# ゴム緩衝体を有する段差防止構造の耐荷性と耐衝撃に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 4～令 6
担当チーム：寒地構造チーム
研究担当者：畠山乃、佐藤京、寺澤貴裕

【要旨】
地震後の橋梁の早期機能復旧を図るための対策工には、衝撃力を低減する構造として緩衝体を設けることが望ましいとされている。しかし、その性能面については明確に規定されておらず、大概の場合、「「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」の準用に関する参考資料（案）」に示されているゴム硬度と厚さを根拠としているが、確実なフェールセーフ機能を発揮するためには、作用や性能を明確に規定する必要がある。本研究では、ゴム緩衝体を有する段差防止構造が必要とする耐荷性能と耐衝撃性能を確保するために、緩衝体の要求性能を明確にし、段差防止構造の設計手法の提案に向けた検討を行った。
キーワード：段差防止構造、衝撃力、緩衝体、ゴム、要求性能

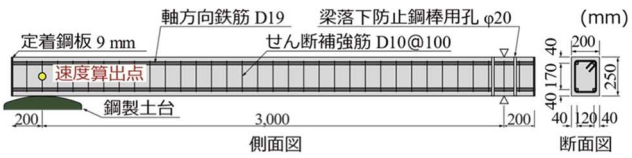
## 1. はじめに

「防災・減災、国土強靱化のための 5 か年加速化対策」（令和 2 年 12 月閣議決定）の策定に際し、国土交通省は「発災後概ね 1 日以内に緊急車両の通行を確保し、概ね 1 週間以内に一般車両の通行を確保する」ことを目標としている。これを踏まえ、設計想定を超える地震動に対しても早期に橋梁の機能確保を可能とする、信頼性の高い設計技術の確立が求められている。

そうした一方で、新潟地震（昭和 39 年）を教訓に落橋防止構造が設けられたが緩衝機構の特性は明らかにされていない。さらに平成 7 年兵庫県南部地震の復旧仕様には、変位拘束構造に緩衝材を設置することが推奨されたが要求性能の明記がなく、配置する緩衝材の性能は設計者に委ねられている。

本研究は、段差防止工にも配置が推奨されている緩衝体として、ゴム緩衝体に要求される性能の明確化を図り、緩衝体の設計法に関する検討を行った。

図−1　RC 梁の落下試験状況



図−2　RC 梁の形状寸法及び配筋状況

## 2. 段差防止工と RC 桁の衝突時挙動の把握

衝撃荷重載荷時における段差防止工と RC 桁の挙動特性について、ゴム緩衝体の有無による影響を把握することを目的に、梁の一端を自由落下させる衝撃載荷試験を行った。図-1 と図-2 には、試験状況と検討対象とした RC 梁試験体の形状寸法および配筋を示している。試験体の形状寸法 (梁幅×梁高×全長) は 200×250×3,400 mm である。実験条件とした落下高さ$h$、ゴム緩衝体の厚さ$t_e$と試験ケース一覧を表−1 に示す。ケース名では、R に続きゴム緩衝体の有無（無は N、有は一次形状係数$S_1$の値）と文字 H に続き落下高さを示している。落下高さは、0.5m と 1.0m の 2 条件とした自由落下試験である。

測定項目は、梁の上下面のひずみ、支点反力、衝撃力、画像分析による梁の変形量である。

なお、一次形状係数$S_1$は、道路橋支承便覧（平成 30 年 12 月）に示されている拘束面積/自由面積より定義されたゴムの幾何学パラメータである。

表-1　試験ケース一覧

| ケース名 | 落下高$h$ (m) | 緩衝ゴム | |
|---|---|---|---|
| | | 1 次形状係数$S_1$ | ゴム厚$t_e$ (mm) |
| RN-H0.5 | 0.5 | — | — |
| RN-H1.0 | 1.0 | — | — |
| R2.0-H0.5 | 0.5 | 2.0 | 20 |
| R2.0-H1.0 | 1.0 | 2.0 | 20 |
| R1.0-H0.5 | 0.5 | 1.0 | 40 |
| R1.0-H1.0 | 1.0 | 1.0 | 40 |
| R0.5-H0.5 | 0.5 | 0.5 | 80 |
| R0.5-H1.0 | 1.0 | 0.5 | 80 |

