

ゴム支承の耐久性に係る品質確保のための評価手法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 1

担当チーム：橋梁構造研究 G

研究担当者：大住道生、横山朋弘、江口康平

【要旨】

本研究では橋梁用ゴム支承の耐久性確保を目的に、環境劣化や長期間供用されたゴム支承の耐久性に係る検討を行った。また、地震動を受けたゴム支承を対象に、耐久性の低下が地震時のゴム支承の損傷に影響を与えた可能性や、地震による損傷の有無の評価方法、外観に損傷が生じている支承の残存性能について検討した。また、ゴム支承の品質を確保し、かつ不測の事態におけるトレーサビリティの確保を目的に、明確な品質管理手順を検討した。

その結果、ゴム支承の耐オゾン性を定量的に評価する方法を提案し、また、外部から水等の浸透がない場合、20年程度の供用期間では接着性が変化しないことを確認した。地震により損傷したゴム支承に対する検討に関しては、損傷原因に耐久性の低下は影響しなかったことや、残留変形が生じた場合でも耐荷性能は大きく変化しないことを確認できた。品質管理に関しては、ゴム支承の品質を確保する上で抑えるべきことを抽出し、各種特性の評価方法及び統一的な記録の入力フォーマットを提案した。

キーワード：ゴム支承、耐久性、評価方法、品質管理

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震では、多くの鋼製支承が損傷したことから、それ以降、積層ゴム支承が適用される事例が増加している。ゴム支承の大まかな構成は図-1.1に示す様に、外部からの劣化因子の浸透を防ぐ被覆ゴムと、内部鋼板が埋設されたゴム本体で構成され、上下の沓プレートにより上下部構造に接続される。

ゴム支承は国内で適用されてからの歴史が浅く、耐久性に関する検討¹⁾²⁾³⁾や地震による損傷メカニズムや被災後の性能評価に関する検討⁴⁾⁵⁾はいくつかあるものの、明らかになっていないことが多い。また、品質管理方法に関しても、これまでゴム支承メーカーが設定する方法がとられてきたが、建築用ゴム支承のデータ改ざん問題等もあり、曖昧さのない明確な品質管理方法を設定することが求められている。

そこで本研究では、ゴム支承の耐久性に関して、被覆ゴムの耐オゾン性や内部鋼板とゴムの接着層の経年による品質変化について検討した。また、地震動により損傷した支承に対して、耐久性の低下が与えた影響を検討するために、支承の損傷状況を詳細に調査した。加えて、地震により損傷した支承の損傷箇所を推定する方法や、地震により残留変形が生じた支承の耐荷性能を検証した。更に品質管理方法に関しては、品質確保に必要な情報を整理し、効果的に記録する方法を検討した。

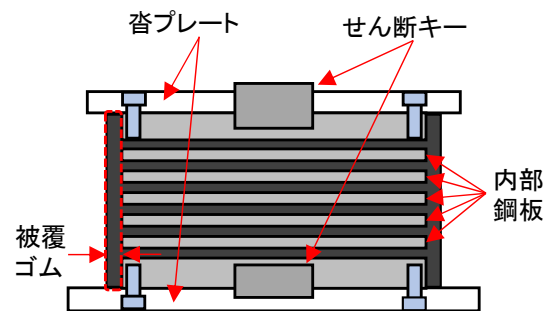


図-1.1 支承の断面イメージ図

2 ゴム支承の耐久性に関する検討

2.1 ゴム支承の耐オゾン性

2.1.1 目的

ゴム支承は被覆ゴムにより表面を覆われており、内部に劣化因子が浸透することを抑制している。しかし、大気中のオゾンなどの劣化因子によって亀裂が発生する事例が報告されている（図-2.1）。ゴム支承用ゴムの耐オゾン性に関しては、平成30年道路橋支承便覧⁶⁾（以下、H30 支承便覧）では、温度 40℃、与ひずみ 50%、オゾン濃度 100pphm（なお、一般大気中のオゾン濃度は 1～5pphm）の促進環境で 96 時間亀裂が発生しないことが求められている。しかし、この条件を満足するゴムが実環境でどの程度の耐久期間を確保しているかは明らかになっておらず、より定量的にゴムの耐オゾン性を評価する方法が求められている。そこで本研究で



図-2.1 オゾン劣化によると思われる支承の亀裂

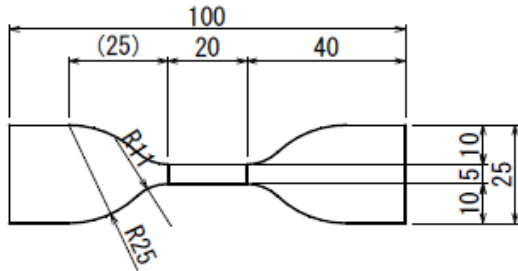


図-2.2 供試体形状(単位:mm)

は、ゴム支承の耐オゾン性を定量的に評価する方法を検討した。

2.1.2 実験概要

ゴムの耐オゾン性評価方法について、オゾン濃度や与ひずみをパラメーターとして促進オゾン劣化試験を実施した。実験供試体の寸法を図-2.2に示す。実験に供したゴム供試体は JIS K 6259-1:2015「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-耐オゾン性の求め方-」に準拠してダンベル状 3 号形 (厚さ 2mm) のものを使用した。ゴムシートには老化防止剤としてアミン系老化防止剤 (2phr) およびワックス (1phr) を配合している。アミン系老化防止剤はゴムの自動酸化反応を抑える機能を有し、ワックスはゴム表面において耐候性保護膜を形成してオゾンとゴムの接触を物理的に遮断する機能を有する。老化防止剤の添加量については、今回の試験条件で破断または亀裂発生が確認できると想定される量とし、かつ平成 24 年道路橋支承便覧⁷⁾に示されていたゴムの耐オゾン性試験に合格する特性を確保できる量とした。供試体は伸長治具に取付け、表-2.1に示す温度、オゾン濃度、引張ひずみを加えて促進オゾン劣化試験を行った。オゾン試験槽の状況を図-2.3に示す。また、本検討ではオゾン劣化による亀裂伸展を定量的に測定する為にロードセルを取付け、試験期間中の引張荷重の減少を測定した。試験終了の条件は、ゴムが破断するまでとし、破断しなかった場合は 192 時間を最大とした。

表-2.1 試験条件

名称	試験数	オゾン濃度 (pphm)	与ひずみ [伸長率] (%)	温度 (°C)
A	3	100	50	40
B	3	50	50	
C	3	10	50	
D	3	100	5	
E	3	100	20	
F	3	100	80	

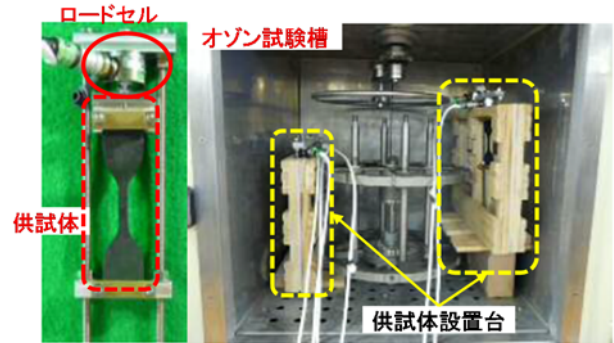


図-2.3 治具取付け状況およびオゾン試験槽内の状況



図-2.4 試験終了後の供試体外観 (条件 C : オゾン濃度 10pphm、与ひずみ 50%)

2.1.3 実験結果および考察

一例として試験時間終了まで破断しなかった供試体のマイクロ스코ープ画像 (倍率 10 倍) を図-2.4に示す。ゴムにオゾンが作用したことで、表面に亀裂が生じていることが確認できる。破断した供試体は、この状態より更に深部まで劣化したことで引張力を支持できなくなり、最終的に破断したと考えられる。

