

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評価

阪神高速道路(株)技術部技術推進室 篠原 聖二
阪神高速道路(株)技術部技術推進室 高田 佳彦
阪神高速道路(株)技術部技術推進室 西岡 勉

要 旨

本検討では、LRB の変状メカニズムを明らかにするために、実橋における LRB の常時挙動の調査、鉛の外部への突出要因の推定、および、鉛プラグの分断を再現するために供試体に緩速繰返しせん断変形を与える試験を行い、き裂や分断等の鉛プラグの変状の再現と緩速繰返し変形の影響の評価を試みた。その結果、標準供試体の鉛プラグは分断しなかったが、所定の設計面圧に対して 1/10 の面圧としたケースおよび充填不足のケースの鉛プラグは円弧上に分断した。これは、設計面圧 1/10 および充填不足の供試体では、部分的に引張応力が発生していたためき裂が進展したと考えられる。

キーワード:鉛プラグ入り積層ゴム支承、常時挙動調査、き裂、分断、緩速繰返しせん断変形

はじめに

平成 7 年兵庫県南部地震以降、道路橋の支承としてゴム支承が広く普及してきた。これは、当時の建設省より通達された「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関する仕様¹⁾」において、ゴム支承の被災事例が少なかったことから、ゴム支承を積極的に用いることが望ましいと記載されたこと、また、平成 8 年には、それまでの研究成果としてとりまとめられていた免震設計マニュアル(案)²⁾が、新たに道路橋示方書³⁾に取り入れられたことが理由としてあげられる。一方、近年、平成 23 年東北地方太平洋沖地震や平成 26 年熊本地震において、平成 8 年道路橋示方書に基づいてレベル 2 地震動に対して設計や照査がなされたゴム支承に破断やき裂等の損傷が生じた事例が報告

されており、ゴム支承の経年劣化が要因のひとつとしてあげられている。^{4), 5), 6), 7), 8)}

阪神高速道路においても、15 号堺線の高架橋に設置した、約 17 年が経過した鉛プラグ入り積層ゴム支承 (以下、LRB) に、鉛の突出や、鉛プラグにき裂や分断などの変状が確認された⁹⁾。当該高架橋はレベル 2 地震動に相当するような強い地震動は経験していないことから、LRB の鉛プラグの変状は何らかの常時の作用により生じたと考えられる。常時の作用としては、外気温の日変動や季節変動による、上部構造の温度伸縮に伴う緩速の繰返しせん断変形の影響が考えられる。

今後、発生が想定される南海トラフ地震や都市直下型地震に備えるためには、ゴム支承が地震時に水平反力の分散やエネルギー吸収等の所定の機能を確実に発揮する必要がある。そのためには、



写真-1 鉛プラグ入り積層ゴム支承の変状

既設のゴム支承の変状メカニズムを踏まえて、点検、診断、補修、交換等の維持管理を適切に行う手法を確立しておくことが求められる。

そこで本検討では、LRB の変状メカニズムを明らかにするために、上部構造の温度伸縮に伴う緩速の繰返しせん断変形に着目し、実橋におけるLRB の常時挙動の調査、鉛の外部への突出要因の推定を行った。さらに、鉛プラグの分断を再現するために供試体に緩速繰返しせん断変形を与える試験を行い、き裂や分断等の鉛プラグの変状の再現と緩速繰返し変形の影響の分析を試みた。

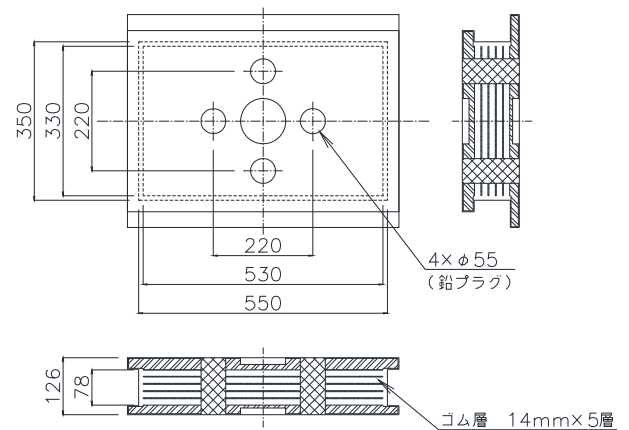


図-1 堺 P181 の LRB の構造 (単位 : mm)

