第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

関西国際空港連絡橋（鋼トラス橋）耐震対策における免震支承構造の検討

安里　俊則[1]・野田　翼[2]・西田　峻[3]・
中村　隆志[4]・引口　学[5]・吉山　純平[6]・五十嵐　隆之[7]・高橋　良和[8]

[12]正会員 西日本高速道路株式会社 関西支社 保全サービス事業部（〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13）
[3]正会員 西日本高速道路株式会社 関西支社 阪奈高速道路事務所（〒583-0033 大阪府藤井寺市小山9-3-1）
[4]非会員 株式会社IHIインフラシステム 事業戦略本部（〒135-8710 東京都江東区豊洲三丁目1-1 ）
[5,6]正会員 株式会社IHIインフラシステム エンジニアリング部（〒590-0977 大阪府堺市堺区大浜西町3）
[7]正会員 オイレス工業株式会社 免制震事業部 支承営業部（〒108-0075 東京都港区港南1-2-70）
[8]正会員 博(工) 京都大学工学研究科 教授（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）

1. はじめに

関西国際空港連絡橋（以下，関空連絡橋）は1994年（平成6年）に開通した大阪府泉佐野市のりんくうタウンと関西国際空港島を結ぶ，橋長3,750mの道路・鉄道併用橋であり，関西国際空港島の唯一の陸上アクセスを担っている．海上中央部は鋼トラス橋で，空港島・前島側は鋼箱桁橋である．上部構造は，上層に道路（一般国道481号：6車線），下層に鉄道（JR関西空港線，南海空港線：複線）が通る構造で，さらに電気・ガスなどのライフライン全てがこの橋を利用している．（**図-1，2，写真-1**）

鋼トラス橋は，橋長450m（支間長150m）の3径間連続橋の6連で構成されており，支承条件は中間橋脚2基を固定，端支点橋脚2基を可動とし，ピポット支承，ピポットローラー支承を採用している．耐震対策として，長周期化による上部工応答の低減を図るため鉛プラグ入り積層ゴム支承（以下，LRB）による免震化を行うが，免震支承構造の検討にあたり，免震ゴム支承の平面形状が大きく，端支点部は死荷重面圧が低くなる傾向となった．また，鉄道の列車走行安全性の観点から，橋軸直角方向の支承条件について，常時～レベル１（以下，L1）地震時を固定支持とし，L1を超える地震時には弾性支持とする支承構造の検討が必要となった．

本稿は，この低面圧環境下の免震ゴム支承が，常時の温度変化によるせん断変形や品質管理試験に与える影響ならびに鉛プラグの温度上昇に対する分散配置効果について供試体試験による検証を行った結果に加え，ノッチ入りボルトを用いたノックオフ構造の検討を行った結果について述べるものである．

