

経年劣化ゴム支承の耐震性能低下に関する確認試験

林 訓裕¹・足立幸郎²・上田勝久³・肥田 肇⁴・坂本直太⁵・五十嵐 晃⁶

1正会員	工修	阪神高速道路株式会社	大阪管理部
2正会員	工博	阪神高速道路株式会社	保全交通部
3正会員	工修	阪神高速道路株式会社	大阪管理部
4正会員	工修	阪神高速道路株式会社	神戸管理部
5正会員		阪神高速技術株式会社	技術部
6正会員	Ph.D.	京都大学防災研究所教授	

(〒552-0006 大阪府大阪市港区石田3-1-25)
(〒541-0056 大阪府大阪市中央区久太郎町4-1-3)
(〒552-0006 大阪府大阪市港区石田3-1-25)
(〒650-0041 兵庫県神戸市中央区新港町16-1)
(〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町1-4-1)
(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

1. はじめに

積層ゴム支承（以下、「ゴム支承」という。）の長期間供用にともない、経年劣化と考えられる損傷が顕在化している。劣化によって支承性能へ及ぼす影響は明確になっていないため、兵庫県南部地震以前から供用しており、かつ経年劣化損傷のあるリングプレート型積層ゴム支承（以下、「リング沓」という。）を実橋から取り出し、各種試験を実施し、残存機能に与える影響を調べたところ、終局耐力の著しい低下が確認された¹⁾。

本稿では、これら耐震性能低下の原因究明を目的として実施した詳細試験結果を報告する。

2. 対象支承の概要

リング沓の構造は天然ゴム（NR）4層の積層構造で、ゴムの平面寸法は400mm×450mm、総厚は107mmである。ソールプレートとベースプレートが省略された低厚の構造であり、ゴムと下フランジは加硫接着により一体化された片フランジ付きゴム支承となっている。

27年間供用されたことにより、支承表面にはオゾンきれつが発生しており、その最大深さは21mmまで達していた。被覆ゴム厚が5mmであることから、本体ゴムまできれつが進展していたことになる。また、桁端部に位置していたため、雨水や伸縮装置からの漏水等により、写真-1に示すように下フランジの一部に腐食が認められた。

3. 試験内容ならびに結果

実橋より取り出した劣化支承5基 (G1,G2,G5,G7,G9 ; 数字は桁番号, 以下同様) と, 比較用に再現製作したリファレンス支承 (N1,N2,N3) に対して表-1に示す試験を実施した. なお, リファレンス支承は, 前稿¹⁾にて載荷試験を実施後, リングプレートの形状が劣化支承と異なっていることが判明したため, 同じ形状にて再製作したものである.



写真-1 取出し後の支承状況

表-1 試驗項目一覽

試験項目	測定項目	規格値
リファレンス支承力学試験	力学性能	—
載荷試験画像分析	破断過程状況	—
目視観察	破断面状況	—
引張試験	引張強さ	15N/mm ² 以上
	破断伸び	550%以上
接着はく離試験	接着性能	7N/mm以上
組成分析	溶存酸素量	—
ラップシエア試験	破断応力	—

(1) リファレンス支承の力学試験

各供試体に対して表-2に示す力学試験を行った。載荷装置・プロトコルは前稿¹⁾と同一である。

L1試験のサイクルごとの等価剛性 keq をプロットした結果を図-1に示す。ここでのサイクルとは、正負交番載荷により支承のゴム総厚150% (160.5mm)の水平変位を1往復与えることと定義する。なお、図中には劣化支承3体 (G1, G2, G5) と旧リファレンス支承1体も掲載している。全支承で初期サイクルにて大きく剛性が低下しており、これは処女載荷に現れるMullins効果によるものと考えられる。およそ5~6サイクル目以降は漸減しているが、1サイクル目と15サイクル目を比較すると、リファレンス支承N1, N2ともに約20%の剛性低下となっている。