1. LRB に生じた変状

鉛の変状が確認された LRB を有する高架橋は、建設当初 (昭和 45 年竣工) は鋼製支承で支持された単純桁が連続していた構造であったが、平成 7 年に耐震性向上のために桁連結化および水平力分散構造化を行ったことに伴い、支承が LRB に取り替えられ、橋長 285m の鋼 11 径間連結鉸桁橋と構造系が変化している。当該 LRB の構造を図-1 に、諸元を表-1 に示す。被覆ゴム厚 20mm を除くゴム本体の平面寸法は 330mm × 530mm、層厚は 14mm × 5 層 = 70mm、上部構造の死荷重は 473kN、死荷重に対する面圧は 2.7MPa、活荷重を含む全反力は 1086kN、全反力に対する面圧は 6.2MPa、形状係数は一次形状係数 S1 が 6.87、二次形状係数 S2 が 4.71 であり、地震エネルギーの減衰を目的とする鉛プラグ (φ 55mm) 4 本を図-1 に示す

表-1 堺 P181 の LRB の諸元

項目	単位	値
せん断弾性係数	MPa	0.8
設計寸法	mm	330 × 530
鉛プラグ径	mm	55
鉛プラグ本数	本	4
ゴム層厚	mm	70 (14 × 5)
一次形状係数	-	6.87
二次形状係数	-	4.21

ように配置されていた。

鉛の変状は、写真-1 (a) に示すように、ゴム側面から鉛が突出している状況が確認された。また、別の支承では、写真-1 (b) に示すように、ゴム側面から鉛が突出するとともに、上鋼板の上面からの突出も確認されている。過去の点検履歴により、損傷は平成 17 年 (設置後約 10 年) にゴム側面のふくれが、平成 20 年の点検では、側面からの鉛突出の変状が報告されていることから、突出が経年的に徐々に進行していったと考えられる。なお、

このような鉛の突出は、堺線以外にも、同時期に設置された環状線や守口線など他路線においても確認されている。また、当該 LRB を高架橋から取り出し、切断して内部の状態を確認したところ、**写真-1(c)**に示すように鉛プラグにき裂や塊状の分断などの変状も確認された。

鉛の特性にはひずみ速度依存性があり、地震のように比較的早いせん断変形に対しては弾塑性体として安定したエネルギー吸収が期待できる。一方、緩やかなせん断変形に対しては反力が小さく、ほとんど抵抗せずにクリープ変形を起こすので、温度変化による主桁の伸縮に伴う不静定力の低減の効果が得られる。金属素材が塑性変形を受けた後、加熱されるとその歪んだ結晶構造が歪みのない新たな結晶粒になることを再結晶と呼び、それに必要な温度を再結晶温度と呼ぶ。金属の再結晶は鉛特有ではなく、再結晶温度は、例えば鉄が 450℃であるのに対して、鉛は 20℃未満と常温に近い温度である。そのため、鉛の降伏は鋼材と異なり疲労が進行しないので、大変形領域でも安定した履歴特性を示すと言われている¹⁰⁾。しかしながら、高架橋に設置した LRB については、外気温の日変動や季節変動による、上部構造の温度伸縮に伴うせん断変形の影響を常時受けると考えられ、そのように継続的にせん断変形を受ける場合の鉛プラグの再結晶化の特性は明らかになっていない。

2. LRB の常時挙動の調査

実際に変状が生じた高架橋の LRB の支承線を対象に、どの程度の日変動や季節変動による支承変位が生じていたのか評価するために、現地で常時挙動の計測を行った。

2-1 計測方法

調査対象とした堺線の 11 径間連結鉸桁橋を**図-2**に示す。常時計測の対象箇所は、LRB の変状が確認された端支点である堺 P181 支承線上の G3 桁

を支持する LRB と、比較のために橋長 285m の中間付近に位置する堺 P186 支承線上の同じく G3 桁を支持する LRB を対象とした。なお、LRB が平面的に回転するような挙動も想定されたことから、各 LRB の橋軸方向に対して左右 2 箇所(L 側, R 側)に変位計を設置し、移動量は L 側, R 側の平均値により評価した。

日変動については平成 27 年 8 月 18 日に 24 時間の経時変化を計測し、季節変動については、春夏秋冬の変動を評価するために、平成 27 年 8 月 18 日を基準日とし、10 月 28 日、平成 28 年 1 月 29 日、4 月 28 日、7 月 19 日の計 5 回にわたり計測を実施した。

