

## 高架下建物の防振防音 (吊り免振)工法の開発



大迫 勝彦\* 林 篤\*\* 山田 眞左和\*\*\*

JR東日本では、列車通過時等の騒音ならびに振動が大きな課題となっている高架下において、高品質の居住環境を実現できる「吊り免振工法」を㈱竹中工務店と共同開発した。この吊り免振工法は、高架橋の柱際に鉄骨造の支柱と梁でフレームを構成し、そのフレームから上下に防振ゴムを備えた吊り材で建物を懸架する構造である。この吊られた建物は、地震や強風の時にはブランコのように横方向にゆっくりと動き、建物や高架橋への水平力を大幅に低減することができる。実物大試験体による実験と詳細な解析によりその防振防音効果と地震時に高架橋への影響が少ないことを確認した。列車による室内での振動は、列車通過時に日本建築学会の居住性能評価指針による寝室(住居)として望ましいレベル(V-0.75)を達成でき、騒音は日本建築学会の遮音性能基準におけるホテル・住宅レベル(3級)として適切な環境を達成した。今回、この工法を採用したホテルを京葉線舞浜駅に建設することとなった。

キーワード：騒音、振動、固体音、高架橋、吊り免振、防振ゴム

### 1 はじめに

従来より高架下は飲食店舗や倉庫などの用途に活用されてきたが、近年スポーツジム、スーパー銭湯などの事業展開が図られている。しかし、劣悪な振動・騒音環境のため、都市における貴重な未利用地でありながらホテルとして活用することは困難であった。

この高架下の振動・騒音を解決しJR東日本グループの事業展開を行うために新たな工法を開発する必要があった。その中でも舞浜駅は東京ディズニーリゾートの玄関口であり、2001年9月の東京ディズニーシー開業にともなう宿泊需要の高まりがおいに期待できるということなどから、開発の必要性が高まった。

### 2 技術開発

#### 2.1 吊り免振工法開発の経緯

高架下の振動・騒音を解決する工法として、吊り免振工法の開発を行った。

##### 2.1.1 従来の技術

線路近傍建物では空気中を伝わる騒音(空気音)と躯体を伝わってくる振動、またその振動が壁、天井仕上げ材をスピーカーのコーンのように震わせて生じる騒音(固体音)が問題となる。この対策法として、図1に示すように室内に浮き床、二重壁そして二重天井を施す場合がある。しかし、この工法ではコストアップの要素が大きくなる上、対策により空間は狭隘となる。また、対策効果は現状では騒音レベルが50dB(A)程度

の一般事務室レベルの音環境確保までである。ホテルのように静粛性が要求される空間では、騒音レベルを40dB(A)程度に抑える必要があり、この対策法では不十分である。そこで、さらなる静粛な空間の実現を目指して技術開発が行われた。



図1：従来の防振防音工法

##### 2.1.2 課題

一般に、列車振動は建物基礎から進入し、建物内部ではあまり減衰せず、体感振動や固体音、空気音が室内に発生する。空気音は外壁、内装材、防音サッシなどで抑えることができるが、躯体を伝わる振動を抑えることは容易ではない。

理想的な防振対策は、高架下に建物を浮かせるというイメージのような、建物躯体と高架橋躯体が完全に分離されている状態である。現実的な案として、免震建物で使われる積層ゴムの上に建物を載せる、という方法が考えられるが、地震の水平動を対象としている積層ゴムは鉛直方向の剛性が非常に大きい。そのため、上下方向の振動が伝搬してしまう。そこで、地震力を低減し、上下方向の振動も伝搬させないものとして、「建物を吊るし、吊り材の上下に防振ゴムをはさむ」というアイデアが生まれた。これは振動伝搬を基礎や床などの「面」からの進入ではな

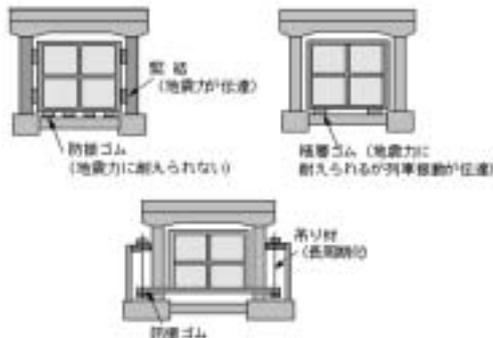


図2：検討システムの例

く吊り材の「点」からの進入で捉え、対策を容易にするメリットもある。開発の重要なポイントは「防振対策」と「高架橋の耐力」の2つの課題であった。

## 2.2 吊り免振機構

### 2.2.1 システム構成

吊り免振工法のシステム構成を図3に示す。高架橋柱に逆L型の支持架台を取り付け、この架台から上下に防振ゴムを取り付けた吊り材にて建物を懸架している。このシステムにより、列車通過時と地震時・暴風時の対策を同時に行っている。また室内の居住性を確保するためダンパーを床下に設置し、日常的な横揺れを防止している。このダンパー部分にもゴムを挿入し防振対策を行っている。