図-2.5にオゾン濃度が変化した場合、図-2.6に与ひずみが増加した場合の試験期間中の初期荷重からの荷重減少率をそれぞれ示す。

まず、オゾン濃度を変化させた場合 (図-2.5) について見ると、オゾン濃度が高いものほど短時間で荷重が減少していた。これは、オゾン濃度が高いほどオゾン分子がゴムに衝突する回数が増えたことが原因と考えられる。また、オゾン濃度 10pphm で試験した C は、試験期間の経過に伴い、荷重は減少しているものの試験終了までゴムは破断しなかった。次に、与ひずみを変化させた図-2.6を見ると、与ひずみ 5%はそ

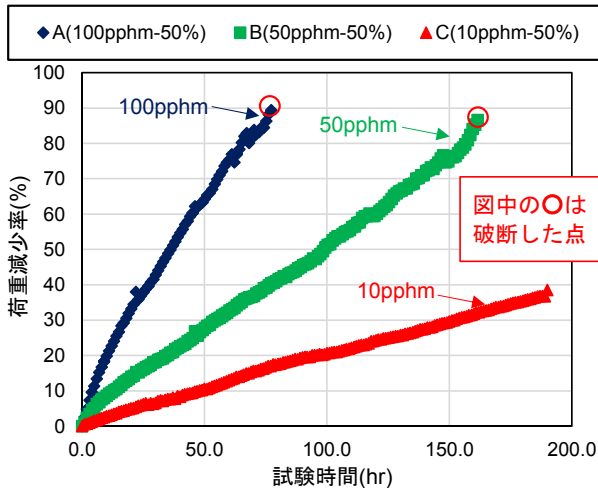


図-2.5 試験期間中の荷重減少率
(オゾン濃度が異なる場合)

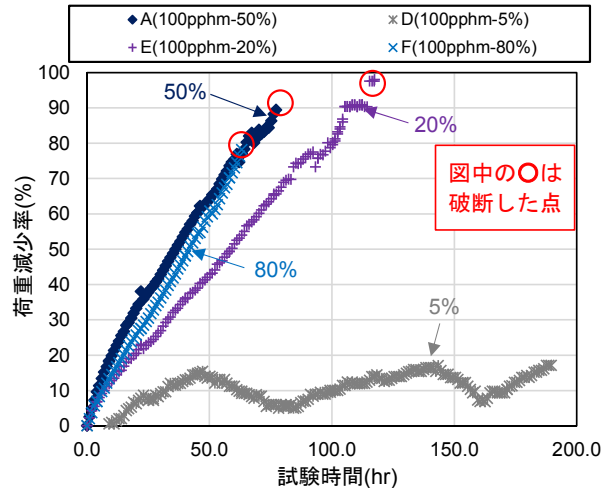


図-2.6 試験期間中の荷重減少率
(与ひずみが異なる場合)

他の条件に比べて荷重減少率の傾きが極端に小さい。また、この供試体は試験終了後のマイクロスコープ画像でも表面に亀裂は確認されなかった。

ゴムとオゾンが反応すると、脆い生成物層が生成される⁸⁾。この際に、引張力が生じていると、ゴムの変形と生成物層の変形に差が生じて、生成物層に亀裂が発生し、未反応のゴムが露出するため、再度オゾンと反応する。これを繰り返すことで内部まで亀裂が伸展し、最終的には破断に至る。一方で、引張力が生じていない場合には、ゴム表面はオゾンとの反応が進行するが、反応部と未反応部で変形に差が生じないため亀裂は発生しない。また、ゴムとオゾンの反応生成物が層としてゴム表面に存在するため、ゴム内部までオゾン劣化が進行しないと考えられる。その為、与ひずみ5%とした供試体ではオゾンによる劣化が進行せず、試験終了まで破断しなかったと考えられる。

与ひずみ20%以上の結果を見ると、いずれも試験終了時間に達する前に破断して終了している。また、20%よりも50%以上の方が荷重減少率の傾きが大きい。但し、与ひずみ80%は50%と同程度の傾きとなっており、本検討の範囲では、50%以上ひずみを与えても亀裂の進展には影響しない結果となった。

オゾン濃度、与ひずみいずれを変化させた場合も、試験期間中の亀裂発生による荷重の減少速度は概ね一定の速度となっていた。このことから、本研究では、オゾン濃度および与ひずみをパラメーターとして、オゾン劣化が支承被覆ゴムに作用したときの亀裂貫通時間を算出する方法を検討した。なお、本検討の範囲では、温度の影響を検討できていないため、化学反応の速度を推定する際に一般的に使用されるアレニウス則

に従ってオゾン劣化が進行すると仮定して温度の影響もパラメーターとして組み込むこととした。

劣化速度推定式の提案にあたっては、アレニウス則を拡張し、濃度などの任意のパラメーターを変数として設定できるアイリングの式を使用した。本検討で得られたオゾン劣化によるゴムが発生させる引張荷重の減少率の推定式を式(1)に示す。

$$\ln(L) = A + l * \frac{1}{T} + m * \ln(M) + n * \ln(\varepsilon) \quad (1)$$

ここに、

L : 1時間あたりの荷重減少率(%)

A, l, m, n : 重回帰分析から求められた係数

T : 条件温度(K)

M : オゾン濃度(pphm)

ε : 与ひずみ(%)

推定式を用いて、前述した促進オゾン劣化試験と同じ条件の荷重減少率を推定した結果を図-2.7に示す。オゾン濃度50pphm以外は、実験値と推定値は同程度の傾きとなっている。50pphmは誤差が生じているが推定式の方が大きく、安全側の評価になっていると言える。更に本検討では、推定式を実際の環境に対して適用した場合の10mm厚の被覆ゴムを亀裂が貫通するまでの期間を試算した。試算した環境条件を表-2.2に示す。季節毎のオゾン濃度および温度は環境省が公表している環境省大気汚染物質広域監視システム⁹⁾からデータを取得し、ゴム支承に発生するひずみは既往の研究¹⁰⁾を参考に設定した。また、使用するゴムの品質はH30支承便覧に規定される性能を満足する最低限の特性とした。推定結果を図-2.8に示す。推定結果を

見ると、環境条件によって多少の変動はあるが、いずれの環境でも、H30年支承便覧の基準を満足するゴムを使用した場合、供用開始から100年経過後も亀裂は被覆ゴムを貫通しない結果となった。

以上より、促進オゾン劣化試験中の供試体の荷重減少率を測定することで、オゾン濃度や与ひずみをパラメーターとして耐オゾン性を定量的に評価する方法を提案できた。但し、今回の検討の範囲では、ゴムの耐オゾン性を高めるワックスの影響や温度条件への検討が十分ではないため、継続して検討し、推定精度の向上を図る必要がある。

2.1.4 まとめ

ゴムの耐オゾン性に関して、複数の条件で促進試験を行い、試験中のゴムの荷重減少率を測定することで以下のことが明らかとなった。

- (1) オゾン劣化中のゴムの荷重減少は、亀裂の進行に比例しており、荷重の変化を測定することで、オゾン劣化の速度を定量的に把握することが可能である。
- (2) 複数の条件で試験を行うことで、ゴムのオゾン濃度や与ひずみの影響を重回帰分析により定量化でき、任意の環境での被覆ゴムの荷重減少率を推定できる。
- (3) 本検討で提案した式で、実環境で10mm厚の被覆ゴムの亀裂貫通年を算出したところ、H30年支承便覧の規定を満足するゴムを使用した場合、供用開始から100年経過後も亀裂が被覆ゴム内部で留まる結果となった。

