

日本銀行本店本館免震レトロフィット ～重要文化財の免震化～



菊地 岳史
株式会社松田平田設計



藤田 啓史
同



北村 圭
同

1 はじめに

耐震性の不足する建築物に免震レトロフィットを実施する事例が増えている。免震の効果により大幅に地震力を低減できるため、上部構造体の補強はほとんど不要になり、改修前の室内の環境、使い勝手を変えずに耐震性を向上できるのが、最大の利点である。歴史的な建築物の耐震改修の工法を選択する際には、建築物の歴史的、文化的な価値を保存する観点に加わるため、免震レトロフィットの優位性はさらに高まる。工事エリアを免震層に集約できるため建築物の改造が少なく、敷地条件や工事費、工期等の諸要件が解決されれば最善の工法といえる。

本稿は、明治期に建築され、国の重要文化財に指定されている日本銀行本店本館の大規模な免震レトロフィットの設計において、建築物の特性を踏まえた独創的な手法により歴史的、文化的な価値を保存した設計事例について報告を行う。



写真1 日本銀行本店本館（改修工事中）

2 建物概要

東京都中央区に建つ日本銀行本店は、本館、旧館、新館で構成されている。（図1）本館は日本人建築家による、最初の本格的な明治洋風建築であり、現存する最も文化的な価値の高い建築物の一つとして国の重要文化財に指定されている。また、隣接する旧館との重厚な石造りの外観は、近隣の三井本館、三越本店とともに日本橋の歴史的景観を形成している。以下に本館、旧館の建築物概要を示す。

【本館】

規 模：地上3階、地下1階、高さ約18m
 延床面積：約11,400m²
 構 造：煉瓦造、直接基礎
 設 計：辰野金吾
 竣 工：1896年（明治29年）
 重要文化財指定：1974年（昭和49年）

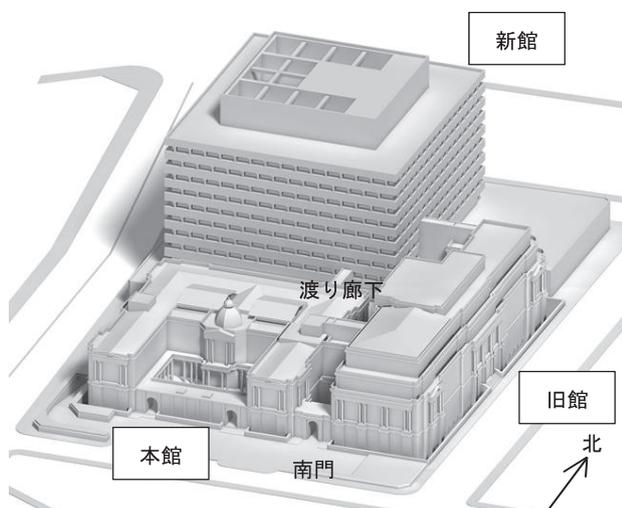


図1 日本銀行本店

【旧館（2・3号館）】

規模：地上6階，地下4階，高さ約30m
延床面積：約23,900m²
構造：鉄骨鉄筋コンクリート造，直接基礎
設計：長野宇平治
改修設計：松田平田設計
竣工：2号館 1935年（昭和10年）
 ：3号館 1938年（昭和13年）
 ：免震改修 2009年（平成21年）
 （1号館は新館建設時に解体）

3 免震化の経緯

本館は、明治29年に建築された煉瓦造の建築物である。昭和10年、13年の旧館の増築時には、南門、渡り廊下の部分で本館の東側の煉瓦壁に接して鉄骨鉄筋コンクリート造の柱が築造され、本館とは外観的、構造的に一体として建築された。

現行の耐震基準を満足しない旧館は、2006～2009年（平成18～21年）に地下1階（一部、地下2階）に免震装置を設置する中間階免震改修工事を行った。その際、本館との接続部では、免震の可動域を確保するために、旧館側の躯体を撤去することで躯体クリアランス450mmを確保し、その隙間を覆う免震EXP.Jが設けられた。

煉瓦造の本館に対しても詳細な耐震診断が行われている。その結果、大地震発生時には煉瓦壁量の少ないエリアで局所的に煉瓦壁が損傷する可能性があった。逼迫性が指摘される首都直下地震等の大地震発生時にも、日本銀行本店施設の機能を維持し、重要文化財の本館を損傷させないことを目標とする「基礎免震改修」を行うこととなった。