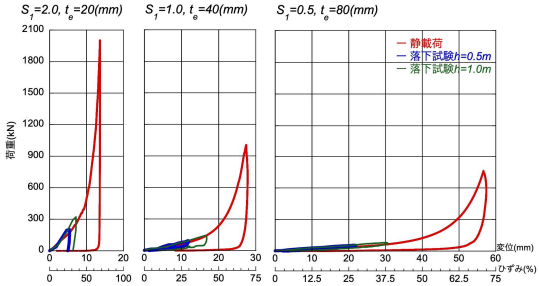



図-3　形状別ゴム緩衝体の荷重−変位関係

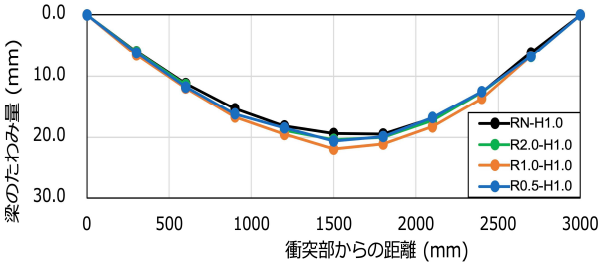



図-4　ゴム緩衝体別の梁のたわみ量（$h$ = 1.0$m$）

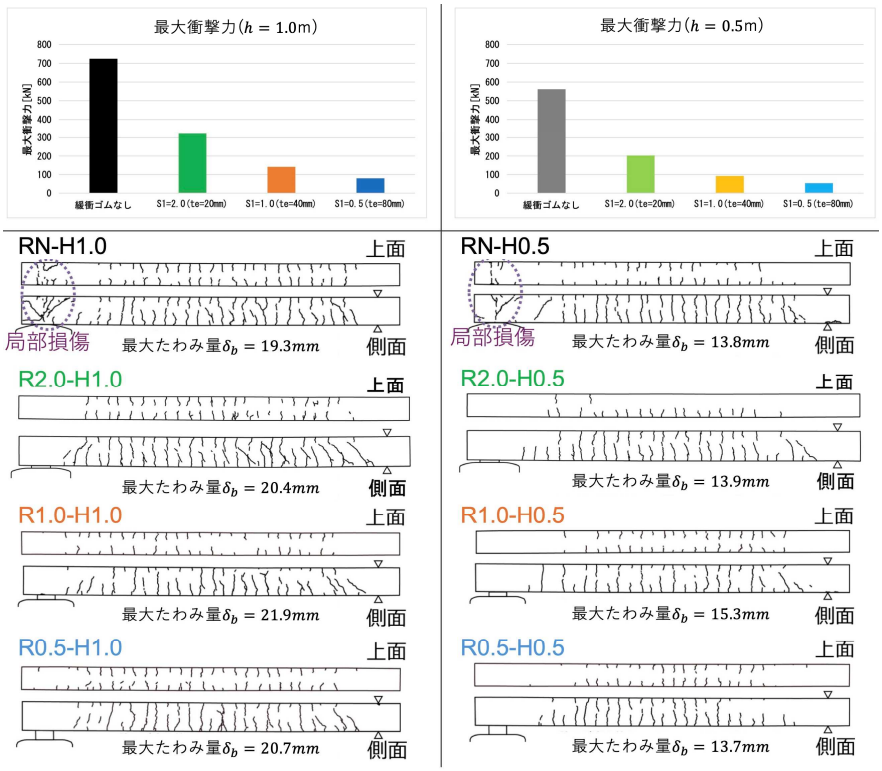



図-5　衝撃力と梁の損傷状態の比較(左；落下高$h$ = 1.0$m$、右；落下高$h$ = 0.5$m$)

## 2.1　ゴム緩衝体と梁の応答

ここでは、高速度カメラで撮影した画像を基にゴム緩衝体の鉛直変位と梁のたわみ量を求めた。ゴム緩衝体の荷重変位関係を図-3 に示す。図には、静的載荷の結果も合わせて示している。緩衝体の厚さと落下高、いずれにおいても静的試験と落下試験の剛性は概ね一致している。厚いゴム緩衝体ほど初期の剛性が低い。また、落下高さ$h$ = 1.0$m$の試験において、いずれの厚さにおいても最大圧縮ひずみは 30%程度であった。

落下高$h$ = 1.0$m$の試験で計測した 4 ケースの梁のたわみ量を図-4 に示す。図示した梁のたわみ量は、支間中央の値が最大となった時刻に記録されたものである。図では、計測した梁下面の鉛直変位を点で示し、その点を実線で結んで示した。最大たわみ量が生じた箇所は、支間中央で、その量はゴム緩衝体の厚さによらず概ね一致している。