終局限界試験にて得られたせん断ひずみ-反力関係の比較を図-2に示す。リファレンス支承N1, N2は前述のL1試験を経て本試験を行っているが、ほぼ

表-2 リファレンス支承の力学試験内容

支承	力学試験内容
リファレンス N1	L1 試験から終局
リファレンス N2	L1 試験から終局
リファレンス N3	終局のみ

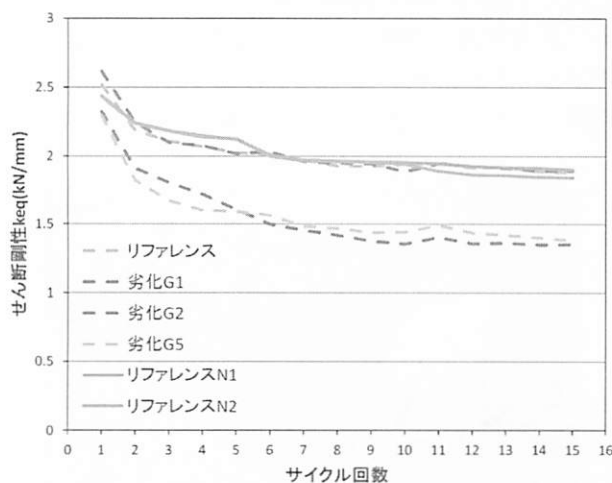


図-1 L1試験におけるサイクルごとの等価剛性の変化

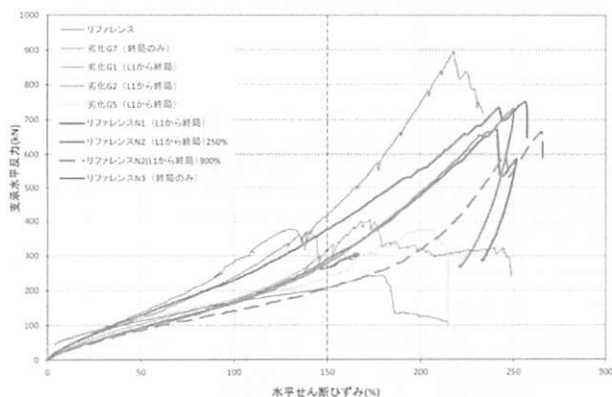


図-2 終局限界性能試験結果

同様の履歴となっている。これに対し、リファレンス支承N3は終局限界試験のみを行っており、N1, N2と比較してやや剛性が高くなっている。

さらに、リングプレート形状の異なる旧リファレンス支承と比較すると、終局耐力が2割程度低下している。これはリングプレート形状の違いによるものと考えられる。

(2) 載荷試験画像の分析

劣化支承とリファレンス支承の載荷試験のビデオ画像から破壊開始点やその進展状況を分析した。

劣化支承G2, G5は、L1試験に続いて終局限界試験を行った。L1載荷時に下フランジとゴムの境界部が大きく開口し、繰り返し載荷によりその境界部が滑るような挙動が確認されており、L1試験時に既に一部が破断していた可能性がある。G2及びG5の終局試験画像を写真-2に示す。終局限界試験ではこの下フランジとゴムの境界部が滑るように破断した。