4 免震化計画

4.1 本館の構造

本館の構造は、創建時の耐震性への配慮や地下室に金庫を配していたこと（現在は他の用途）等から、煉瓦壁の厚さは最大約1300mmの重厚な組積造である。全体としては壁量の多い建物であるが、平面的に壁量の少ないエリアがある。本館の床の多くは鉄骨梁を内蔵する鉄筋コンクリート造に改修されているが、煉瓦壁の厚さに比べて薄く、剛床的な水平力伝達には期待できない。したがって、本館の耐震性は、重量が大きく壁量の少ないエリアの評価で決定づけられる。

4.2 本館の基礎

本館の基礎は直接基礎形式であるが、既存図面や文献等によると「礎盤」と呼ばれる厚さ8.5尺（約2,576mm）の剛強な無筋コンクリートの上に煉瓦が積まれており、その下は厚さ2尺（約606mm）の大玉砂利層によってならされている。基礎免震改修設計にあたり礎盤の状態を把握する必要があったため、地下1階床からコアボーリングを行い、礎盤のコンクリート強度、礎盤や大玉砂利層の厚さ寸法の調査を実施した。調査の結果、礎盤のコンクリートは設計基準強度18N/mm²相当の強度があり、厚さ寸法は、ほぼ文献のとおりであることが分かった。なお、本館は重要文化財であるため、各種調査にあたっては、文化庁他、関係機関と協議を行いながら進めた。

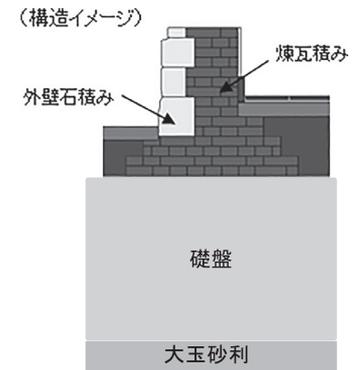
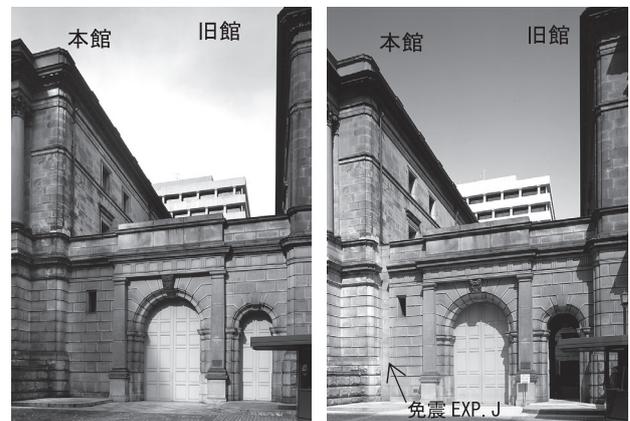


図2 本館の断面イメージ

4.3 隣接する旧館との関係

旧館を地下1階（一部、地下2階）の中間階免震構造に改修する際に、本館との接続部である南門及び渡り廊下の地上部には、免震EXP.Jを設ける必要があった。旧館免震化前と免震化後の南門の状況を写真2に示す。本館の免震化にあたり、旧館とは別々の動きをする免震構造として計画する場合には、この免震EXP.Jを2倍の動きに追従するように改修する必要があり、本館の正面ファサードと連続する旧館南門の意匠性が大きく損なわれる課題があった。



a.旧館免震化前 b.旧館免震化後（現状）
写真2 南門（旧館免震改修前・後）

5 本館の特殊性を踏まえた免震化

本館の免震化計画にあたっては、国の重要文化財であることを考慮し、大地震動時にも構造体は無被害とするだけでなく、将来的な煉瓦壁のひび割れ抑止や、隣接する旧館との関係性を十分に考慮した。

5.1 ゴム層総厚さを統一した免震層の構成

将来に亘って煉瓦壁にひび割れを生じることのないよう、免震支承の長期的なクリープ変形による沈下が均一となるよう配慮した。採用する免震支承は、鉛プラグ入り積層ゴム支承、天然ゴム系積層ゴム支承、弾性滑り支承の3種類であるが、全てゴム層総厚を160mmに統一した。低摩擦、160mmタイプの弾性滑り支承は新たに開発された装置を採用した。