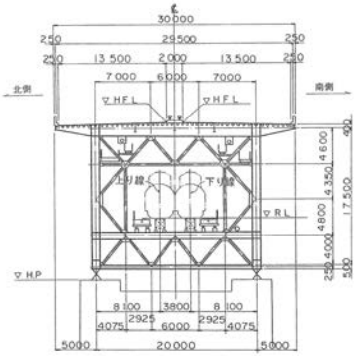


図-2　標準断面図（鋼トラス橋一般部）

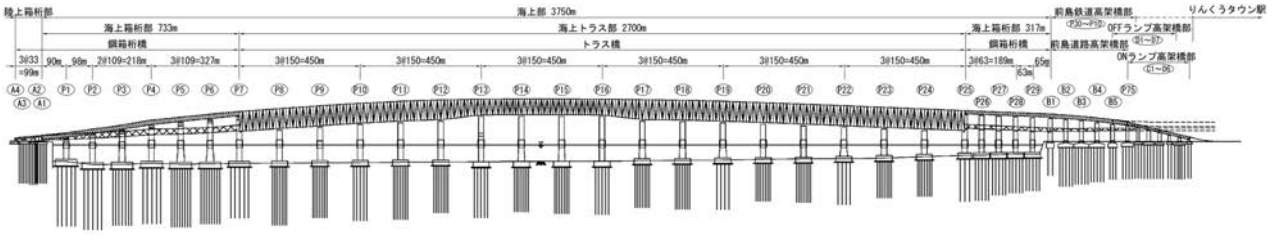


図-1　橋梁一般図

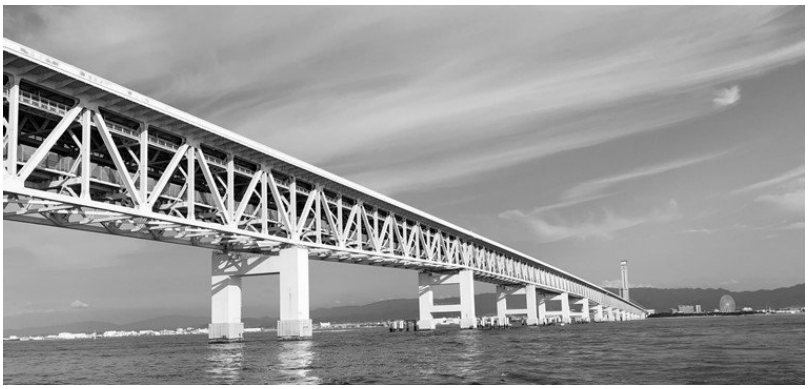


写真-1　関西国際空港連絡橋（鋼トラス橋）海上からりんくうタウンを望む

2. 大規模地震対策の検討

建設時の耐震設計では，中規模地震に対しては橋梁構造が弾性範囲内で応答し，稀な大規模地震に対しては塑性域まで達することを許容するが，落橋等の重大な損傷は被らないように配慮する方針とし，静的設計と応答スペクトル法による動的設計により実施されている．静的設計の設計震度はkh=0.24とし，動的設計では架橋位置の地震環境ならびに地盤特性を反映させた応答スペクトルを用いている．以下に，今回の大規模地震対策検討の概要を示す．

(1) 照査用地震動[1)]

本橋付近には，多数の断層の存在が指摘されており，本橋への影響が懸念されたことから，最新の設計基準類に示される標準波に加え，内陸直下地震動として「中央構造線断層帯」「上町断層帯」，海溝地震動として「南海トラフ（基本ケース）」を選定の上，サイト波を作成し，照査用地震動として用いることとした．作成した各サイト波の地表面波から加速度応答スペクトルを算出し，比較した結果を**図-3**に示す．

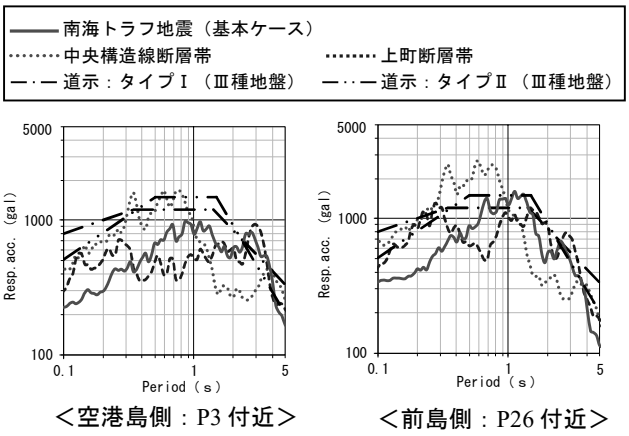


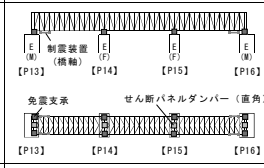
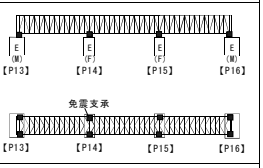
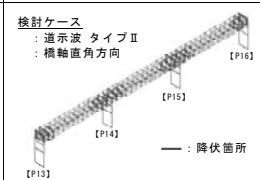
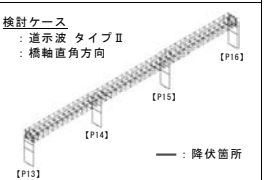
図-3　地表面波による加速度応答スペクトル(橋軸方向)

(2) 対策工法検討

現況の耐震照査結果を踏まえ，部材耐力を向上させる補強方法だけでなく，免震化や制震化といった全体構造系を変化させる対策について検討を行った．具体的には，代表径間の3次元ファイバーモデルを用いて，各照査用地震動に対する現況の耐震性能評価を行い，構造の成立性，部材補強の規模を勘案し，対策案を選定した．免震案と免制震案の比較を**表-2**示す．

