

# 基礎ボルトの耐震設計

株式会社 プラント耐震設計システムズ

池 田 雅 俊

## 1. まえがき

わかっているようでわからないものが定着部ともいわれる基礎ボルトとその周辺のコンクリートの損傷である。実際の設計荷重よりもはるかに低いと思われる条件で被害を受けている例が意外に多く見られる。基礎ボルト単体としての強度についても、計算と異なる例があったり、施工の問題と思われるものがあったりする。定着部は、大地と構造物をつなぐために耐震上重要な部材である。定着部が上手く機能しなければ、いくら頑丈な基礎を構築しても意味がないといえる。構造物の壁や柱などには、地震の際に水平や垂直方向に強い力が働く。その結果、建物と大地をつなぐ基礎ボルトには大きな引抜力がかかる。基礎コンクリートから基礎ボルトが引抜けたり、破断して建物の倒壊にいたる可能性もある。

今回は定着部の中でも特に重要な基礎ボルトについて説明する。

## 2. 基礎ボルトの役目

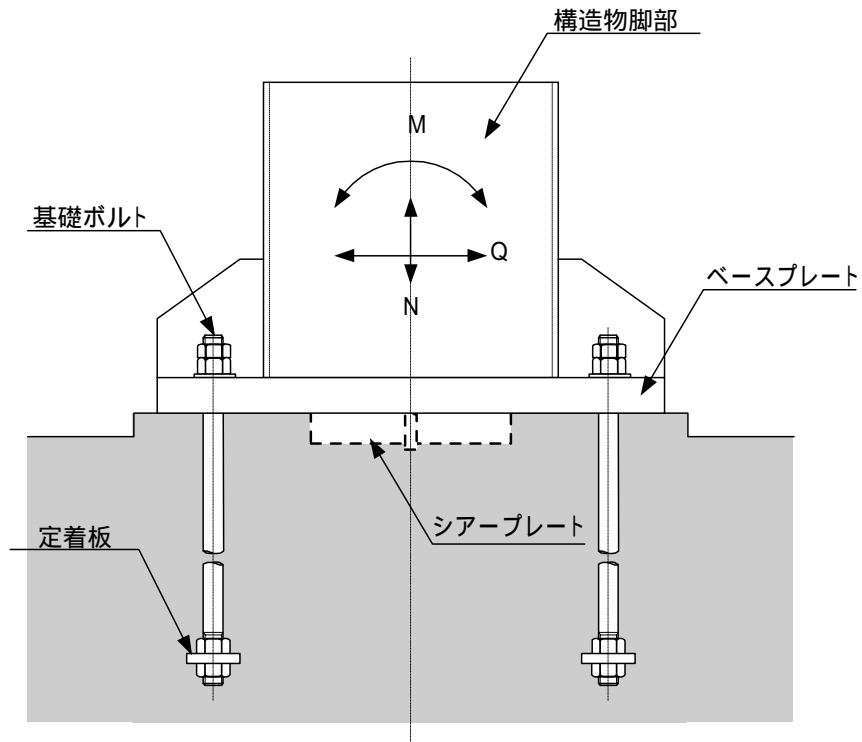
地震時の揺れに際して基礎ボルトは、塔槽類や架構などの上部構造物に生じる地震力に耐え基礎に緊着させ、その倒壊や損傷を避けている。すなわち、基礎ボルトは上部構造物に生じる地震力を負荷し上部構造物を基礎に固定する役目を有している。基礎ボルトの損傷は直接、上部構造物の倒壊につながり、耐震設計の上で最も重要な部材であるといえる。

基礎ボルトは、もう一つの重要な役割を持っている。地震による地盤の揺れは基礎ボルトを通じて上部構造物に入力される。基礎ボルトに十分な塑性変形能力（「靱性」という。）を持たせれば、設計地震動（レベル1）を超える大きな地震動（レベル2地震動又はそれ以上）に対しても、基礎ボルトがその塑性変形により地震動のエネルギーを吸収して上部構造物へ入力するエネルギーを減らし、上部構造に生じる地震力を低減させ、構造物の決定的な損壊を防止することができるのである。