表1 採用した免震支承の仕様

	鉛プラグ入り 積層ゴム支承	天然ゴム系 積層ゴム支承	弾性滑り支承
ゴムの種類 (せん断弾性係数)	G4 (0.392N/mm ²)	G4 (0.392N/mm ²)	G4 (0.392N/mm ²)
ゴム径 (mm)	○-700~1100	○-700~900	□-600, 700
ゴム総厚 (mm)	約 160	約 160	約 160
2次形状係数	4.4~6.8	4.4~5.6	3.8~4.4
摩擦係数	-	-	0.01

5.2 歴史的建造物の一体化免震の実現

免震化されている旧館と新たに免震化する本館を、地震発生時に一体的に挙動させることを目標に、本館と旧館の一体化免震の計画を行った。これが実現すれば、旧館の改修時に設けた免震EXP.Jは不要となり、南門ファサードは創建時に近い姿に戻すことができる。予め計画された免震建物どうしを一体化する新築の事例はあるものの、本計画のような歴史的建築物において、既存の免震建物に隣接する建物を一体的に免震化改修する計画は、調べた限りは初めての事例である。

本館の一体化免震の実現には、解決しなければならない多くの課題があったが、以下に記す2つの重

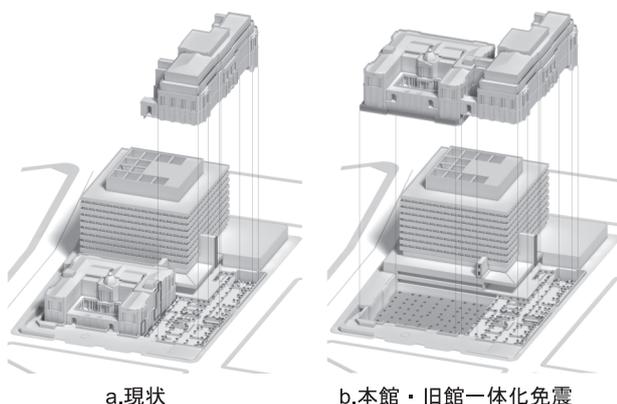


図3 本館-旧館一体化免震の概念図

要課題をクリアすることで、本計画の実現に向けて大きく前進した。一つ目は、一体化免震後の旧館の地震動時の応答層せん断力や免震層応答変位が、当初の設計のクライテリアを満足すること。二つ目は、旧館と本館の接合部材に、それぞれの免震層のレベル差を解消しながら、一体化免震に求められる適切な剛性をもたせることである。

一つ目の課題への対処として、本館の免震装置の種類及び構成比は旧館のものと同一とし、本館の免震層の固有周期は、初期剛性から大変形時まで旧館の固有周期と合わせることを基本的な考え方とした。また、本館免震層の製作誤差ばらつきの影響について検証した結果、ばらつき標準状態の免震層の剛性は、旧館の剛性よりもややソフトにした方が良かったことが分かった。そうすることで本館が効果的に免震化されるだけでなく、ばらつきを考慮したうえでも、旧館の応答層せん断力が当初設計と同等以下に収まることを確認した。

二つ目の課題への対処として、まず、本館と旧館の接合部材の剛性についてパラメータスタディを行い、最適な剛性について把握した。接合部材の剛性が低すぎると、本館と旧館が、それぞれ別の挙動をしてしまい、一体的な挙動とならない。一方、接合部材の剛性が高すぎると、地震動時に本館と旧館がそれぞれに影響を及ぼしあい、共に上部構造の最大応答層せん断力が大きくなる傾向が見られた。一体化免震の実現には、固すぎず、柔らかすぎない、適度な接合部材の剛性が必要であることが分かった。

図4に示すように、旧館は地下1階柱頭の間中層免震であるのに対し、本館は礎盤ごと免震化する基礎免震となるため免震層にレベル差がある。そのため、適度な剛性を確保したうえで、レベル差を解消するためのディテールも求められた。

一体化接合部材の構成を図5に、一体化接合部材の3Dパースを図6に示す。接合部材には適切な剛性及び十分な耐力を確保できる鉄骨トラスを用いることとし、旧館との連結にはPC鋼棒を用いることとした。連結にPC鋼棒を用いた理由は、旧館の躯体