検討の結果，免震支承形状が大きくなるものの，上部構造の補強箇所の削減が図れることから免震案を採用することとした．

表-2　対策工法概略比較表（免震案・免制震案）

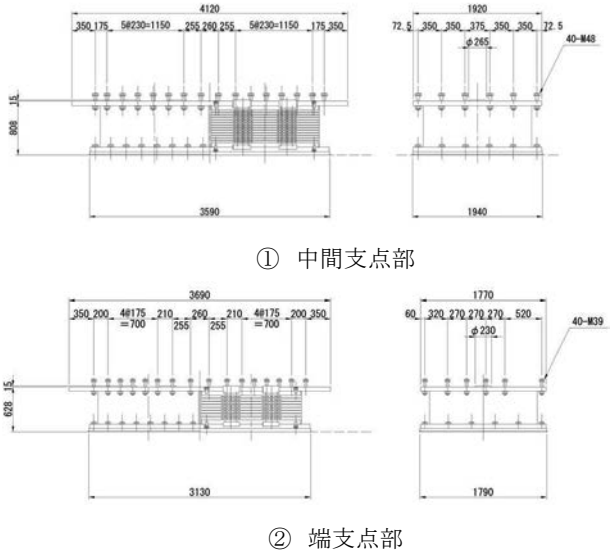
	免制震案	免震案
概　要	全支点を免震支承に取替え、制震装置を設置した案	全支点を免震支承に取替えた案
対策案概略図		
降伏箇所		
支承形状	端支点（1 支点当り、ゴム体 1 個） 平面形状：□1600mm×1600mm ゴム総厚：342mm 中間支点（1 支点当り、ゴム体 2 個） 平面形状：□1600mm×1600mm ゴム総厚：170mm	端支点（1 支点当り、ゴム体 2 個） 平面形状：□1350mm×1350mm ゴム総厚：333mm 中間支点（1 支点当り、ゴム体 2 個） 平面形状：□1600mm×1600mm ゴム総厚：378mm

3. 免震支承構造の検討

(1) 免震支承の適用に向けた課題

鋼トラス橋では，耐震対策として長周期化による上部構造の応答低減を図るため免震化を行うが，変位抑制を図りつつ，支承を成立させる必要があるため，免震ゴム支承製作最大サイズを2個並列する対策が必要となった（**図-4**）．その結果，特に端支点では死荷重時面圧が約2MPa，隣接する箱桁橋では1.5Mpaとなっている．

そこで，この低面圧環境下のLRBに対し，常時の温度変化による疲労耐久性への影響や実製品の品質確認試験時に与える影響について，縮小供試体を用いた試験による検証を行った．また，繰返しせん断変形により発生する鉛プラグの温度上昇に対する分散配置の効果について，あわせて検証を行った．



① 中間支点部

② 端支点部

図-4 LRB 2個並列タイプ

(2) 低面圧環境下におけるせん断疲労試験

既往の研究において，LRBに対し低面圧下で緩速繰返しせん断変形試験を行った際に，鉛プラグにき裂が生じた知見[2)]があることから，本橋の使用条件に基づいた面圧環境下でのせん断疲労試験を行い，疲労試験前後の性能確認を行う．

a) せん断疲労試験内容

試験体を**図-5**，試験体諸元を**表-3** に示す．試験体サイズはNEXCO試験方法[3)]せん断疲労試験および道路橋支承便覧[4)]（以下，支承便覧）特性検証試験に用いる試験体寸法から□400×400とした．

使用した試験機の能力は，鉛直荷重：動的±2MN，鉛直ストローク±200mm，水平載荷：動的±400kN，水平ストローク±250mm である．

試験条件は，せん断疲労試験時の載荷面圧は実橋の最低死荷重面圧である1.5MPa とした．水平加振変位は許容せん断ひずみ±70%の片振幅分から，総ゴム厚の±35%に相当する変位（±18.9mm）とした．加振回数は支承便覧 疲労特性の確認例[5)]を参考に，架橋地点における各月の平均日最高・最低温度の差の年平均値を1日あたりの温度変化分とし，年温度変化分と合わせた温度変化から生じると想定されるひずみ量から100 年分の入力エネルギーを求め，これと等価となる試験条件として，加振回数820回を設定した．なお，加振は820回終了後，1,000回まで実施した．水平加振周期はNEXCO試験方法 せん断疲労試験を参考に180秒，加振波形は正弦波とした．

b) せん断疲労試験前後の性能確認試験内容

せん断疲労試験前後の性能確認は，正負交番繰返し載荷前，820回加振後および1,000回加振後の3回

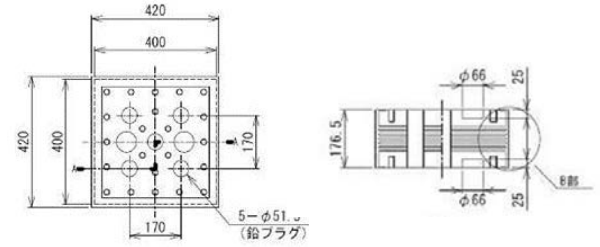


図-5 せん断疲労試験体

表-3 せん断疲労試験体諸元

タイプ	鉛5本タイプ
上下鋼板平面寸法(mm) 内部鋼板平面寸法(mm)	400×400
ゴムせん断弾性率(kN/mm)	1.2
ゴム1層厚(mm/層)	9
ゴム層数(層)	6
内部鋼板厚(mm/枚)	4.5
鉛プラグ径(mm)	51.5
鉛プラグ本数(本)	5
鉛比率(%)	7
1次形状係数	10.39
2次形状係数	7.41
等価剛性(kN/mm)	3.600
等価減衰定数(%)	15.24