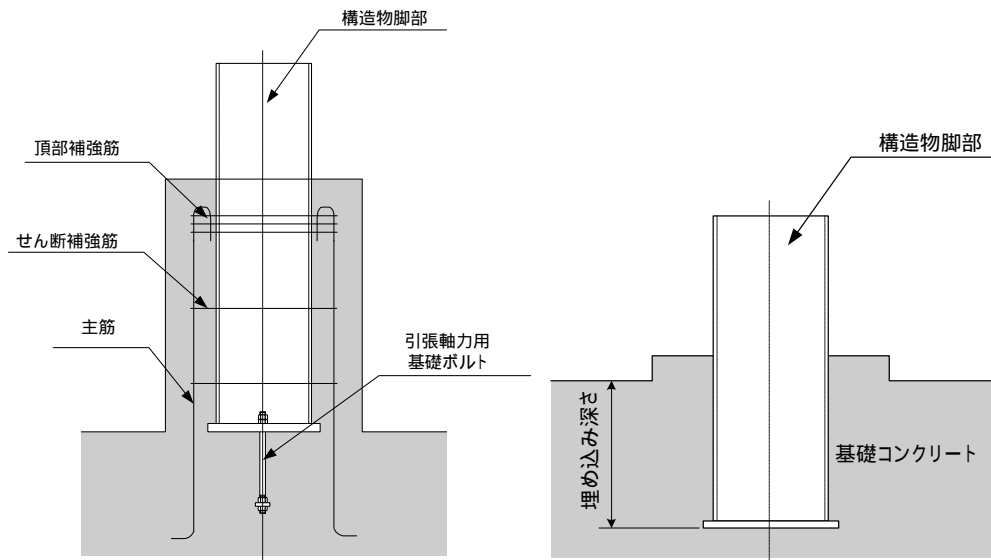
基礎ボルトは、通常上部構造物の脚部（ベースプレート及び脚部補強用のガセットプレート、コンプレッションリング、その他スティフナーなど）に接続され、基礎部のコンクリートに結合して付着されている。これらの部品と基礎ボルトを総称して基礎定着部と称している。定着部を地震力の伝達システムとして注意深く設計することにより、上述のように構造物に大地震にも強い性能を持たせることができる。<sup>文献1)</sup>

### 2.1. 基礎定着部はどのような構造があるか

構造物の基礎との定着部は一般に大きく分けて図1に示すように(a)露出形式定着部、(b)根巻型定着部、(c)埋込型定着部に分類することができるが、プラント設備の塔槽類等の基礎定着部は通常(a)の形式が採用されているので、以下には露出形式定着部について述べることにする。



