

天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究

杉本 博¹・溝江 実²・山本 吉久³・池永 雅良⁴

¹正会員 工博 北海学園大学教授 工学部土木工学科 (〒064-0926 北海道札幌市中央区南 26 条西 11 丁目)

²正会員 日本道路公団 技術部構造技術課 (〒100-8979 東京都千代田区霞ヶ関 3-3-2 新霞ヶ関ビルディング)

³正会員 東海ゴム工業株式会社 橋梁事業室 (〒485-8550 愛知県小牧市東三丁目 1 番地)

⁴正会員 オイレス工業株式会社 免制震カンパニー技術開発部 (〒326-0327 栃木県足利市羽刈町 1000 番地)

阪神淡路大震災を契機に、橋梁の耐震性向上に寄与するゴム支承は、長期耐久性にも優れることから、全国的規模で採用されている。しかし近年寒冷地における一部のゴム支承に表面き裂が発見された。このような寒冷地における耐候性に関する研究は少なく、ゴム支承の寒冷地での採用に伴い、低温耐候性は解明すべき課題である。本研究では、被覆ゴム部のき裂の発生再現実験により、低温環境下でのオゾン劣化によるき裂の発生メカニズムを解明した。そして、それらの防止方法と低温耐候性評価方法を提案し、その信頼性について屋外暴露試験によって確認した。さらに、き裂による支承機能への影響について、FEM解析と低温環境下での力学的特性を実験的に調査研究し、寒冷地での天然ゴム支承の実用性を確認した。

Key Words: bridge bearing, ozone cracking, exuding speed of wax and ageresister, natural rubber, low temperature

1. はじめに

支承は従来、剛性の高い鋳鋼製が主流であったが、兵庫県南部地震で鋳鋼製支承やそれらを採用した橋梁に大きな損傷が生じたことなどから、地震力を制御できるゴム支承の有効性があらためて認識され、現在全国的に普及し、支承の主流になりつつある。

日本でのゴム支承は、ドイツでの実績からクロロブレンゴム(CR)を用いた支承が最初に実用化され、昭和 36 年に建設した東北本線鬼怒川橋梁に採用されている。その後の経年変化に関する調査^{1),2)}により、その経年耐候性等が評価されて以来、今日のゴム支承普及の礎となっている。

近年、反力分散支承をはじめとする多機能、高性能が要求されるに伴い、弾性率の経年安定性に優れ、耐久性の良好な材料との理由で、ゴム支承には天然ゴムが一般的に使用されるようになった。天然ゴムはクロロブレンゴムに比較して、酸素やオゾンの影響を受けやすいため、老化防止剤による保護と被覆ゴムによる内部ゴムと外気との遮断により劣化を防ぐ設計がなされている。また、最近では免震構造設計としてのゴム支承の採用も増加の傾向にあり、大反力・大ひずみ設計の例に見られるように、ゴム支承には益々重要な機能が要求される状況下にある。

このような背景の中で、最近北海道で実橋に設置され、

一冬経過した天然ゴム支承の側面被覆ゴムの表面にき裂が発生していることが判明した。側面被覆ゴムとは、ゴム支承本体の耐候性を高めるために、設計寸法(内部鋼板寸法)の外側に設けた 5~10 mm の厚さのゴム層である。前述のとおりゴム支承が橋梁の支承として採用されて今日までの 20 数年間、一冬といった比較的短期間でこの種の損傷を生じた事例は過去にほとんど見当たらない。これらの原因究明のため、全国にわたり、日本道路公団の高速自動車道の橋梁に設置されているゴム支承について状態調査を実施したところ、同種のき裂は寒冷地に限定して発生していることが判明した。本件のき裂発生は、寒冷地でのゴム支承を用いた橋梁の耐震設計を進めるにあたって重大な事象であり、早期の原因究明と防止対策の研究が求められた。

関連の既往の研究としては、ゴム支承に関する低温特性として、クロロブレン、天然ゴム支承の低温下における剛性変化についての研究^{3),4),5)}、鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)の低温下における剛性についての研究^{6),7),8),9)}、ゴム材料として一般の低温特性の研究¹⁰⁾があるが、これらは低温下におけるゴム弾性の変化について論じたものであり、低温によるき裂の発生には触れられていない。また、低温条件下で使用されるゴム材の配合設計に関しては単に各種配合剤の基本的な知見を述べられているに過ぎない¹¹⁾。天然ゴム支承の耐候性については、実際に使

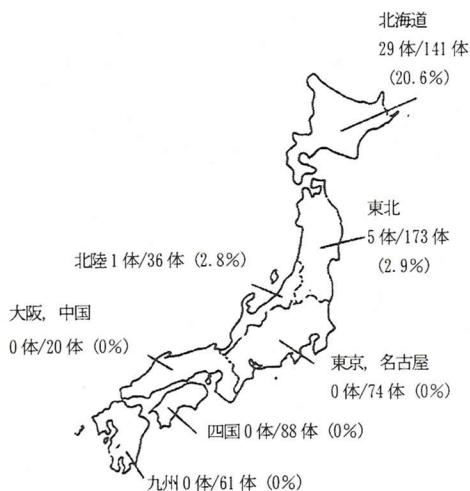


図-1 地域別き裂発生割合

表-1 地域別ゴム支承点検結果

地域	点検数	き裂発生数	発生率 (%)
北海道	141	29	20.6
東北	173	5	2.9
北陸	36	1	2.8
東京・名古屋	74	0	0
大阪・中国	20	0	0
四国	88	0	0
九州	61	0	0
計	593		

用された支承の剛性の変化や圧縮クリープの研究¹²⁾、支承内部のゴムの強度や伸び、弾性率の分布^{13)、14)}および老化防止剤の消耗について研究¹⁴⁾があるものの、温度特に低温環境下での研究はない。さらに加硫ゴムの耐候性に関する研究^{15)、16)、17)、18)}では、ワックスのブルーム機構およびオゾンき裂機構について論じられてはいるが、低温下における耐オゾン性の問題の指摘がなされているに止まっている。寒冷地方においてもゴム支承の採用は増加しており、低温環境下での耐候性の研究、低温特性の把握は重要な課題である。

ここで、本研究では寒冷地すなわち低温環境と天然ゴム支承のオゾン劣化の相互作用に着目し、そのメカニズムの解明と劣化防止策について研究を行い、併せて天然ゴム支承の低温特性の実験的把握により実設計の資料とすることとした。

2. ゴム支承のき裂発生状況

(1) 地域別き裂発生状況調査

北海道で発生したき裂の発生原因を究明するために全

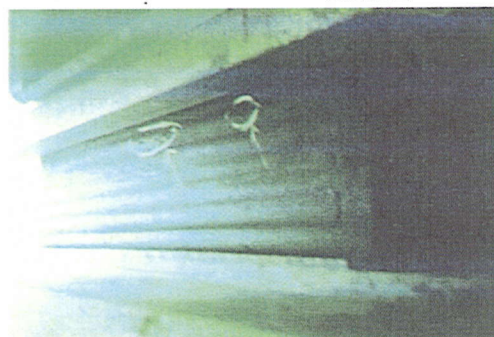
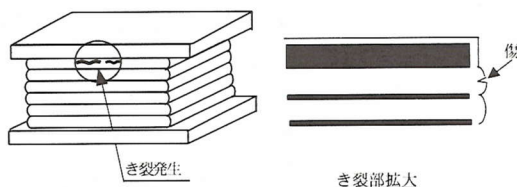