2-2 計測結果

外気温、構造物の温度、および堺 P181 と堺 P186 の LRB の水平変位の日変動の経時変化を**図-3**に、日変動の水平変位の最大値、最小値、平均値(正側および負側の絶対値の平均値)、および平均値に相当するせん断ひずみを**表-2**に示す。中間支点の堺 P186 では、LRB に平均で 1.3mm の水平変位(せん断ひずみ 1.8%)しか生じていないのに対して、端支点の堺 P181 では、5.9mm の水平変位(せん断ひずみ 8.4%)が生じていた。また、季節変動の水平変位の 5 回の計測結果および同様に、最大値、最小値、平均値(正側および負側の絶対値の平均値)および平均値に相当するせん断ひずみを**表-3**に示す。日変動同様に、季節変動についても、中間支点の堺 P186 では、平均で 3.6%のせん断ひずみしか生じていないのに対して、端支点の堺 P181 では、29.3%のせん断ひずみが生じていた。なお、このせん断ひずみ 29.3%という値は、ゴム支承の設計上の常時の許容せん断変位 70%に対して、半分以下の値である。

計測結果より、日変動、季節変動ともに、LRB の変状が生じた端支点堺 P181 上では、中間支点堺 P186 上より大きな水平変位が繰り返し生じていたことが示された。

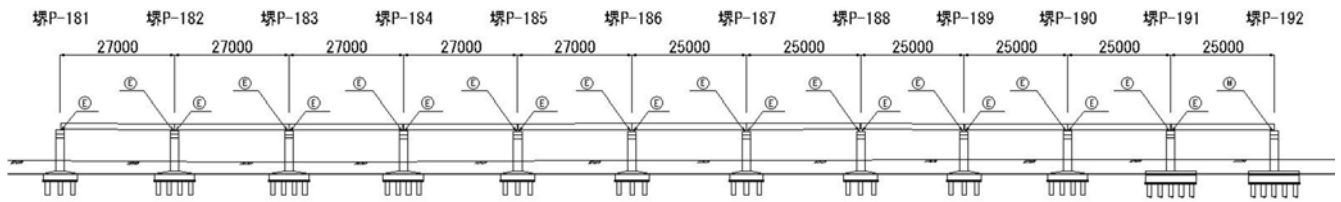


図-2 調査対象橋梁の概要 (単位: mm)

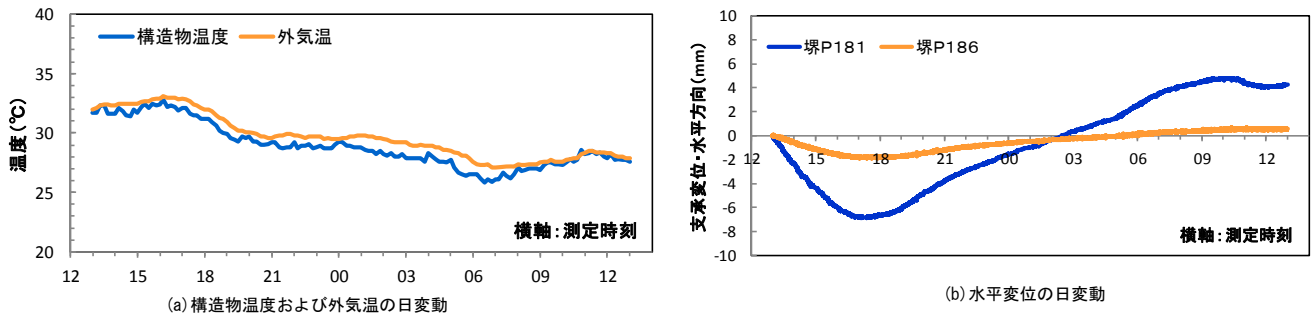


図-3 構造物温度、外気温および水平変位の日変動

表-2 LRB の日変動の計測結果

対象	単位	最大値	最小値	平均値	せん断ひずみ
外気温	°C	33.1	27.1	30.1	-
P181	mm	4.9	-6.9	5.9	8.4%
P186	mm	0.7	-1.9	1.3	1.8%