(a) 露出形式定着部



(b) 根巻型定着部

(c) 埋込型定着部

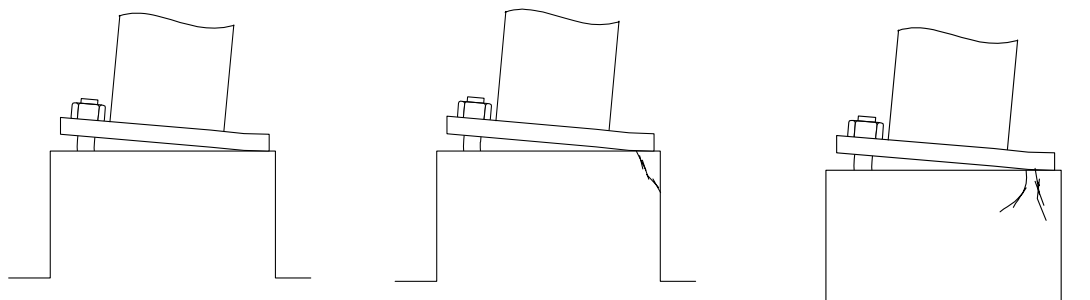
図 1 基礎定着部の分類

## 2.2. 基礎定着部はどこがどのように損傷するか

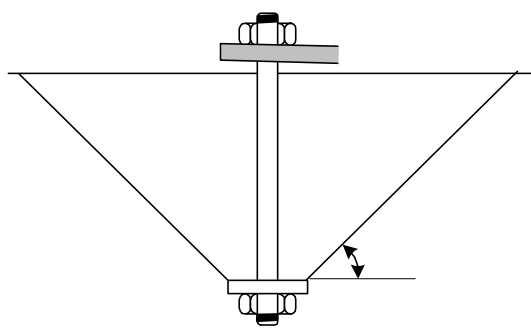
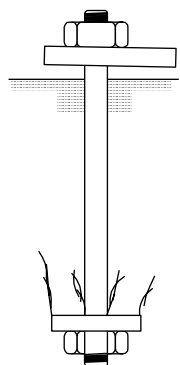
基礎の定着部には塔槽類、架構等の上部構造物より水平地震力  $Q$ 、鉛直力  $N$  及び転倒モー

ーメント  $M$  が作用する。これらの地震荷重は、定着部すなわち基礎ボルトと上部構造物との連結部（ベースプレートと関連部品）、基礎ボルト及び基礎コンクリートとの接続部に伝達される。この力により定着部が損傷する。夫々の部材は適切な耐震性能を有しなければならない。

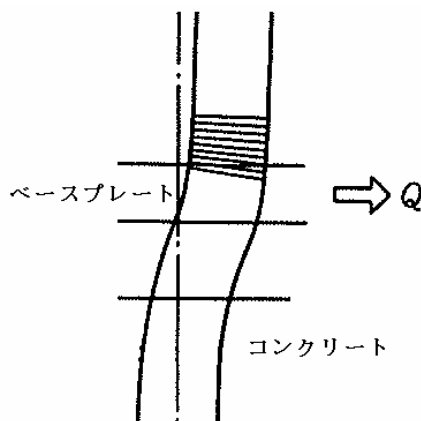
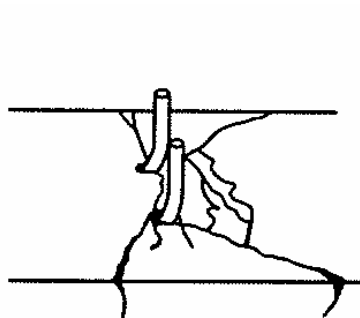
ここでは、水平地震力  $Q$ 、鉛直力  $N$  及び転倒モーメント  $M$  による、基礎ボルト及びその周辺コンクリートの損傷モードを図に示す。



- (a) 基礎ボルトの降伏とベースプレートの浮上がり (b) 立ち上げ部周辺コンクリートの剥落 (c) コンクリート面圧による圧壊・割壊



- (d) 基礎ボルト下端部の定着不十分によるコンクリート圧壊及びこれによる基礎ボルトの抜け出し (e) 基礎ボルト周辺のコンクリートのコーン状破壊



- (f) 地震水平力  $Q$  により基礎ボルト周辺のコンクリートが圧壊

図 2 基礎定着部の損傷モード

## 2.3. 定着部の耐力

図 2 による基礎定着部の損傷モードに対して夫々定着部の耐力等を検討して定着部全体で構造物の靱性を向上させるのが好ましい。

このような定着部の耐力を確保するために、下記のような項目に対する検討が必要である。

- 基礎ボルト引張り降伏耐力の検討
- 基礎ボルトせん断破壊又はベースプレート強度の検討
- 基礎コンクリートの圧縮応力度の検討
- 基礎コンクリートの剥離の検討
- コンクリートのコーン状破壊の検討
- ベースプレートの検討(板厚の算定も可能)
- リブプレート等の脚部補強部材の強度の検討

これらの項目に対する、検討方法は、文献 1) ~ 5) に示すような各種基準で規定されている。

## 2.4. エネルギー吸収能力

地震時に構造物が大きな靱性(粘り強さ)を発揮するためには、基礎ボルト自体が破断するまでに、十分な塑性変形能力を持つことが要求される。このために降伏点や降伏比に関する配慮が必要となる。

