

明石海峡大橋用リンク式伸縮装置の開発

Development of the Link-Type Expansion for the Akashi Kaikyo Bridge

宮川一夫 / Kazuo Miyagawa・関西製造所 製鋼品技術部 装置事業室 参事

三浦孝一 / Koichi Miura・関西製造所 製鋼品技術部 装置事業室

鈴木不二雄 / Fujio Suzuki・建設・エネルギー事業部 土木・橋梁技術部 大阪橋梁設計室 室長

萩森敏貴 / Toshiki Hagimori・建設・エネルギー事業部 土木・橋梁技術部 大阪橋梁設計室 参事

原口哲朗 / Tetsuro Haraguchi・住金関西工業(株) 設計技術室 室長

要 約

長大橋梁には、温度変化、活荷重、風および地震等による橋梁の変位を吸収するために、伸縮量の大きな道路伸縮装置が必要となる。

当社ではこのニーズに対応した長大橋梁用の伸縮装置として、リンク機構を採り入れた「リンク式伸縮装置」を開発・実用化している。

平成10年4月開通予定で世界最長の吊橋となる明石海峡大橋では、このリンク式伸縮装置の性能が高い評価を得て採用され、この程無事納入・据付が完了した。

そこで、この明石海峡大橋用に開発したリンク式伸縮装置の概要について紹介する。

Synopsis

Long-span bridges need road expansion joints with a large amount of expansion and contraction for handling very large bridge movements caused by variations in temperature, live load, wind, earthquakes, etc..

In response to above needs, Sumitomo Metal Industries, Ltd. has developed an expansion joint utilizing a link mechanism, which is called a "Link-type Expansion Joint", specifically for use in long-span bridges.

This Link-type Expansion Joint, highly valued for its performance, was used in the Akashi Kaikyo Bridge which will be the longest suspension bridge in the world and will open to traffic in April 1998. All the expansion joints for the bridge have already been installed at the site.

This paper provides an outline of the link-type expansion joint developed for the Akashi Kaikyo Bridge.

1. まえがき

長大橋梁には温度変化、活荷重、風および地震等による橋梁の変位を吸収するために、伸縮量の大きな道路伸縮装置が必要となる。

当社ではこの伸縮装置で荷重支持機構にリンク機構を採用し、装置が伸縮しても中央部で荷重を可動支持するリンク式伸縮装置を開発・実用化している。

平成10年4月開通予定で世界最長の吊橋となる明石海峡大橋では、このリンク式伸縮装置の性能が高く評価され採用された。

採用にあたっては解決が必要な課題として、今までに経験のない世界最大の伸縮量±1450mmへの対処が可能なこと、環境問題（特に神戸側）への配慮から低騒音化が必

要なこと、また主塔部中央径間側中央分離帯部においてウィンドタングとの干渉回避が必要であったが、技術開発と実機試作品による性能確認試験の実施により、問題ないことを確認したうえで本格製作に着手し、この程無事納入・据付が完了した。

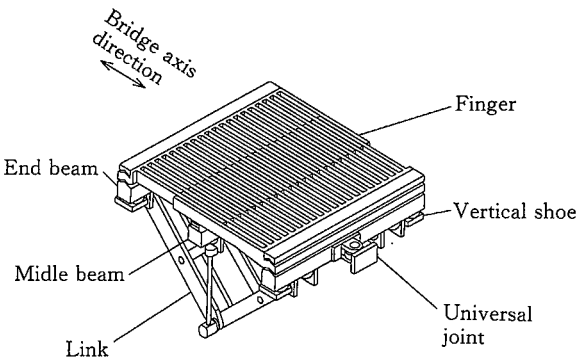
以下に明石海峡大橋用リンク式伸縮装置の開発、主として設計および性能確認試験結果の概要について紹介する。

2. リンク式伸縮装置の概要

2-1 基本構造

リンク式伸縮装置の基本構造を第1図に示す。

装置は変位に対する追従性および設置時・メンテナンス時の施工性を考慮し、半車線分を1ユニットとすることを



第1図 リンク式伸縮装置構造図
Fig.1 Construction of the link-type expansion joint

標準としているユニットはフィンガー、端横梁、中間横梁、リンク、鉛直支承(沓)、ユニバーサルジョイントにより構成されている。

2-2 特長

- リンク式伸縮装置の特長を以下に示す。
- ①コンパクトでかつ大伸縮量に適している。
装置は荷重の支持機構にリンク機構を採用し、フィンガーを装置の中央の中間横梁で可動支持できるため、コンパクトでかつ、大伸縮量に容易に対処できる。
 - ②すべての方向の変位に追従できる。
装置と橋梁は一對のユニバーサルジョイントのみで連結しているため、橋梁のすべての方向の変位に円滑に追従できる。
 - ③装置の設置が容易
装置はユニットごとに工場で組立て、現場でユニバーサルジョイントの連結ボルトを締めれば設置完了するため、短時間でしかも精度よく設置できる。
 - ④車両走行性に優れている。
装置は橋梁の変位に対し常に平坦であり、走行方向に対し段差や遊間がないため、車両走行性に優れている。

第1表 変位追従機能
Table 1 Performance following bridge displacements

変 位	概 説	概 説 図
橋軸方向変位	橋梁の伸縮により、A B間の距離が変化すると、装置はリンク交角 θ が変化し、追従する。	
橋軸直角方向変位	橋梁と橋台（又は橋梁）の相対変位 δ (B→B') に対し、装置はユニバーサルジョイントAを中心に水平面内で回転し、追従する。	
鉛直面内回転変位	橋梁のタワミ角、および鉛直方向変位に対し、リンクおよびフィンガーが端横梁との連結ヒンジを中心に回転することにより追従する。	
水平面内回転変位	橋梁の水平面のタワミ角に対し、装置は各ユニットの伸縮差に置換し、追従する。	