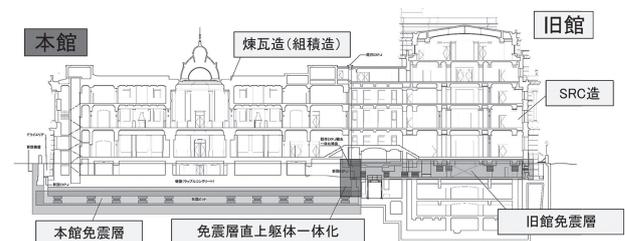


図4 本館・旧館一体化部分の断面図

と新設の鉄骨トラスを、緊張力によりガタをなくして密着させるためである。本館と旧館が離れる動きをした場合にはPC鋼棒に引張力を生じるが、あらかじめそれ以上の緊張力を入れておけば、地震動時も一体化が確保出来る。

また、免震層のレベル差を解消するために、免震支承上部の免震上部補強スラブ (t=800mm) からRC造の立上り壁 (以下、RC立上り壁) を設けることとした。RC立上り壁の中に、鉄骨トラスに接合する鉄骨柱を埋め込むことにより、接合部材にかかる力を伝達できるようにした。ただし、RC立上り壁の高さが4m近くあるため、本館と旧館が離れる動きをした場合にRC立上り壁が曲げ変形を起こし、十分な強度や適度な剛性が得られない。そこで、PC鋼線を斜めに礎盤を貫通して配置し、あらかじめ緊張力を入れておくことでRC立上り壁の変形を抑制することとした。

6 煉瓦造建物の構造体検討

煉瓦造の本館の応力解析は、柱・梁フレームで構成される一般的な構造と異なるため、3次元FEM解析モデルを用いた。図7に示すように、本館の構造体及び礎盤下の免震上部補強スラブまでをモデル化

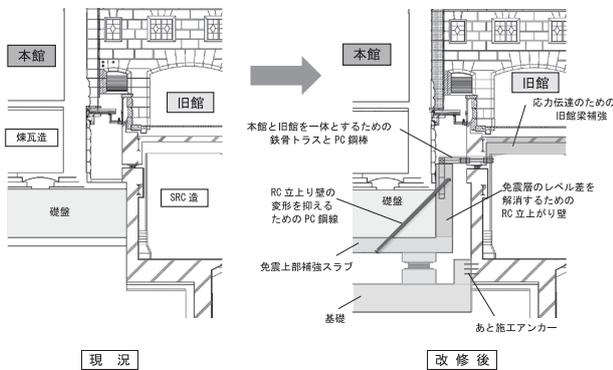


図5 一体化接合部材の構成

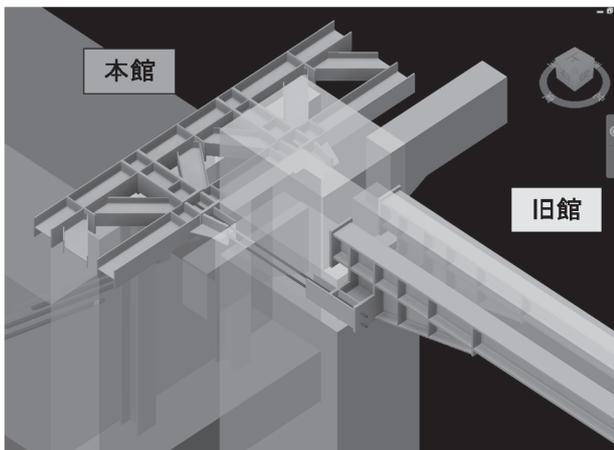


図6 一体化接合部材の3D パース

し、極めて稀に発生する地震動時に生じる慣性力や免震付加応力等に対し各部材の検討を行った。

6.1 部材のモデル化

各構成部材のモデル化を図8に示す。煉瓦壁のモデル化は、壁面内方向の曲げ・せん断に対する評価だけでなく、壁面外方向曲げを考慮できる板要素とし、煉瓦壁に生じる面外曲げ応力を把握できるようにした。また、厚さ約2.6mの礎盤のモデル化は、地下1階の煉瓦壁脚部から免震支承への礎盤内の力の伝達を把握するために、三軸の主応力を確認できるソリッド要素とした。また、壁のモールディング(装飾)の重量等の線荷重を入力する箇所にはダミー梁を配置した。