表-3 LRB の季節変動の計測結果

対象	単位	1	2	3	4	5	最大値	最小値	平均値	せん断ひずみ
		8/18	10/28	1/29	4/28	7/19				
外気温	°C	32.9	21.4	9.6	20.5	33.4	33.4	9.6	21.5	-
P181	mm	0.0	-6.0	-28.0	-10.0	13.0	13.0	-28.0	20.5	29.3%
P186	mm	0.0	-2.0	-2.0	-1.0	3.0	3.0	-2.0	2.5	3.6%

3. 鉛の外部への突出要因の推定

鉛の変状としては、写真-1 に示したように、鉛の外部への突出と鉛プラグの分断という2種類の変状が認められたが、ここでは、鉛の外部への突出要因について推定する。

鉛突出の推定メカニズムを図-4 に示す。当該LRBは、前述したように、鋼鈹桁を支持する鋼製支承の代わりに設置されたものであり、図-4(a) に示すように、鋼鈹桁の下フランジの幅が狭く、ソールプレートがフランジ幅に合わせられたため、鉛プラグ上面の一部が露出した状態で設置されていた。したがって、ソールプレートを介して上載荷重が作用することにより、鉛プラグに発生する荷重分布が不均一になり、鉛プラグ上面の露出部

から鉛が上部に突出したと考えられる。

ゴム側面からの鉛突出については、図-4(b) に示すように、当該LRBは縁端距離(鉛プラグ中心からゴム側面までの距離)が現在の規定の $1.5d$ (ここで、 d は鉛プラグの直径)を下回る $1.0d$ であった。縁端距離が小さい場合、その方向の拘束圧が相対的に小さくなり、LRBがせん断変形を受けると鉛が拘束力の小さい側へ押し出され、それが繰り返されることにより最終的にはゴムを破って側面から突出したものと考えられる。

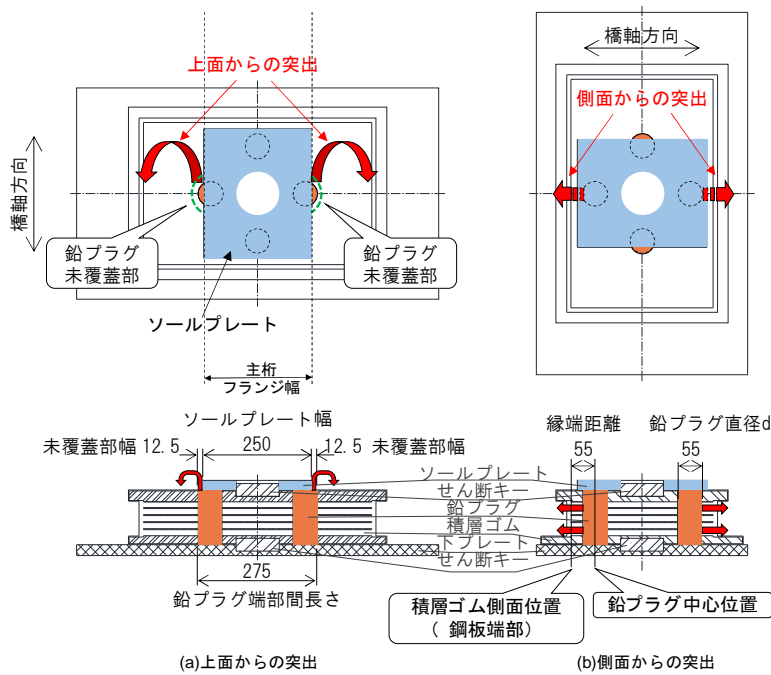


図-4 鉛突出の推定メカニズム (単位: mm)

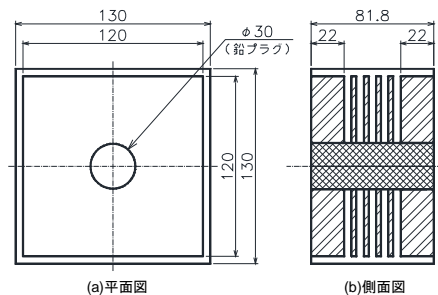


図-5 供試体の形状 (単位: mm)

表-4 供試体の諸元

項目	単位	値
せん断弾性係数	MPa	1.0
設計寸法	mm	120×120
鉛プラグ径	mm	30
鉛プラグ本数	本	1
ゴム層厚	mm	25 (5*5)
一次形状係数	-	6.0
二次形状係数	-	4.8