⑤耐久性に優れている。

摺動部およびヒンジ機構には耐摩耗性・耐疲労性に優れた材料を使用しているので、耐久性に優れている。

2-3 変位追従機能

本装置は四隅にある可動鉛直支承を介して橋梁端部に支持され、橋梁の変位に対し、橋梁（または橋台）とユニバーサルジョイントのみで連結している支持機構により、リンク、鉛直支承およびユニバーサルジョイントが相互に連動し、円滑に追従する機構となっている。その変位に対する追従機能を第1表に概説する。

3. 明石海峡大橋用リンク式伸縮装置

3-1 概要

明石海峡大橋は本州四国連絡橋の「神戸・鳴門ルート」に属し、気象・海象条件が厳しく、航行船舶数が極めて多い国際航路として名高い明石海峡を横断して、兵庫県神戸市と淡路島を結ぶ、橋長3910m（中央支間長1990m）の3径間2ヒンジ吊橋である。現在世界最長のハンバー橋より580m長い世界最長の中央支間長を有する吊橋となる。

この明石海峡大橋に採用されたリンク式伸縮装置には、橋台部で $\pm 450\text{mm}$ 、主塔部の側径間側で $\pm 600\text{mm}$ 、中央径間側では世界最大となる $\pm 1450\text{mm}$ と3種類の伸縮量がある。それぞれの設置位置を第2図に示す。

本装置は第3図に示すように東西鋼床版について、それぞれ8ユニットに分割されている。主塔部中央径間側用の装置においては、中央分離帯部の東西鋼床版の4ユニットが一体となった特殊なユニットとなっている。

3-2 設計

3-2-1 設計諸元

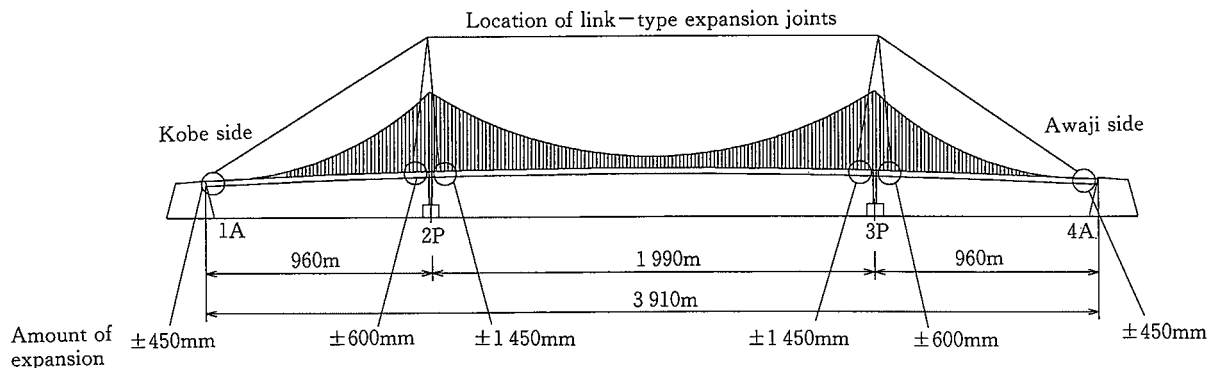
第2表に明石海峡大橋用伸縮装置の設計諸元を示す。

3-2-2 構造

(1) 標準断面

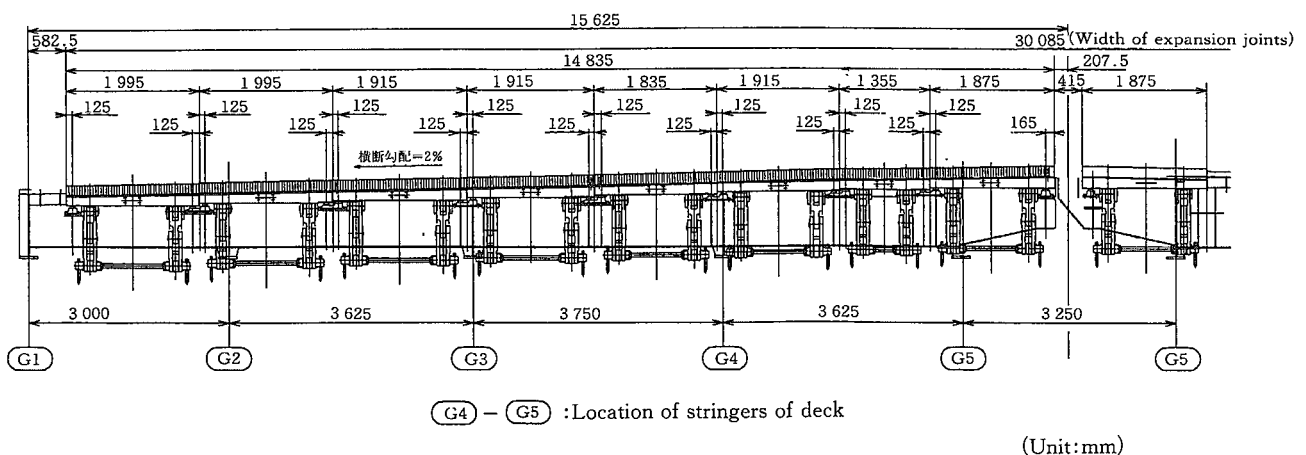
第4図に伸縮量 $\pm 450\text{mm}$ 、 $\pm 600\text{mm}$ 、 $\pm 1450\text{mm}$ の伸縮装置の断面図を示す。

各々の基本構造は同じであるが、橋台部の伸縮装置（伸縮量： $\pm 450\text{mm}$ ）にはユニットごとにゴム製の排水樋を取り付けており、ユニット間の繋ぎ目には防水ジッパーを使用している。主塔部中央径間側の伸縮装置（伸縮量： $\pm 1450\text{mm}$ ）にはフィンガーが約3.2mと長くなるため、フ