JIS G 3138(建築構造用圧延棒鋼)SNR 鋼を用いた基礎ボルトを使用する。このため切削ねじには J I S の S N R 鋼よりさらに降伏比を低くした材料を用いる。

露出形式定着部の大地震時における必要な回転角は 0.03 rad 程度とされており<sup>文献 1)</sup>、基礎ボルトの塑性変形のみによってこの回転量を確保すると仮定すれば、定着長さ 20d で 3% の一様伸びに対応する塑性変形があれば必要な靱性は確保できる。<sup>文献 6,7)</sup>

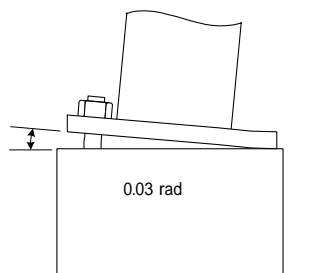


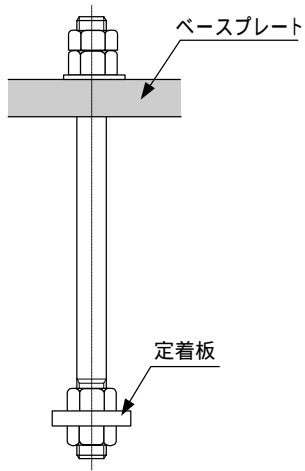
図 3 基礎定着部の回転角

## 3. 基礎ボルト

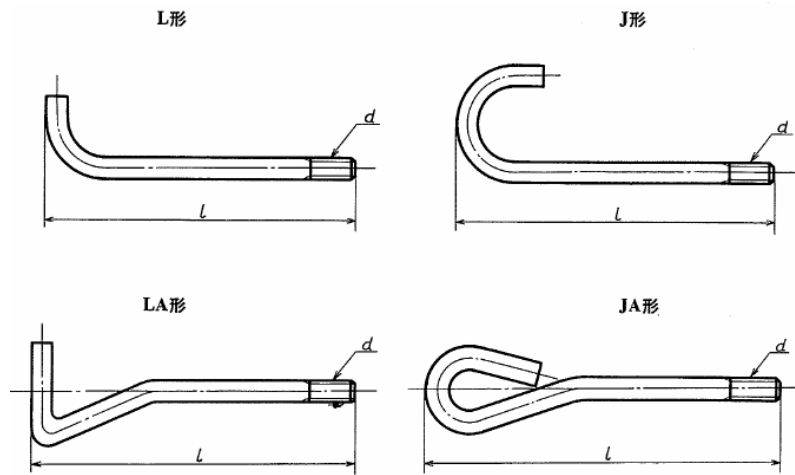
### 3.1. 基礎ボルトの種類

基礎ボルトは、用途や要求耐震性能に応じて、図 4 に示すような種類がある。大きく分けて、(a)基礎ボルトの基本形、(b) JIS B1178 に規定する一般用基礎ボルト及び(c)アト打基礎ボルトがある。

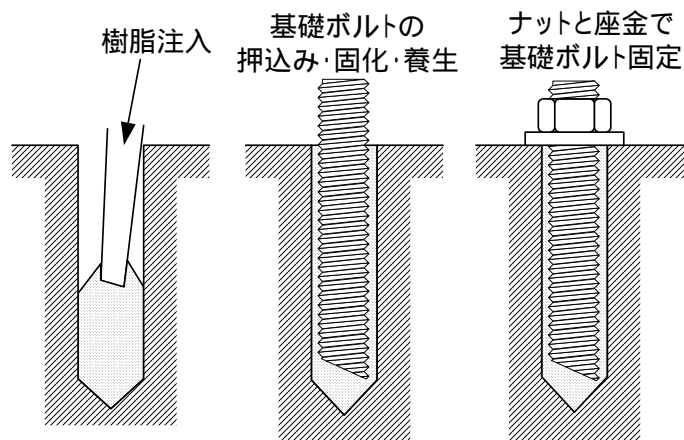
(a)の種類的基础ボルトは、構造物の終局強度設計に対応する。ボルトに塑性変形能力をもたせて上部構造物をレベル 2 地震に対しても安全性の確保を期待するために使用する。コンクリートと基礎ボルトの定着は定着板を通して行われる。基礎ボルトの材料管理、耐力管理、塑性変形能力管理等が必要であり、バランスの取れた設計考慮が必要であるが、大型装置や重要な高い構造物は原則的にこの種類的基础ボルトが利用することになる。