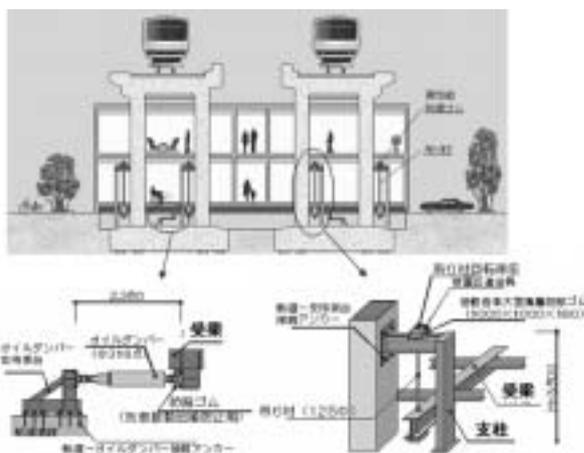


図3：システム構成図

### 2.2.2 地震対策機構

吊り免振工法では、図4(a)に示すように建物を高架橋から吊っているため、建物は地震時、暴風時にブランコのように横方向にゆっくりと動く。長周期で揺れることで短周期成分に強大なパワーをもつ地震動から逃れることができる。そのため、建物に作用する外力を大幅に低減することができ、また高架橋に与

える力は、直接高架橋基礎上に設置する図4(b)の従来工法より小さくなる。このように地震の強大なエネルギーをかわすことにより安全な建物になると同時に、高架橋の構造安全性も損なわれない技術が可能となった。また、大地震時や暴風時に建物と高架橋がぶつかって壊れることのないように十分な隙間を設け、安全性を確保している。

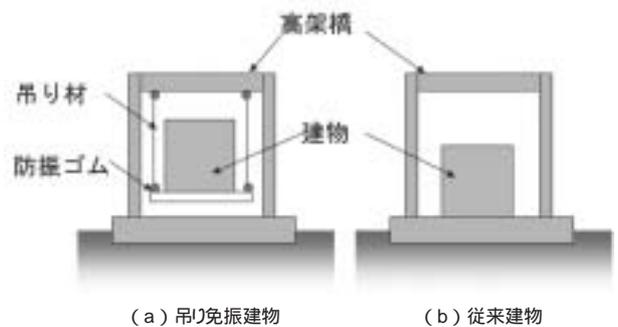


図4：吊り免振建物と従来建物の比較

### 2.2.3 防振防音対策機構

吊り架構部の詳細を図5に示す。この吊り架構部では高架橋柱または支柱から伝搬する振動を、上部の防振ゴム、吊り材、下部防振ゴム、受梁、床スラブの経路をしながら順次振動を低減させ、振動と固体音をコントロールする働きを持っている。なお、建物の屋根、壁、床は鉄筋コンクリート造とし、内装材と併せて空気音対策を図っている。

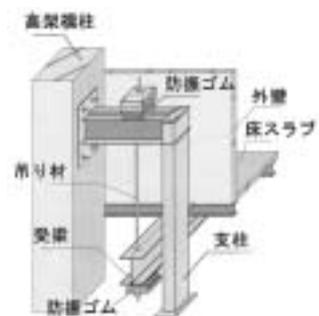


図5：吊り架構部詳細図

## 2.3 実物大試験体による検証

実物大試験体を用いて、吊り免振機構の地震時、強風時の安全確認と防振防音性能確認を行った。表1、図6、図7に試験体の概要を示す。試験体の内装は実際のホテルの客室を模してベッド、空調装置などもセットした。列車振動による吊り架構や建物内装材に発生する共振の問題を解決しながら試験体の改良を重ね、所定の目標性能を達成した。