第2図 明石海峡大橋リンク式伸縮装置設置位置

Fig.2 Location of link-type expansion joints installed in the Akashi Kaikyo Bridge

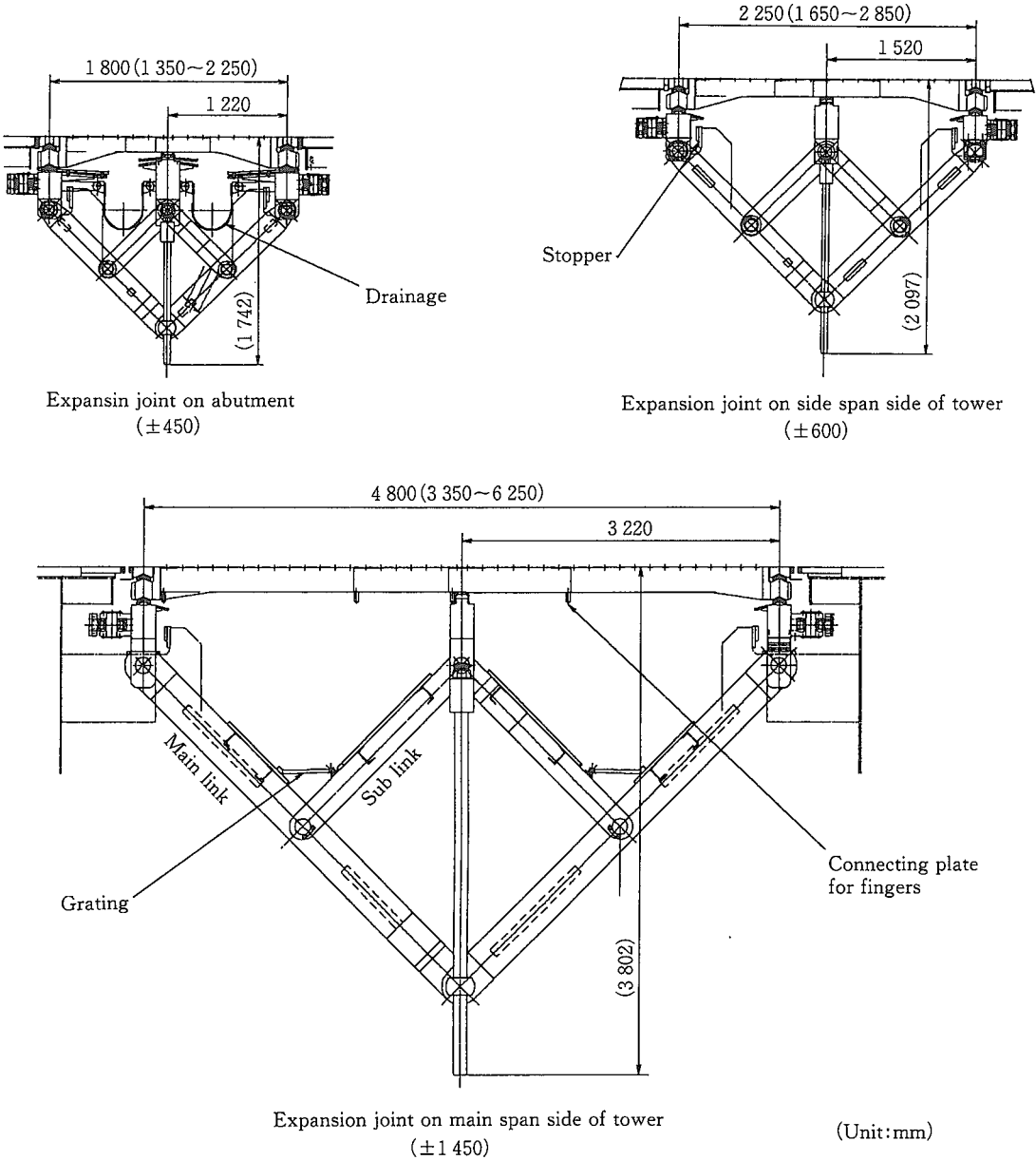


第3図 ユニットの割り付け（橋台部用）

Fig.3 Unit arrangement of expansion joints (On abutment)

第 2 表 明石海峡大橋伸縮装置設計諸元
Table 2 Design dimensions on expansion joint for the Akashi Kaikyo Bridge

	橋台部	主塔部	
		側径間	中央径間
橋 格 (道路規格)	一等橋 (第 1 種 第 2 級 6 車線)		
総幅員	31.250m		
横断勾配	2.0%		
荷 重	B 活荷重 (T 荷重)	B 活荷重 (T 荷重)	B 活荷重 (T 荷重) T・T-43 後輪荷重
衝撃係数	i = 1.0		
設計伸縮量 (mm)	± 450	± 600	± 1 450
設計計算伸縮量 (mm)	± 100	± 250	± 700
水平方向移動量 (mm)	± 50	± 30	± 55
鉛直面内回転角	± 20 / 1 000	± 20 / 1 000	± 20 / 1 000
水平面内回転角	± 20 / 1 000	± 30 / 1 000	± 60 / 1 000



第 4 図 リンク式伸縮装置断面図
Fig.4 Cross section of link-type expansion joint

インガー先端下面に振れ防止用連結板を取り付けており、また、装置のサイズが大きくなることから装置内を容易に点検可能とするため、点検歩廊用のグレーチングを主リンク上部と副リンクに取り付けた。