表-5 緩速繰返しせん断変形の試験条件

Case名	面圧 [MPa]	せん断ひずみ [%]	载荷速度 [mm/s]	せん断ひずみ速度 [%/s]	周期 [s]	備考
Case1-4.4%	6.0	4.4	0.002	0.01	3600	標準
Case1-11%	6.0	11	0.005	0.02	3600	標準
Case1-22%	6.0	22	0.01	0.04	3600	標準
Case2	0.6	22	0.01	0.04	3600	1/10面圧
Case3	6.0	22	0.01	0.04	3600	充填不足

4. 鉛プラグに緩速繰返しせん断変形が及ぼす影響の評価

鉛プラグの分断の要因については、前述したように当該高架橋はレベル2地震動に相当するような強い地震動は経験していないことから、LRBの鉛プラグの変状は何らかの常時の作用により生じたと考えられる。そこで本検討では、LRBの供試体に緩速繰返しせん断変形を与える試験を行い、き裂や分断等の鉛プラグの変状の再現と緩速繰返し変形の影響の評価を試みた。

4-1 試験方法

供試体の形状を図-5に、諸元を表-4に示す。供試体の諸元は、道路橋支承便覧¹¹⁾(以下、支承便覧と称す。)に規定されている条件を満足する

ように設定した。各Caseの試験条件を表-5に示す。標準供試体(Case1)については、作用させる最大せん断ひずみの大きさの影響を評価するために4.4%、11%、22%の3パターン(Case1-4.4%、11%、22%)を設定した。また、鉛プラグに生じる圧縮力が及ぼす影響を評価するため、設計面圧はCase1と同じ6.0MPaのまま、緩速試験中の面圧を設計面圧の1/10の0.6MPaとしたケース(Case2)を設定した。さらに、当該高架橋では、LRBの鉛プラグの一部の外部への流出が確認されたことから⁸⁾、鉛プラグの充填量を標準供試体よりも予め減少させたケース(Case3)を設定した。通常、ゴム支承に設ける鉛プラグ孔の体積を超える体積の鉛を鉛プラグとして充填するが、Case3については、鉛プラグ孔相当の充填量に留めている。

緩速载荷試験機を図-6(a)に示す。LRBに正弦

表-6 緩速繰返しせん断変形の試験結果

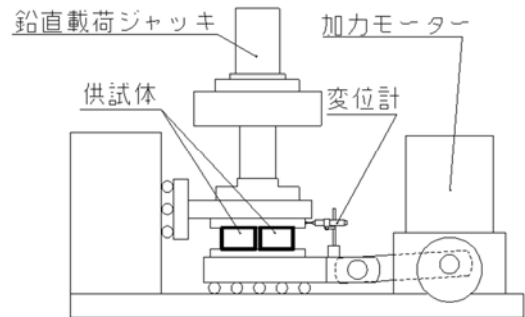
Case名	単位	Case1 (標準供試体)			Case2 (1/10面圧供試体)		Case3 (充填不足供試体)	
せん断ひずみ	%	4.4%	11%	22%	22%	22%	22%	22%
断面写真	—							
加振回数	回	3020	3018	10024	790	5001	1152	5021
加振時間	日間	126	126	418	33	208	48	209
累積せん断変形量	%	5.3E+04	1.3E+05	8.8E+05	7.0E+04	4.4E+05	1.0E+05	4.4E+05
累積せん断変形量に相当する年数	年	4.3	10.8	71.9	5.7	35.9	8.3	36.0
き裂の進展の有無	—	なし	なし	なし	あり	あり	あり	あり
分断の有無	—	なし	なし	なし	あり (1箇所)	あり (2箇所)	あり (1箇所)	あり (2箇所)
切片荷重の変化率	%	—	—	+12.5	+13.4	+1.2	+3.9	-1.0

波パターンの正負繰返し変形を変位制御により与える荷重を行った。加振周期は、既往の研究¹²⁾におけるせん断応力とせん断ひずみ速度の関係から、鉛プラグの変形が緩速の領域にあると考えられる1サイクル1時間の周期とした。なお本試験では、後述するように最大10024回の緩速繰返し試験を行っており、この試験を行うために418日間を要した。