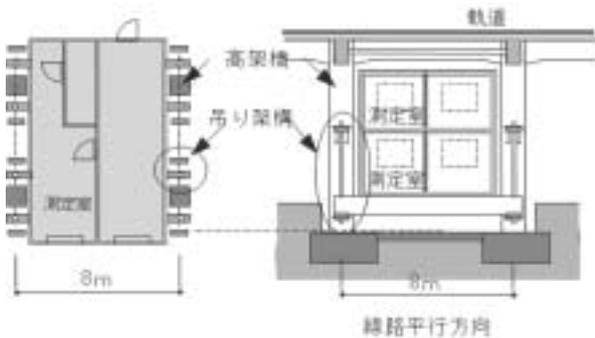


図6：実物大試験体の平面図と断面図



図7：実物大試験体内部

表1：試験体概要

鉄骨造2階建ラーメン架構
床壁鉄筋コンクリート造
総重量：220t
吊り材：L = 3.4m
設計1次固有周期：3.7秒

実物大試験体を用いた列車通過時の室内騒音測定結果を図8に、床振動測定結果を図9に示す。吊り免振工法を採用することにより振動、騒音が大きく低減されている。室内騒音は、表2に示す日本建築学会の「建築物の遮音性能基準」におけるホテル・住宅レベル（3級）として適切な環境を達成している。床振動は表3に示す日本建築学会の「建築物の振動に関する居住性能評価指針」による寝室（住居）として望ましいレベル（V-0.75）を達成している。

表2：騒音等級

測定量	クラス	等級 (学会基準)				
		有級 (学会別社株)	1級 (学会標準)	2級 (学会標準)	3級 (学会許容)	
室内平均音圧レベル	再測	-	D-55	D-50	D-45	D-40
床振動レベル	騒音	L-40	L-45	L-50	L-55	L-60
	騒音	L-45	L-50	L-55	L-60	L-65
両側音圧レベル差	騒音	90dB(A)	0-20-Ⅱ	0-25	0-20	0-15
	騒音	90dB(A)	0-25	0-30-Ⅰ	0-20	0-15
	騒音	70dB(A)	0-40	0-35	0-30-Ⅰ	0-25
	騒音	90dB(A)	-	0-40	0-35	0-30-Ⅰ
室内騒音レベル	-	-	N-25	N-45	N-45	N-45
			N-25dB(A)	45dB(A)	45dB(A)	45dB(A)

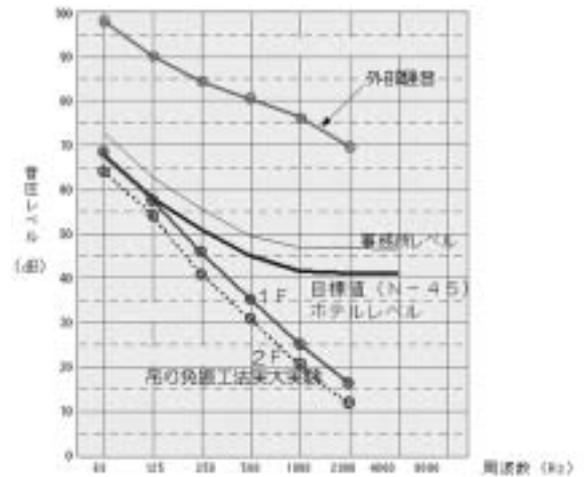


図8：室内騒音

表3：振動ランク

建築物用途	ランク	振動種別1			振動種別2	
		ランクⅠ	ランクⅡ	ランクⅢ	ランクⅣ	ランクⅤ
住居	別荘、邸宅	V-0.75	V-1.5	V-3	V-5	V-10
事務所	会議・応接室	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
	一般事務室	V-3	V-5	F-5程度	F-10程度	V-30程度

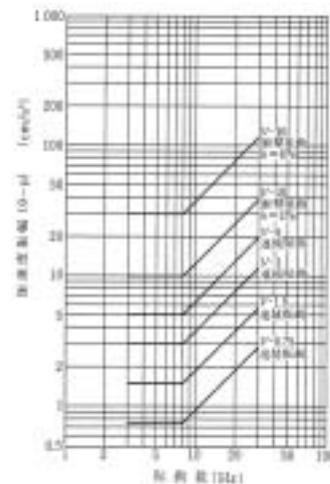


図9：室内床振動

## 2.4 技術検討委員会

本工法は土木構造物である高架橋に建築物を懸架する特殊なものであり、双方の諸基準に基づく独自の構造安全性の検証が必要とされた。それとともに、両分野の一体化した技術として、設計施工に関する諸問題を解決する必要があった。このため、耐震や基礎構造の分野で著名な建築・土木の学識経験者の参加した「高架下建築物構造設計法技術検討委員会（委員長：加藤勉東京大学名誉教授）」を開催し、技術的検討を行うことで諸問題を解決した。

