

論文 一端がピン支持され他端を基礎あるいは緩衝ゴム上に自由落下させる RC 梁の衝撃荷重実験

寺澤 貴裕^{*1}・小室 雅人^{*2}・岸 徳光^{*3}・余野 智哉^{*4}

要旨: 本研究では、段差防止構造上に橋桁が落下した場合を想定し、桁落下時における桁の耐衝撃挙動の基礎的なデータ収集を目的として、基本的な構造部材である矩形 RC 梁を対象に衝撃荷重実験を実施した。ここでは、一端をピン支持とし他端を自由落下させることで実験を実施した。また、梁落下地点への緩衝ゴム設置の有無による挙動の変化に着目し検討を行った。その結果、1) 緩衝ゴムの設置によって衝突部直上に発生するひび割れが抑制できること、2) 一方で、緩衝ゴム設置の有無によらず梁全体の応答性状は概ね同様であること、などが明らかになった。

キーワード: RC 梁, 緩衝ゴム, 衝撃荷重, 自由落下

1. はじめに

我が国は、世界有数の地震多発国であることより、しばしば地震災害が発生している。また、大規模な地震が発生した場合には、写真-1に示すように橋梁支承部が損傷したことによって、路面に大きな段差が生じる事例も確認されている¹⁾。路面に段差が生じた状況下においては、車両走行による人命に関わるような事故の発生や、緊急車両等の走行が困難な場合には避難や人命救護の遅れが危惧される。

このような被害が想定される橋梁の早期機能回復を目的とした対策工には、落橋防止装置や変位制限装置の他、段差防止構造がある。段差防止構造は、地震発生時に支承が破損し、橋桁がリバウンド状態に至って橋台に落下した場合においても、路面に生じる段差量を抑制させ、橋梁機能の早期回復を図り緊急車両の走行を可能にすること等を目的に、橋台に設置されている。一方で、段差防止構造の性能規定²⁾は未だ不明確であることから、橋桁落下時における段差防止構造や橋桁自体の応答性状を明らかにすることは肝要であるものの、段差防止構造の耐衝



写真-1 被災事例¹⁾

撃挙動や橋桁の落下損傷状況に関しては未だ十分に検討が行われていないのが現状である。

このような観点から、本研究では、段差防止構造上に橋桁が落下した場合を想定し、基本的な構造部材である矩形 RC 梁を対象に、梁落下時における耐衝撃挙動の基礎的なデータ収集を目的として、一端をピン支持とし他端を自由落下させる衝撃荷重実験を実施した。ここでは、段差防止構造を想定し、RC 梁落下地点に緩衝ゴムを設置した場合と、比較のために直接、鋼製基礎上に落下する場合の2ケースの実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状寸法および配筋

図-1には、試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体の形状寸法(幅×高さ×全長)は、200×250×3,400 mmである。また、軸方向鉄筋にはD19を用い上下端に各2本配置して、梁軸方向端面に設置した厚さ9 mmの定着鋼板に溶接固定している。さらに、せん断補強筋にはD10を用い、100 mm間隔で配筋した。

なお、実験を行う上での安全面を考慮し、RC 梁を設定落下高(=0.5 m)まで吊り上げた際の支点からの滑り落ちを防止することを目的に、RC 梁の支点部を中心に梁軸方向左右80 mmの位置にφ20の梁落下防止鋼棒用孔を設けている。

表-1には、本実験に用いた試験体一覧を示している。試験体は、RC 梁の衝突部に段差防止構造を模擬した緩衝ゴム設置の有無を変化させた全2体である。上述の通り、いずれのケースも、試験体の形状寸法は同一である。表中の試験体名において、Nは鋼製架台上に、Rは鋼製架

*1 土木研究所寒地土木研究所 寒地構造チーム 博(工) (正会員)

*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 教授 博(工) (正会員)

*3 室蘭工業大学 大学院工学研究科 もの創造系領域 土木工学ユニット 特任教授 工博 (正会員)