6.2 境界条件及び剛床仮定

煉瓦造の本館の特性を考慮し、各部材の接合境界条件を設定した。煉瓦壁は、礎盤の上に積まれている状態のため、煉瓦壁と礎盤はピン接合とした。各階床は鉄骨小梁とRCスラブで構成されており、関

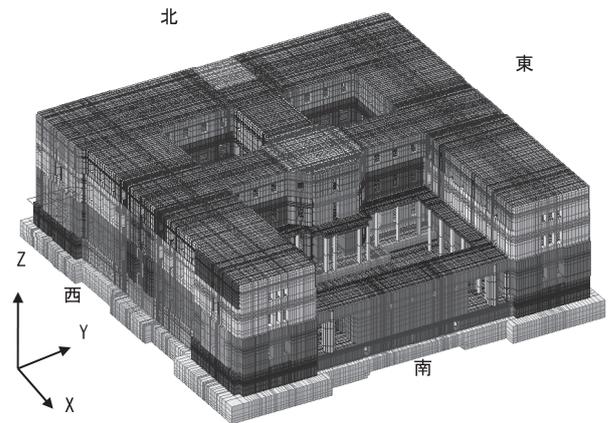


図7 3次元FEM 解析モデル (全体図)

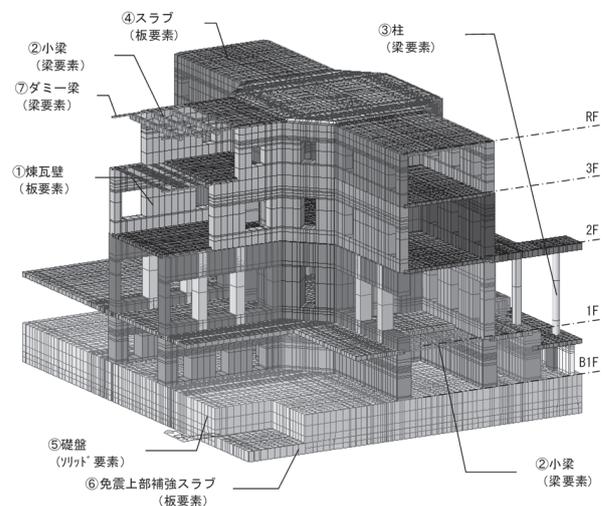


図8 部材配置図 (八角室周辺部)

東大震災の後に施工されたものであるため、煉瓦壁と強固に接合しているとは言い難い。したがって、煉瓦壁と床はピン接合とした。また、煉瓦壁に比べスラブ厚が薄いため、地下1階床を除き非剛床とし、スラブ面内剛性を考慮した。

6.3 上部構造の断面検定

前述の条件で本館の構造体をモデル化し、外力に対し適切に評価した応力度と、部材の許容応力度を比較することで、煉瓦造建物の安全性を確認した。各許容応力度は、実物から採取した煉瓦壁試験体の強度調査によって得られた終局強度をもとに設定した。なお、地震時層せん断力は、本館と旧館の一体化免震構造の時刻歴応答解析の結果より設定した。

7 一体化免震の時刻歴応答解析

7.1 本館と旧館の平面配置

本館と旧館は図9に示すような平面配置をしており、本館は、旧館の西側と接合部材を介して一体化する計画となっている。また、接合部材の鉄骨トラスは、本館と旧館をつなぐ渡り廊下を避けた北側部と南側部に分かれている。