### 3 ホテルの概要

建設場所は図12に示すように千葉県浦安市にある舞浜駅東側蘇我方の高架下で、従来は未利用地であった。ホテルは鉄筋コンクリート壁式構造2階建て、延床面積は約6,000㎡である。吊り免振工法を採用したホテル客室棟は総重量が4,500tで、44本の鋼棒で吊り下げた。図10、11に示す客室棟は約80室の規模であり、1室当たりの面積は36㎡とゆとりを持たせ、バス・トイレ・洗面は個別に使用できる。また、1室当たりの利用人数は2～4人程度と弾力的な運用が可能である。なお付帯施設として、店舗・駐車場等を整備している。

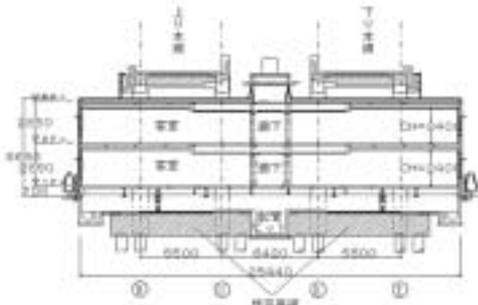
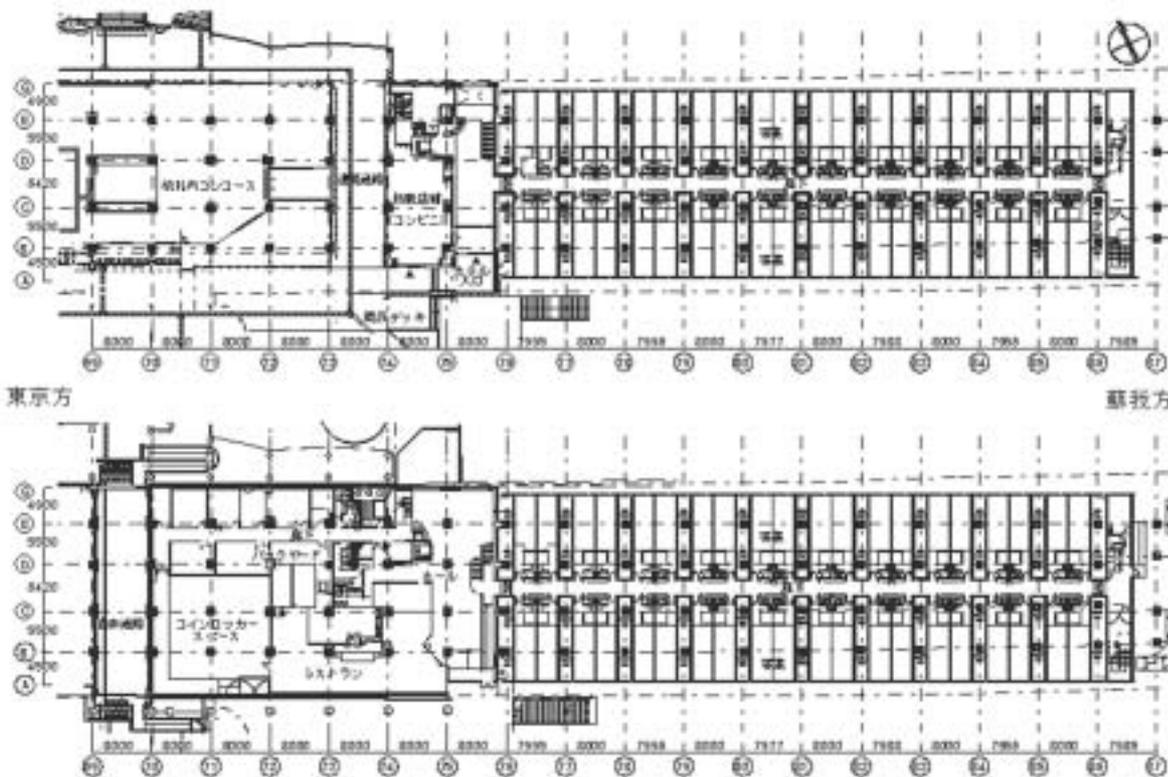