*4 一般社団法人ゴム支承協会 (非会員)

表-1 試験体および試験条件一覧

試験体名	緩衝ゴムの有無	設定落下高 H (m)	設定衝突速度 V (m/s)	実測衝突速度 V' (m/s)	コンクリート圧縮強度 f'_c (MPa)	主鉄筋降伏強度 f_y (MPa)	せん断筋降伏強度 f_{sy} (MPa)
N	無	0.5	3.13	3.56	26.2	386.7	377.2
R	有			3.52		372.3	

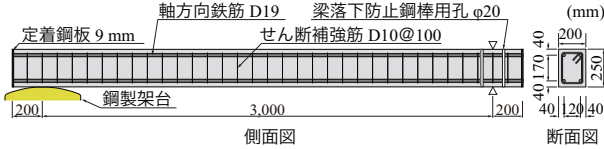


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

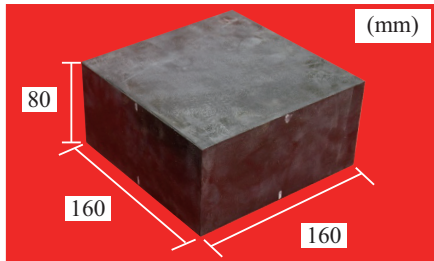
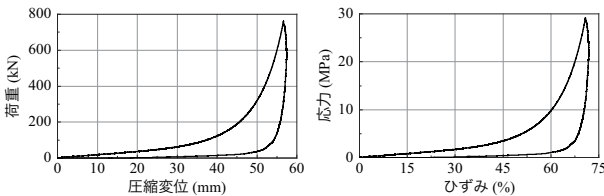


写真-2 緩衝ゴムの形状寸法



(a) 荷重-変位関係 (b) 応力-ひずみ関係

図-2 緩衝ゴムの材料試験結果

台に設置した緩衝ゴム上に、試験体の一端を自由落下させることを表している。表には、設定落下高 H 、設定衝突速度 V 、実測衝突速度 V' や、コンクリート及び鉄筋の材料強度も併せて示している。ここでは、いずれのケースも 0.5 m から自由落下させることとした。実測衝突速度 V' は、いずれの試験体においても、設定衝突速度よりも上回っている。なお、実測衝突速度 V' の計測方法については、2.2 で述べる。

写真-2 には、R 試験体で用いた緩衝ゴムとその形状寸法を示している。本実験では、一般的な段差防止構造用材料として採用されている硬度 55 のクロロプレングムを用いることとした。また、緩衝ゴムの形状寸法 (幅 × 長さ × 厚さ) は、160 × 160 × 80 mm とした。これより、受圧面積と自由面積の比で算出される形状係数は 0.5 となる。