2.2 接着層の経年による影響の検討

2.2.1 目的

ゴム支承内部の鋼板は接着剤により接着されており、その剥離強さは JIS K 6256-2「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-接着性の求め方-第2部:鋼材との90°剥離強さ」に規定される方法により試験し、所定の剥離強さを確保することが H30 支承便覧に規定されている。また、剥離強さだけでなく、試験時には接着層ではなく、ゴム部で破断することが求められている。しかし、接着層は水等と接触すると接着力が低下することが判明している一方で、経年に対する耐久性については検討されていない。そこで、本研究では様々な環境で長期間適用されてきたゴム支承を回収し、接着層の剥離強さについて検証した。

2.2.2 実験概要

表-2.3 に試験に使用した実支承の供用条件を、表

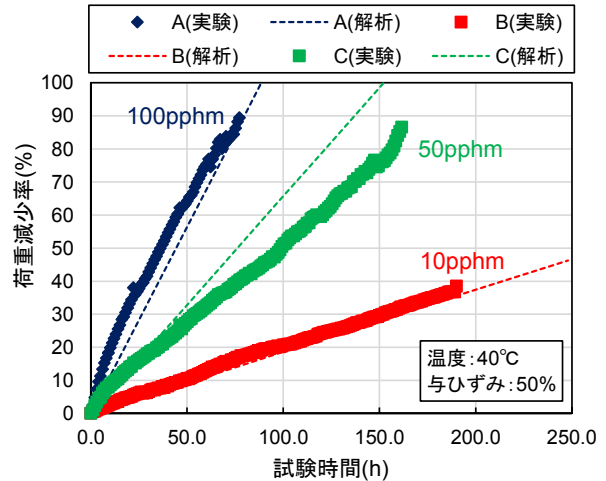


図-2.7 実験値と推定値の比較 (オゾン濃度の影響)

表-2.2 試算条件

	札幌	東京都	大阪	北九州
オゾン濃度(pphm)	1.95~4.5	1.7~4.1	2.0~4.9	2.1~5.0
気温(°C)	-2.9~22.2	6.6~28.5	6.3~28.8	8.0~28.4
支承に生じるひずみ(%)	11~66			

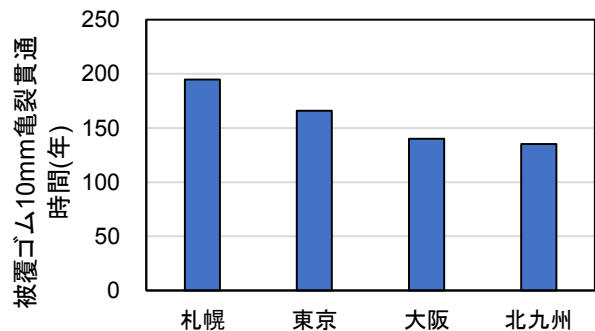


図-2.8 被覆ゴム 10mm に亀裂が貫通する年数

図-2.4 には支承の寸法などの諸元を示す。荒磯橋は塩害環境下の河川橋であり、供用開始から 26 年経過している。ゴム支承の外観に大きな損傷は確認されていない。扇の坂橋は山間部の河川橋であり、支承撤去までの供用期間は 17 年である。本支承は、2016 年熊本地震により橋軸直角方向に 200mm の残留変形が確認されている。旭高架橋は塩害環境下の海上橋梁であり、支承撤去までの供用期間は 5 年である。支承形式は鉛プラグ入り積層ゴム支承で、地震による損傷と考えられる長さ 410mm の水平方向ひび割れが確認されている。損傷が確認されたゴム支承の外観を図-2.9 に示す。各支承の被覆ゴムについては、H30 支承便覧に規定される JIS K 6259「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-耐液性の求め方-」で、水温 55°C に 72 時間水没させた状態での質量変化が 10% 以下であることが求められており、これを被覆ゴムの厚さに換算すると 0.48mm となる。被覆ゴムは水を通しにくい構造であることも分かって

表-2.3 回収した支承の供用条件

橋梁名	供用開始(年)	撤去までの供用年数	橋長(m)	幅員(m)	橋梁形式	環境条件	特色	支承形式
荒磯橋	1988	26年	45.00	16.55	単純PCポステン桁橋(×2連)	塩害環境下の河川橋 海岸線から220m	-	パッド型 ゴム支承
扇の坂橋	2001	17年	128.00	12.50	3径間連続鋼板桁橋	山間部の河川橋	熊本地震により 損傷	地震時水平力分散型 ゴム支承
旭高架橋	2006	5年	981.20	8.25	4径間連続PC箱桁橋 7径間連続PC箱桁橋 7径間連続PC箱桁橋	塩害環境下の海上橋	東北地方太平洋沖 地震により損傷	鉛プラグ入り 積層ゴム支承

表-2.4 試験に用いた撤去支承の諸元

橋梁名	支承名	ゴム材質	平面形状	せん断弾性係数(N/mm ²)	ゴム支承本体寸法						側面被覆 ゴム厚さ (mm)	内部鋼板	
					橋軸 (mm)	直角 (mm)	直径 (mm)	高さ (mm)	1層厚 (mm)	層数 (層)		厚さ (mm)	材質
荒磯橋	A2-KG2	CR	□	1.0	300	450	-	81	15	4	5	1.60	SS400
	A2-KG3	CR	□	1.0	300	450	-	81	15	4	5	1.60	SS400
扇の坂橋	A2-G1	NR	○	0.8	-	-	φ520	245	17	9	10	3.00	SS400
旭高架橋	As1-G1	NR	○	1.0	-	-	φ720	228	22	5	10	4.50	SS400
	P1-G2	NR	□	1.0	570	870	-	284	19	8	10	4.50	SS400
	P8-G1	NR	□	1.0	570	1050	-	289	17	9	10	4.50	SS400



図-2.9 ゴム支承の撤去前の損傷状況(左:扇の坂橋 A2-G1、中:旭高架橋 As1G1、右:旭高架橋 P1G2)