また、伸縮装置は鋼床版の端横桁から張り出した受け桁に載っており、この受け桁からの脱落を防止するため、全ユニットにストッパーを設置した。

(2) 主塔部中央径間側伸縮装置 (伸縮量: $\pm 1450\text{mm}$) 特殊ユニット

第5図に示すように主塔部中央径間側においては、中央分離帯部に吊橋の補剛桁の橋軸直角方向のズレを生じないためのストッパーであるウィンドタンクが主塔水平材に取り付いている。リンク式伸縮装置の通常形状では中央部2ユニットの主リンクとウィンドタンクが高さ方向で干渉するため、中央2ユニットのリンク構造を変更し荷重伝達を行わずユニットの長方形の形状保持のみの機能とすることで干渉を回避し、中間横梁はその両隣りの2ユニットと合せ4ユニット分一体とし、両端のユニットのリンクにて荷重伝達する4ユニットを一体構造とした特殊形状のものを開発した。なお、両端のユニットに配置した荷重伝達用のリンク間隔をウィンドタンク幅4mに対し6mとした。

また、中間横梁は4ユニット分一体構造であるが、端横

梁およびフィンガーは水平変位時の桁(道路)との遊間量の関係から他ラインと同様4ユニット分割とし、ユニバーサルジョイントを取り付けている。この関係から、水平変位時端横梁に連結されているリンクの支点間隔と一体構造の中間横梁のリンクの支点間隔が異なることから、リンクの中間横梁支点は防振ゴム構造とし、その相対変位を吸収する工夫を行っている。

(3) 遊間

a. フィンガー遊間

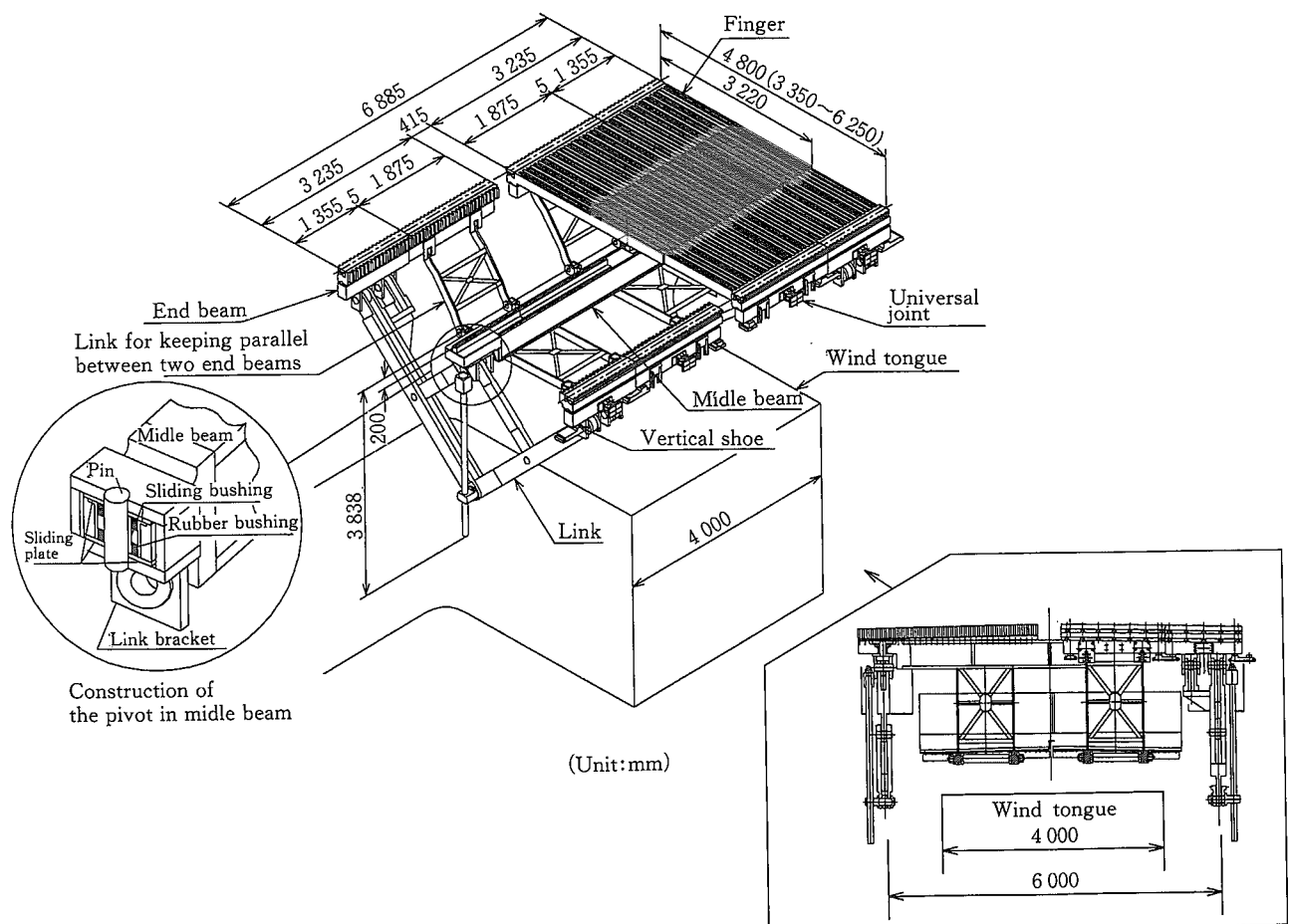
フィンガー遊間は広いと車両(自動二輪)の走行性を阻害することから、極力狭い方が好ましい。

通常一般のフィンガータイプの伸縮装置では、フィンガー厚を40mm、対向するフィンガーとの隙間を5mmとしているため、フィンガー遊間は50mmとなっている。

リンク式伸縮装置のフィンガーは従来より、自動二輪の車両走行性向上のため第6図に示すように、フィンガー厚35mm、フィンガー遊間45mmとしており、明石海峡大橋でもこれを採用した。