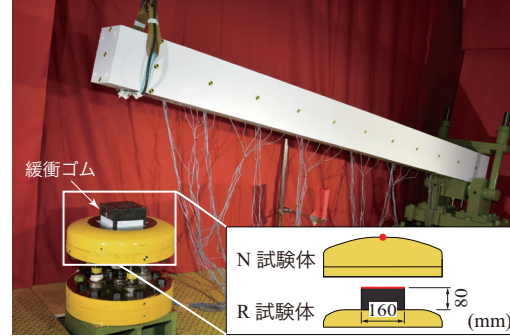


写真-3 衝撃荷重載荷実験状況および衝突部形状

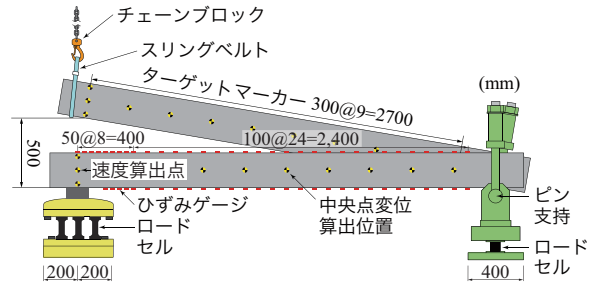


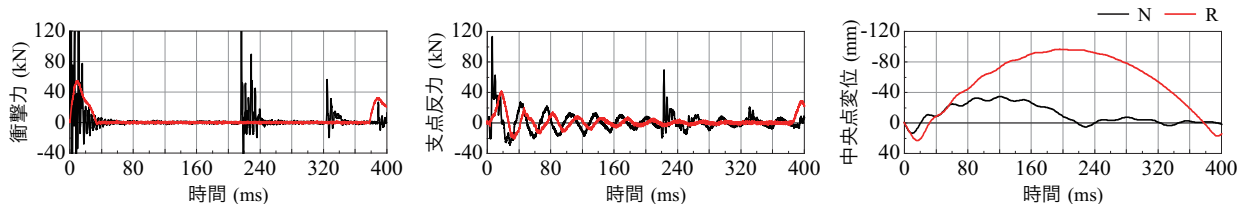
図-3 試験体の落下方法および計測位置

図-2 には、緩衝ゴム単体の力学的な材料特性を把握するために実施した静的圧縮試験結果から得られた荷重-変位曲線および応力-ひずみ曲線を示している。なお、本試験は写真-2 に示す緩衝ゴムを対象に、最大ひずみが 70 % 程度に至るまで載荷した。また、図-2 (b) に示す応力-ひずみ関係は、載荷前における緩衝ゴムの形状寸法を測定し、それらを基に簡易に換算したものである。

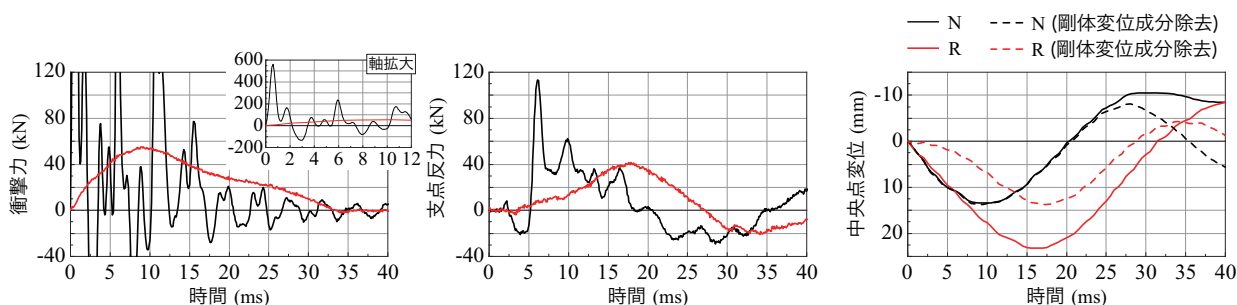
図より、図-2 (a) に着目すると、荷重は変位が 30 mm 程度まではほぼ線形に増加する傾向が確認できる。その後、荷重は二次関数的に急激に増加し、変位が 55 mm 程度で最大 750 kN 程度に達していることが分かる。また、図-2 (b) 図の応力-ひずみ関係を見ると、70 % 程度のひずみ発生時に、28 MPa 程度の応力が発生していることも読み取れる。なお、変形は除荷後 20 mm 以下まで戻っており、緩衝ゴムの復元性能が確認できる。

2.2 実験方法および測定項目

写真-3 には衝撃荷重載荷実験状況および衝突部の形状を、図-3 には試験体の自由落下時のイメージおよび計測位置の概要を示している。



(i) 0～400 ms までの各種時刻歴応答波形



(ii) 0～40 ms までの各種時刻歴応答波形

(a) 衝撃力

(b) 支点反力

(c) 中央点変位

図－4 各種時刻歴応答波形

実験は、以下の通り実施した。すなわち、1) 試験体端部にスリングベルトを設置し、2) 試験体は、ベルトを介してチェーンブロックを用いて手で試験体下面の衝突点から高さ 0.5 m まで吊り上げ、3) ベルトに挿入している電熱線に高圧電流を流して、4) ベルトを焼き切ることで試験体を自由落下させる、である。なお、N 試験体の場合には、鋼製架台の衝突部が球形かつ一点で衝突するような形状とした。一方、R 試験体の場合には、緩衝ゴムと試験体が面で衝突するように緩衝ゴム設置部の鋼製架台を平面状にしている。