写真-1 き裂の発生状況

国にわたり、日本道路公団の高速自動車道の橋梁に設置されているゴム支承を現地調査することとした。

調査地域は図-1に示すとおり、北海道から九州までT社製の同一配合の天然ゴム支承について総計 593 支承を調査し、き裂の発生有無の判別を行った。その結果を地域別に集計し、整理して表-1に示す。

なお、発生していた代表的なき裂の状態を写真-1に示す。き裂の発生は冬期に、特に気温の低い北海道、東北、北陸の地域に確認され、き裂発生比率からも判るとおり北海道に集中しており、東京以南の地域においては全く発見することができなかった。

これらのことから、き裂の発生原因は寒冷地すなわち低温環境と密接な関係があるものと推察される。

(2) き裂発生の状態調査

き裂の発生が認められた北海道の橋梁13橋について詳細に調査し、その状態を整理すると以下のとおりである。

- ① き裂の発生比率からも判るとおり、寒冷地であるからといって、北海道全ての橋梁のゴム支承にき裂が発生している訳ではない。
- ② き裂の発生は13橋中4橋のみで、特定の橋梁に集中している。
- ③ また、き裂は以下に記すとおり、特定の橋脚に集中している場合があった。

- ・ A橋 32体中5体き裂有り(5橋脚中2橋脚)
- ・ B橋 20体中9体 " (5橋脚中4橋脚)
- ・ C橋 20体中8体 " (5橋脚中4橋脚)

A, B, C橋のゴム支承は製造時期・使用材料・形状等ほぼ同一条件のものである。

- ④ き裂は短期間(ほとんど架設後 1 年以内)に発生している。
- ⑤ き裂はゴム支承が桁荷重を受けた際に、ゴムの圧縮変形によって生じる側面膨らみ部に発生している。確認されたき裂の大きさは、写真-1 に見られるとおり、小さいき裂で深さ 0.5 mm 以下、長さ 3 mm 以下、大きいき裂で深さ 1.5 mm、長さ 30 mm におよぶ。
- ⑥ き裂の状態は、ゴム材料の耐候性試験(オゾン劣化試験)によって生じるき裂(写真-2)に酷似している。
- ⑦ A 橋のゴム支承は 12 月の点検ではき裂の発生が確認されず、翌年 5 月の点検にて発見された。したがって、き裂の発生は冬期に生じたと判断される。
- ⑧ A, B, C 橋の現地の気温は確認できないが、近接する都市での気温の変化は図-2 の通りである。

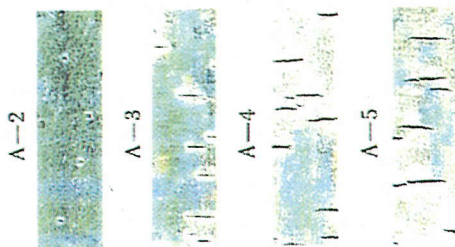


写真-2 オゾン劣化試験によるき裂状況

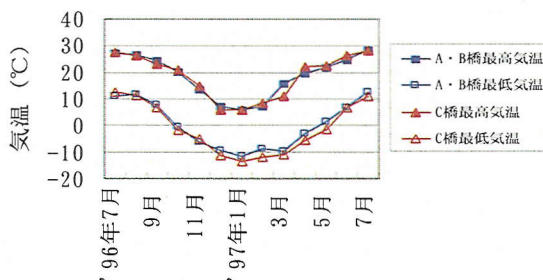


図-2 A, B, C 橋近隣都市の気温

3. き裂発生要因とその特定

(1) き裂の発生要因の検討

ゴム支承膨らみ部のき裂発生特性要因図として図-3 のとおり整理することができる。これらの要因についてそれぞれ以下のとおり考察を行った。

a) 設計に関して

ゴム支承の設計・使用条件については支圧応力度と最大局部せん断ひずみの2つの要因が挙げられるが、前述のA, B, C, 3橋のゴム支承計72体について、死荷重に対する支圧応力度と最大局部せん断ひずみとの関係を求めた結果をき裂有りとき裂無しに識別して図-4 に示す。

これらの結果の考察より、最大局部せん断ひずみとここで問題としているき裂の発生の間には有意な相関関係は認められないと判断される。

b) ゴム材料に関して

現地のゴム支承からゴム片を採取し化学成分の分析を行った結果を表-2 に示す。き裂有りき裂無しの採取によりき裂有りき裂無しの異常は認められなかった。

c) 施工に関して

現地調査におけるゴム支承設置状況や異常変形等の外観検査からは、何らかき裂発生の原因となる状況は認められなかった。

d) 環境に関して

残る要因として考えられるのはこの要因である。前述のとおりき裂発生が寒冷地に集中して発生していること、冬期に発生したと確認されていること、き裂の発生はゴムの表面の現象であること等を鑑み、低温環境でのゴム表面の物理的、化学的挙動について調査研究することによりき裂発生要因がさらに特定されるものとの結論に達した。

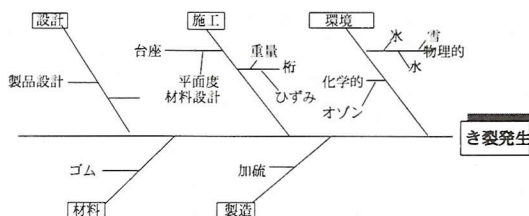


図-3 き裂発生特性要因図

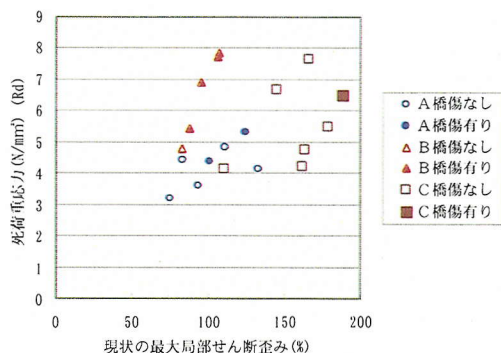


図-4 設計使用条件と傷発生

表-2 成分分析結果

	オリジナルゴム	き裂回収品ゴム
ポリマー定性	天然ゴム	天然ゴム
カーボンブラック定量	21.1%	21.0%
灰分	4.4%	4.2%

表-3 再現実験の組合せ

No.	引張りひずみ	高温	低温	表面粗さ	衝突	オゾン	紫外線	水	氷雪	実験時間 (日)	再現性
1	○									168H亀裂なし	-
2	○			○						同上	-
3	○				○					同上	-
4	○					○				同上	-
5	○						○			同上	-
6	○		○			○				同上	-
7	○		○	○		○				同上	-
8	○		○			○		○		48H亀裂発生	◎
9	○		○			○			○	48H亀裂発生	◎
10	○	○				○			○	168H亀裂なし	-
11	○	○				○		○		同上	-
12	○					○			○	同上	-

(2) き裂発生時の再現実験と要因の特定

一般に、天然ゴムは強靱性がすぐれているが、耐候性(耐オゾン性)がやや劣るとされている。その対策として、ゴム材料設計においてはワックス系あるいはアミン系の老化防止剤を配合し、ゴム表面に浸透させて一種の保護膜を形成し、オゾン等の攻撃による劣化の防止を図ろうとしている。本体とは別の材料で耐候性の被覆ゴム層を設ける製品と、本体ゴムに耐候性を付与して本体ゴムと被覆ゴムを同一にする製品があり、今回き裂の発生したゴム支承は後者である。そのようなゴム材料において今回き裂の発生といった現象が発現した訳であり、先の要因分析の結果を踏まえここでき裂の再現実験を試みた。

き裂の発生が寒冷地に集中していること、ゴム支承の膨らみ部(すなわち引張りひずみ条件下)で発生していること、したがって前記3. (1) のa), b), c) の影響は少なく、d) の影響が大きいことから、ここでの再現試験は環境条件を中心に行った。