最も終局荷重が低かった劣化支承G7の終局試験画像を写真-3に示す。変形が大きくなるにつれリング

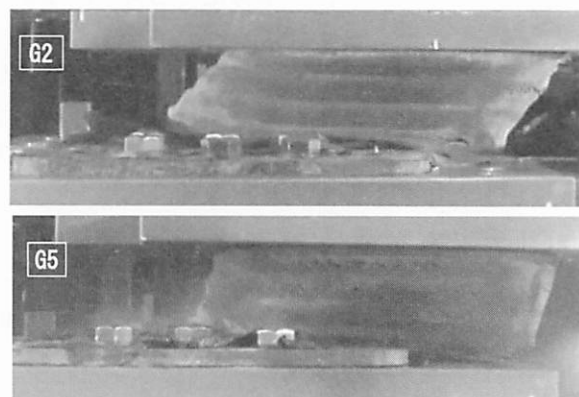


写真-2 劣化支承G2及びG5の終局限界試験画像

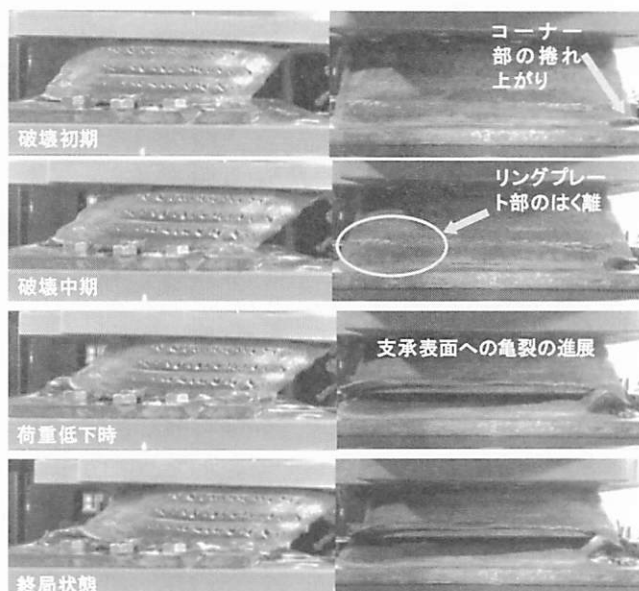


写真-3 劣化支承G7の終局限界試験画像

プレート部のはく離が始まり、徐々に支承表面へきれつが進展した後、荷重低下とともに終局状態となった。破断位置はリングプレート下面とゴムの境界部、ならびに下フランジとゴムの境界部であった。

一方、リファレンス支承の終局時の破壊位置は、内部鋼板最下段位置及び上鋼板位置となっている。これは一般的な支承の荷重試験と同様で、局部的な引張が卓越する位置からの破壊であり、明らかに劣化支承と異なる位置であった。

経年劣化損傷であるオゾンきれつが荷重試験時に開口している状況を写真-4に示す。特に上鋼板部が大きく開口しているが、上鋼板部は引張が卓越するため、ここが破壊の起点になりうるほどの大きな開口であった。しかしながら、オゾンきれつが奥深く進展して破断する状況は確認されなかった。これはすべての劣化支承に共通しており、オゾン劣化によりゴム表面にきれつが発生していても破断の起点に

なるとは考えにくい状況であった。この状況から、オゾンきれつが耐震性能や破断へ及ぼす影響は限定的と考えられる。なお、支承取出しの際にゴム表面に大きく傷が生じたG1支承についても、その傷はオゾンきれつと同様に破断の起点とはならなかった。

(3) 目視観察

終局試験後の支承の破断面を目視及びマイクログラフにて観察を行い、破断面の状況を調査した。なお、終局後でもゴムが破断していない部分については刃物で切断している。ゴムが破断した場合、金属のそれと同様に破断面には破壊機構に見合った破断面が現れ、代表的な破面はせん断変形破断の周期的なストライエーションである²⁾。写真-5はリファレンス支承の鋼板とゴムとの境界面が破断した部分の鋼板側であり、周期的な模様（ストライエーション）を呈している。鋼板側にストライエーションが