実施し，等価剛性，等価減衰定数の変化を確認した．

試験条件は，NEXCO試験方法 各種依存性試験の基準面圧および支承便覧 特性検証試験において基本となる試験条件を参考に，面圧は6Mpa，水平加振は変位±175%，周期2.0秒の正弦波を11 波とし，試験インターバルは8 時間以上とした．

表-4　せん断疲労試験前後の性能確認試験結果

試験順番	回数	開始時	実測値		補正後					
		温度 (℃)	keq (kN/mm)	heq (%)	Keq (kN/mm) 【設計値3.6】			Heq (%) 【設計値15.2】		
					値	変化	対設計比 ≦±10%	値	変化	対設計比 +0%以上
1	疲労試験前	22.5	3.653	17.56	3.648	—	1.3	17.52	—	15.2
3	820回後	23.2	3.773	18.41	3.775	1.03	4.9	18.43	1.05	21.3
5	1000回後	21.6	3.677	17.8	3.69	1.01	2.5	17.69	1.01	16.4

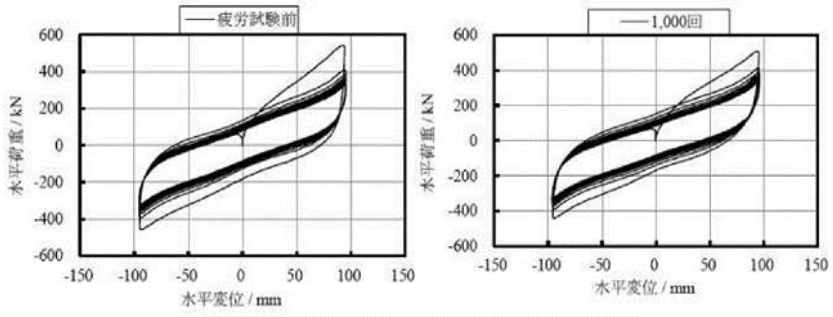


図-6　水平荷重-水平変位関係

c) 性能確認試験結果

せん断疲労試験前後の性能確認試験結果を**表-4**に示す．なお，等価剛性，等価減衰定数は温度補正を実施している．ここで，Keq：等価剛性，heq：等価減衰定数，値：補正後値，変化：せん断疲労試験前からの変化率を示す．初期値に対するせん断疲労後の等価剛性の変化は10%以内で，等価減衰定数も初期値以上であることを確認した．水平荷重-水平変位関係を**図-6**に，切片荷重の変化を**表-5**に示す．なお，表中の切片荷重（Qd）は第5サイクル目の値を示す．

1,000 回後の第5 サイクルにおけるの履歴ループの切片荷重の変化は大きくなく，履歴性状も安定している．せん断疲労試験後鉛がゴム体に徐々に入り込む状況（**図-7**）も確認できるが，せん断疲労試験がエネルギー吸収性能に与える影響は小さい．

なお，実橋に使用するLRBでは，ゴム体内部に中間プレートを配置し，鉛の拘束効果を高める構造を採用している（**図-8**）．

表-5　せん断疲労試験前後の切片荷重の変化

試験順番	回数	開始時 温度 ℃	切片荷重(Qd) (kN)	
			実測値	変化
1	疲労開始前	22.5	101.7	—
3	820回後	23.2	110.3	+8.5%
5	1000回後	21.6	107.0	+5.2%