## 2.2　衝撃力と梁の損傷

各ケースで生じた最大衝撃力と梁の損傷状態を図-5 に示す。また、最大たわみ量$\delta_b$も合わせて示す。

最大衝撃力は、ゴム緩衝体の厚さが増加するとともに、或いは落下高さが低くなると低下するが、最大たわみ量$\delta_b$は緩衝体厚によらず概ね同じである。梁に生じた損傷は、大別して側面に広く確認される鉛直方向に伸びる曲げ損傷と接触点より放射状に進展する局部損傷である。落下高が同一のケースでは、ゴム厚が厚くなると支点部側から梁中央に分布する斜めひび割れが生じた区間が減少しているものの顕著な差ではない。一方、落下高の差、つまり作用の大きさによって、ひび割れの生じる範囲や進展状態、$\delta_b$に違いが生じている。局部損傷に着目すると緩衝材を設置した場合では、その厚さに関係なく損傷の痕跡は確認できない。

以上より、衝突部の局部損傷を除くと緩衝体を設置

表-2　試験測定値および衝突直前の運動エネルギーとゴム緩衝体のひずみエネルギー

| ケース名 | 落下高(m) | 試験測定値 | | | 推定エネルギー | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 衝突速度(m/s) | ゴム最大圧縮変位$\delta_e$(mm) | 最大衝撃力$P_{max}$(kN) | $PE$(kNm) | $KE$(kNm) | $KE/PE$ | $U_e(\delta_e \times P_{max}/2)$(kNm) | $U_e/KE$ |
| RN -H0.5 | 0.5 | 3.56 | － | | 1.041 | 0.673 | 65% | － | － |
| RN -H1.0 | 1.0 | 4.90 | － | | 2.083 | 1.276 | 61% | － | － |
| R2.0-H0.5 | 0.5 | 3.52 | 4.63 | 204.62 | 1.041 | 0.658 | 63% | 0.474 | 72% |
| R2.0-H1.0 | 1.0 | 4.91 | 7.12 | 321.60 | 2.083 | 1.281 | 62% | 1.145 | 89% |
| R1.0-H0.5 | 0.5 | 3.55 | 11.57 | 94.59 | 1.041 | 0.670 | 64% | 0.547 | 82% |
| R1.0-H1.0 | 1.0 | 4.97 | 16.4 | 141.91 | 2.083 | 1.312 | 63% | 1.164 | 89% |
| R0.5-H0.5 | 0.5 | 3.52 | 20.92 | 55.22 | 1.041 | 0.658 | 63% | 0.577 | 88% |
| R0.5-H1.0 | 1.0 | 4.97 | 30.11 | 79.56 | 2.083 | 1.312 | 63% | 1.198 | 91% |

しないケースでもゴム緩衝体が厚いケースと同じようなひび割れの生じ方をしており、側面のひび割れは、主に入力エネルギーの影響によるものであると推察する。また、局部損傷は、最大衝撃力の大きさによるものと推察し、緩衝材の有無が大きく影響している。

### 2.3　梁への作用の推定

本試験では、梁の一端を固定し、他端を所定の高さ$h$から自由落下させることにより、梁に衝撃力を加えている。このとき梁に作用する衝撃力は、落下前の位置エネルギー（ポテンシャルエネルギー：$PE$）に起因し、これは梁が鋼製土台等に衝突する直前までに運動エネルギー$KE$へと変換されるものである。なお、$PE$は、梁の 1/2 の質量が高さ$h$から自由落下する場合の位置エネルギーに相当すると仮定している。

梁への作用の起因となる初期エネルギーを$PE$と$KE$ の関係で評価する。表-2 には、本試験の測定値等とその値により推定した各エネルギーを示す。本試験結果においては落下高によらず$KE$は、概ね$PE$の 60%程度であった。また、ゴム緩衝体との衝突により、梁に伝達されるエネルギー（入力エネルギー$E_{in}$）は、ゴムのひずみエネルギー$U_e$によって低減されることが考えられる。$KE$に対する$U_e$の割合を表-2 に示す。この結果より、衝突直前の運動エネエルギーは、初期のポテンシャルエネルギーの 60%程度に低減された上、ゴム緩衝体がある場合は、その緩衝体のひずみエネルギーに 90%程度転換されている。

本仮定で算定したポテンシャルエネルギー$PE$と比べ、運動エネルギー$KE$は 60%程度と低いものの、$KE$は緩衝体のひずみエネルギー$U_e$と同程度であることが示された。