写真-4 荷重試験時のきれつ開口状況

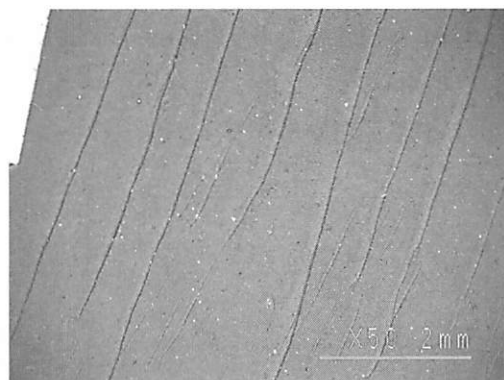


写真-5 リファレンス支承の破断面（鋼板側）

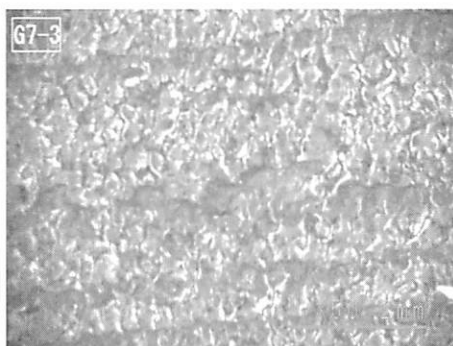
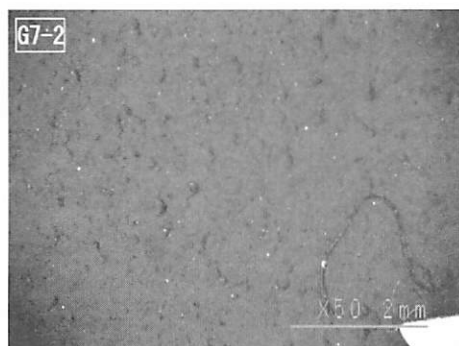
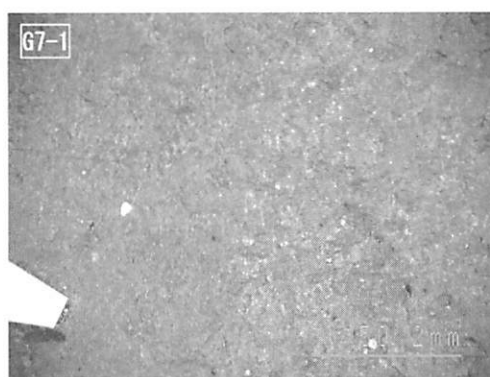
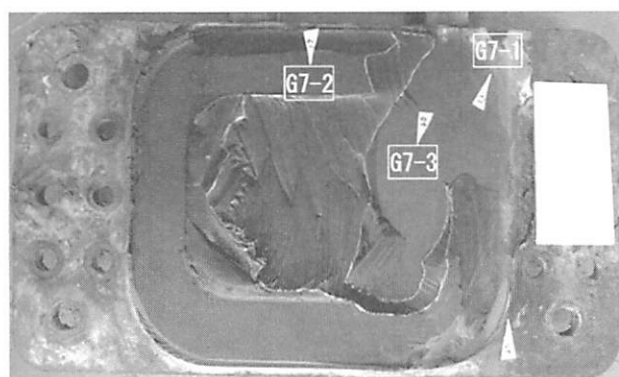


写真-6 劣化支承 G7 の破断面

確認できるということは、鋼板側にもゴムが薄く残っていることを示している。

最も終局耐力が低かった劣化支承 G7 の破断面を写真-6 に示す。破断位置は下フランジ及び内部鋼板の最下段面である。G7-1～G7-3 はすべて鋼板とゴムとの境界を撮影したものである。G7-1 は支承最外縁であり、錆が発生している。G7-2 は内部鋼板面のゴム側であり、平滑な状況である。G7-3 は下フランジ面であり、ゴムが完全にはく離して鋼材面が観察できる。いずれの破断面もリファレンス支承に現れたストライエーションは確認できない。

この G7 の破断面状況は、他の劣化支承も同様であった。リファレンス支承の破断面と異なっている状況から、劣化支承の破断の支配的部分はゴム層ではなくゴムと鋼板との接着面であると考えられる。

(4) 引張試験

支承からゴム部材の供試体を採取して引張試験を行い、引張強さと破断伸びを測定した。測定結果を図-3及び図-4に示す。なお、以降の試験結果は前稿にて実施した引張試験も併せて示している。

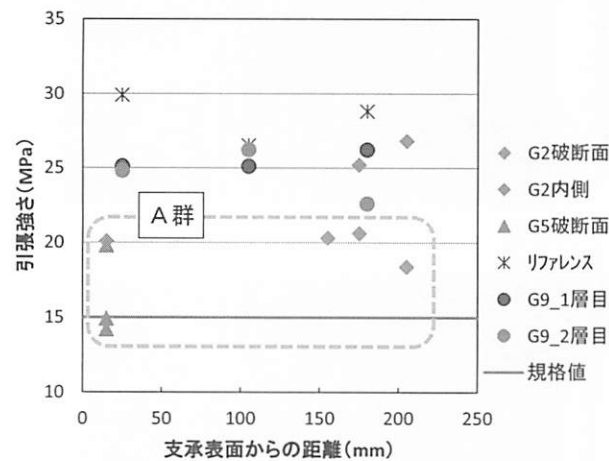


図-3 引張試験（引張強さ）結果

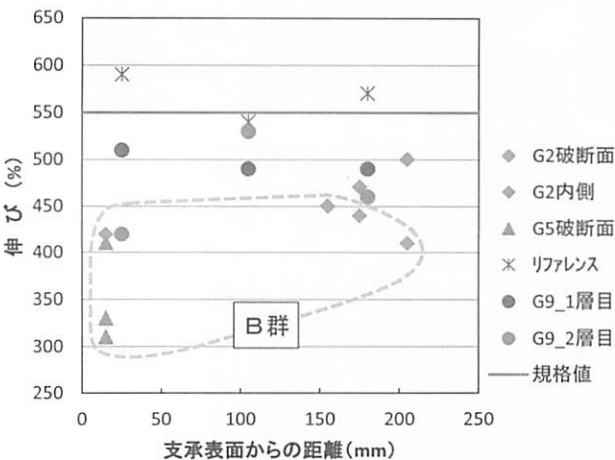


図-4 引張試験（破断伸び）結果

引張強さ及び破断伸びは、リファレンス支承に比べ劣化支承が低く、特に劣化支承の伸びはすべてが規格値を下回っており、材料劣化が顕著に表れている。引張強さ及び破断伸びは支承表面からの距離による明確な傾向は確認できない。