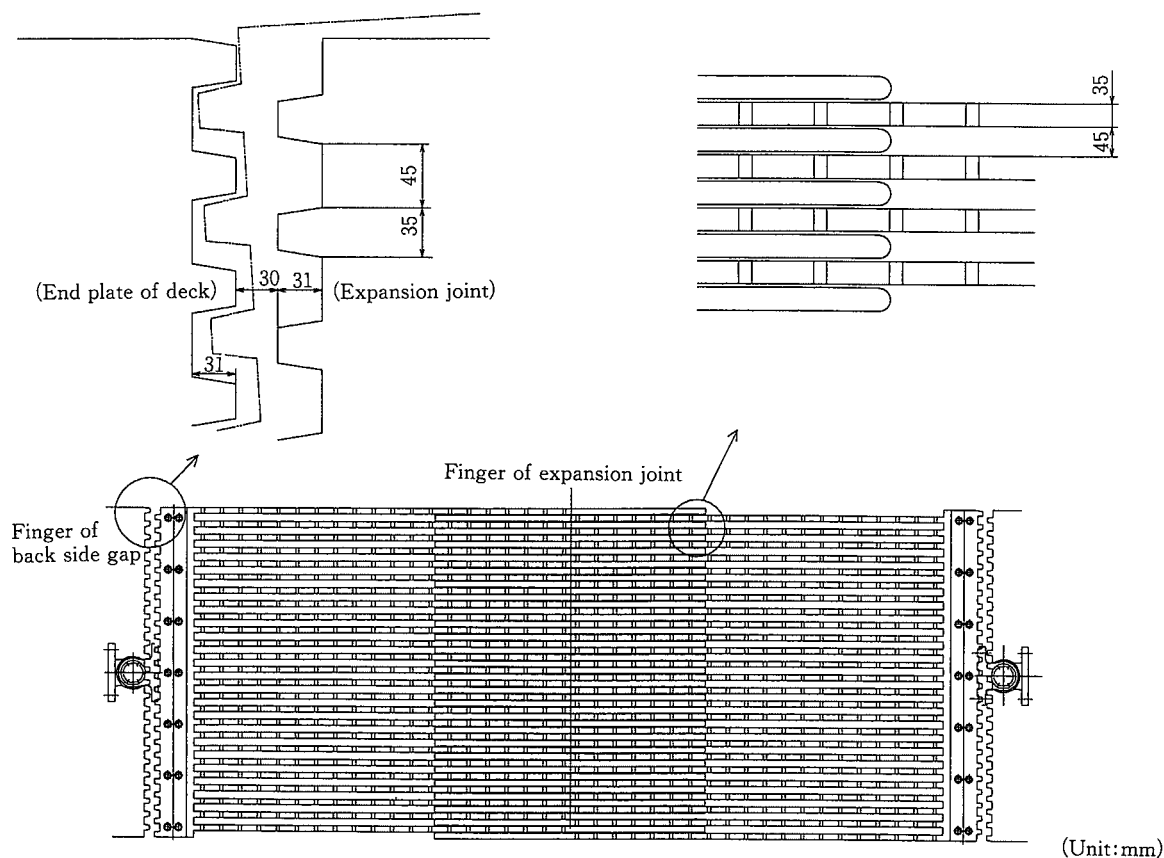
b. 背面遊間

リンク式伸縮装置は橋桁の水平面内回転変位に対して、ユニットごとにユニバーサルジョイントを中心に回転する。このため、この回転変位を許容するために、伸縮装置と桁



第5図 主塔部中央径間側特殊部伸縮装置

Fig.5 Particular expansion joint on center span side of tower



第6図 主塔部中央径間側伸縮装置のフィンガー部詳細

Fig.6 Detail of finger section of expansion joint on center span side of tower

端部に背面遊間が設けられている。明石海峡大橋用のリンク式伸縮装置の背面遊間量は橋台部(伸縮量:±450mm)および主塔部側径間側(伸縮量:±600mm)で30mm、主塔部中央径間側(伸縮量:±1450mm)で61mm必要となる。この内、主塔部中央径間側伸縮装置は背面遊間が61mmと大きく車両走行性を阻害する恐れがあることから、第6図に示すように伸縮装置側から押え板背面と、桁側から鋼床版端部板にそれぞれ櫛歯を設けて張り出すフィンガー構造とし、中立時の櫛歯先端間の遊間を30mmとして、水平面内回転時の変位伸縮装置変位量61mmを確保する構造とした。

3-2-3 フィンガー部の設計

(1) フィンガーヒンジ構造

従来のリンク式伸縮装置は1本1本独立したフィンガーを端横梁の突起にピンで定着している構造であり、フィンガーのピン孔とピンの間に隙間があるため、大型自動車通過に伴う衝撃音が発生した。

このため、明石海峡大橋用リンク式伸縮装置では、低騒音化のためフィンガーのピン定着の構造を一体型のフィンガーを防振ゴムを介して定着する構造の改良型を開発した。なお、防振ゴムの断面形状については、車両の制動力等の水平力に対する変位を抑制するために山形状とした。第7図に従来型と低騒音型の構造比較を示す。また、第8図

に低騒音型リンク式伸縮装置のフィンガー、第9図に防振ゴムの詳細図を示す。

(2) フィンガー材質の選定

一体型フィンガーの材質選定に当たっては経済性、製作性、寸法精度により比較検討を行った。その結果を第3表に示す。

鋼板から櫛歯状に製作する場合、伸縮量±1450mmの最も大きなフィンガーでは、フィンガー部で $h=200\text{mm}$ 、付け根部で $h=240\text{mm}$ と背が高く切断、溶接方法とも製作上あるいは精度的にも問題が多いため鋳物を選定した。