実験の設定因子として、低温、引張りひずみ、ゴムの表面粗さ、物体の衝突等の外力、紫外線、オゾン、水、氷雪を摘出し、表-3に示す組み合わせで行った。なお、全ての組み合わせ実験に共通の引張りひずみは、JIS K 6259で規定されている「加硫ゴムのオゾン劣化試験方法」に準じ与えた。(写真-3)

また各因子の条件は以下のとおりである。

(各因子の条件)

温度 : -30℃, 40℃

引張りひずみ : 後述のように実際は20~30%であるが促進条件として100%

表面粗さ : サンドペーパー #30にて研磨(製品の仕上げの際に使用する粗さ)

衝突 : 砂塵が衝突するイメージでグリッド投射

紫外線 : サンシャインウエザーメータ

オゾン : 50pphm(通常40℃)

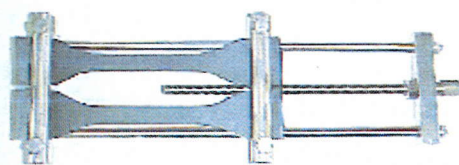


写真-3 オゾン劣化伸長治具

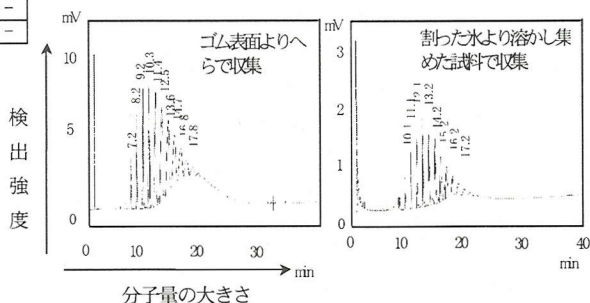


図-5 ゴム表面に氷結した水中の耐候性保護剤のガスクロマトグラフ

水 : 精製水の流水に1日浸漬後
オゾン槽へ投入

氷雪 : 表面結氷後結氷を除去しオゾン槽へ投入

表-3に示した一連の組み合わせ実験の結果、ゴムにき裂の発生が確認できた条件は実験No. 8およびNo. 9の2つの条件であった。

実験No. 8は、流水に1日浸漬されゴムの表面が洗い流された状態で、-30℃の雰囲気下のオゾン槽に投入し実験したものである。また、実験No. 9は、ゴムに水を塗布し氷点下で凍結させこれを繰り返して結氷させた後、表面の氷をハンマーで割り除去した後、-30℃の雰囲気下のオゾン槽に投入したものである。

ここで、実験No. 9によって採取された氷の試料を解凍し濃縮した液をガスクロマトグラフ(GC)により定性分析を行った結果、図-5に示すとおりゴム表面に浸出(ブルームと言う)した耐候性保護剤(ワックス系およびアミン系老化防止剤)と同一の成分が検出された。すなわち、ゴムの表面に浸出した前記耐候性保護剤は結氷した水に付着し、その氷が除去される時に剥ぎ取られたと考えられる。

また、実験No. 8においては流水に表面が洗われ、実験No. 9と同様、ゴムの表面から耐候性保護剤が除去されていることが判明した。

以上のことからき裂の発生には、通常ゴムの表面に浸

表-4 滲出速度の測定手順

手順	作業内容	記号	説明
①	既存老化防止剤の除去	W_0	ゴム質量（ゴム内部の老化防止剤質量）
②	設定温度で保管（3日間） 滲出した老化防止剤の除去	(r_1, r_2, r_3)	各日に除去した老化防止剤質量
③	3日保管後、質量測定	W_1 ※	3日分の滲出後のゴム質量 （残存老化防止剤質量）
④	滲出速度の算出	$w\text{t}\%/72\text{H}$	$\frac{W_0 - W_1}{\text{老化防止剤配合設計値}} \times 100\%$ ※ $W_1 = W_0 - r_1 - r_2 - r_3$

表-5 耐候性保護剤の滲出速度

温度（℃）	滲出速度（wt%/72H）
25	29.1
-5	10.1
-30	2.4

出している耐候性保護剤の欠落による無防備状態でのオゾンの作用によるものが原因であると推論できる。

さらに、低温環境とオゾンの関連を特定するために低温環境下における耐候性保護剤の滲出速度に着目し、滲出量の測定を行った。滲出量の測定方法は JIS 1 号のダンベル試験片を用い、表-4 に示す手順で行った。

表-5 に滲出量を試料中の老化防止剤配合設計値で除した時間当たりの滲出速度を示す。

これらの結果より、-30℃での耐候性保護剤の滲出量（速度）は 25℃のそれに対し約 12 分の 1 と非常に少ない（遅い）ことが判った。したがって、低温環境下では耐候性保護剤の滲出速度が極めて遅いため、ゴム支承表面に氷結し、解氷時に保護剤が剥ぎ取られた後、ゴム内部より保護剤が十分滲出てくる前にオゾンの攻撃に曝され、き裂の発生につながる条件を生み出しているとの結論に達した。

4. き裂発生メカニズムの推定

前章ではき裂の再現実験により、

- ① ゴム支承表面の水分の氷結およびその解氷による耐候性保護（剤）膜の剥離
- ② 低温環境下
- ③ オゾン劣化
- ④ 引張りひずみ

が複合してき裂の発生に繋がるとの結論を得た。

引張りひずみに関しては、ゴム支承に桁荷重が作用するとその鉛直荷重によりゴム支承内部に圧縮応力が生じる。その時ゴム支承の外周には円弧状の膨らみが発生する、すなわちこの部分に引張りひずみが発生していると

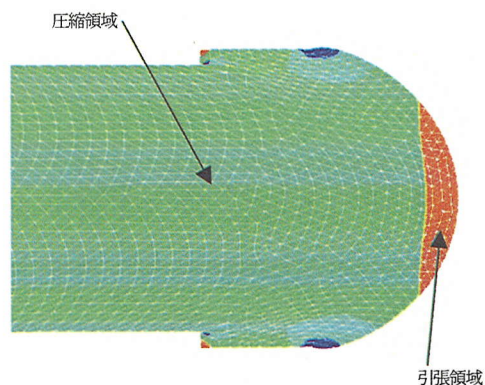


図-6 FEM 解析結果

考えられている。これらの現象は応力解析からも裏づけすることができ、ここでゴム支承側面の代表的部分を取り出して FEM 解析を試みた。FEM 解析の解析方法を以下に示す。

〈解析方法〉

解析手法: 2次元有限要素法(FEM)

2次元3角形（平面ひずみ）

要素数 8861

解析条件: ① ゴムのせん断弾性率 $G=0.98 \text{ Mpa}$

② ゴムのポアソン比 $\nu=0.49$

③ ゴム1層の圧縮量 $\delta=3 \text{ mm}$

実橋に使用させている支承の測定値
2倍に相当する。

モデルの形状: 支承のゴム1層について中心より
半分を対象とした。

以上の設定で得られた解析結果を図化して図-6 に示す。図-6 に見られるとおり、ゴム部の外周端部に円弧状の膨らみ変形が現れており、円弧部に引張りひずみが生じていることが判る。この部分は本件のき裂の発生確認部分と一致している。