図中に示すA群及びB群はゴムと下フランジの破断面から採取した試料であり、劣化支承の中でも低い値を示している。特にG5 (▲) は錆面付近から採取した試料であり、水等の外的劣化因子が影響してゴムが劣化していることが分かる。

これらの結果から、表面以外の内部ゴム自体の材料劣化は微少であり、この微少劣化が終局荷重低下

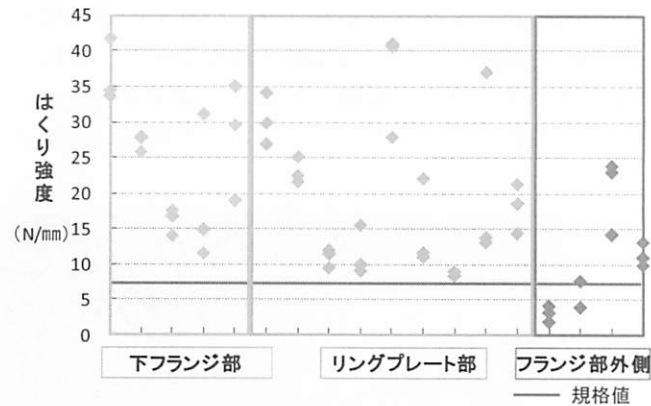


図-5 接着はく離試験結果

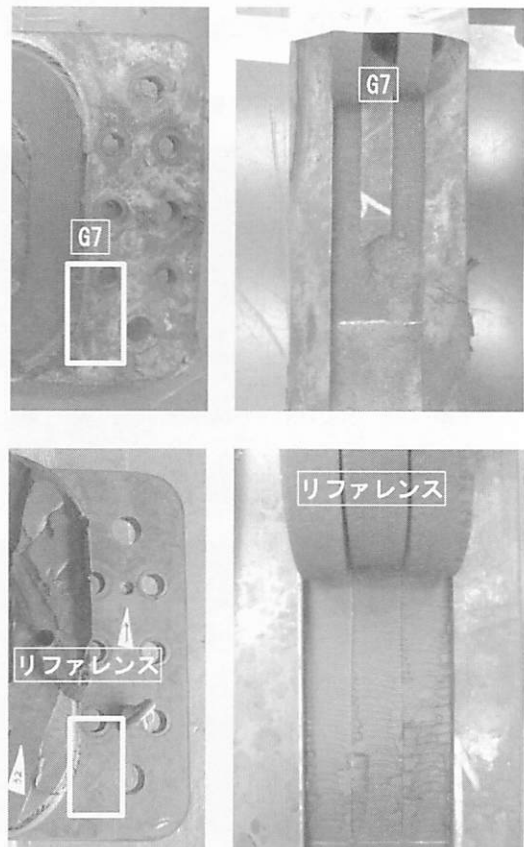


写真-7 フランジ部外側のはく離試験写真

の主要因となっているとは考えにくいものの、下フランジを被覆している部分の薄層ゴムは水や外気にさらされると劣化が大きく進行し、下フランジ鋼板自体も腐食すると考えられる。

(5) 接着剤はく離試験

支承から供試体を採取して90°はく離試験を行い、ゴムと鋼板の接着強度を測定した。測定結果を図-5に示す。ゴム支承内部のはく離強度は、ばらつきはあるもののすべて規格値を満足している。劣化支承、リファレンス支承ともにばらつきが大きいことは、供試体の作成方法によるものと考えられる³⁾。

しかし、フランジ部外側のはく離強度が一部規格値を満足しておらず、そのはく離性状が異なるものが確認された。写真-7にG7支承とリファレンス支承のフランジ部外側のはく離試験後の写真を示す。G7のはく離面は、鋼板との接着面が滑らかな性状ではく離しているのに対し、リファレンス支承は接着面にストライエーションを伴ったはく離性状であった。このことから劣化支承のはく離面は、接着面に異常が生じ、それに伴いはく離強度が低下したと考えられる。