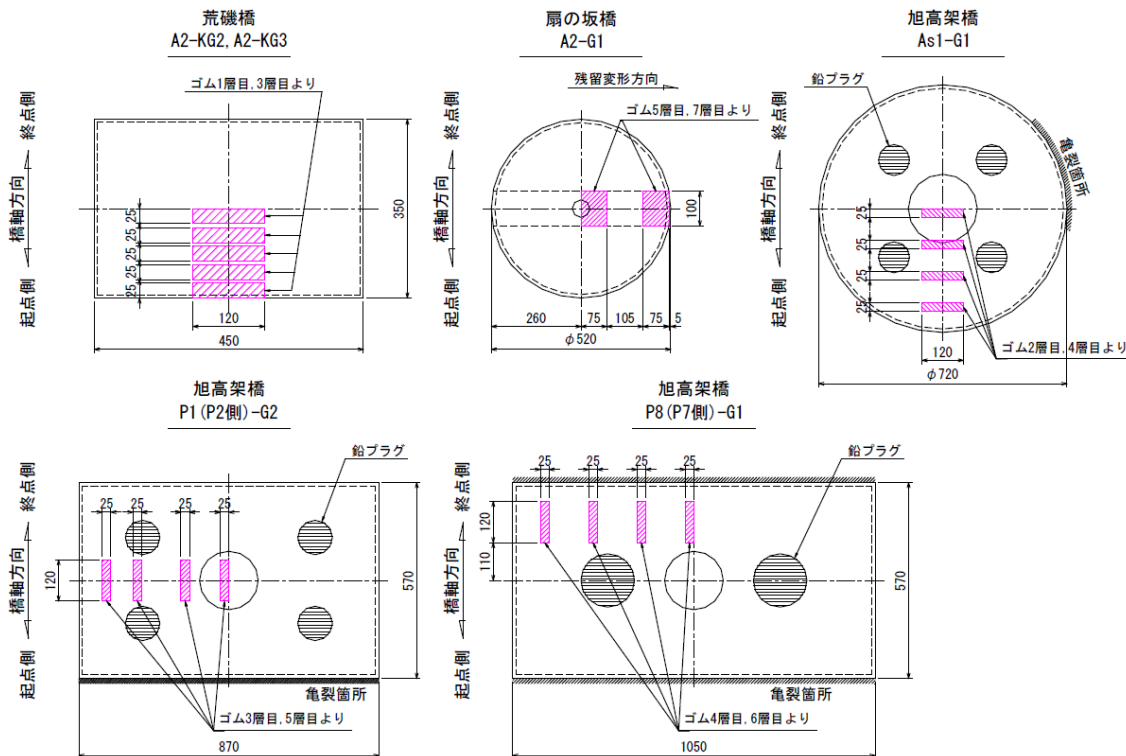


図-2.10 剥離強さ試験用供試体の採取位置

おり、亀裂のない場合、内部への水の浸透はなかったと考えられる。なお、支承6基の回収の際、バーナーにて周辺部材を溶断しており、熱による支承への影響

は不明である。回収した支承は、JIS K 6256に基づき、図-2.10に示す範囲から試験片を取り出し、90°剥離試験を行った。

2.2.3 実験結果および考察

試験結果を橋梁ごとに取り纏め図-2.11、2.12、2.13にそれぞれ示す。図中の横軸はゴム支承本体側面から試験片を採取した中心位置までの距離、縦軸には剥離強さを示したものである。剥離強さは1箇所当たり2層分から切り出した試験片2つの平均で表している。剥離強さは全ての試験片において、H30 支承便覧で求められる値(7N/mm)以上が確保されていることを確認した。扇の坂橋については、製品検査記録表の実験値が入手できたため参考として記載している。これは製品と同一の製作工程で製作された試験片を用いて行った材料試験であり、経年による材料劣化の指標となるため比較を行った。検査時の結果と比較すると、供用後の支承は表面近くの剥離強さは低下しているが、規格値である 7N/mm は上回っていた。供用開始から最も供用年数長い荒磯橋の結果を見ても、いずれの採取位置でも規格値を満足していることから、外部から劣化因子の浸透が無い場合は、接着層は長期にわたって所定の性能を保持することができると考えられる。また、剥離強さ試験終了時の破断形態についても、全ての試験片でゴム部での破断となっており、接着剤やその界面での破断は確認されなかった。

2.2.4 まとめ

実環境で供用された支承から試験片を採取し、接着層の剥離強さ試験を行った結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 長期間塩害環境で供用された支承でも、外部から劣化因子の浸透が無い場合は、接着層は所定の性能を保持できることを確認した。
- (2) 地震動により残留変位や亀裂が生じた場合でも、接着層の剥離強さは確保されていることを確認した。

3. 地震動を受けたゴム支承に関する検討

3.1 劣化がゴム支承の損傷に与える影響

3.1.1 検討目的

2016年熊本地震ではレベル2地震動に対して設計された橋梁にも大きな被害が生じた。ゴム支承に関しても破断などの深刻な損傷が発生したが、耐久性に関連する損傷が地震による支承の損傷に影響を与えたかは明らかになっていない。

そこで本研究では、熊本地震により被災した橋梁から支承を回収し、支承に生じていた損傷を調査し、耐久性に起因する劣化の影響を検証した。

3.1.2 検討概要

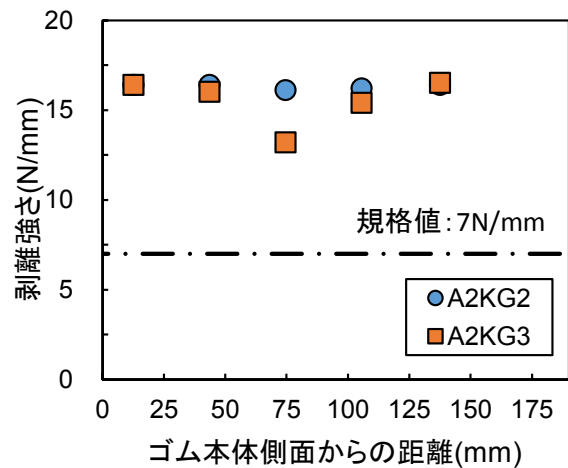


図-2.11 剥離強さ (荒磯橋)

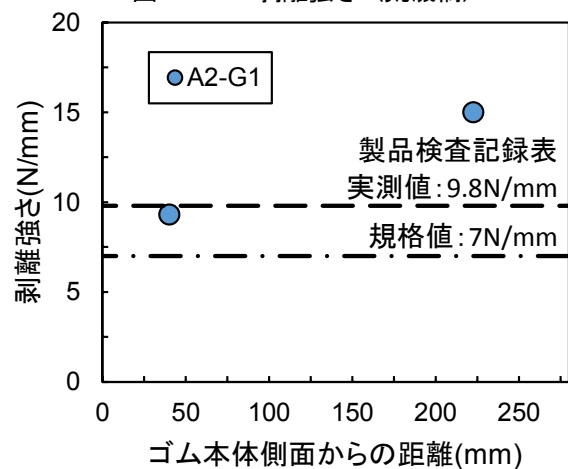


図-2.12 剥離強さ (扇の坂橋)

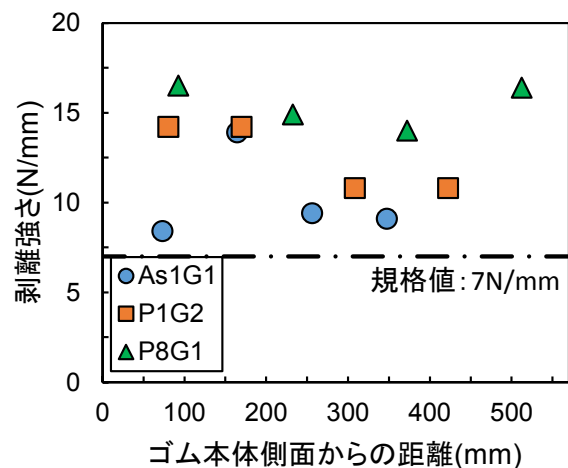


図-2.13 剥離強さ (旭高架橋)

損傷調査用の支承は、熊本県県道 28 号に位置する俵山大橋、扇の坂橋、大切畑大橋の 3 橋から回収したものである。ここでは、大切畑大橋について報告する。大切畑大橋は航空写真判別により地表の亀裂が発生した付近に位置しており、地震動だけでなく地盤変状も影響したと考えられる。また、対象橋梁は橋長 265.4m