## 3. ゴム緩衝体の剛性と最大衝撃力の評価

段差防止工に配置するゴム緩衝体の設計では、桁への作用力と桁の耐力との比較により、必要な寸法や配置が定まるものと考えられる。作用力となる最大衝撃力は、ゴム緩衝体の剛性とゴム緩衝体が得るひずみエネルギーより求めることができると考えられる。

桁落下による作用力とゴム緩衝体の鉛直変位は、ゴムが非線形性を示さない範囲においてフックの法則に従いゴムの剛性$k$を係数とする線形関係であると仮定する。ゴム緩衝体の許容ひずみ$\varepsilon_{e_a}$とゴム厚$t_e$により算定される鉛直変位を許容変位$\delta_{e_a}$とすると式(1)に示すように、ゴム緩衝体の設計で許容される最大衝撃力$P_{max}$を算定できる。また、落下によるポテンシャルエネルギー$E_{in}$は段差防止工で分担する桁の質量$m$と重力加速度$g$、桁と接触箇所までの落下高$h$で表され、ゴム緩衝体の許容変位で吸収できるひずみエネルギー$U_e$として全て蓄積されたと仮定した際のエネルギーの関係を式(2)に示す。なお、自由落下により生じた作用力に起因するひずみエネルギー$U_e$は、変形量に対し線形に増加する作用力の積分値で示されると仮定した。

$$P_{max} = k\delta_{e_a} = k\varepsilon_{e_a}t_e \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

$$E_{in} = mgh \cong U_e = \delta_{e_a}P_{max}/2 \quad \cdots\cdots (2)$$

### 3.1　ゴム緩衝体の剛性

ゴム剛性$k$は、試験で記録した最大ひずみを基にゴム緩衝体の許容ひずみの設定範囲について 50%を上限とするとし、文献 1)、2)を参考に服部武井式が試験値に合致する補正係数 1.35 を求め、服部武井式に係数を乗じた式(3)を仮定した。

本試験の条件におけるゴム剛性$k$を式(3)より推定し、計測値の荷重変位関係より算定した剛性と比較するため図-6 を整理した。なお、$G_e$は使用したゴムの規格値 1.0(N/mm$^2$)とした。図より、剛性が高くなると誤差が大きいケースが確認できる。その差は、最大で 30%であった。該当するケースは、形状係数$S_1$が 2.0 で、ゴム緩衝体が薄い。それ以外のケースでは試験値と推定値はよく一致しており、本検討ではゴム剛性$k$は式(3)を基本として推定可能であると判断した。

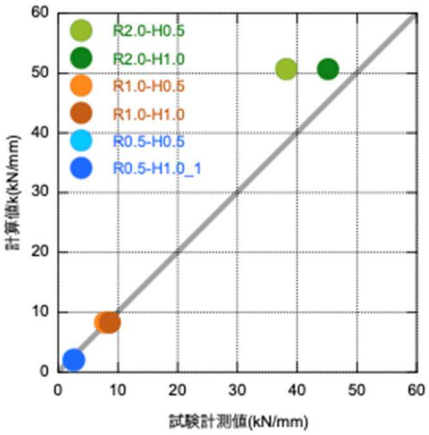



図-6　ゴム緩衝体剛性の推定式評価

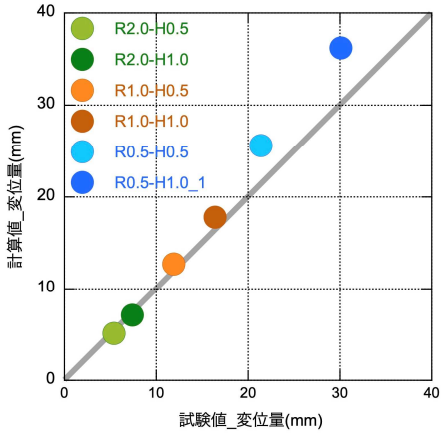



図-7　ゴム緩衝体変位量の推定式評価

表-7　ゴム緩衝体の変位量と最大衝撃力の検証

| ケース名 | ゴム緩衝体変位量$\delta_e$(mm) | | | 最大衝撃力$P_{max}$(kN) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 試験値 | 推定値 | 比 | 試験値 | 推定値 | 比 |
| R2.0-H0.5 | 5.4 | 5.1 | 0.94 | 205 | 258 | 1.26 |
| R2.0-H1.0 | 7.4 | 7.1 | 0.96 | 328 | 360 | 1.10 |
| R1.0-H0.5 | 11.9 | 12.7 | 1.07 | 95 | 105 | 1.11 |
| R1.0-H1.0 | 16.4 | 17.8 | 1.09 | 142 | 147 | 1.04 |
| R0.5-H0.5 | 21.4 | 25.6 | 1.19 | 55 | 51 | 0.93 |
| R0.5-H1.0 | 30.1 | 36.2 | 1.20 | 81 | 73 | 0.90 |