※切片荷重（Qd）は5サイクル目の値を示す．

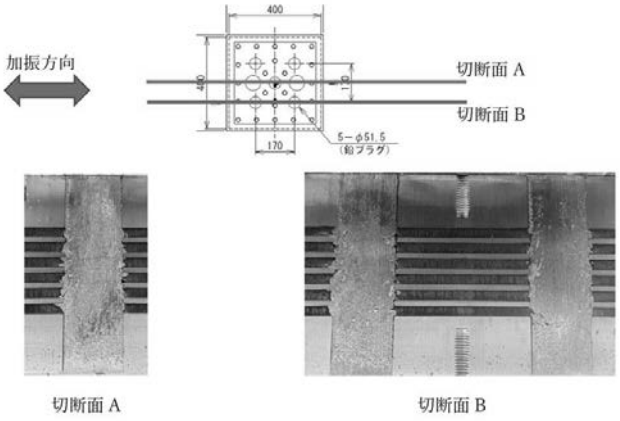


図-7　1,000回せん断疲労試験後の鉛プラグ状況

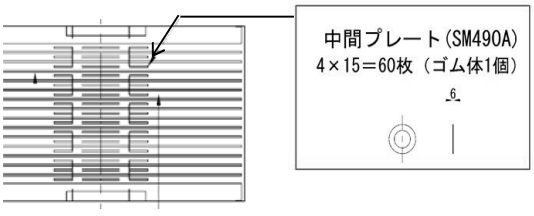


図-8　ゴム体内部の中間プレート

(3) 面圧補正式確認試験

NEXCO試験方法では，実製品の品質管理試験において，死荷重時面圧で等価剛性・等価減衰定数試験（せん断ひずみ±175%）を行うことが規定されているが，LRB出荷試験機の最低面圧が3Mpaであるため，3Mpa未満の実製品では評価できない．そこで，本橋における実製品の品質管理試験ではNEXCO試験方法の面圧依存性試験で規定されてい

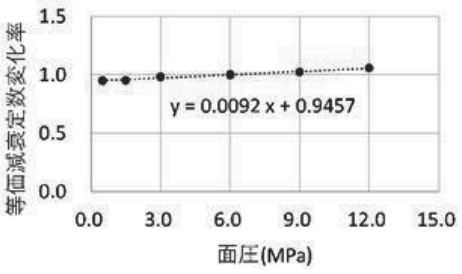
る3～12MPaの面圧検証範囲を低面圧側へ拡大した面圧補正式を確立し，基準面圧での試験結果を実面圧時に補正して評価することとした．

a）試験内容

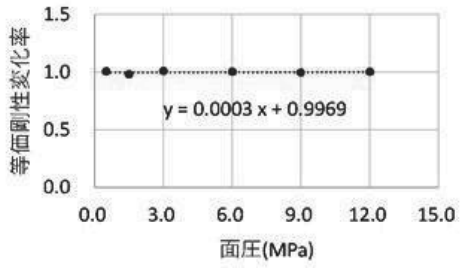
試験面圧はNEXCO試験方法 面圧依存性試験で規定されている3,6,9,12Mpaの4ケースに低面圧側の2条件を追加した0.5,1.5,3,6,9,12Mpaの6 ケースとした．試験条件は，水平加振は変位±175%，周期2.0 秒の正弦波を11 波とし，試験インターバルは8 時間以上とした．

b）試験結果

試験結果を**図-9**に示す．各面圧での等価剛性，等価減衰定数の6MPa 時の値に対する変化率から，線形近似式を用いて補正式を求めた．なお，等価剛性，等価減衰定数は，温度補正を実施した．この面圧補正式を用いて6MPa 時に対する1.5MPa 時の変化率を近似式から求めると等価剛性は-0.1%，等価減衰定数は-4.1%となる．



① 等価剛性



② 等価減衰定数

図-9 面圧補正式確認試験結果

(4) 鉛プラグ温度上昇確認試験

LRBの履歴回数に伴う鉛の発熱と切片荷重の低下は,吸収エネルギーが熱変換されるプロセス上やむを得ないが，鉛を中央1本から4本配置にすることで熱の上昇を抑制できる知見がある[6]．従来の橋梁用LRBの鉛4本から鉛5本に変えた場合に同様の効果が期待できないか確認試験を行った．

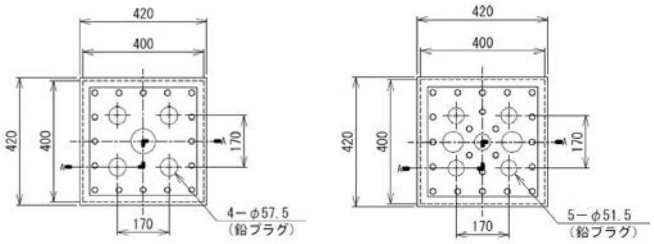
a）試験内容

試験体は**図-10**に示す鉛5 本タイプおよび四隅に配置した鉛4 本タイプを使用する．試験体諸元を**表-6**に示す．熱電対は鉛中心付近に，鉛4本タイプは鉛1本に，鉛5 本タイプは中央の鉛と外側の鉛1 本に設置した．試験条件は，面圧は6Mpa，水平加振は変位±175%，周期2.0秒の正弦波を11 波とした．

b）試験結果

試験結果を**図-11**に示す．加振時の挙動及び温度上昇傾向はほぼ同等であり，鉛の総断面積が等しければ鉛本数の影響は小さい．また，加振終了後の鉛の温度回復状況は，鉛5本タイプの方がやや早い傾向が見られた．なお，鉛温度-時間関係における鉛5本タイプは中央の鉛の値を示す．