本実験の測定項目は、試験体衝突位置における衝撃力（以後、単に衝撃力）、支点反力、試験体各点における変位（図－3 参照）、および試験体上下縁における軸方向ひずみである。なお、衝撃力と支点反力は、圧縮力を正とし、図－3 に示す位置に起歪柱型の衝撃荷重測定用ロードセルを設置して計測した。また、変位は、鉛直下向きを正とし、2,000 fps の高速度カメラ撮影画像から試験体側面に貼り付けたターゲットマーカを追跡することによって計測を行った。マーカーは梁高さ中央に 300 mm 間隔に 10 点配置し、加えて衝突位置付近には上下に 1 点ずつ配置した。軸方向ひずみは、図－3 に示す通り、試験体上下縁にゲージ長 10 mm の箔ひずみゲージを接着して測定を行っている。なお、ひずみゲージは、微細なひび割れにも追従できるように目付量を 280 g/m^2 とするアラミド繊維束 3 本を接着し、その上を接着することとした。

3. 衝撃荷重実験結果

3.1 各種時刻歴応答波形

図－4 には、全ケースにおける衝撃力、支点反力および中央点変位（図－3 参照）に関する時刻歴応答波形を示している。図中、横軸は試験体が鋼製架台の衝突部または緩衝ゴムに接触した時点を基準とし、(i) 図には 0～400 ms 間、(ii) 図には 0～40 ms 間についての応答波形を示している。なお、N, R 試験体に関する応答波形は、それぞれ黒線、赤線で示している。(ii) 図中の変位波形には、梁の両端部を結んで得られる基準線を零とし剛体変位成分を除去した場合の結果も併せて示している。

まず、図－4 (a) の衝撃力波形に着目すると、N 試験体の場合には、荷重直後に継続時間が 1 ms 程度で最大衝撃力を示す三角形の波形を示し、後続して高周波成分を伴う複数の波が励起していることが分かる。一方、R 試験体の場合には、継続時間が 35 ms 程度で最大衝撃力を伴う第一波が励起している様子が見取れる。また、図中の範囲内では、N 試験体の場合には衝撃力が 3 回（約 220, 320, 390 ms 時点）、R 試験体の場合には 1 回（約 380 ms 時点）励起しており、N 試験体の場合には複数回リバウンドし、かつ高周波成分も励起していることが確認できる。しかしながら、R 試験体の場合には高周波成分の励起が確認できないことから、衝撃力の高周波成分は緩衝ゴムを設置することによって効率良く除去可能であることが分かる。これは、橋桁の橋台への落下による局所的な損傷を抑制できる可能性があることを示唆している。両試験体の最大衝撃力は、N, R 試験体の場合でそれぞれ

562, 55 kN であり、緩衝ゴムを設置することによって 1/10 程度まで抑制されていることが分かる。

次に、図-4 (b) の支点反力波形に着目すると、いずれの試験体においても 1 波目の衝撃力除荷後に減衰自由振動状態を呈していることが分かる。その周期は約 40 ms である。この減衰自由振動は、後述する中央点変位波形からも明らかなように、リバウンド後の梁の振動と対応して発生したものと推察される。R 試験体の場合には、振動は 2 載荷目に至る前にほぼ零振幅状態まで減衰していることが分かる。これは、1 波目の衝撃力波の振幅が、緩衝ゴムの設置によって前述のように大きく低減したことによるものと推察される。また、載荷初期にはいずれの試験体も負反力を示している。これは、衝突後試験体に上向きのリバウンド力が作用したことを表している。この傾向は、後述のひずみ分布からも確認できる。なお、載荷初期に発生する最大負反力は N, R 試験体でそれぞれ 21, 2 kN 程度であり、緩衝ゴムを設置することによって前述の最大衝撃力と同程度に抑制されていることも見て取れる。最大支点反力は、N, R 試験体でそれぞれ 113, 41 kN である。