以上のことを総合してき裂の発生メカニズムを以下のとおり推定することができる。

- ① ゴム支承に桁荷重が作用する。

- ② ゴム内部は圧縮され、それに伴い支承外周部に膨らみが生じ引張りひずみが生じる。
- ③ 自然現象によりゴム表面に水分の付着(解氷、結露等)、氷結、雪の付着がある。
- ④ 温度変化による解氷、桁伸縮や動荷重の作用によるゴム表面ひずみ変化による氷の割れ発生。
- ⑤ 解氷等によるゴム表面の耐候性保護剤の剥離または流出。
- ⑥ 無防備状態のゴム表面にオゾンが作用する。
- ⑦ 引張りひずみ部分にオゾンによるき裂が発生する。

以上のメカニズムを図-7に模式図として示す。

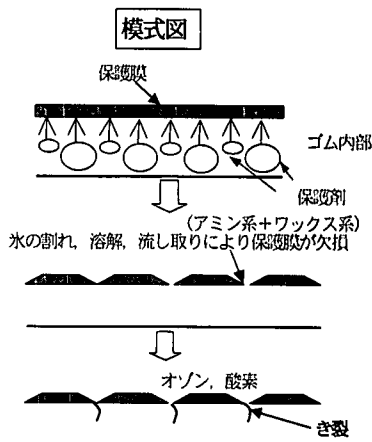


図-7 き裂発生メカニズム

5. 耐低温オゾン劣化ゴム材料の開発

き裂発生メカニズムの推定により低温環境下でのオゾン劣化が主原因と特定することができた。したがって、これらのき裂の発生防止にはゴム支承表面に生成された保護膜が欠落した後、いかに速く再生させるかが対策のポイントとなる。

ゴムに使用されている耐候性保護剤には大別して2種類あり、それぞれの働きは表-6に示すとおりである。

2種類の保護剤の内、表面へ滲出するのはほとんどがワックス系であることから、ワックスに焦点をあてワックスの種類毎に温度と表面滲出量の関係を測定した結果を図-8に示す。(ただし、オゾン条件下ではない。)この結果より、ワックスの分子量により環境温度による滲出速度が大きく異なることが判った。

オゾンによる劣化はミクロ的な化学反応によるものであり、温度が高いほど反応速度が速くなり、劣化の進行が速い。しかし、耐候性保護剤の滲出速度も温度が高いほど速く、保護膜の表面形成は速やかに行われ、通常の温度下ではオゾン劣化が生じ難い状態である。したがって、低温下においても常温と同様の滲出速度の速いワックスの使用、すなわち低分子量のワックスを耐候性保護剤として活用することが本件のき裂の発生防止に有効であると推察される。

一般にゴム材料の開発には、常温を念頭に置いた設計がなされるため、比較的高分子量のワックスが使用されている。

まず、材料開発にあたって耐候性評価方法について検討する必要がある。従来の耐候性評価方法であるオゾン劣化試験は40℃雰囲気での促進劣化試験とされており、また、ゴム支承の品質管理要領に規定する耐オゾン性試験方法(JIS K 6259)でも試験片を伸張後、室温雰囲気下で20～96時間放置し、その後オゾン試験に供することになっており、これらの試験方法では本件の低温下でのき

表-6 耐候性保護剤の種類と働き

種類	働き
1. ワックス系 パラフィン系 ろう状物質 ($\text{CH}_3 - (\text{CH}_2)_n - \text{CH}_3$)	ゴムの表面に滲出し、保護膜を形成することでオゾンや酸素の攻撃を直接ゴムへ働かないようにし、長期に渡り効果を持続する。
2. 老化防止剤(アミン系) 主成分 ($\text{R} - \text{NH} - \text{NH} - \text{R}$)	ワックスと共に表面に滲出すると同時にゴム中へ透過してくるオゾンや酸素等の攻撃を化学反応により阻止する。

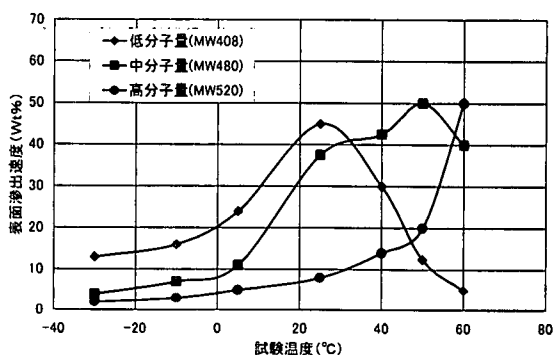


図-8 温度とワックスの表面滲出速度

表-7 試験方法とき裂の発生

No	狙い	前処理	オゾン濃度	温度	伸張率	試験結果
1	通常試験	伸張後24時間放置し、試験	50pphm	40℃	50%	96時間異常なし
2	(JIS K 6259)			-10℃	50%	96時間異常なし
3				-30℃	50%	96時間異常なし
4	表面の保護膜を擦り、新しいゴム表面を出した状態	水を割る	50pphm	-30℃	50%	24～48時間き裂発生
5		流水洗浄	同上	-30℃	50%	24～48時間き裂発生
6		伸張30分後試験	同上	-30℃	50%	10時間以内き裂発生

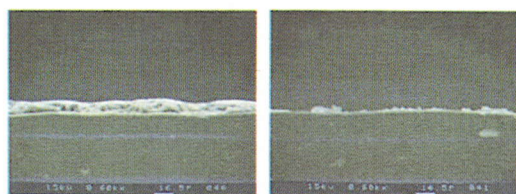


写真-4 保護膜破壊状態

表-8 低温耐候性保護剤の配合処方

耐候性保護剤の種類	使用量 (W t %)	
	従来材料	改良材料
①ワックス系 A: 低分子量 (MW=408) B: 中分子量 (MW=480) C: 高分子量 (MW=520)	—	0.93
	0.93	0.93
	0.66	—
②アミン系	1.32	1.55

表-9 改良材料の低温オゾン試験結果

改良材料の低温耐候性の確認試験（き裂発生時間、○印は96Hでき裂なし）

方法	温度	材料	10%		20%		50%	
			従来	改良	従来	改良	従来	改良
通常※1	40℃	—	—	—	—	○	○	○
	-30℃	—	—	—	—	—	○	○
再現試験	40℃	—	—	—	—	—	○	○
	-30℃	—	—	—	—	—	○	○
方法※2	-30℃	24~48H	○	24~48H	○	3~5H	○	○

※1 ゴム支承品質管理要項に基づいた従来の試験方法（JIS K 6259（伸長後24時間放置→オゾン槽へ））

※2 低温き裂発生の再現した試験方法（伸長後、直ちにオゾン槽へ）

裂発生の再現ならびに評価はできないと判断される。

すなわち、低温環境試験方法としては、冰雪の剥離による耐候性保護膜が欠落した状態と相關のある条件設定の評価方法が必要である。そのようなことから、本試験で採用した試験方法として表-7に示す内容とした。

表-7の試験の結果、試験No. 4, 5, 6においてき裂の発生が再現された。この方法の内No. 4, No. 5の方法は試験が煩雑でかつ結果のバラツキが生じ易いことから、試験No. 6を実用性のある試験方法として採用した。

なお、写真-4に試験No. 6で再現された保護膜破壊の状態を示す。中央の白い部分が保護膜で、下側の黒い部分がゴムである。

以上の評価方法により、従来の耐候性保護剤である高分子量のワックスに中分子量の組み合わせ、および低分子量と中分子量の組み合わせ等と各々の配分量も考慮し、種々の配合試料を試験評価した結果、表-8に示す配合処方を見出すことができた。