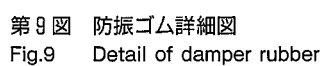
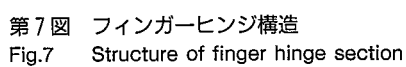
鋳物には、鋳鋼(SC, SCW)と鋳鉄(FC, FCD)がある。鋳鉄は、①寸法精度が良好、②内部欠陥の発生が少ない、③振動減衰能が良好、④耐摩耗性が良好の特長を基本的にもっていることから、鋼板(SM400B)と同等以上の疲労強度を有する球状黒鉛鋳鉄(FCD400)を選定した。

なお、FCD400は切削性が良く比較的靱性を有しており、伸縮装置への採用も豊富である。

(3) 防振ゴムの設計

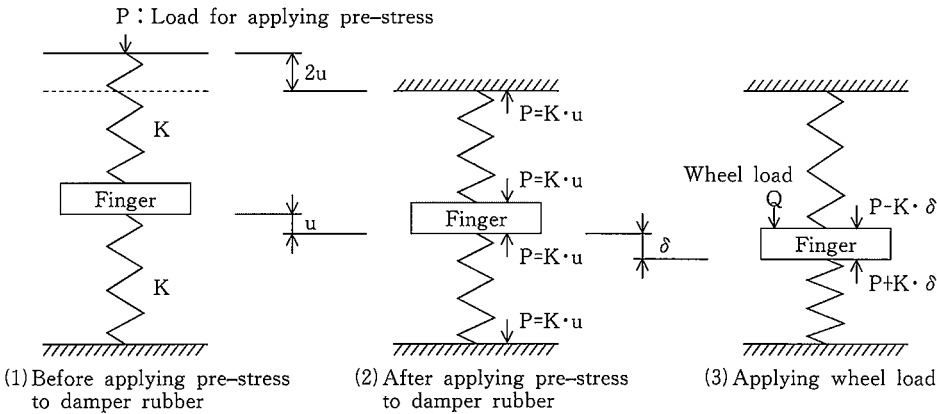
第10図にフィンガーヒンジ部の防振構造の概念図を示す。

バネ支持部はフィンガーを防振ゴムで上下から挟み込んで、押え板を端横梁上面のステイにボルトで締め込むことにより、防振ゴムに初期圧縮力を導入している。



第3表 フィンガー材料，製作方法比較表
Table 3 Comparison of materials and manufacturing process on finger

材 料	製 作 方 法	評 価			総合評価
		経済性	製作性	精度（曲がり）	
鋼 板	厚板からの機械切断	×	△	◎	×
	厚板からのガス切断	△	×	×	×
	フィンガー根元での溶接	△	×	×	×
鋳 物	鋳 鋼	○	×	△	×
	鋳 鉄	○	○	○	○



第10図 防振ゴム支持部の概念図
Fig.10 Structure of damping system

車両の輪荷重（ Q ）が作用したとき，防振ゴムのバネ定数（ K ）およびフィンガーのタワミ（ δ ）との間に次式が成り立つ。

$$Q=2K \cdot \delta$$

防振ゴムのバネ定数の設定に当たっては，以下の点を考慮した。

- ①輪荷重によるタワミは道路面の段差を考慮して，最大1 mm程度に抑える。
- ②フィンガーの自重によるタワミ角度が設計曲げ角度（鉛直面内回転角）以上である。

3-2-4 材 質

第4表に明石海峡大橋用のリンク式伸縮装置の主要部材の材質を示す。

3-2-5 設計計算

(1) 許容応力度照査

各部材に対しては，第5表に示す手順¹⁾にて許容応力度照査を行った。

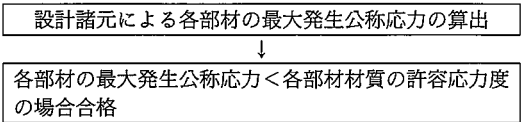
(2) フィンガー部のFEM解析

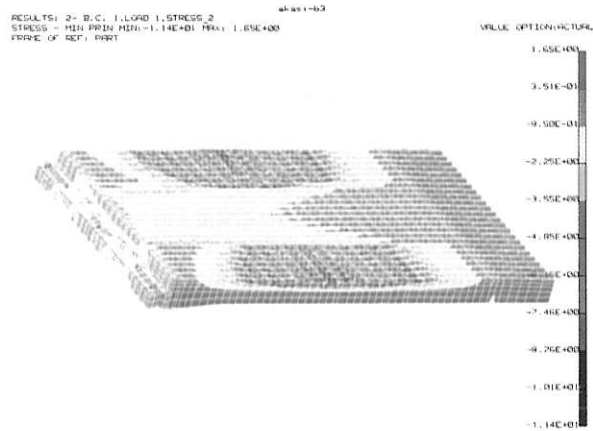
フィンガーは1ユニットで一体とし，防振ゴムを介して定着する構造としたため，定着部の応力状態が複雑になる。このため，上記(1)の許容応力度照査以外にFEM解析を行った。その結果の一例を第11図に示す。

第4表 主要部材材質
Table 4 Material grades of major parts

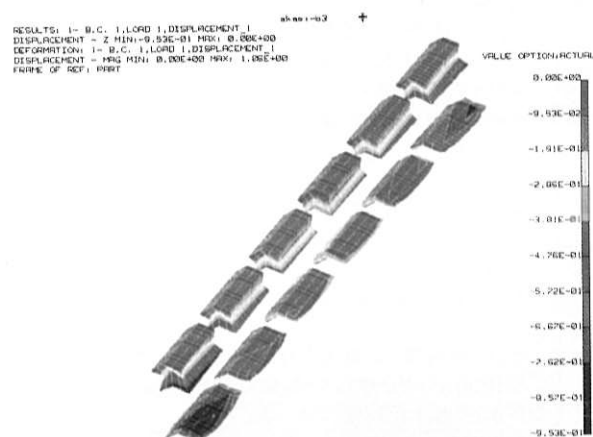
部 材	材 質
フィンガー	FCD400
押え板	SM570
防振ゴム	加硫ゴム
端横梁	SM490
中間横梁	SM490
中間横梁ゴムパッド	ウレタンゴム
主リンク	SM490
副リンク	SM400
ピン	SUS304
ブッシュ	HBSC4+黒鉛
ユニバーサルジョイント・ハウジング	SC450
鉛直支承	SCM440