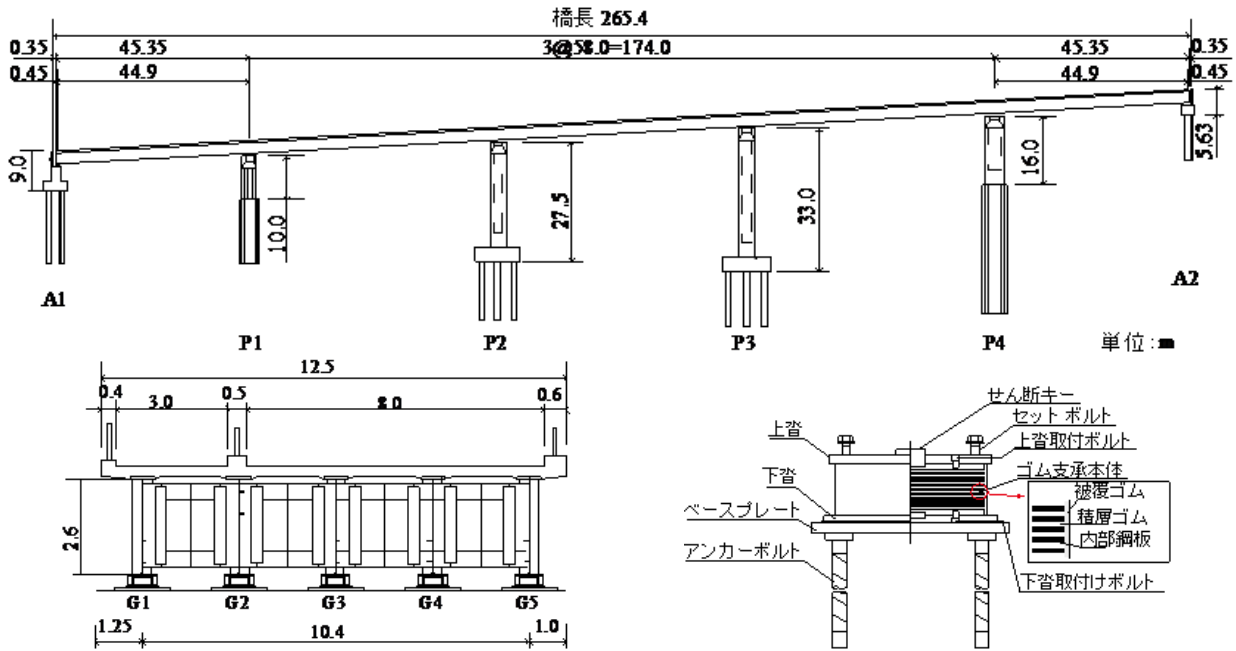


図-3.1 大切畑大橋の一般図及び支承の概要図

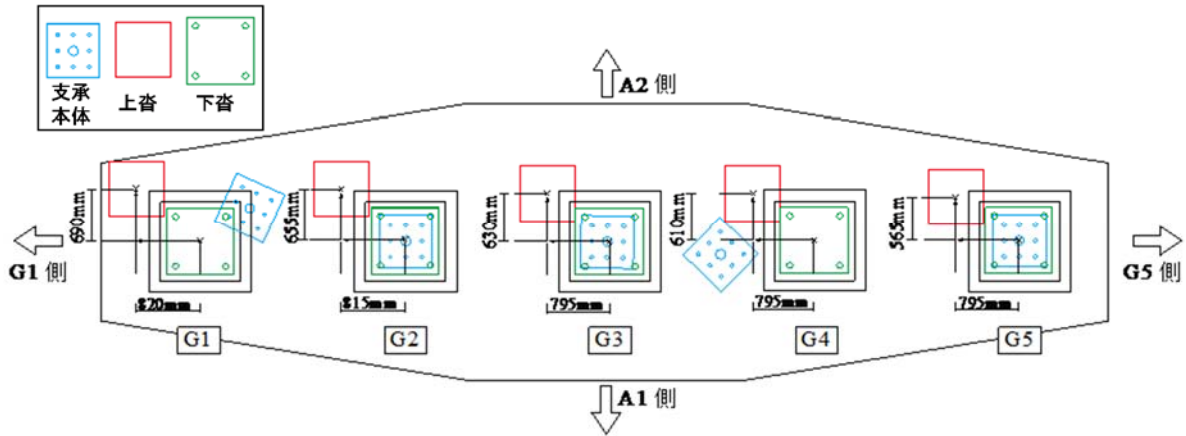


図-3.2 地震後の支承、上沓、下沓の位置 (P1 橋脚)

の5径間連続非合成曲線鋼桁橋である。本橋は平成8年道路橋示方書に基づいて設計されたものであり、支承に地震時水平力分散型ゴム支承を使用し、2001年に竣工し、回収時点で供用開始から15年経過していた。橋梁一般図を図-3.1に示す。

本稿では地震により損傷したP1橋脚に設置されていた支承を対象として、損傷状態及び推定される挙動を検討する。P1橋脚は、図-3.2に示すように、主桁がA2方向に550mm~700mm程度、G1方向に800mm程度移動していた。また、支承は全て損傷し、主桁は支承から落下していた。

3.1.3 調査結果および考察

調査結果の一例としてP1G3支承の損傷状況を図-3.3に示す。まず、(a)~(d)に示すゴム支承側面の状況を見ると、被覆ゴムに長さ20~150mm程の大きな亀裂が発生している。ゴム支承にオゾン劣化による亀裂が

発生した場合、内部鋼板によって被覆ゴムにひずみが発生する箇所に、2.1で示したような微細な亀裂が発生する筈であるが、今回の検討では確認できなかった。また、(d)では内部鋼板が露出するほど表層ゴムが剥離している。地震後から回収するまでの期間および保管している期間に腐食が進行してしまっているが、被覆ゴムを亀裂が貫通して内部鋼板が腐食していた場合、他の箇所よりも腐食が進行していると考えられる。但し、今回調査した支承は一律に腐食していたことから地震により表層ゴムが剥離するまでの間は、腐食は発生していないと考えられ、支承の損傷原因にオゾン劣化は影響しなかったと考えられる。

次に、地震発生以前にボルトが腐食し、断面が減少していた場合、見込んでいた耐力未滿で破断する危険性があるため、ボルトの破断原因について検討する。図-3.3の(e)~(f)にボルト孔の状況を示す。支承上面の

赤:亀裂・破断、青:変形、緑:剥離

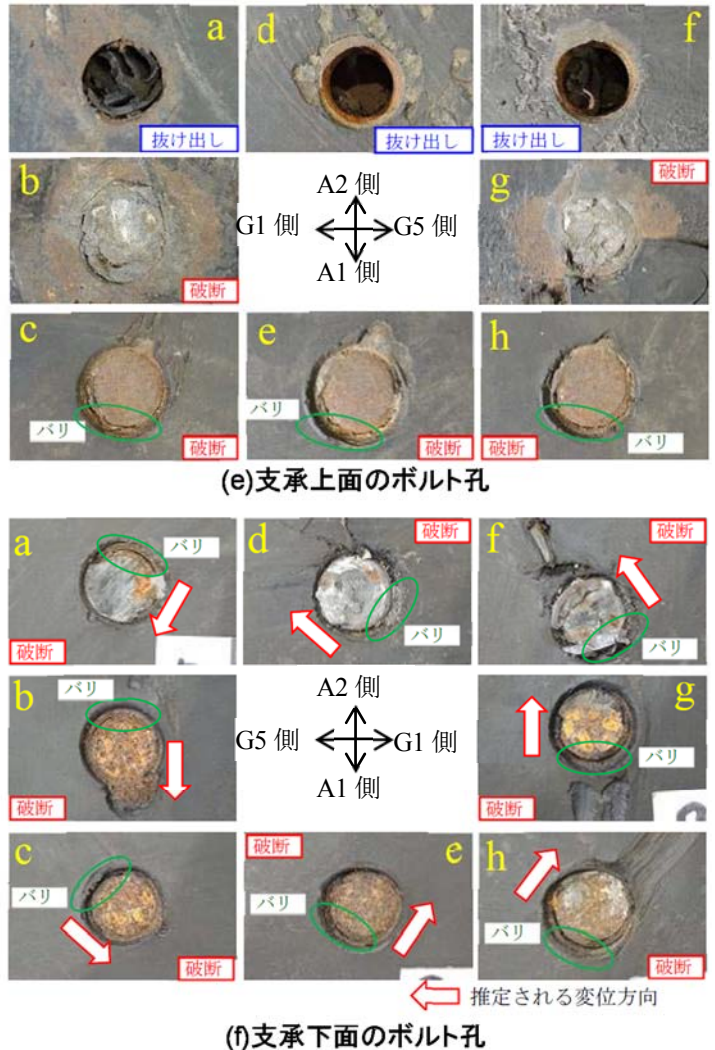
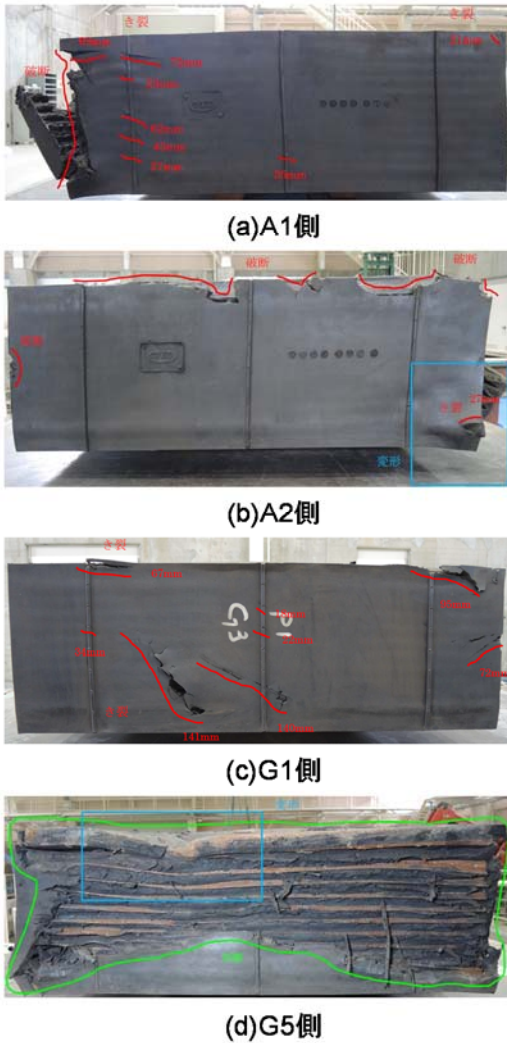