この改良開発した材料と従来配合の材料について通常のおゾン試験と本研究で提案した低温オゾン試験の両方

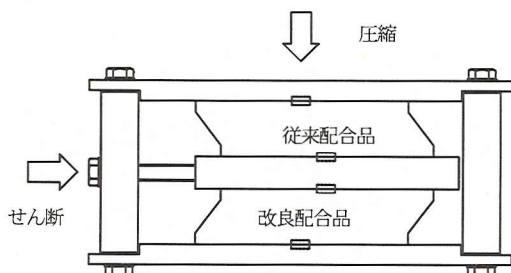


図-9 屋外低温暴露試験方法

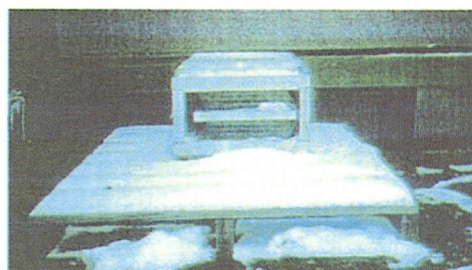


写真-5 現地状態

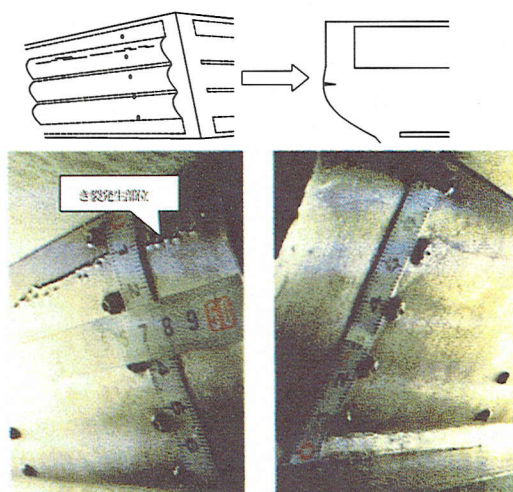
の方法で評価を行った。それらの結果を表-9に示す。

それらの結果より本開発の材料は従来の材料に比べ耐低温オゾン性が大幅に改善されていることが判る。

さらに、ゴム支承の形で耐低温オゾン性を検証する目的で標準モデル支承（幅310mm、長さ310mm、高さ76mm、ゴム層16mm×3層）について、設計許容値の荷重条件（圧縮量：7.85N/mm²相当、せん断ひずみ：ゴム厚みの70%相当）を加力治具で与え、寒冷地（北海道）と愛知県小牧市（T社テクニカルセンター屋上）の2箇所に開発材料と従来材料各々を放置し屋外暴露試験を実施した。図-9および写真-5にそれらの状況を示す。

平成10年11月～平成11年3月にかけて、一冬を経過した時点でそれらの観察を行ったところ、写真-6に示すとおり、寒冷地に放置した従来の材料を使用した支承にはき裂の発生が確認されたのに対し、本開発の材料を使用した支承には全くき裂の発生は見られなかった。これらの観察結果を表-10に、試験期間の気温記録を図-10に示す。

以上、本研究では、き裂の発生した従来材料の支承と開発材料の支承の一連のき裂発生メカニズムの推定に基づき、その評価試験の導入により低温耐候性に優れたゴム支承材料の開発を行うことができた。



き裂発生(従来の材料)

き裂なし(本開発の材料)

写真-6 表面き裂発生

表-10 暴露試験結果

ゴム材料	設置場所	評価結果	
		'98/11/26	'99/3/30
従来配合品	北海道	○	×
	愛知県	○	○
改良配合品	北海道	○	○
	愛知県	○	○

(○: き裂なし、×: き裂あり)

6. 低温耐候性試験評価方法の提案

前章で述べたように、支承用ゴム材料に対して低温耐候性試験(低温オゾン試験)を想定した試験方法が従来なかった。本研究結果より、低温オゾン試験は、寒冷地で使用されるゴム支承の信頼性を確保する上で重要な試験であると考えられる。したがって、今後この種の評価には新たに確認項目として追加することが必要と考える。

ここで、評価条件を決定するために、試験に必要な要因と水準を変えて低温オゾン試験のき裂発生状態を確認した。その結果を表-11に示す。試験温度が低い程き裂の発生までの時間が短く、また伸張率が大きいほどき裂の発生までの時間が短い。さらに、オゾン濃度が高くなる程、き裂の発生までの時間が短くなる傾向がある。

これらの結果をふまえ、実橋で生じたと同様のき裂発生状況が再現できることに加え、次のような観点より、低温オゾン試験方法を提案した。

- ① 比較的低ひずみ率(約10%)でもき裂が発生している。
- ② 実際に気温は、 -20°C 以下になることがあり、試験が迅速で、かつ安全率が見込めるという理由で試験

札幌市最高気温、最低気温気温

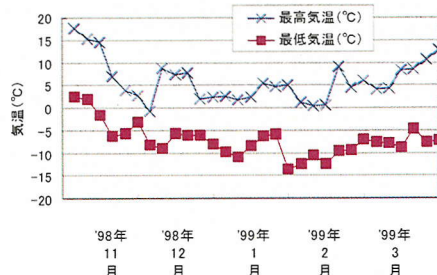


図-10 札幌の98/11~99/3の気温グラフ

表-11 試験条件とき裂発生

No	オゾン試験条件			き裂発生時間(H)	
	温度($^{\circ}\text{C}$)	伸張率(%)	濃度(pphm)	従来材料	改良材料
1	40	50	50	96H	○ 96H
2	20	50	50	96H	○ 96H
3	5	50	50	24~72H	× 96H
4	-10	10	50	96H	○ 96H
5	-10	50	50	12~48H	× 96H
6	-30	10	50	24~48H	× 96H
7	-30	20	50	24~48H	× 96H
8	-30	20	80	12~24H	× 96H
9	-30	50	50	3~5H	× 96H

○: き裂発生なし ×: き裂発生あり



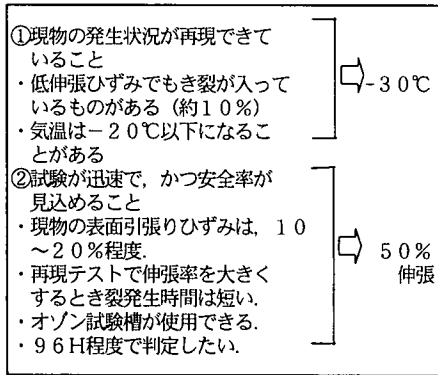
仕様
オゾン濃度 20~250pphm
温度 -30°C ~ 60°C
オゾン発生 オゾン灯方式

写真-7 低温オゾン試験機

温度をより低温な -30°C とする。

- ③ 実橋のゴム支承の表面ひずみを歯科用印象材で型取して調査した結果では10~20%の引張りひずみが発生する。
- ④ 伸張率は、大きいほどき裂の発生が速い。
- ⑤ オゾン試験槽が利用できること。(写真-7に低温オゾン試験機を示す。)
- ⑥ 通常のオゾン試験(JIS K 6259)時間は、高温(40°C)で96時間であり、同じ時間に設定した。

以上の勘案事項を整理し、低温耐候性試験方法として整理して図-11に示す。



低温耐候性試験方法

試料：ダンベル1号
試験槽：低温オゾン槽
試験条件：-30℃
50pphm
50%伸張後
即オゾン槽投入 注)
判定：96H異常なきこと

注) ゴム支承の常時の実働引張りひずみが20%を超えることが十分予想されるため、試験の引張りひずみを50%伸張とした。

図-11 試験方法の検討

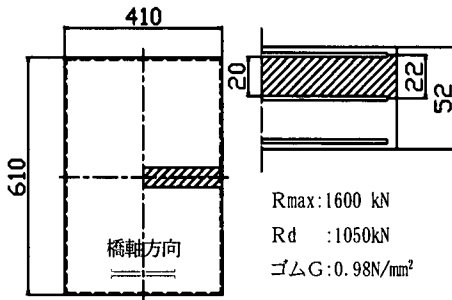


図-12 FEM 解析の支承

7. き裂発生後の支承機能への影響

前章まででき裂発生の原因及びその改良方法を述べたが、実橋でき裂の発生した支承について、機能喪失の有無を有限要素法(FEM)による解析とき裂の進行性実験を実施して確認することとした。