なお，実橋に使用するLRBでは，明確な温度上昇抑制効果は見られなかったが，加振時の挙動はほぼ同等であること，また，支承製作時において，鉛5本タイプでは支承中央の鉛部分に熱源を入れてゴムの成型することが可能であることから，本橋のような大型のLRBの製作面で有利となる部分も考慮し，鉛5本タイプを採用することとした．

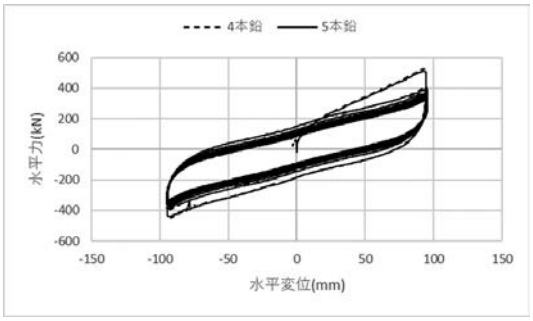


① 鉛4本タイプ　　② 鉛5本タイプ

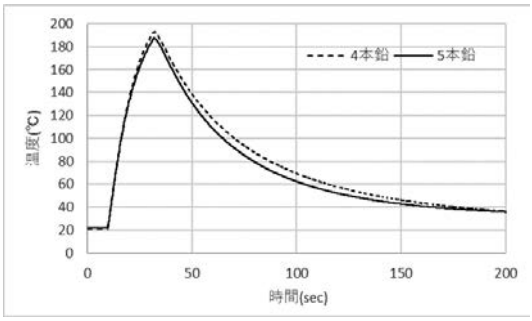
図-10 温度上昇確認試験体

表-6 温度上昇確認試験体諸元

タイプ	鉛4本タイプ	鉛5本タイプ
上下鋼板平面寸法(mm) 内部鋼板平面寸法(mm)	400×400	400×400
ゴムせん断弾性率 (kN/mm)	1.2	1.2
ゴム1層厚(mm/層)	9	9
ゴム層数(層)	6	6
内部鋼板厚(mm/枚)	4.5	4.5
鉛プラグ径(mm)	57.5	51.5
鉛プラグ本数(本)	4	5
鉛比率(%)	6.9	7
1次形状係数	10.39	10.39
2次形状係数	7.41	7.41
等価剛性(kN/mm)	3.599	3.600
等価減衰定数(%)	15.20	15.24



（ⅰ）水平力-水平変位関係



（ⅱ）鉛温度-時間関係

図-11　鉛プラグ温度上昇確認試験結果

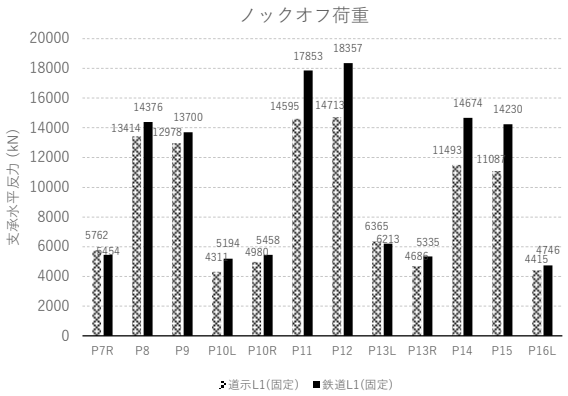
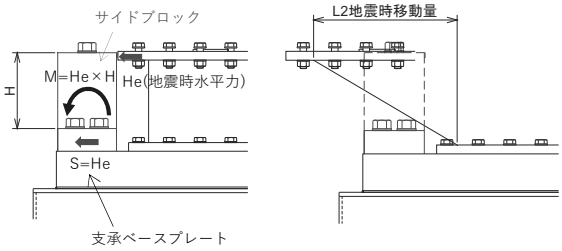