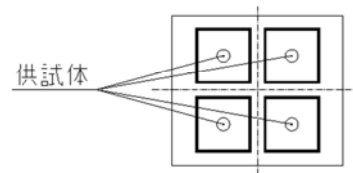
試験機には図-6(b)に示すように同じ供試体4基を同時にセットし、所定の繰返し回数に達した供試体を取り出し、せん断特性試験によるエネルギー吸収性能の変化の評価および断面切断による鉛プラグの状態の確認を行った上で、また新たな供試体をセットして、緩速荷重試験を継続する手順を繰り返した。緩速繰返しせん断試験後のLRBのエネルギー吸収性能の変化の評価は、JIS K 6411-2012¹³⁾のせん断特性試験を参考にせん断ひずみ γ 175%の基本特性試験とせん断ひずみ γ 250%の地震時特性試験により行った。なお、エネルギー吸収性能は、第5サイクルのせん断力-せん断ひずみの履歴ループの切片荷重により評価した。断面切断による鉛プラグの状態の確認は、荷重方向と平行に切断して、目視によりき裂や分断の状態を確認した。

4-2 試験結果

緩速繰返し変形試験での繰返し回数と供試体切



(a)緩速荷重試験機



(b)供試体配置平面図

図-6 緩速繰返しせん断試験セットアップ

断面の鉛プラグの状態の関係を表-6に示す。せん断ひずみ振幅の大きさが鉛プラグへ与える影響の評価を目的とした標準供試体シリーズ (Case1-4.4%, 11%, 22%) では、せん断ひずみ γ 22%で10024回まで繰返し荷重を行ったが、き裂の進展は認められなかった。一方、設計面圧に対して1/10の面圧としたCase2の供試体は、790回加振した場合に初めて鉛プラグの分断が確認された。鋼板とゴム層の境界付近の鉛プラグ表面から分断が始まっており、円弧を描く様に分断していた。また、設計面圧1/10試験における最多回数の5001回の荷重を行った供試体では、上下鋼板部

の対称な2箇所の位置に円弧状の分断を確認した。仮に、表-1の堺 P181の日変動移動量(8.4%)を用いて、緩速繰返し試験において分断が生じた累積せん断変形量に達する使用年数を算出すると、1箇所目の分断が確認された790回は5.7年に、2箇所の分断が確認された5001回は35.9年に相当する。

Case3の鉛プラグの充填量が少ない供試体は、1152回加振した場合に初めて鉛プラグの分断が確認された。また、Case3における最多回数の5021回の载荷を行った供試体でも、Case2同様、上下対称な2箇所の位置に分断を確認した。ただし、分断位置はCase2が上下鋼板に囲まれてた範囲において円弧状に分断したのに対して、Case3では、内部鋼板に囲まれた範囲において円弧状に分断していた。なお、Case2同様に、表-1の堺 P181の日変動移動量(8.4%)を用いて、緩速繰返し試験において分断が生じた累積せん断変形量に達する使用年数を算出すると、1箇所目の分断が確認された1152回は8.3年に、2箇所の分断が確認された5021回は36年に相当する。標準供試体(Case1)の鉛プラグは分断しなかったが、設計面圧1/10の供試体(Case2)と充填不足の供試体(Case3)の鉛プラグは分断した。これは、鉛プラグ内の応力場の状態の相違が要因として考えられる。標準供試体の場合、6.0MPaの面圧作用により鉛プラグはせん断変形中も圧縮応力場が維持されるため、き裂が進展しづらい状態であったと考えられる。これに対し、Case2の鉛プラグは面圧が0.6MPaと小さいため、Case3の鉛プラグは周囲に隙間があり十分な拘束効果が得られなかったため、共にせん断変形中に引張応力が生じやすい状態にあったため、き裂が進展し分断に至った可能性が考えられる。

5. 結論

本検討では、LRBの変状メカニズムを明らかにするために、実橋におけるLRBの常時挙動の調査、

鉛の外部への突出要因の推定、および、鉛プラグの分断を再現するために供試体に緩速繰返しせん断変形を与える試験を行い、き裂や分断等の鉛プラグの変状の再現と緩速繰返し変形の影響の評価を試みた。以下に得られた主な知見を示す。