実橋に設置されていたいくつかのき裂の発生した支承の中から、支承の取り付け状態とき裂の発生状況から最も状態が劣悪と考えられる支承を選んだ(図-12)。その支承の寸法は、410mm×610mm×52mm(ゴムの層構成：20mm×2層)のすべりゴム支承であり、偏荷重による橋軸方向

表-12 FEM 解析モデルと条件

解析方法	2次元FEM 2次元3角形(平面ひずみ) 要素数:7045~8861
解析条件	①ゴム弾性率 $G = 0.98 \text{ N/mm}^2$ ②ポアソン比 $\nu = 0.49$
モデル形状	製品のゴム1層の1断面をモデル化

表-13 FEM 解析結果 (通常圧縮状態)

No.	傷の有無 及び大きさ	圧縮量(mm) (ゴム支承相当)	引張りひずみ測定結果	
			引張りひずみ深さ(mm)	最大引張りひずみ(%)
1	無	1.5 (3)	2.0	9.9
2		3.0 (6)	1.8	19.9
3		4.5 (9)	1.8	27.8
4	2mm	1.5 (3)	1.6	3.4
5		3.0 (6)	2.1	7.5
6		4.5 (9)	2.4	10.5

表-14 FEM 解析結果 (偏荷重による圧縮状態)

No.	偏荷重ひずみ () はせん断ひずみ	せん断変形量 (mm 支承相当)	傷の有無 大きさ	引張りひずみ測定結果	
				引張りひずみ深さ(mm)	最大引張りひずみ(%)
7	せん断方向	—	無	1.7	8.0
8	1.5G	5 (10)	無	1.9	9.4
9		5 (10)	2	2.4	6.6
10		—	無	1.6	18.0
11	3(6)	5 (10)	無	1.8	18.6
12		5 (10)	2	2.5	9.9

の撓みが3/400程度加わったことが確認されたものである。

(1) FEM解析によるき裂の影響

き裂は、写真-1に示すように、端部の影響が少ない中央に多く発生しているので、図-12に示すように、製品のゴム1層の1断面を2次元解析用モデルとした。また、ゴムの弾性率を $G=0.98 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比を $\nu=0.49$ と設定した。その他の解析条件の詳細を表-12に示す。

解析においては圧縮量及び偏荷重、さらに、せん断変形を付加し、側面被覆ゴム表面の厚さ方向の引張りひずみの大きさと深さについて解析した。また、き裂の有無についても同時に解析比較した。その結果を、表-13、14

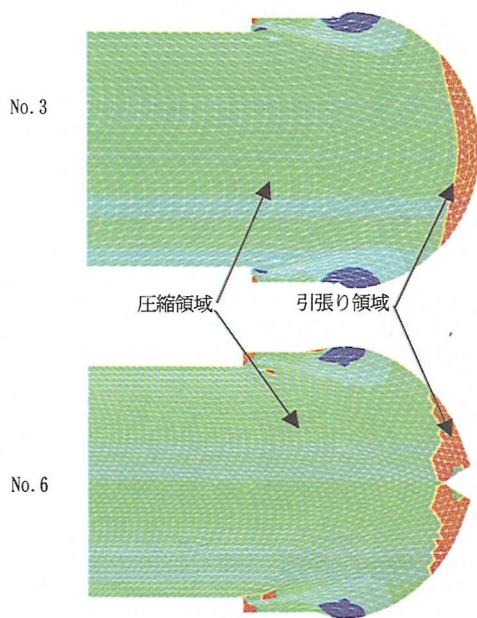


図-13 FEM 結果

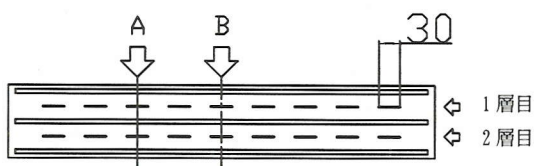


図-14 カッターナイフによる傷の位置

表-15 き裂の進行性確認結果

No	条件 反力 (kN)	傷の位置 A				傷の位置 B			
		き裂長さ		き裂深さ		き裂長さ		き裂深さ	
		①	②	①	②	①	②	①	②
1	1049	0 (30.7)	0 (32.5)	0 (3.0)	0 (3.2)	0 (31.5)	0 (32.4)	0 (2.7)	0 (3.6)
2	1324	+0.5	0	-0.3	-0.1	+0.3	+0.3	-0.1	0
3	1598	+0.4	+0.2	-0.4	0	+0.4	+0.3	+0.1	0
4	1598	+0.2	+0.2	0	+0.2	0	+0.5	+0.3	+0.3
5	圧壊 試験後	+0.5	+0.4	+0.1	+0.2	+0.3	+0.2	+0.1	0

数値は、変化量を示す。
() 内は初期値 (mm) を示す。

表-16 圧縮破壊試験

No.	テーパースペーサー	圧縮剛性 (kN/mm)	圧縮強度 (kN)	圧壊状態
1	0/400	1387	13023 (亀裂無し品)	中央鋼板 で破断
2	3/400	1346	12513 (亀裂有り品)	中央鋼板 で破断
3	9/400	886	13102 (亀裂有り品)	中央鋼板 で破断

$$\text{圧縮剛性} = \frac{R_{\max} - R_d}{\text{撓み量 } (R_{\max}) - \text{撓み量 } (R_d)}$$

理論値 : 1411 kN/mm

表-17 き裂発生品の信頼性評価結果

検討項目	試験条件	結果
①有限要素法 (FEM) による 表面き裂の解析	ゴム $G=0.98\text{N/mm}^2$ ポアソン比 $\nu=0.49$ き裂の深さ 2mm 圧縮: $R_{\max}=1600\text{kN}$ $R_d=1050\text{kN}$	・き裂の発生部位は引張りひずみの発生領域と一致する。 ・現状の使用条件では、引張りひずみの発生深さは表面ひずみの発生深さ表面から2.5mmを超えないので、き裂は被覆ゴム(厚さ5mm)の範囲に止まる。
②表面き裂の進行性 確認実験	鉛直荷重: $R_{\max}$, R_d 傾斜: 3/400	・不具合と同等の大きさ(長さ30mm、深さ約2mm)のき裂と傾斜(3/400)をつけ、圧縮せん断変形を与え、又圧壊まで経験したがき裂の深さに変化はなく進行は無いものとする。
③圧壊試験	傾斜: 無し、3/400 9/400 破壊まで圧縮	・3/400の傾斜では、圧縮剛性の特性変化は少ない。 ・3/400傾斜の圧壊試験では、中央の補強鋼板で破壊(12513kN、応力 52.1N/mm^2)しており、その強度は $R_{\max}$ (1598kN)の7.8倍以上であり問題ない。