図10：断面図

図11：建物外観および室内パース



2階平面図

1階平面図

図12：建物平面図

4 設計・施工

4.1 設計

4.1.1 構造設計

当該高架橋は将来の増築対応として、中層スラブ荷重を見込んでいた。この中層スラブは未施工であるため、中層スラブ荷重による常時、地震時の断面力と吊り建物による付加外力による断面力の比較検討を行った。検討の結果、高架橋に作用する建物付加外力は、増築対応荷重を下回っており、建設当時の土木設計基準を満足していることを確認した。

一方建物に関しては、建設地で想定される模擬地震動や代表的な地震波に対して時刻歴応答解析を行った。その結果、「稀に発生する地震動(レベル1)」「極めて稀に発生する地震動(レベル2)」とも、建物の層間変位は0.1cm以下(1/2850以下)とごくわずかで、応力度も許容応力度以下となり、耐震性能目標を十分満足した。これにより地震荷重によって建物の各部分が損傷を生じないこと、および建物が崩壊しないことを確認している。また吊り材を支持する架構についても、許容応力度以下となっている。吊り建物全体の水平変形については、「極めて稀に発生する地震動(レベル2)」においても設計クリアランスである30cm以下となり、高架橋柱脚との衝突が生じないことを確認している。

なお、今回採用したオイルダンパーは従来用いられているユニフロー型でなく、小型軽量で最高速度100cm/secまで対応でき縮側の剛性が高いバイフロー型を一部改良して採用した。

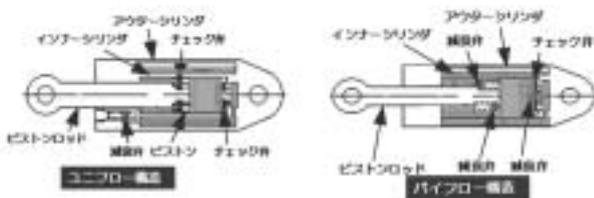


図13: オイルダンパー

4.1.2 防振防音設計

先の実大試験体での実験および解析結果から下記の仕様の変更を行った。

- 吊り箇所 高架橋 1 柱当り 2 箇所 1 箇所
- 建物受梁 鉄骨造梁一部鉄骨コンクリート造梁  
全て鉄骨コンクリート造梁
- 建物 鉄骨造フレーム、床壁鉄筋コンクリート造  
壁式鉄筋コンクリート造

以上の変更により荷重分布は平滑化され、防振ゴムの固有振動数は小さくなり、さらに受梁などの減衰力増加と建物剛性

の増大により防振性能を向上できた。なお、図14に示す防振ゴムの材質は低動倍率型天然ゴムを採用し、設計固有振動数の3Hzと実際の挙動時の違いを少なくした。また、この防振ゴムは、耐震上の積層ゴムではないが、地震時に水平や鉛直方向に変形を生じる。そこで、事前に水平、鉛直両方向に載荷試験を行い地震時の安全確認を行った。

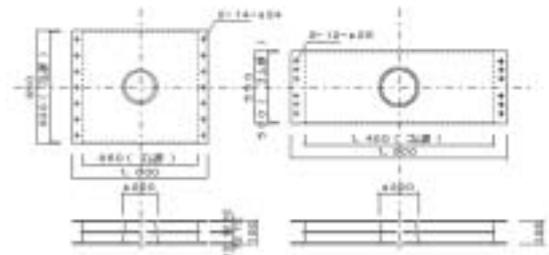


図14 防振ゴム姿図

4.2 行政手続

4.2.1 構造性能評定

本建物は国土交通省の指導に基づき、建築基準法上の構造に関する性能評価として国土交通省大臣により認定を受けた。具体的には、第三者機関である(財)日本建築センターでの審査を受けた。また、荷重を支える部分に建築基準法第37条の指定材料でない防振ゴムやダンパーなどを用いているが、その材料強度などについても性能評価の中で検討した。なお高架橋部分は、一般認定鉄道事業者であるJR東日本で構造安全性を確認している。

4.2.2 耐火性能評価

建物は既存駅舎の増築として建設される複合施設である。敷地は防火地域・準防火地域の指定がなく、また、駅舎は建築基準法第27条に規定する特殊建築物に該当しないため、基準法上は耐火建築物とする必要はない。しかし、既存駅舎が耐火建築物であり、ホテル部分と一体として申請する必要があり、千葉県条例により耐火建築物として申請した。

吊り免振工法の吊り材や防振ゴムは主要構造部に該当するため耐火性能が要求される。しかし、防振ゴムは耐火構造認定を有していないため、建築基準法施行令第108条の3第1項第二号(ルートC)に基づき耐火性能検証を行い、国土交通大臣認定の取得を図ることになった。