図-3.3 P1G3 支承の損傷状況
(a)~(d)支承側面、(e)~(f)支承上下面のボルト孔

a,d,fを除くボルトは破断し、ボルト孔にボルトが残存していた。正確なところは不明だが、殆どのボルトは全面的に腐食が生じており、局所的な腐食の進行は見られなかった。

ゴム側面に生じた亀裂やボルトの腐食状況に関してはいずれの支承も同様の傾向を示しており、熊本地震により損傷した支承が耐久性の低下に起因して損傷した可能性は殆どなかったと考えられる。

3.1.4 まとめ

耐久性に係る観点から地震により損傷した支承の被害状況を調査した結果以下のことが明らかになった。

- (1) ゴム支承側面にオゾンクラックと思われる微細な亀裂は確認されなかったことから、被覆ゴムの亀裂に耐久性の低下は影響しなかったと考えられる

- (2) ボルトの破断状況を詳細に調査した結果、局所的な腐食の進行は確認されず、また、破断位置はゴム本体と杓プレートの境界面であったことから、地震前にボルトの腐食は生じていなかったと考えられる。

3.2 残留変形したゴム支承の耐荷性能

3.2.1 目的

ゴム支承を有する橋梁が大規模地震により被災し、ゴム支承に残留変形が生じた際、この残留変形がゴム支承の力学特性に及ぼす影響を検証した事例は少ない。このため、地震によりゴム支承に残留変形が生じた際の継続使用の可否についての判断が難しくなっている。そこで、熊本地震で被災し、ゴム支承に残留変形が生じたのち、約11ヶ月経過した後、撤去されたゴム支承

表-3.1 扇の坂橋橋梁諸元

道路規格	第3種第2級
橋長	128.0m
支間長	L=38.900m+48.800m+38.900m
有効幅員	8.00m(車道)+3.50m(歩道)
平面線形	R=250m(A=100m)
上部構造形式	3径間連続曲線鉄桁橋
下部構造形式	橋台:逆T式橋台 橋脚:張出式橋脚
基礎構造形式	A1:直接基礎 P1, P2, A2深礎杭基礎
適用基準	平成8年道路橋示方書 平成3年道路橋支承便覧

表-3.2 支承の諸元

項目	単位	設計諸元	
		A1C2支承	P2G1支承
直径	mm	500	650
1層のゴム厚さ	mm	17	27
ゴムの層数	層	9	2
補強材の厚さ	mm	3	3
被覆ゴム厚	mm	10	10
ゴムの総厚	mm	153	54
せん断弾性係数	kgf/cm ²	8.0	12.0
せん断弾性係数(低減時)	kgf/cm ²	8.0	12.0
形状係数	-	7.35	6.02
弾性係数	kgf/cm ²	2158.5	2181.1



(a)A1G2 支承 (b)P2G1 支承

図-3.4 供試体支承の被害状況

を用いて、その残存性能を確認するため、力学特性試験を実施し、残留変形がゴム支承のせん断剛性及び圧縮剛性に与える影響について検討を行った。

3.2.2 試験概要

検討には、3.1 で取り扱った大切畑大橋と同様に熊本地震により損傷した県道 28 号熊本高森線(俵山バイパス)の橋梁の一つである扇の坂橋(平成 10 年 12 月竣工、回収時点で供用 17 年経過)からの撤去支承を用いた。支承は円柱状の地震時水平力分散ゴム支承で、本研究では、支承製作当時の製品検査結果の残る A1G2 および P2G1 の支承を用いた。橋梁および支承の諸元を表-3.1、表-3.2 に、支承の被害状況を図-3.4 に示す。撤去時に応力開放した後、約 2 ヶ月経過した段階で出荷当時に対する A1G2 の残留変形は鉛直方向=+1.8mm、橋軸水平方向=5mm に、P2G1 の残留変形は鉛直方向=+0.1mm、橋軸水平方向=3mm となっていた。また、いずれの支承も、支承下部に内部鋼板の変形によるものと思われるゴムの膨出が確認されている。

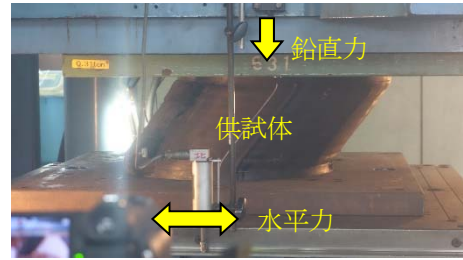


図-3.5 水平せん断試験の状況

表-3.3 水平せん断試験の結果

供試体名	せん断剛性(kN/mm)			試験結果との比率(%)	
	試験結果	製品検査時	設計値	対製品検査時	対設計値
A1G2支承	1.05	1.05	1.03	0.0	+1.9
P2G1支承	7.47	7.25	7.37	+3.0	+1.4

表-3.4 鉛直力載荷試験の結果

供試体名	圧縮変位(mm)			試験結果との比率(%)
	試験結果	製品検査時	変位差	対製品検査時
A1G2支承	4.3	3.4	0.9	+26.5
P2G1支承	2.7	2.2	0.5	+22.7

表-3.5 圧縮剛性の比較

供試体名	圧縮剛性(kN/mm)		試験結果との比率(%)
	試験結果	設計値	対設計値
A1G2支承	252	277	-9.0
P2G1支承	1241	1340	-7.4

これらのゴム支承に水平せん断試験と鉛直力載荷試験を実施した。図-3.5 に試験状況を示す。水平せん断試験は、鉛直反力として死荷重反力相当を載荷した状態でせん断ひずみ±150%のせん断ひずみを正負交替で 3 回与え、3 回目のせん断剛性を評価値とした。鉛直力載荷試験は、初期荷重 0kN から最大反力相当までの載荷を 3 回行い、3 回目の圧縮変位量を評価値とした。