に示す。

FEM 解析の結果より、

- ① き裂の発生している部位と FEM 解析で得た引張りひずみの発生部位が一致している。
- ② 死荷重反力(R_d)の3倍相当の圧縮を負荷した場合で

もゴム表面の引張りひずみは深さ方向に 2.5 mm 程度であり、その他の部分は、圧縮領域で、き裂は被覆ゴム(厚さ 5 mm)の範囲に止まると推測される。

- ③ さらに偏荷重でせん断を与えた場合でも同様な結果となっている。

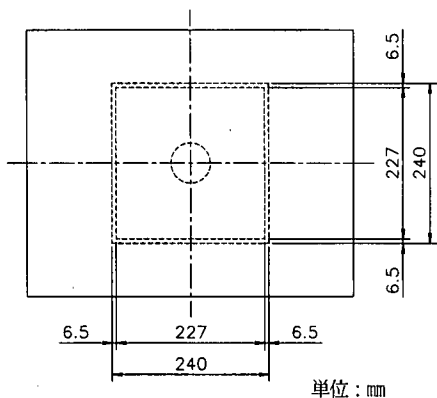


図-15 試験体

No. 3, No. 6 の解析グラフを図-13 に示す。したがって、圧縮領域は同じレベルで分布しており、き裂の進行の可能性は少ないと考えた。

(2) き裂の進行性確認実験

次に同じ形状の支承を製作し、き裂の発生した支承と同等の大きさである長さ 30 mm、深さ約 2 mm のき裂をカッターナイフで各ゴム層に 9 ヶ所付けた(図-14)。次に、支承に 3/400 の傾きをつけ荷重を R_d から R_{max} まで载荷しき裂の変化を測定した。その結果、き裂の長さとも深さとも 0.5 mm 以内に止まっておりほとんどき裂の進行が見られないことが確認された。それらの結果を表-15 に示す。

さらに、圧縮荷重を破壊にいたるまで負荷し圧縮破壊強度を調査するとともに偏荷重についても調査した。その結果、圧縮破壊は、面内の引張り応力が最も高いと考えられる中央補強鋼板部に生じている。圧縮破壊試験の前後で、表面き裂の深さ、大きさは、ともにほとんど変化はなかった。それらの結果を表-16 に示す。

以上、一連の信頼性評価試験結果を一覧して表-17 に示す。なお、当該支承は大変形を与えられないパット型ゴム支承であるため、信頼性評価は圧縮試験を中心に実施した。

8. 低温下のゴム支承の機能

前章においてき裂発生をの要因を低温環境条件とオゾン

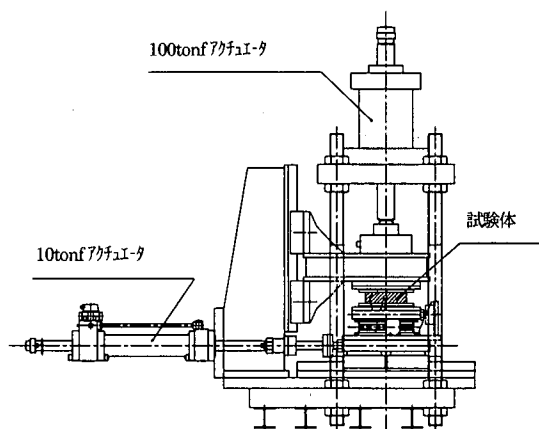


図-16 試験装置

表-18 試験条件

試験項目	設定温度(℃)	鉛直面圧(N/mm ²)	せん断歪み(%)	加力波	回数(回)
圧縮	-30, 0, 20, 40	0~8	0	手動 周期 約3.0秒	3
せん断	-30, 0, 20, 40	5	±175	正弦波 振動数 0.3Hz	10

の複合作用に起因するものと究明した。また、評価試験方法と耐候性改善方策についても提言することができた。しかしながら、低温耐候性の改善策であるワックス系、アミン系の耐候性保護剤の使用が、ゴム材料の力学特性やゴムと鋼板との接着に関して、ゴム支承としての性能に悪影響を及ぼすことが懸念される。本章では耐候性ととも、ゴム支承の機能として重要な力学特性の低温挙動について調査し、低温環境下でのゴム支承の実用性について考察する。

ゴム支承の重要な力学特性としては、せん断剛性、圧縮剛性が挙げられる。ゴム支承のせん断剛性は橋梁の振動特性すなわち耐震性に大きな影響をおよぼす。低温環境下での実用性を評価する目的で、ゴム支承の圧縮、水平の変形性能に対する温度の影響を試験により調査した。

試験体は低温耐候性を改良した天然ゴム支承を使用した。ゴム支承は図-15 に示すように 227 × 227 mm の平面寸法で、ゴム層は 7.1 mm × 5 層である。

温度はゴム支承側面のゴム表面から中心方向に 75 mm の深さに入れた熱電対で測定し、温度条件の確認を行った。試験体の冷却は、試験体を加力試験機に取り付け、図-16 に示す試験機と環境試験室(温度範囲: -30 ~ 80 ℃)に入れて行い、ゴム支承の中心部が設定の温度条件になったところで、加力試験を行った。設定試験温度

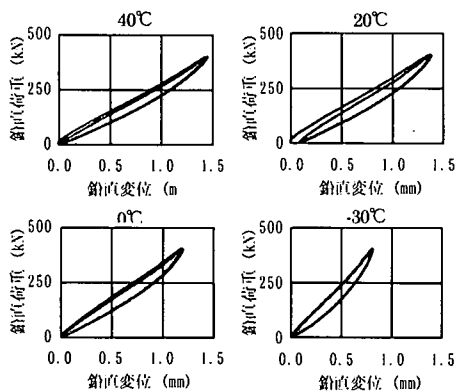


図-17 圧縮試験

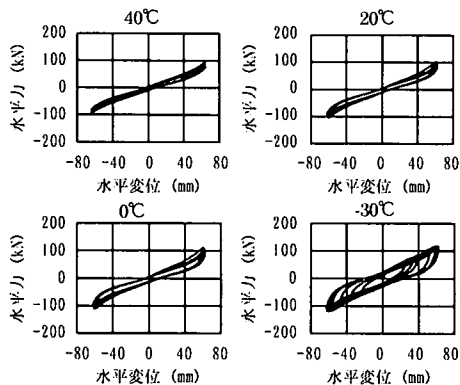


図-19 せん断試験

は常温の 20℃、低温の 0℃、-30℃と高温の 40℃の 4 条件とした。

本試験は圧縮試験とせん断試験からなり、試験条件は表-18 に示すとおりである。圧縮試験は鉛直荷重 400 kN（面圧 8 N/mm²）を 3 回負荷し 3 回目のデータを代表値とした。

a) 圧縮試験結果

圧縮試験により得られた圧縮変位と荷重の関係を図-17 に示す。また、温度による圧縮剛性の変化として示した結果を図-18 に示す。これらの結果より、0℃～40℃の範囲では温度変化に対する圧縮剛性の変化量は小さい。また、-30℃では圧縮剛性は高くなり、20℃における値に対して +50 % となった。

b) せん断試験結果

せん断試験により得られた水平変位と荷重の履歴曲線を図-19 に、温度によるせん断剛性の変化を図-20 に示す。これらの結果より、低温になるとせん断剛性は高くなり、履歴曲線はふくらむ傾向を示す。圧縮剛性と同様に 0℃～40℃の範囲のせん断剛性の変化は小さいが、-30℃での変化は比較的大きく ±175 % せん断変形時のせん断

