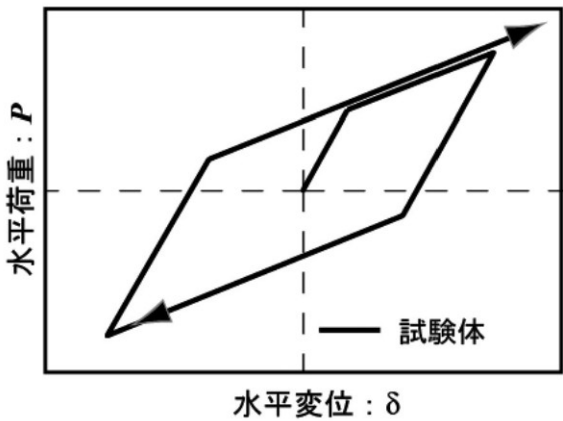


(a) 水平荷重－水平変位関係

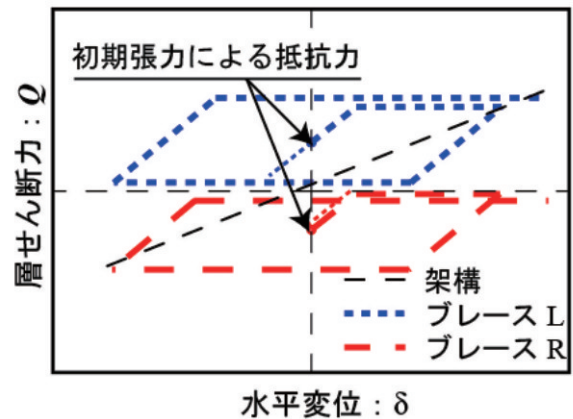


(b) 各種抵抗力－水平変位関係

図7 ノンコンプレッションブレースの実験結果



(a) 水平荷重－水平変位関係



(b) 各種抵抗力－水平変位関係

図8 ノンコンプレッションブレースの復元力特性モデル

- 1) 1つの地震動により構造物にもたらされる総入力エネルギーは、構造物の総質量および1次固有周期から求められる。
- 2) 地震による総入力エネルギーは、弾性振動エネルギー、累積塑性エネルギーおよび減衰により消費されるエネルギーの総和に等しい。
- 3) 各層の累積塑性エネルギー（必要エネルギー吸収量）は、構造物全体の累積塑性エネルギーを損傷分布則に基づき配分することにより求められる。
- 4) 各層の累積塑性変形性能（保有エネルギー吸収量）は、各層の各要素累積塑性変形性能を累加して求められる。

即ち、「エネルギー法」による構造物の耐震性能検証は、各層毎に、保有エネルギー吸収量が必要エネルギー吸収量よりも大きくなることを確認することである。

## 5. ノンコンプレッションブレースの性能評価法

### 5.1 性能評価

「エネルギー法」では、ダンパーの定義は、完全弾塑性型復元力特性を有し、鉛直荷重を支えない構造としている。

ノンコンプレッションブレースはX型とすることで、図7に示すように、完全弾塑性型復元力特性を有し、更に、鉛直荷重を負担するような形式ではない。このため、ノンコンプレッションブレースを、ダンパーとして取扱うことができる。この場合、以下のようにしてダンパー同様の方法で性能を決定する。

- ・ダンパーに配分される履歴吸収エネルギー、つまりダンパーの必要履歴吸収エネルギーには、 $i$ 層に分布されるエネルギー値をダンパーの保有水平耐力と $i$ 層の保有水平耐力の比で乗じた値に加え、稀に発生する地震に対するダンパーの履歴吸収エネルギー-ESdpiと、ごく稀に発生する地震に対するダンパーの履歴吸収エネルギーが含まれる。
- ・保有累積塑性変形倍率が、必要累積塑性変形倍率を上回る必要がある。

ノンコンプレッションブレースは引張にのみ抵抗するので、ブレース材の素材特性が得られれば、保有エネルギー吸収量は容易に算出できる。

降伏耐力・弾性剛性はブレース材の大きさを変えることで調整でき、エネルギー吸収量はブレースに保証されてい



る塑性変形量の範囲内であれば、楔デバイスの寸法により調整できるため、非常に容易に設計を行なえる。

また、ダンパーとしての保有累積塑性変形率の換算には、初期剛性、降伏耐力、全塑性耐力、最大耐力、限界変形(最大変形)、累積塑性変形を用いる。ノンコンプレッションブレースでは、これらの各パラメータを以下の様に設定できる。

- ・初期剛性は、図7に示すように、初期張力を予め与えておくことで、ブレース2本分の抵抗剛性を初期剛性とできる。
- ・転造ねじアンカーボルトを使用することにより、軸部の塑性伸び能力が十分に確保でき、降伏比が低く降伏棚が得られることより、降伏耐力、全塑性耐力、最大耐力をほぼ一定値と考える。また、その耐力は、降伏応力度と軸部断面積を乗じた値となる。
- ・限界変形は、楔貫入限界を迎える時のブレース塑性伸び量とする。

## 5.2 保有エネルギー吸収量

地震外力によりブレースが伸ばされ、楔が貫入限界に達すると、楔デバイスが機能せず、スリップ現象を示すことになる。このため、ノンコンプレッションブレースの保有エネルギー吸収量は、楔の貫入限界によって決定するものとする。