(a) 基礎ボルト基本形



(b) 基礎ボルト ( JIS B 1178:1994 )



(c) アト打基礎ボルト

## 図 4 基礎ボルトの種類

(b)の種類ボルトは、許容応力設計に対応したものである。従来から用いられてきたものである。基礎ボルトに耐力を保証するものである。この場合、コンクリートと基礎ボルトとの定着はコンクリート、基礎ボルト間の付着力による。主として小構造物などに使用される。

(c)の種類のアト打基礎ボルトは、通称ケミカルアンカー等と称されているものであり、既存設備の改造等で使用されるものである。許容応力設計に対応したものであり、重要な設備や大型設備には使用されない。経年変化、施行管理等に注意が必要である。

以下には、基礎ボルトの基本形について説明する。

### 3.2. 基礎ボルトの性能

基礎ボルトでは、今まで一般的にはSS材という鋼材が利用されていたが、兵庫県南部地震において、ボルトねじ部分で破断し、建物が倒壊する事例が見られた。基礎ボルトには、ねじ部の破断に先立って軸部降伏させ基礎ボルトに靱性を持たせることが重要であると認識され、建築用圧延鋼 SNR 材を使用することが推奨されている。SNR 材はアンカーボルト、ターンバックルボルト・ピンなどに用いられる棒鋼専用の鋼材として制定された。SS 材に比べて寸法精度や伸び能力が優れている。

地震エネルギーの吸収はボルト軸部での塑性変形により行なわれる。軸部で地震力を吸収する前にねじ部で破断してしまうと、基礎ボルトの靱性を確保できずに建物の倒壊につながる。

上部構造物と基礎ボルトを締結する際の締結部品として使用するナットや座金についても強度管理をした部品を使用し、ナットが弱すぎて抜けてしまうことや、座金に変形してベースプレートから抜けるというようなことのないように設計されねばならない。<sup>文献 6,7)</sup>

### 3.3. 基礎ボルトの材料と塑性変形能力

これまで構造用鋼材は、一番手ごろな鋼材として一般構造用鋼である S S 鋼が使用されてきたが、1994年には鋼板、鋼帯、平鋼、形鋼を対象とした建築構造用熱間圧延鋼材 SN 鋼 (JIS G 3136) が制定され、1996年には丸鋼、角鋼、パーインコイルを対象とした建築構造用圧延棒鋼 SNR 鋼 (JIS G 3138) が制定された。SN 鋼と SNR 鋼は、鋼材の成分や性能についてはほぼ同一のものである。

SN 鋼は、従来の地震時発生応力を降伏点以内に留める許容応力法による設計法から、鋼材が降伏点を越えて最大強さに達するまでの塑性変形能力を活用して地震入力エネルギーを吸収させ構造物の耐震安全性を確保する終局強度設計法に変わったことに応じて、新しく規定された鋼材である。構造用として求められている強度 (降伏応力) と共に降伏後の変形能力などの特性が強化された鋼材で、建築構造用の鋼材としては従来の SS 鋼、SM 鋼の上位鋼材になる。なお、SN は、New Structure の頭文字、SNR の R は Round Bar を表している。

SN 鋼・SNR 鋼の引張強度は、従来の S S 鋼とは同様に、 $400\text{ N/mm}^2$  と  $490\text{ N/mm}^2$  の 2 種類である。

SN 鋼は A 種、B 種、C 種及び SNR 鋼は A 種、B 種が規定されている。溶接性の保証をねらっている SM 鋼の A、B、C 種の意味は「シャルピー吸収エネルギーの規定値の違い」を表しているが、SN 及び SNR 鋼で A、B、C の意味は「使用部位の違い」を表し、A 種は溶接しない補助部材用で弾性範囲で使用する。B 種は主要構造部材用として塑性変