3.2.3 実験結果および考察

水平せん断試験の結果得られたせん断剛性と製品検査時及び設計値に対するせん断剛性の比率を表-3.3 に示す。A1G2 支承のせん断剛性は製品検査時と比べて変化がなく、設計値と比べて 1.9%上回っていた。P2G1 支承のせん断剛性は製品検査時と比べ 3.0%増加、設計値と比べて 1.4%上回っていた。

同様に、鉛直力載荷試験得られた圧縮変位と製品検査時の圧縮変位に対する比率を表-3.4 に示す。A1G2 の圧縮変位は製品検査時と比べ 0.9mm (26.5%) 増加、P2G1 は 0.5mm (22.7%) 増加していた。圧縮変位の増加は圧縮剛性の低下を表すことから、支承の圧縮剛性は低下していると予想された。そこで圧縮応力度

1.5N/mm²から最大反力までの圧縮剛性を算定し、設計値との比較を行った。試験結果を表-3.5に示す。その結果、A1G2 支承は9.0%、P2G1 支承は7.4%設計値よりも低い値を示していた。但し、出荷時の製品試験では、せん断剛性の実測値は設計値の±10%、圧縮剛性の実測値は設計値の±30%まで変動が許容されていることから、支承の耐荷性能には大きく影響しないといえる。

3.2.4 まとめ

熊本地震により残留変形が生じていた扇の坂橋の支承を回収し、せん断載荷試験、鉛直載荷試験を行い以下のことが明らかとなった。

- (1) 地震動によりゴムの膨出や残留変形が生じた場合でも、せん断剛性は殆ど変化しない。
- (2) 鉛直変位は経年あるいは地震による損傷により増加しており、ゴムの圧縮剛性は設計で想定している値より低下していた。但し、その低下は設計で許容されている範囲であった。

3.3 被災したゴム支承の状態診断方法の検討

3.3.1 目的

地震動を受けた橋梁は、適切に被害状態を把握するために点検を行う必要がある。ゴム支承も同様に被災後の状態確認をするが、ゴム支承の場合、内部鋼板が変形している場合は、外観でゴムの膨出などを確認できる場合があるが、前述した鋼板とゴムの接着層の剥離は確認することができない。接着層の剥離が生じていると、そこを起点としてゴムと鋼板が完全に剥離してしまい、機能が消失する危険性があるため、接着層の剥離の有無や、位置・規模等を把握する方法が求められている。

そこで、本課題では既往の研究を参考に、物体内で発生する弾性波を利用して損傷箇所を推定する AE 法の、ゴム支承に対する適用性について検討した。

3.3.2 実験概要

AE 法を活用した内部亀裂の確認試験には、3.2 で載荷試験の対象とした扇の坂橋から回収した A1G2 支承および P2G1 支承を使用した。本稿では A1G2 支承の結果について説明する。回収後の支承外観を図-3.6に示す。A1G2 支承は地震後の調査により残留変形が確認されており、ゴム支承下部にゴムの膨出が確認されている。なお、AE 法による損傷の確認試験は、3.2 で示した載荷試験後の供試体を用いて測定している。

AE 法を利用して内部損傷を測定する方法に関しては、既往の文献¹⁾を参考に、供試体側面に受信子を設



図-3.6 回収した A1G2 支承の外観

表-3.6 載荷条件

供試体No.	載荷荷重(kN)		
	活荷重10%	活荷重20%	活荷重50%
A1G2支承	561	599	711

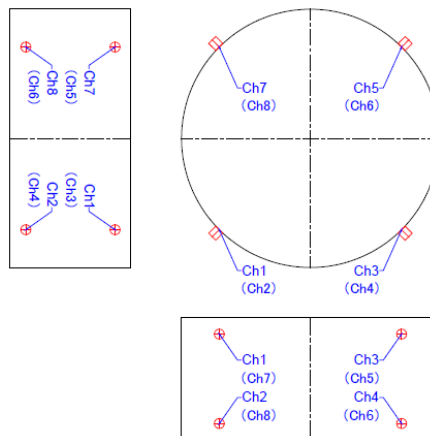


図-3.7 AE センサー設置位置概略図

置し、鉛直載荷による亀裂が開閉する際や、亀裂が伸展する際に発生する弾性波を捉えることで損傷箇所の特定を試みた。載荷条件は死荷重相当(約 520kN)を載荷した状態で、活荷重相当(約 370kN)の 10、20、50%に相当する鉛直荷重を 1 サイクル 25 秒として動的に 10 サイクル繰返し載荷した。各載荷条件の載荷荷重を表-3.6 に示す。本検討では載荷ステップごとに弾性波が発生した回数をカウントし、カウント数が多い箇所を損傷発生箇所と推定することとした。AE センサーの設置位置の概略を図-3.7 に示す。

載荷後、試験体は損傷発生箇所と考えられる部位周辺で切断し、実際に損傷があるか確認した。

3.3.3 実験結果および考察

載荷試験時の各 CH における弾性波カウント数を図-3.8 に示す。結果を見ると、CH4 に設置した受信子で多数の弾性波が計測されたほか、CH1、CH3、CH7 でも弾性波の発生を検知しており、これらの付近に損傷が有る可能性が示唆された。但し、載荷する活荷重の大きさには明確な関係は見られなかった。また、この傾向は P2G1 支承でも同様であった。

次に、AE 法で損傷があることが示唆された箇所を

調査する目的で、供試体を切断し、切断面のゴムと鋼板の接着面を中心に目視観察を行った。観察した結果を一例として図-3.9 に示す。CH4 は支承下部に位置しており、支承側面にゴムの膨出が確認された付近である。切断して内部の状況を確認したところ、内部鋼板の変形が確認されたが、明確な亀裂は確認されず、どのような過程で弾性波が発生したのかは明らかにできなかった。また、他の CH 位置でも観察を行ったが、明確な亀裂は確認できなかった。但し、今回は一面のみの観察結果であるため、それ以外の面で損傷が発生していた可能性は有る。

3.2.4 まとめ

本検討では、支承の損傷箇所を非破壊的に判定するために地震被害を生じた実支承に対して AE 法の適用性を検討した。今回の検討の範囲では、どのような原理で発生した弾性波を検知していたかを明らかにすることができず、結果の妥当性を判断することができなかった。但し、鋼板が変形する程の外力が作用していることから、何らかの損傷は発生していると考えられる。その為、より CH 数を増やして、損傷箇所を絞り込みながら詳細に損傷箇所を特定することで、AE 法の妥当性を検証できる可能性は考えられる。

4. ゴム支承の品質管理に関する検討

4.1 目的

ゴム支承は、ゴム（添加剤含む）、鋼材、接着剤及び鉛プラグなどの材料を組み合わせた状態で加熱及び加圧を加えることにより化学変化（加硫）させることで所定の性能を得ている。そのため、材料ごとの品質のみでは、ゴム支承としての品質を確認できない。材料としての品質を確保するとともに、材料を組み合わせたゴム支承としての品質も確保する必要がある。これまで、支承メーカーごとに道路橋支承便覧などを参考に品質管理方法などを定めていたが、あるメーカーによる建築用ゴム支承の品質管理データ改ざん問題等もあったため、品質管理の内容を分かりやすく記録し、有事の際にゴム支承の製造段階における品質を確認するためにトレーサビリティが確保できるようにすることが求められている。

4.2 品質管理の基本的な考え方

ゴム支承の性能を確保するためには図-4.1 に示す方法による品質管理が必要であると考えられる。前述のように材料の品質を確保するとともに、ゴム支承としての品質の確保が必要となる。これは実際に橋梁等に用いられる製品（出荷品）を用いて確認できる項目