いかなる載荷下においても、ノンコンプレッションブレースは単調に伸ばされるのみである。このため、ブレースが完全弾塑性型の素材特性を有するとすれば、X型に配置したノンコンプレッションブレースが保有する保有エネルギー吸収量： ${}_B E_{pu}$  は、以下の式により求められる。

$${}_B E_{pu} = {}_B N \cdot H_{lim} \cdot {}_B A \cdot {}_B \sigma_y \quad \dots (1)$$

ここに、 ${}_B N$ ：配置されているブレースの本数、 ${}_B A$ ：ブレースの断面積、 ${}_B \sigma_y$ ：ブレースの降伏点である。

地震により、ブレースに大きな塑性変形が起こった場合は、地震後に、ブレース材を交換するのみで補修作業は完了する。

尚、ブレースには塑性変形が蓄積されるため、十分な伸び能力のある転造ねじ付ブレースを使用する必要がある<sup>7)</sup>。

## 5.3 ノンコンプレッションブレースの設計について

ノンコンプレッションブレースの設計の考え方を以下に示す。

- 1) X型に配置し、耐力はブレース1本分の降伏軸力の水平成分、水平剛性はブレース2本分の軸弾性剛性の水

平成分として考える。これらより、一般的なブレースと同様の考え方により、必要な剛性や保有水平耐力を得るための、ブレース断面積を決定する。

- 2) ノンコンプレッションブレースは、ダンパーとして使用できるため、ダンパーに必要な保有エネルギー吸収量、ブレースの数、断面積、降伏応力度から、式(1)を用いて、楔貫入限界高さ  $H_{lim}$  を算定する。

## 5.4 ノンコンプレッションブレース付きラーメン架構の耐震設計における利点

ノンコンプレッションブレース付きラーメン架構の利点は以下のようなものとなる。

- ・ノンコンプレッションブレースの貫入量は、ブレースの塑性伸び量とほぼ一致するため、ブレースの微量を設定することで、容易に楔貫入限界量を設定できる。つまり、使用限界量を容易に設定でき、エネルギー量の調整が簡単に行える。
- ・ノンコンプレッションブレースは、引張軸力にのみ抵抗する抵抗機構を有しているため、図2に示すような細長い材を使用しても、スリップ現象・座屈現象等を起こすことはない。このため、従来型の引張ブレースと同等の断面積・細長比をもって、安定した履歴性状を示す。
- ・ノンコンプレッションブレースは、楔貫入限界を迎えるまで緩まないため、中小地震時においても、エネルギーダンパーとして使用することが可能である。また、大地震時においても、同様のことが言える。
- ・復元力特性が紡錘型を示すため、エネルギー吸収効率に優れている。「エネルギー法」では、平均塑性率  $m$  の判定に、従来型が示すスリップ型復元力特性と、ノンスリップ型が示す完全弾塑性型復元力特性が検討されており、完全弾塑性型であればスリップ型と比較して半分の値で良いとされている。つまり、構造物としての塑性変形を抑えることが明らかとされている。
- ・ノンコンプレッションブレースは、転造ねじボルトを使用しているため、設置・解体が非常に簡便である。このため、ブレースが十分に塑性伸び変形をして、ブレース交換期を迎えても、その補修作業は手間が掛からない。また、ブレース材のみの交換で良いので、特殊な材や工程を得ることなく、コスト的に従来型と同等で、管理・維持費を抑えることができる。

## 6. まとめ

ノンコンプレッションブレースを「エネルギー法」の観点から、検討を行い、その性能評価および設計法について考察した結果を以下に示す。

- 1) ノンコンプレッションブレースの復元力特性は紡錘型復

元力特性となり、「エネルギー法」に記されているダンパーとして使用できる。

- 2) ブレース材の素材特性が分かれば、降伏耐力はブレース断面性能により、保有エネルギー吸収量は、本論文で示す(1)式により、容易に調整ができる。
- 3) 地震後における、ノンコンプレッションブレースの耐震補修・改修工法が非常に容易に行える。

## 謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者 高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施されました。

また、試験体作製にあたりフルサト工業株式会社には、転造ねじアンカーボルトを提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 高松隆夫, 玉井宏章, 小待明宏: ノンコンプレッションブレースの履歴性状とエネルギー吸収性能について, 鋼構造年次論文報告集, 第 11 巻, pp 129-136, 2003.11.
- 2) 玉井宏章, 高松隆夫, 松尾彰: ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上について, 日本建築学会構造系論文集, 第 595 号, pp 131-138, 2005.9.
- 3) 高松隆夫, 玉井宏章, 加藤孝昌, 小畑寛行: ノンコンプレッションブレースで補強した鋼構造骨組の復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp 429-436, 2006.11.
- 4) 高松隆夫, 玉井宏章, 岡部政和, 古賀稔章: ノンコンプレッションブレース付き鋼構造骨組の振動台実験, 鋼構造年次論文報告集, 第 14 巻, pp 349-356, 2006.11.
- 5) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999.11.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 他: 「エネルギーの釣合に基づく耐震設計法の技術基準解説及び計算例とその解説」, 日本建築センター, 2005.10.
- 7) (株)日本鋼構造協会: 建築構造用転造ねじアンカーボルト・ナット・座金のセット, JISII 13-2000, 2000.6.