形性能と溶接性の確保を意図した。C種はさらに板厚方向の集中応力に対する性能保持が必要な部材用となっている。

### 3.4. 転造ねじと切削ねじ

転造ねじの基礎ボルトでは、軸部断面積はねじ部有効断面積に近いので、ねじ部と軸部がほぼ同時に降伏する。

また、転造ねじは塑性加工の影響で、鍛流線 (fiber flow) がねじ山の形に沿って流れ、谷底部分が特に緻密になりねじの谷の硬度が上昇する。これによってねじ部と軸部との強度における差が極めて小さくなり、転造ねじ基礎ボルトでは軸部降伏後耐力上昇が可能で、大きな伸び性能を有する。

切削ねじの基礎ボルトでは、断面の小さいねじ部が降伏し、ねじ部の歪硬化により応力上昇して軸部降伏耐力に達した後に軸部が塑性変形する。

100mm 程度までのボルト径を想定し、加工実績や設備能力を考慮すると M16～M48 までは転造ねじとして、M24～M100 のサイズは切削ねじが使われている。文献 6,7)

鋼材の「降伏点」を「引張強さ」で割った値 (降伏点 / 引張強さ) を「降伏比」という。その意味は引張強さの何%の応力で降伏 (塑性伸び) するかを表している。即ち降伏比が低いほど鋼材の降伏後の塑性変形能力の上昇が大きくなる。建築構造用の基礎ボルトは地震時の大きな塑性歪を吸収し、ボルト降伏後の伸びや耐力を保證するために降伏比を低くする。基礎ボルトに靱性を持たせるためには、降伏比が 0.7～0.75 以下であることが必要であるといわれている。

降伏比の規定のない材料で製作した基礎ボルトは軸部が塑性変形する前に、ねじ部破断をおこす可能性が大きい。ねじ部の破断に先だてて軸部全体の降伏を先行させ、基礎ボルトとして必要な塑性変形を確保するためには、下記の条件が要求される。

$$\frac{\text{ねじ部の有効断面積}}{\text{軸部の断面積}} > \text{降伏比}$$

切削ねじではこの条件を満たすために細目ねじにすると、降伏比を 75% 以下にすることができる。文献 7)

## 4. さいごに

耐震設計は巨大地震に対しても安全性を確保するために構造物に粘り持たせることが重要である。粘りとは、地震に際して構造物が降伏した後も塑性変形して構造として安定性を失わず地震のエネルギーを吸収する性能をいう。基礎ボルトに塑性変形能力を持たせると、上部構造に地震エネルギーが入力されないため、基礎ボルトは地震に対して構造物の粘りを確保するために最重要な部品である。各種基礎形式があるが、プラント設備で一般的な露出型の基礎ボルトについて述べた。

基礎ボルトの性能を生かすためには、構造物脚部、コンクリートなど周辺の部品を含めた基礎定着部システムとしてバランスよい設計が必要であるが、今回は詳しくは述べなかった。定着部の設計体系については別の機会にテーマとして取り上げたい。

また、既存設備の補強や改造によく使用されるアト打基礎ボルトは、適切に使えば、十分な耐震性をうるることができる。これについても別に機会に解説したい。

文献 1) 秋山 宏 : 鉄骨柱脚の耐震設計、技報堂出版、1985

- 文献 2) 日本建築学会：鋼構造設計規準
- 文献 3) 日本建築学会：塔状鋼構造設計指針・同解説、1980
- 文献 4) 石油学会：スカートを有する塔そ類の強度計算,JPI-7R-96
- 文献 5) 日本建築学会：鋼管構造設計施工指針・同解説,1990
- 文献 6) 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, JSS II 13-2004
- 文献 7) 日本鋼構造協会：JSS 14 建築構造用切削ねじアンカーボルト・ナット・座金のセット, JSS II 14-2004