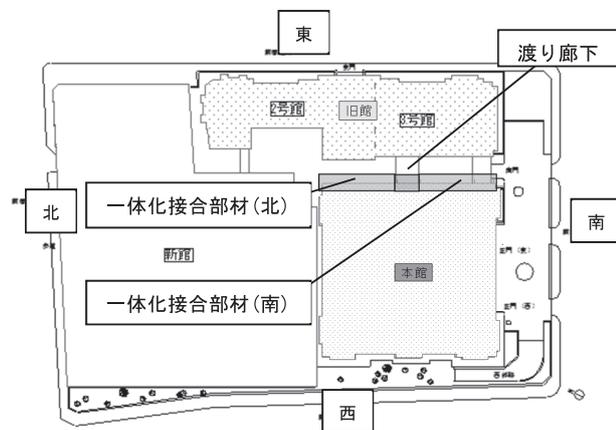


図9 一体化接合部材の平面位置図

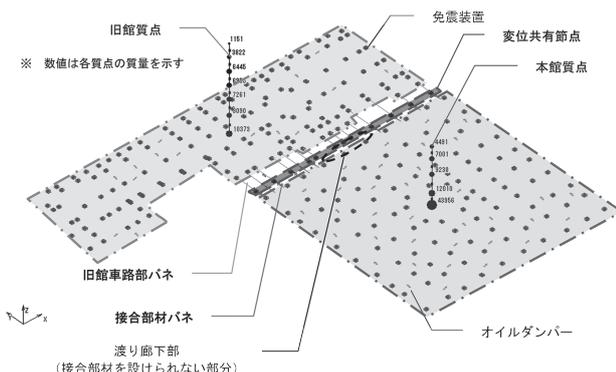


図10 振動解析モデル

7.2 免震層のねじれ変形を考慮した応答解析モデル

旧館と本館の免震性能及び平面配置をふまえ、大地震動時の免震層のねじれを考慮した検討を行うため、振動解析モデルは図10に示す免震層を平面的に再現したモデルとした。

一体化接合部材は、北側と南側に分けてモデル化を行い、それぞれせん断バネ(南北方向)及び軸バネ(東西方向)で接合した。

免震層直上層は、旧館、本館それぞれに剛床が成り立つものとし、旧館及び本館の質点は、それぞれの免震層の重心の位置に1本棒としてモデル化した。なお、煉瓦造の本館に対しては、別途、エリアごとに質点を設ける9本棒モデルによる検討も行っている。

7.3 免震層のねじれ変形

表2に、重心位置での最大応答変位となる告示波 JMA KOBE 1995 NS位相における最大応答変位、最大応答ねじれ角及び本館と旧館の開き角(図11参照)

表2 最大応答及び発生時刻一覧

		免震性能のばらつき		標準	マイナス	プラス
X方向地震動	最大応答変位 mm (sec)	X方向 [並進方向]	本館	-288 (35.46)	-287 (35.49)	-262 (35.40)
			旧館	-291 (35.46)	-284 (35.48)	-270 (35.40)
		Y方向 [直交方向]	本館	0.51 (35.19)	1.07 (34.48)	-0.92 (37.36)
			旧館	-1.12 (35.14)	-1.92 (34.80)	-1.80 (35.25)
	ねじれ角 rad (sec)	本館	-1.02E-04 (35.10)	-1.71E-04 (34.62)	-1.68E-04 (35.36)	
		旧館	-8.85E-05 (35.12)	-1.63E-04 (34.62)	-1.46E-04 (35.36)	
開き角 rad (sec)	—	-1.49E-05 (35.06)	9.11E-06 (33.74)	-2.24E-05 (35.38)		
Y方向地震動	最大応答変位 mm (sec)	X方向 [直交方向]	本館	-0.65 (36.68)	1.07 (34.44)	-0.73 (36.65)
			旧館	-0.82 (34.48)	1.59 (37.13)	1.07 (35.86)
		Y方向 [並進方向]	本館	-289 (35.46)	-286 (35.49)	-265 (35.40)
			旧館	-289 (35.46)	-285 (35.49)	-266 (35.40)
	ねじれ角 rad (sec)	本館	2.67E-05 (36.68)	-4.84E-05 (34.18)	3.30E-05 (35.86)	
		旧館	3.14E-05 (36.04)	6.41E-05 (36.48)	3.75E-05 (35.98)	
開き角 rad (sec)	—	-2.85E-05 (35.06)	-2.34E-05 (36.48)	-2.94E-05 (35.66)		

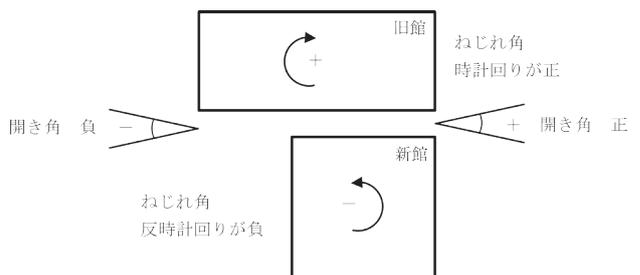


図11 ねじれ角及び開き角の定義