図-12　L1固定（橋直方向）の最大水平反力



①　L1地震時　　②　L2地震時

図-13　サイドブロックによるノックオフ構造

4. ノックオフ構造

(1) 道路鉄道併用橋の免震化に向けた課題

鋼トラス橋の支持条件を全方向弾性支持とすることで，L2地震動に対して上部および下部構造の応答低減を図り，橋梁全体として道路橋示方書[7]（以下，道示）における安全性・供用性・修復性ならびに鉄道構造物等設計標準[8]（以下，鉄道標準）における構造体としての安全性を確保することができた．一方で，鋼トラス橋の橋軸直角方向（以下，橋直方向）を弾性支持とすると，L1地震時に生じる橋梁間の目違いや角折れ等により，鉄道標準における機能上の安全性（列車の走行安全性）の確保が困難となる．そこで，橋直方向の支持条件を常時～L1地震動までは固定とし，L1地震動を超える水平荷重が生じた際は免震となる，ノックオフ機能を有する支承構造を検討する．

(2) ノックオフ荷重

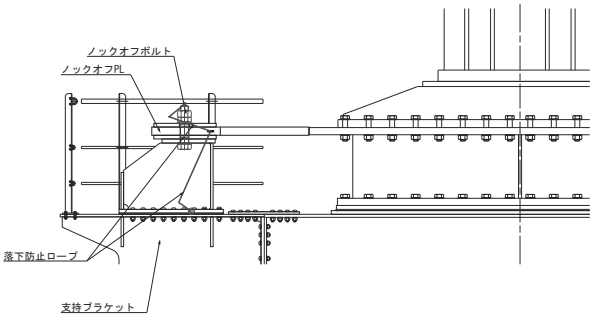
列車の走行安定性の確保が重要であるため，鋼トラス橋の橋直方向を固定とした場合の鉄道標準L1地震動で生じる最大水平反力でのノックオフを前提とする．また，ノックオフ機能の維持管理面にも配慮して，道示L1地震動で生じる最大水平反力も考慮し，鉄道標準および道示で生じる最大水平反力のうち，大きい方を設計荷重（以下，ノックオフ荷重）として設定する（**図-12**）．

なお，橋直方向を固定支持としたL1地震動によるトラス部材の応力超過箇所は，全方向弾性支持としたL2地震動およびサイト波におけるトラス部材の応力超過箇所に包括されており，これらの応力超過が想定される部材の補強により，L1地震動ではトラス部材に応力超過がないことを確認している．

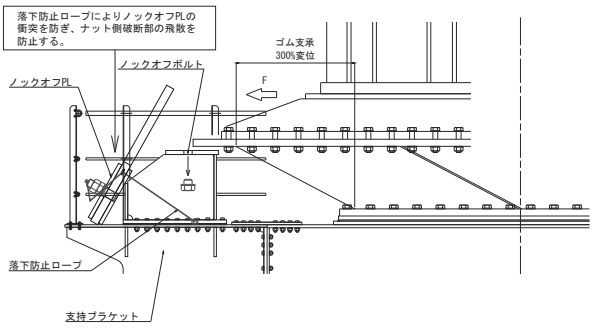
(3) ノックオフ機能を有する支承構造の概要

ノックオフ機能を有する支承構造として，支承ベースプレート上にサイドブロックを設置し，上沓と衝突することで伝えられる所定の水平力に対して取付けボルトを破壊させる形式が採用されている事例がある（**図-13**）．一方で，本従来形式は，引張力が支配的な破壊機構となり，ボルトが脆性破壊しないことが懸念される．

鋼トラス橋の支承構造では，L2地震時の支承移動量に対応するため支承高が高くなっており．サイドブロックに生じる曲げ変形が取付けボルトに作用する引張力をより助長させる構造となる．また，橋直



① 常時およびL1地震時



② L2地震時

図-14 機能分離型ノックオフ機能の構造概要

方向を固定としたL1地震動で生じる最大水平反力が大きいことから，従来形式でのボルト配置ができないことも確認できた．さらに，L2地震時の支承移動量は中間支点で約1mであり，支承の免震機能を阻害しないようにサイドブロックを配置することが困難であった．

そこで，ノックオフ荷重時にボルト部が確実に破壊し，L1地震動を超える地震発生時に速やかに免震構造となるように，ノッチ入りボルトによるせん断制御型の構造を採用した．さらに，免震支承の性能限界であるゴム体の300%のせん断変形を拘束しないようにするため，サイドブロックを支承ベースプレートから独立させる機能分離構造とした（**図-14**）．

ノックオフ機構は，支承両側に設置したブラケットの頂部に取り付けたプレートを，ノッチ入りボルトで固定したもので，L1を超える地震時には上沓が本プレートを押し込むことにより，ボルト軸部に設けたノッチ部でせん断破断し，橋直方向が固定から弾性支持となり免震化する構造である（**図-15**）．ボルト軸部に加工するノッチ位置は，ボルト軸に曲げが作用しないよう，荷重作用位置と反力位置の中間に配置した．また，ノッチを考慮したボルトのせん断耐力は，Von Misesの降伏条件を採用し，終局せん断強度をボルト材料の引張強度を基準として，