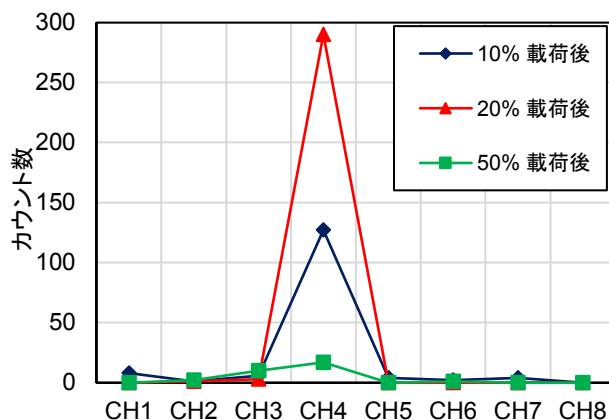


図-3.8 载荷試験時の AE カウント数

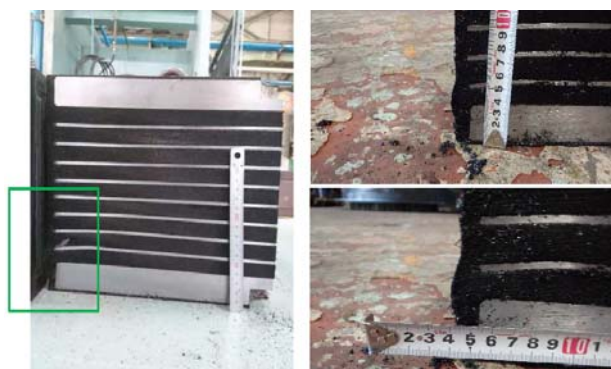


図-3.9 CH4 位置を切断した断面

と、限界状態等のように出荷品では確認できず、供試体を用いて間接的に確認する項目に分けられる。ここで必要となるのは、供試体によって確認された品質管理項目が、出荷品においても同等であると見做せるためには、出荷品と供試体と同じ材料を用いていること、及び同じ製造プロセスによって製作されていることを確認する必要があると言える。

4.3 製造プロセスとその管理方法

例としてゴム支承本体の製造プロセスとプロセス毎に確認すべき項目を整理したものを表-4.1 に示す。それぞれの工程ごとに品質確保において確認すべき項目を示している。この内容が出荷品と供試体で同じであると確認することで、供試体で確認された品質が出荷品においても同等であると考えられる。

4.4 まとめ

プロセスを管理するにあたっては、データが的確かつわかりやすく提示されるよう、確認事項を整理した。この結果は平成 30 年道路橋支承便覧の「参考資料-17 支承部の品質管理記録の様式例」に反映された。支承の特性を検証する試験は各種求められるが、様式では依存性等の補正する前のそれぞれのデータが明確に示されるよう、基本特性のほか、速度、温度、面圧の依存性を確認するそれぞれの試験ごとに結果を記録する

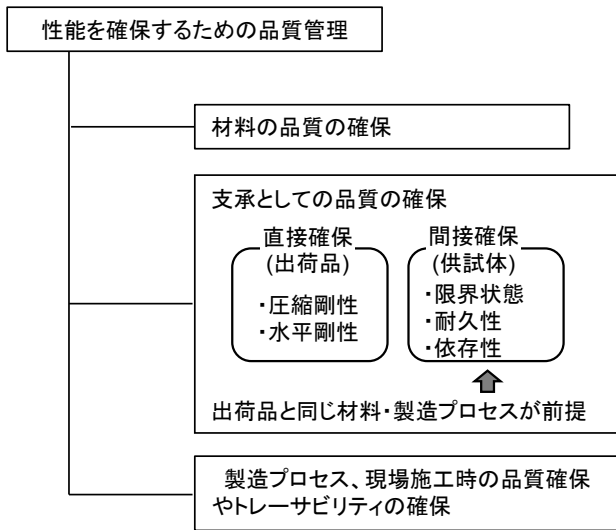


図-4.1 品質管理の基本的な考え方

表-4.1 ゴム支承本体の製造プロセスと確認項目

材料・設備	工程番号	工程	工程毎の確認項目
加硫 鉛 接着剤 鋼板 ゴム材料	①	ゴムの配合・混練	原料ゴム及び配合剤が所定量であること 混練条件が適正であること 物理的性質が規格内であること
	②	ゴムの圧延	圧延シートの厚さが所要の管理値内であること
	③	鉄板の切断加工	材質、厚さ 平面寸法が管理値内であること 数量
	④	ゴム支承製作 鋼板の下地処理	所定の表面粗さであること 異物（錆・油等）の付着が無いこと
	⑤	成型 接着剤塗布	所定のゴム材料を使用していること 所定の鋼板を使用していること 所定の接着剤を使用していること 所定の作業条件であること（接着剤塗布時） 所定の塗布量であること ゴムと鋼板が交互に積層されていること 異物が混入していないこと 成型後の積層ゴムの寸法が所定値であること 所定の金型を使用していること
	⑥	加硫	加硫条件が所定値であること 加硫後の積層ゴムの寸法が所定値であること 加硫後の積層ゴムの外観に異状が無いこと
	⑦	鉛プラグ製作	材質 寸法 数量
	⑧	ゴム支承製作 鉛の挿入	鉛挿入後の外観に異状が無いこと

こととしている。

また、これら品質管理したデータについては記録し、保管されることが重要となる。このため、トレーサビリティの確保のための観点から、プロセス管理における記録資料の名称を記載する欄を設け、それらデータの所在が記録できるようになっている。

参考文献

- 1) 井上崇雅、青木康素、星隈順一：長期間供用されたパッド型ゴム支承の特性評価、第19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、pp.413～418、2016。
- 2) 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検討、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、pp.197～202、2014。
- 3) 大門大、鈴木信勝、山下章、長谷川秀也：既設ゴムダンパー(HDR-S)の劣化原因究明を目的とした材料試験、第19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、pp.427～432、2016。
- 4) 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。
- 5) 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 (地震工学論文集第34巻)、pp.1_587～1_599、2016。

- 6) 公益社団法人日本道路協会：道路橋支承便覧 (平成30年改定)、pp.62～71、2018。
- 7) 公益社団法人日本道路協会：道路橋支承便覧 (平成24年改定)、pp.62～71、2012。
- 8) 深堀美英：高分子の寿命と予測 ゴムでの実践を通して、技報堂出版株式会社、pp.112～116、2013。
- 9) 環境省：環境省大気汚染物質広域監視システム、<http://soramame.taiki.go.jp/>
- 10) 丸山健司、稲荷優太郎、神田智之、中村昌弘：橋梁用ゴム支承の被覆ゴムの耐オゾン性に関する研究 その1：FEMによる橋梁用ゴム支承の表面ひずみの検討、土木学会第73回年次学術講演会概要集、pp.601～602、2018。
- 11) 川崎佑磨、寺村直人、伊津野和行、岡田慎哉：AE法による積層ゴム支承の損傷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.2、pp.244～254、2015。

A STUDY ON EVALUATE METHOD OF RUBBER BEARING FOR QUALITY MANAGEMENT OF DURABILITY

Research Period : FY2016-2019

Research Team : Bridge Structure Research
Groupe.

Author : Michio Ohsumi
Tomohiro Yokoyama
Kohei Eguchi

Abstract : In this study, we examined evaluate method for durability of rubber bearings, inspection method for existing rubber bearings and quality management method for ensuring quality of rubber bearings and improving traceability.

As a result, we proposed quantitative evaluate method for durability of rubber bearing by ozone attack. And adhesion layer between steel plate and rubber is observed that did not deteriorate during service period of about 20 years.

Regarding existing bearings, it was supposed that environment deterioration did not affect to damage of the bearings caused by the earthquake. In addition, it was examined that the deformation capacity did not change significantly even though residual deformation.

As a quality management of manufacturing rubber bearings, we proposed recording procedure and format to ensure the quality of rubber bearings.

Key words: rubber bearing, durability, evaluation method, quality management