- (1) LRBの変状が生じた高架橋を対象に、LRBの挙動を計測した結果、日変動、季節変動ともに、LRBの変状が生じた端支点では、中間支点より大きな水平変位が繰返し作用していたことが示された。
- (2) LRBに生じた変状のうち、上面からの外部への突出については、鉛プラグ上面の未覆蓋部から流出し、ゴム側面からの外部への突出については、鉛プラグ側方のゴム厚が十分ではなかったため、LRBの常時の繰返しせん断変形により、鉛プラグがゴムの破り、外部へ突出したものと考えられる。
- (3) 鉛プラグの分断については、LRB供試体による緩速繰返しせん断変形試験の結果、標準供試体の鉛プラグは分断しなかったが、所定の設計面圧に対して1/10の面圧としたケースおよび充填不足のケースの鉛プラグは円弧状に分断した。
- (4) 標準供試体はせん断変形中も鉛プラグ内に面圧作用による圧縮応力場が形成されていたのに対して、設計面圧1/10および充填不足の供試体では、部分的に引張応力が発生していたためき裂が進展したと考えられる。

一般に、支承の設計面圧は死荷重反力に活荷重反力を加えた全反力となる。一方、実際に支承に常時作用しているのは死荷重反力のみであり、設計面圧よりも小さな面圧しか作用していない状態となる。今回、堺線で見られたような鉛プラグの分断の現象が他の路線で発生していないか、抜き取り調査が必要であると考えられる。

謝辞：本検討は、阪神高速道路株式会社とオイレス工業株式会社との「鉛プラグ入り積層ゴム支承の耐久性に関する共同研究」の成果の一部である。

また、検討にあたっては一般財団法人阪神高速道路技術センター主催の「劣化した LRB の性能検証に関する検討会（主査：京都大学防災研究所 五十嵐晃教授）」の委員各位から貴重なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 建設省道路局：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様，1995.
- 2) (財)土木研究センター：建設省道路橋の免震設計法マニュアル（案），1992.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.
- 4) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国土技術政策総合研究所資料第 646 号/土木研究所資料 4202 号，2011.
- 5) 曾田信雄，山田金喜，木水隆夫，広瀬剛，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol. 59A，pp. 516-526，2013.
- 6) 山田金喜，曾田信雄，木水隆夫，広瀬剛，名古屋和史，鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討，構造工学論文集，(公社)土木学会，Vol. 59A，pp. 527-539，2013.
- 7) 篠原聖二，星隈順一：地震により損傷した鉛プラグ入り積層ゴム支承の特性評価に関する実験的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）Vol. 71，No. 4，[特]地震工学論文集，Vol. 34，pp. I_587-I_599，2015. 9.
- 8) 国土交通省 国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人 土木研究所：平成 28 年（2016 年）熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料第 967 号，土木研究所資料第 4359 号，2018. 3.
- 9) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，八ツ元仁，五十嵐晃，党紀，東出知大：経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の残存性能に関する実験的検証，土木学会論文集 A1 Vol. 70 No. 4（地震工学論文集第 33 巻），2014.
- 10) (公社)土木学会地震工学委員会地震防災技術普及小委員会：実務者のための耐震設計入門別冊，2001. 10.
- 11) (社法)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 12) W. H. Robinson：LEAD-RUBBER HYSTERETIC BEARINGS SUITABLE FOR PROTECTING STRUCTURES DURING EARTHQUAKES, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL10, 593-604, 1982.
- 13) JIS K 6411:道路橋免震用ゴム支承に用いる積層ゴム-試験方法，2012.

EVALUATION OF LOW-CYCLE FATIGUE BEHAVIOR OF PURE LEAD FOR INVESTIGATION OF DURABILITY OF RUBBER BEARINGS WITH LEAD PLUGS (LRB)

Masatsugu SHINOHARA, Yoshihiko TAKADA and Tsutomu NISHIOKA

To evaluate the mechanical properties of lead plugs used in lead rubber bearings subjected to cyclic deformation, uniaxial low-cycle fatigue tests and tensile deformation tests of pure lead were conducted under various strain rate and temperature conditions. The effects of the strain rate and temperature dependencies on the low-cycle fatigue behavior of pure lead were determined from these test results. In addition, the result of a finite element analysis of lead rubber bearings under shear deformation suggested that the stress induced in the lead plugs during cyclic deformation would fall within the compression range if an axial compressive stress of 6 MPa was applied to a bearing sufficiently filled with lead. It is surmised that the rate of fatigue crack growth under this condition is remarkably lower than that under the tensile stress condition.

篠原 聖二



阪神高速道路株式会社
技術部 技術推進室
Masatsugu Shinohara

高田 佳彦



阪神高速道路株式会社
技術部
Yoshihiko Takada

西岡 勉



阪神高速道路株式会社
技術部 技術推進室
Tsutomu Nishioka