第5表 許容応力度照査手順
Table 5 Evaluating procedure on stress of parts





(a) Stress of finger



(b) Deformation of damper rubber

第11図 フィンガー部FEM解析結果

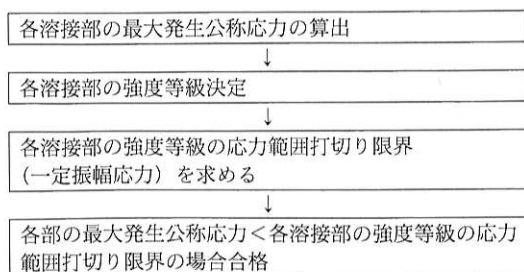
Fig.11 Results of FEM analysis on finger section

(3) 疲労照査

伸縮装置は輪荷重を直接受けるため、溶接を用いている部位は疲労被害を受けやすいと考えられるため、それらの部位については、第6表に示す手順²⁾にて疲労照査を行った。該当部位としては、主リンクの接合箇所・端横梁下面のリンクブラケット取付箇所・端横梁上面ステイ取付箇所がある。

第6表 疲労照査手順

Table 6 Evaluating procedure on fatigue of welded parts



3-3 性能確認試験

明石海峡大橋用リンク式伸縮装置の本格製作に着手する前に、開発要素の最も大きな主塔部中央径間側(±1450 mm)中央特殊部および一般部を各々1ユニットを製作し、当社総合技術研究所波崎研究センタにて性能確認試験を実施した(写真1～写真4)。試験結果の概要を第7表に示すが十分な性能を有していることを確認した。