(6) 組成分析（溶存酸素量測定）試験

ゴムの酸化劣化を確認するために、ゴムの溶存酸素量を測定した。その結果を図-6に示す。劣化支承はリファレンス支承に比べて全体的に低い傾向は確認されたものの、表面から深部方向への距離による差は明確に現れなかった。G2において、下フランジの接着破断面と、そこから10mm深い部分を測定した。その結果両者に差は生じなかったことから、下フランジが先行はく離してそこから酸素が供給された可能性は低いと考えられる。

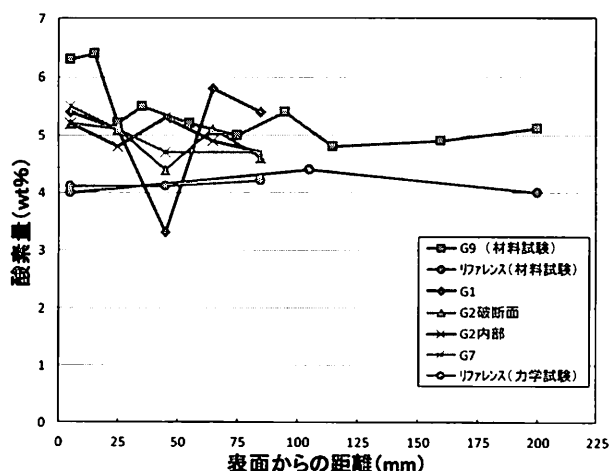


図-6 組成分析（溶存酸素量測定）試験結果

(7) ラップシエ試験

回転など実際のゴム支承のせん断変形挙動を再現しながら、ゴム表面のきれつや鋼板との接着面のはく離などがゴム支承の性能に及ぼす影響を確認することを目的として、ラップシエ試験を実施した。供試体は図-7に示すとおり接着面積や接着形状の異なる5タイプ（a 供試体～e 供試体）を3体ずつ合計15体作成し、せん断方向に破断するまで引張変位を与えた。試験結果を図-8に示す。

接着面積や形状の違いによる破断応力度に明確な差異は確認されなかった。応力集中が高いと考えられるe 供試体においても同様の結果となっていることから、ゴムと鋼板の接着が良好であった場合は、はく離した部分があったとしてもそれが破断の直接的な要因にはならないことが判明した。