比=推定値/試験値

$$k = EA/t_e \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

$A$: 桁接触面積(ゴム緩衝体平面寸法)

$$E = 1.35\left(3 + \frac{2}{3}\pi^2 {S_1}^2\right)G_e$$

$E$: 平板ゴム部材の縦弾性係数

$S_1$: 1 次形状係数

$G_e$: 平板ゴム部材のせん断係数

### 3.2　最大衝撃力の評価

評価した剛性より緩衝体の変位量と最大衝撃力を式(1)、(2)を用いて推定し、試験値との比較を行った。

変位量と最大衝撃力の試験値および推定値を一覧表として表-7 に整理するとともに、試験値と推定値の関係を変位量については図-7 に、最大衝撃力については図-8 に示した。表-7 に示したように変位量は、形状係数$S_1 = 0.5$のケースで誤差が大きい。これに対して最大衝撃力では、形状係数$S_1 = 2.0$のケースで誤差が大きくなっているケースがある。しかしながらいずれにおいても概ね 10%程度の誤差となっており、図-7 や図-8 に示すように概ね線形の関係にあることから、ゴム緩衝体の設計においては、変位量、最大衝撃力の推定値を基にした諸元の算出が可能であると判断できる。なお、両推定値の試験値との誤差については、ゴム剛性の推定の際の誤差に起因する可能性も含め、別に試

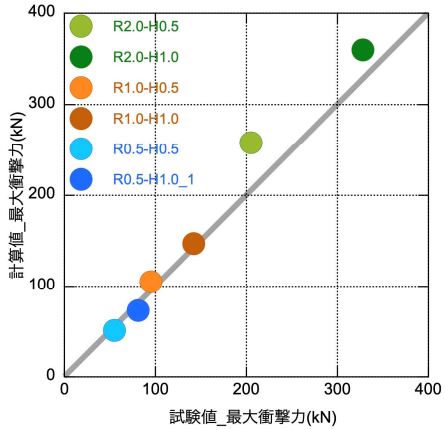



図-8　最大衝撃力の推定式評価

験、研究が進められ、算定精度の向上が図られて行くものと考えられる。

## 4. まとめ

本検討では、ゴム緩衝体に要求される性能の明確化を図り、段差防止工に配置されるゴム緩衝体の設計法について検討し、以下の結論を得た。

・ゴム緩衝体の剛性について、既往成果が適用可能である。

・ゴムの変位量と最大衝撃力の推定式を提案し、試験結果と比較した結果、追加検討の余地が残されているものの、推定値は試験値と概ね一致する。

これらにより、ゴム緩衝体の変位量、最大衝撃力の推定値を基にした設計が可能になるものと考えられる。

参考文献

1)　服部六郎, 武井健三；圧縮ゴム座のバネ常数に就て, 日本ゴム協会誌, 第 23 巻第 7 号, 1950.

2)　川島一彦, 庄司学；衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果, 土木学会論文集, No.612/I-46, PP.129-142, 1999.

# TECHNICAL STUDY ON THE LOAD-BEARINGS CAPACITY AND IMPACT RESISTANCE OF STEP-PREVENTION STRUCTRES WITH RUBBER BUFFERS

Research Period: FY2022-2024
Research Team: Structures Research Team,
Cold-Region Construction Engineering Research Group
Author: HATAKEYAMA Osamu
SATO Takashi
TERASAWA Takahiro

Abstract:
In order to restore the functionality of bridges as soon as possible after an earthquake, it is desirable to install buffers as a structure to reduce impact forces. However, the provisions on its performance are unclear, and in most cases, the rubber hardness and thickness shown in the “Reference Material (Draft) for Mutatis Mutandis Application of Specifications for Rehabilitation of Road Bridges Damaged by the Hyogo-ken Nanbu Earthquake” are used as the basis, so it is necessary to clarify its action and performance in order to ensure its fail-safe function. The study is based on the reference material (draft) regarding the rubber hardness and thickness. This study is conducted to clarify the required performance of the buffer and to propose a design method for the buffer in order to ensure the load bearing and impact resistance performance of step protection structures with rubber buffers.

Keywords: Protection structure, Impulsive force, Buffer, Rubber, Required performance