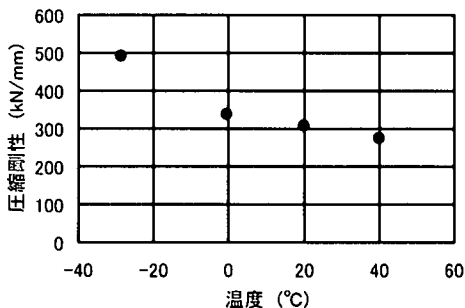


図-18 圧縮剛性と温度の関係

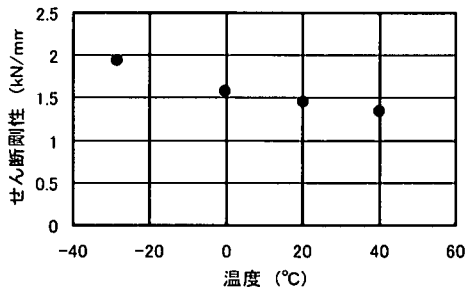


図-20 せん断剛性と温度の関係

剛性は 20℃の時の +33 % となっている。なお、-30℃の試験で初めの数回所定の振幅に達していないのは、低温のため試験機の制御が不完全なためでゴム支承に起因するものではない。-30℃の低温環境下における ±175 % せん断変形でも外観の異常はなく、常温と同様にゴム支承の変形性能は十分に大きい。

以上の結果より、低温耐候性を改良したゴム支承の力学特性は、-30℃の低温環境下で圧縮剛性、せん断剛性は高くなるが、ゴム支承の変形能力については十分保有しており、実用性があることが確認できた。

9. 結論

本文では、寒冷地に使用していたゴム支承に表面き裂が発生した原因の究明と発生メカニズムの解明及びその対策方法について研究、報告した。以下に本研究で得た知見をまとめる。

- 1) き裂の発生した地域、発生状況及び再現試験の結果から、今回のき裂の発生は、低温下においてゴム表面の耐候性保護膜が、氷結等の作用で欠落したことによる要因と、低温下での耐候性保護剤（ワックス等）のゴム表面への再滲出の遅れにより、十分な膜が生成する前に、オゾンの攻撃によりき裂が発生したと結論した。
- 2) 低温耐候性のある天然ゴム材料を開発するにあたり、低温下で素早く再滲出する耐候性保護剤（低分子量の

ワックス)を添加, 増量した結果, -30°C の低温耐候性を満足するゴム配合が見出され, モデル支承の現地暴露試験でき裂の再現と, 本研究により開発された材料の低温耐候性を検証することができた。

- 3) 従来の耐候性試験(オゾン劣化)は, 40°C という高温側の試験温度条件であり, 今回のような低温の使用条件下での耐候性の評価が盛り込まれていないため, き裂発生を再現する簡便なゴム材料の低温耐候性試験方法が必要とされ, き裂の発生メカニズムに基づきそれらを新たに提案した。
- 4) き裂発生後の支承機能の健全性について, FEM 解析およびゴム支承の試験結果より, き裂は被覆ゴム層のみで止まり本体ゴムへは進展せず, 初期の強度を確保していることから実用機能は十分と判断された。
- 5) 低温耐候性のあるゴム材料を使用した支承は低温下においても常温と同等の性能を保持している。

今後は本研究で開発された低温耐候性ゴムについて, 実橋においてゴム支承の健全性等の追跡調査を行い耐候性を確認する予定である。

謝辞: 本研究をまとめるにあたり, 多くの御指導御助言をいただいた, 日本道路公団技術部構造技術課長角谷務氏, 同中部支社建設第二部構造技術課忽那幸浩氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 宇佐見民雄, 渡辺正夫, 橘田敏之, 米浜光郎, 林邦明, 長野悦子: ゴム支承の経年変化と活荷重, 日本ゴム協会誌, Vol. 55, No. 12, pp. 777-783, 1982.
- 2) 宇佐見民雄, 渡辺正夫, 橘田敏之, 米浜光郎, 林邦明, 長野悦子: ゴム支承の経年変化と静的特性, 日本ゴム協会誌, Vol. 54, No. 3, pp. 174-183, 1981.
- 3) Stevenson, A.: Brickendonbury : Crystallization Stiffening of Rubber Vulcanizates at Low Environmental Temperatures, *Kautsch Gummi Kunstst.*, Vol. 37, No. 2, pp. 105-109, 1984.
- 4) Ellis, G. N.: Rubber as an Integral Structural Component, *National Structural Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 158-163, 1987.
- 5) Stevenson, A. and Maxwell, D. L. : Low Temperature

Stiffening of Structural Rubber Bearings, *Proceeding from the International Rubber Conference*, Vol. 2, pp. 424-430, 1986.

- 6) 小山田欣祐, 佐藤昌志, 谷本俊充, 林亜紀夫: 低温域における橋梁免震装置の実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 42, pp. 707-714, 1996. 3.
- 7) 大島俊之, 池永雅良, 斉藤隆行, 本間美樹治: 免震支承の耐寒性の実験および免震橋梁設計, 寒地技術論文第 13 回, pp. 197-202, 1997.
- 8) Kim, D. K., Mander, J. B. and Chen, S. S. : Temperature and Strain Rate Effects on the Seismic Performance of Elastomeric and Lead-Rubber Bearings, Special Publication. *American Concrete Institute* SP-164, pp. 309-322, 1996.
- 9) Mander, J. B., Kim, D. K. and Chen, S. S. : Thermo-Visco-Elasto-Plastic Modeling of Elastomeric and Lead-Rubber Bridge Bearing, 土木研究所資料, Vol. 3480, pp. 131-145, 1997.
- 10) 山田準吉: エンジニアリング用材料としての天然ゴム, 日本ゴム協会誌, Vol. 50, No. 7, pp. 467-483, 1977.
- 11) 西沢仁: 耐寒性ゴム配合の作り方, ポリマーの友, Vol. 15, No. 3, pp. 174-182, 1978.
- 12) 下田郁夫, 池永雅良, 持丸昌己, 宮崎充, 桜庭信一, 増田耕一: LRB 免震建物における免震装置の経年変化, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp. 2885-2888, 1998.
- 13) Nakauchi, H., Tanaka, K., Yokoyama, C., Miyazaki, M. and Yamazaki, N. : Characterization of a 100-years-old Rubber Bearing by Microanalytical Methods, *Journal of Applied Polymer Science, Applied Polymer Symposium*, Vol. 50, 369-375, 1992.
- 14) 渡部征男, 加藤朝郎, 米田玄次, 広谷勉: 約 40 年を経過した積層ゴムの経年変化調査, 土木学会, 第 1 回免震・制震コロキウム, 1996.
- 15) 占部誠亮: オゾン亀裂に対するワックスの機作その 1, ポリマーダイジェスト, Vol. 32, No. 10, pp. 62-70, 1980.
- 16) 占部誠亮: オゾン亀裂に対するワックスの機作その 2, ポリマーダイジェスト, Vol. 32, No. 11, pp. 94-101, 1980.
- 17) 占部誠亮: ワックスブルーの機構, ポリマーダイジェスト, Vol. 35, No. 10, pp. 85-92, 1983.
- 18) 占部誠亮: ゴムコンパウンドの表面, 日本ゴム協会誌, Vol. 65, No. 5, pp. 277-286, 1992.

(2000. 12. 25 受付)

RESEARCH ON LOW TEMPERATURE RESISTANCE OF THE NATURAL RUBBER BEARING

Hiroyuki SUGIMOTO, Minoru MIZOE,
Yoshihisa YAMAMOTO and Masayoshi IKENAGA

Since the Great Hanshin-Awaji earthquake, rubber bearings have been increasingly adopted nationwide. Recently, however, several cases of surface cracking have been reported in the cold region.

We tried to find out the mechanism of ozone cracking under low environmental temperature, and proposed the method to prevent such cracking and to evaluate weatherproof performance of rubber materials. Reliability of such methods was verified by outdoor exposure tests. Further we conducted research on the influence of cracking to bearing performance and confirmed the practicality in the use of natural rubber bearing in cold region.