耐火性能の検証方法は従来、仕様設計しか認められていなかったが、2000年の建築基準法改正により、性能設計をすることが認められた。現行法では従来の仕様設計をルートA、告示に示された検証法によるものをルートB、高度な検証法による検証を行い、指定性能評価機関が評価して、国土交通大臣認

定を受けるものをルートCと呼んでいる。本来は建築物全体を一つの耐火性能評価方法によって検証するのが基本であるが、構造上、防火上、分離されているとの見解から、客室部分とその他の部分を別棟とみなしている。したがって、耐火性能は客室部分をルートC、その他の部分はルートAによって評価した。

### 4.3 施工

#### 4.3.1 鉄骨建方

高架下の低い空頭での施工は、重機の選定に制約を受け、工程に大きな影響を与える。本工事も狭隘な敷地のため、土地業や鉄骨建方などの施工方法について検討を行った。鉄骨建方時の工事写真を図15に示す。建方には4.9tミニクローラークレーンの他、3tフォークリフト、1t台車を用いている。特に大重量となる大梁は4.9tミニクローラークレーン2台を相吊りして行った。

#### 4.3.2 ジャッキアップダウン工事

吊り免振工法の施工手順を図16に示す。ジャッキアップ工事は、1階躯体の荷重支持を床下の仮設ジャッキから本設の防振ゴムおよび吊り材に移し替える作業である。なお、1階の床鉄骨梁建方ならびに1階立ち上がりコンクリート躯体打設は、この仮設ジャッキに支持させた状態で行った。ジャッキアップは吊り鋼棒上部に設置した油圧ジャッキにより行った。

ステップ1:建物が浮き上がるまで防振ゴムの圧縮変形のみ生じる。

ステップ2:油圧ジャッキにより、建物を持ち上げる。

44箇所の吊り部分を一斉にジャッキアップするため、コンピュータによる集中管理で作業を行い、ステップ1では防振ゴムにかかる荷重により制御を行い、ステップ2では浮き上がりの変位量により制御を行った。

ジャッキアップによって、所定高さまで達した後、上部ナットを締めジャッキを開放し、吊り鋼棒に荷重をかけた(ジャッキダウン)。一連のジャッキアップダウン工事によって、初めて高架橋柱



図15：吊り架構部鉄骨建方

に荷重がかかり、ジャッキアップによって持ち上げる変位量は、ジャッキアップ前の仮受時のレベルと、吊り鋼棒に荷重をかけた時点での沈み込みと、2階コンクリート打設、仕上工事等による荷重、さらに防振ゴムのクリープ量を見込んだ。

## 5 おわりに

ホテルドリームゲート舞浜はこの吊り免振工法を採用する最初の開発件名である。工法は現在特許出願中であり、(財)機械システム振興協会から新機械システム普及促進事業\*1にも選定されている。

吊り免振工法を採用するにあたっては、高架橋の耐力や空頭などいくつかの条件を勘案しなければならない。また、事業採算性からも、マーケットに合う立地条件を満足している必要があるため、全ての高架下でホテルが実現できるわけではない。しかし、従来、高架下では騒音振動により開発が制約されていた宿泊施設を、新しい技術の開発により実現できることは、今後の開発可能性を大きく広げるものと期待できる。

\*1：社会システムとして普及促進が必要と認められ、研究開発が相当程度クリアされた実用第1号への助成事業

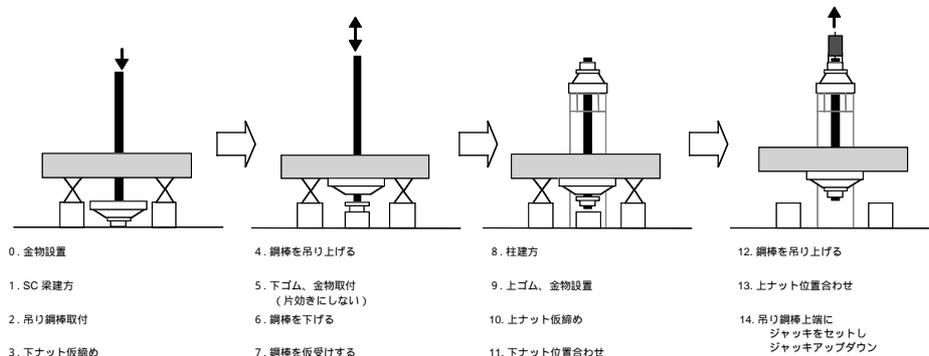


図16：吊り免振工法構築手順