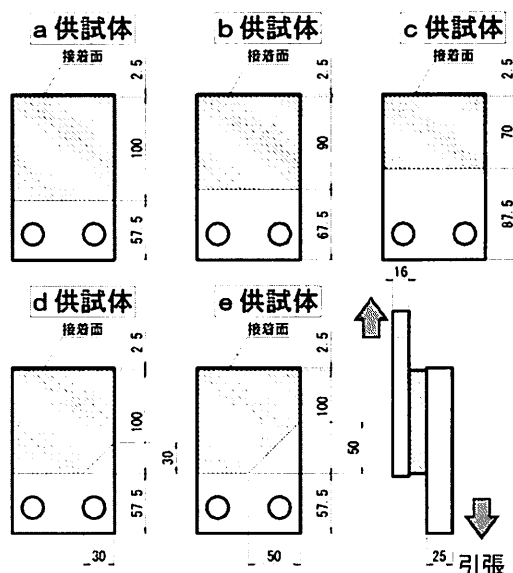


図-7 ラップシエ試験供試体

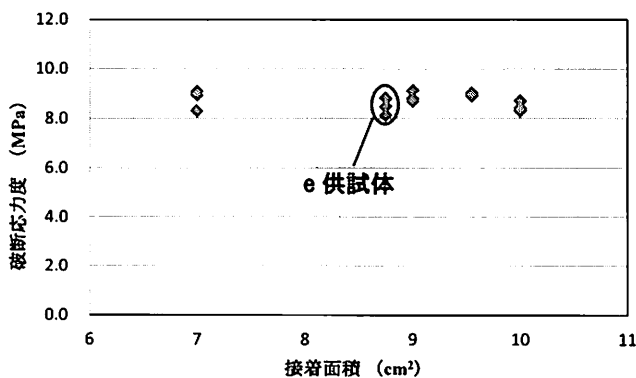


図-8 ラップシエ試験結果

4. 終局耐力低下要因の推定と使用性照査

(1) 終局耐力低下要因の推定

本試験で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 載荷試験の破断状況より、先行破断位置はゴムと下フランジ接着面であると考えられる。また、劣化支承の破断面にはせん断破壊によるストライエーションが発生していないことから、接着層のうち、下フランジとゴムとの接着界面に異常が生じている可能性が高い。
- 経年劣化損傷である表面のオゾンきれつが進展して破断した状況は確認されなかったため、オゾン劣化が終局耐力低下へ与えた影響は限定的と考えられる。
- 引張試験及びはく離試験結果より、表層以外の内部ゴム自体の材料劣化は微少であり、この微少劣化が終局耐力低下の主要因となっているとは考えにくいものの、下フランジを被覆している部分の薄層ゴムは水や空気に触れて劣化が大きく進行し、下フランジ自体が腐食し、その鋼板腐食が接着強度を低下させたと考えられる。
- ラップシエア試験結果より、ゴムと鋼板の接着が良好であった場合は、はく離していたとしても破壊のきっかけとはならない。

これらより、ゴム表面のオゾンきれつが直接的な原因ではなく、ゴムと下フランジの接着面付近が劣化することにより付着力低下が生じてゴムと下フランジ面が先行はく離破断し、終局耐力が低下したものと推定する。

(2) 性能低下と使用性照査

本試験に使用した劣化支承の終局耐力の低下が、橋梁の耐震性に影響を与えているか当時の設計計算書をもとに確認した。なお、等価剛性については著しい低下が確認されていないことから、本稿での検討は割愛する。

当該橋梁の支承設計条件は表-3のとおりとなっている。この設計値を終局限界試験結果に当てはめたものを図-9に示す。劣化支承は設計荷重の169kNまでに破壊したものはなく、設計ひずみ付近では初期載荷の影響のあるG7以外はすべて設計値の0.9～1.1倍の範囲に入っていることから、27年供用時においてL1地震動程度では耐震性能に特段の問題はないと考えられる。しかし、劣化がさらに進行した場合、設計せん断ひずみ以前に破断する可能性は否定でき

表-3 支承設計値

項目	設計値
せん断変形量(常時)	45.4 mm
せん断変形量(地震時)	55.0 mm
せん断変形量(常時+地震時)	100.4 mm
せん断ひずみ(常時+地震時)	93.8 %
水平力(常時+地震時)	169 kN

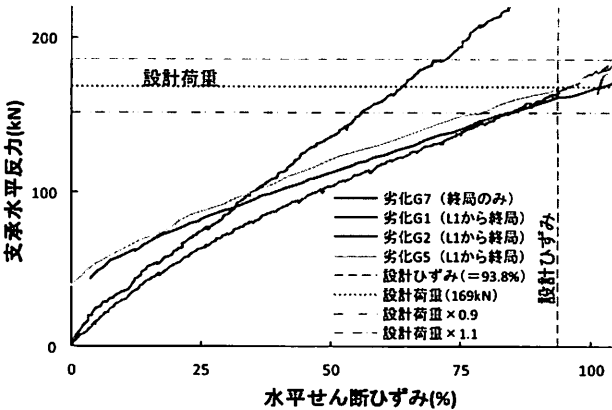


図-9 設計値と終局試験結果

ない。なお、L2地震相当の地震動については、当初設計では考慮されていないため別途考慮する必要がある。

5. おわりに

本試験にて、終局耐力の低下要因として接着面の劣化が影響している可能性があることがわかった。今後は接着面が劣化する原因と接着力の変化、接着力低下が耐震性能にどの程度支配的要因であるのか、などを調査していくことが課題である。併せて、鋼板が発錆・腐食することでゴムとの接着力がどのように変化するかも確認する必要がある。

参考文献

1) 林訓裕・足立幸郎・五十嵐晃・党紀・濱野真彰・東出知大：積層ゴム支承の経年劣化損傷が残存性能に与える影響、第17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，Vol.17，pp.197-202，2014。

2) 高分子材料のフラクトグラフィー—破壊メカニズムと破断面解析事例—，サイエンス&テクノロジー

3) 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，Vol.59A，pp.516-526，2013。