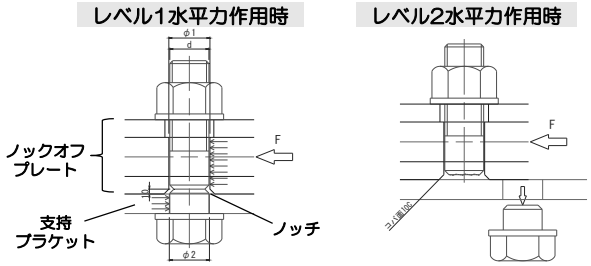


図-15 ノックオフボルトの構造詳細

以下の式(1)により算出する．

$$Fa = N \times A_s \times \frac{\sigma_{bu}}{\sqrt{3}} \qquad (1)$$

ここに，F_a：せん断耐力(kN)，σ_{bu}：ボルトの引張破断強度(N/mm^2)，As：スリット部の断面積(=$\pi d^2/4$)(mm^2)，N：ボルト本数，d：ノッチを考慮したボルト軸径(mm)

6. まとめ

道路鉄道併用橋である鋼トラス橋の耐震対策における免震支承構造の検討において，免震ゴム支承の平面形状が大きく，端支点部は死荷重面圧が低くなる傾向となったことから，縮小供試体を用いた検証を行った．得られた結果を以下に示す．

1) 架橋地点における各月の平均日最高・最低温度の差の年平均値から求めた100 年分の入力エネルギーと等価となる変位，加振回数を与えたせん断疲労耐久試験を行った結果，せん断疲労試験前後において，せん断力ーせん断ひずみの履歴ループの切片荷重の変化は大きくなく，履歴性状も安定しており，等価剛性・等価減衰定数ともに所定の性能を満たしていることを確認した．
2) 面圧依存性試験で規定されている載荷平均面圧3,6,9,12Mpaよりも低い0.5,1.5MPaでの性能確認試験を行い，各面圧での等価剛性，等価減衰定数の6MPa 時の値に対する変化率から，線形近似式を用いて面圧補正式を求めた．この面圧補正式から6MPa 時に対する1.5MPa 時の等価剛性・等価減衰定数の変化率は小さいことを確認した．

3) 鉛プラグ4本タイプと5本タイプに対し，鉛プラグ温度上昇確認試験を行った結果，温度上昇傾向はほぼ同等であることを確認した．なお，実橋に使用するLRBでは，加振時の挙動はほぼ同等であること，大型のLRBの製作面で有利となる部分もあることを考慮し，鉛5本タイプを採用することとした．

また，列車の走行安定性確保のため，橋直方向の支持条件を常時～L1地震動までは固定とし，L1地震動を超える水平荷重が生じた際は免震となるノックオフ機能を有する支承構造とした．具体的な構造として，ノッチ入りボルトによるせん断制御型とし，サイドブロックを支承ベースプレートから独立させる機能分離構造とした．ノッチを考慮したボルトのせん断耐力は，終局せん断強度をボルト材料の引張強度を基準として算出した．

謝辞：本検討にあたっては，照査用地震動，既設橋梁耐震性照査ならびに大規模地震対策（案）策定について，「関西国際空港連絡橋 大規模地震対策検討委員会」（委員長：立命館大学衣笠総合研究機構 土岐憲三特別研究フェロー）の委員の方々に貴重なご意見を頂いた．また，この審議結果を踏まえ，耐震補強の設計･施工に関する具体的な検討課題（既設部材補強，支承構造等）について，「関西国際空港連絡橋 大規模地震対策設計･施工検討委員会」（委員長：京都大学家村浩和名誉教授）の委員の方々に貴重なご意見を頂いた．ここに記して感謝の意を表する．

参考文献

1) 児嶋ほか：関西国際空港連絡橋におけるサイト波の作成，土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，2023.9
2) 篠原ほか：鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）に緩速繰返しせん断変形が及ぼす影響の分析，第 21 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp103-110，2018.7
3) 西日本高速道路㈱ほか：NEXCO 試験方法 第 4 編 構造関係試験方法 試験法 418，2020
4) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2018
5) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧 参考資料-12，pp.501-507，2018
6) 長弘ほか：LRB の減衰材分散配置による熱力学特性改善効果(その 1 加力試験による検証)，日本建築学会大会学術講演梗概集，2019.9
7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012
8) (公財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012