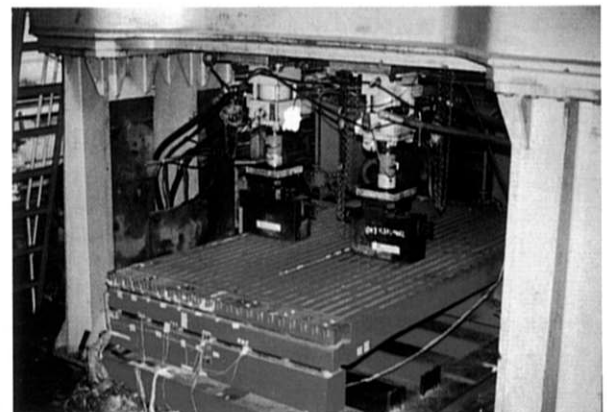


写真1 フィンガー部疲労試験状況

Photo 1 Fatigue test on finger section

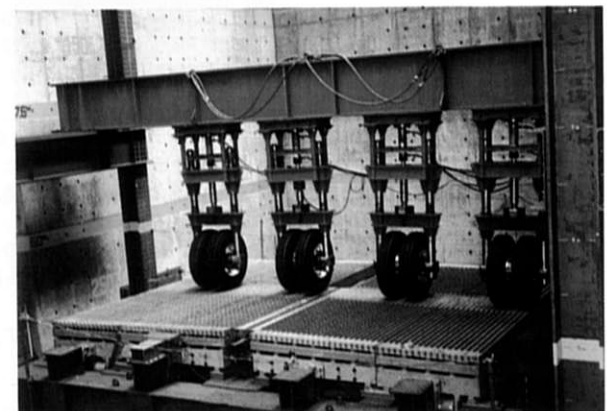


写真2 中央特殊部静荷重試験状況

Photo 2 Static load test on particular unit

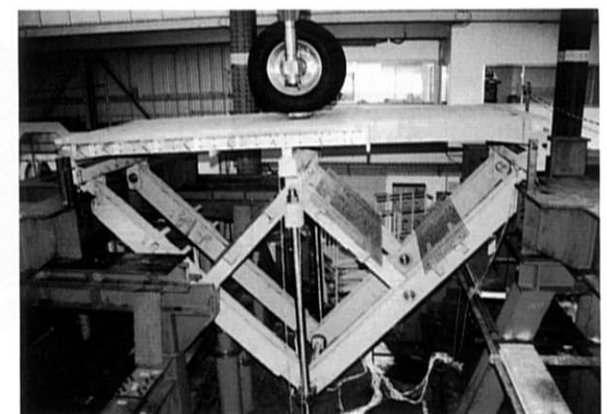


写真3 一般部静荷重試験状況

Photo 3 Static load test on general unit

第 7 表 性能確認試験結果概要
Table 7 Summary of results of performance tests

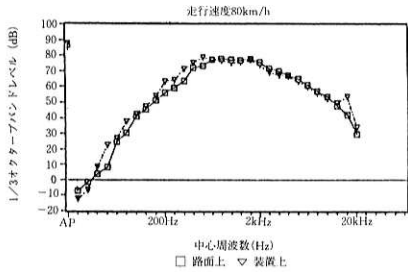
試験項目	試験内容	試験結果
フィンガー部 静荷重試験	フィンガー部のみで試作を行い、輪荷重による鉛直荷重および水平荷重を負荷し、発生応力および変位を測定した。(計11ケース)	部材での最大応力はフィンガーでは1 183 (kgf/cm ²)発生したが、材料FCD400の許容応力度1 400 (kgf/cm ²)以下であった。 また、溶接部での最大応力は端横梁上面ステイ取付部で81 (kgf/cm ²)発生したが、応力範囲打切限界235 (kgf/cm ²)以下であった。
フィンガー部 疲労試験	上記同容のフィンガー部試作品にサーボアクチュエータにより繰り返し負荷を与え、各部の耐久性を確認した。(計 2 ケース) 試験状況を写真 1 に示す。	フィンガー、端横梁の磁粉探傷試験の結果問題無かった。防振ゴム、連絡板(ウレタンゴム)にも異常は無かった。
中央部組立完成品 静荷重試験	中央特殊部の組立完成品状態で輪荷重による鉛直荷重および水平荷重をフィンガー部に負荷したときの各部の発生応力および変位を測定した。(計12ケース) 試験状況を写真 2 に示す。	部材での最大応力値はリンクで1 038 (kgf/cm ²)発生したが、材料SM490の許容応力度1 900 (kgf/cm ²)以下であった。 また、溶接部での最大応力は同じくリンクで432 (kgf/cm ²)発生したが、応力範囲打切限界469 (kgf/cm ²)以下であった。
中央部組立完成品 変位追従性試験	中央特殊部の組立完成品状態で橋梁変位に相当する強制変位を油圧ジャッキにより取付架台に与え、その時の作動荷重および伸縮装置各部の発生応力、変位を測定した。(計 7 ケース)	各方向変位に対して伸縮装置の抵抗力は小さく、変位に対する追従性が良いこと確認した。 また、発生応力も問題なかった。
一般部組立完成品 静荷重試験	一般部組立完成品状態で輪荷重による鉛直荷重および水平荷重をフィンガー部に負荷したときの各部の発生応力および変位を測定した。(計 4 ケース) 試験状況を写真 3 に示す。	部材での最大応力は1 304 (kgf/cm ²)発生したが、材料SM490の許容応力度1 900 (kgf/cm ²)以下であった。 また、溶接部での最大応力は同じくリンクで422 (kgf/cm ²)発生したが、応力範囲の打切限界469 (kgf/cm ²)以下であった。
実車走行試験	フィンガー部を構内の道路に埋設し、20tトラック実車走行によるフィンガー各部の発生応力、振動、変位、および騒音を測定した。 なお、騒音測定は比較のため、装置上走行の他、アスファルト路面上走行についても実施した。 試験状況を写真 4 に示す。	発生応力、振動、変位とも特に問題なかった。 騒音については下表に示すように路面上、装置上の音圧レベルにほとんど差が無かった。

測定状況	走行速度	60km/h	70km/h	80km/h
路面上音圧レベル (dB(A))		84.0	87.1	88.4
装置上音圧レベル (dB(A))		84.5	86.9	89.4



写真 4 走行試験状況
Photo 4 Truck running test

また、下図に示すように1/3オクターブバンド周波数解析結果より、路面上の騒音と装置上の騒音にほとんど差がなかった。



3-4 架 設

伸縮装置の架設は第8表に示す手順にて実施し、短時間でしかも精度良く架設を完了することができた。

写真5に主塔部中央径間側伸縮装置（伸縮量： ± 1450 mm）の架設状況を示し、写真6に架設完了後の状況を示す。

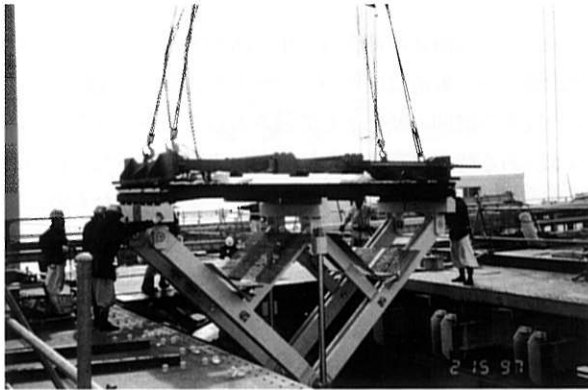


写真5 架設状況（主塔部中央径間側）
Photo 5 Installation scene (Center span side of tower)

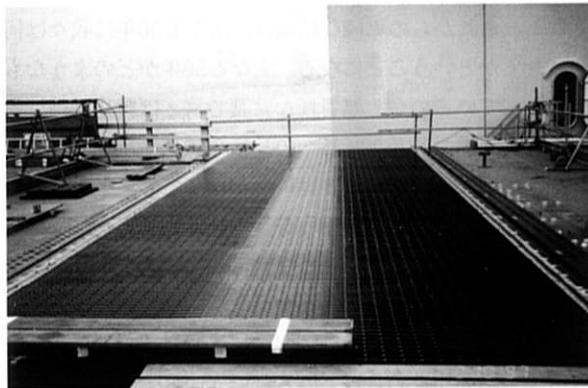


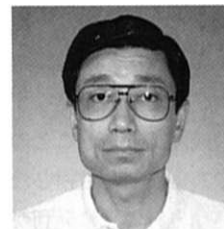
写真6 架設完了（主塔部中央径間側）
Photo 6 Complete installation (Center span side of tower)

4. あとがき

明石海峡大橋用リンク式伸縮装置については、平成5年11月に設計開始以来、平成7年8月の試作品による性能確認試験を経て本格製作に着手し、平成9年9月すべての架設作業が無事完了した。

今後は、今回の世界最大の伸縮量となる明石海峡大橋用リンク式伸縮装置で得られた設計・製作ノウハウを紀淡海峡他の次期大型プロジェクトに生かしていく所存である。

最後に、本開発を進めるに当たり御指導いただいた本州四国連絡橋公団第一建設局殿および明石海峡大橋補剛桁工事共同企業体殿に感謝する次第である。



宮川一夫 / Kazuo Miyagawa

関西製造所 製鋼品技術部
装置事業室 参事

（問合せ先：06(466)6284）

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編，平成6年2月
- 2) 社団法人 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993年4月

第8表 リンク式伸縮装置架設手順
Table 8 Installing procedure of Link-type expansion joint