以上のことから、支点反力波形は、緩衝ゴムを設置することによって衝撃力波形と対応する形で減少傾向にあり、高周波成分が除去された性状を呈することが明らかになった。また、再載荷時においても、支点反力波形は、前述の通り衝撃力波形に対応して励起することも明らかになった。

図-4 (c) の中央点変位波形に着目すると、両試験体共に衝突後最大変位を示し、リバウンド状態に至っていることが分かる。そのリバウンド量は、緩衝ゴムを設置した R 試験体の場合が N 試験体の場合よりも大きい。最大変位に着目すると、N, R 試験体においてそれぞれ約 13, 23 mm であり、R 試験体の場合が大きく示されている。これは、緩衝ゴム自体の変形分も含まれているためである。ここで、図中点線で示した梁の剛体変位成分を除去した場合に着目すると、N 試験体の場合には剛体成分除去前後において、その波形性状に大きな差異がないことが分かる。しかしながら、R 試験体の場合には、その最大変位は剛体変位成分を除去することによって 13 mm 程度と評価され、N 試験体の最大変位と同程度であることが分かる。

3.2 落下時における梁の応答性状に関する経時変化

図-5 には、本実験で得られた両試験体の上下縁における軸方向ひずみ分布および剛体変位成分を除去した梁側面の変位分布の時間的な推移状況を、 $t = 0.5 \sim 50$ ms において比較して示している。なお、上下縁ひずみはそれぞれ青線、赤線で示している。また、変位分布に関しては、N, R 試験体の結果をそれぞれ黒線、赤線で示している。

$t = 0.5$ ms 時点に着目すると、N 試験体の衝突部近傍の

梁上縁には引張ひずみが生じており、負曲げの状態にあることがうかがえる。一方、R 試験体の場合には、ひずみおよび変位はスパン全長においてほぼ零の値を示している。

$t = 1$ ms 時点では、N 試験体の梁上下縁にはひずみが励起しており、衝突位置近傍において下縁には引張、上縁には圧縮ひずみが生じており、変位の値は小さいものの正曲げの性状が見て取れる。

$t = 1.5 \sim 2$ ms 時点では、N 試験体の場合には、梁上下縁のひずみおよび変位は増加傾向を示し、支点に向かって曲げ波が伝搬していく様子が確認できる。また、梁下縁部のひずみ分布には部分的に乱れが生じている。これは、梁下縁において、ひび割れが発生したことによるものと推察される。そのひずみ値を見ると、鉄筋の降伏ひずみ 1500μ を超過していることから、主鉄筋が部分的に降伏に至っている可能性が示唆される。なお、R 試験体の変形は未だ確認できない。

$t = 5$ ms 時点では、N 試験体の場合には、梁の変形がさらに進行しひずみが支点に向かって伝播している。一方、R 試験体の場合には、この時点で初めてひずみが励起し鉛直変位が生じていることが分かる。 $t = 7.5 \sim 10$ ms 時点では、N 試験体の場合には、ひずみが支点部近傍まで進展していることが確認できる。R 試験体の場合においても N 試験体と同様の傾向が見られ、下縁のひずみ分布には部分的に乱れが生じていることが分かる。

$t = 12.5$ ms 時点では、N 試験体の場合には、ひずみ分布性状に大きな変化は見られないものの、変位分布から復元の様相を呈していることが分かる。一方で、R 試験体の場合には、特に梁下縁部において未だひずみが増加傾向にあり、それに対応して変位も増大している。 $t = 15 \sim 17.5$ ms 時点においても、両試験体共に同様の現象が進行し、R 試験体の場合にはひずみが支点近傍まで推移していることが確認できる。また、 $t = 17.5$ ms 時点において、R 試験体の場合には最大ひずみに達しており、その後 N 試験体の場合と同様に変位が復元する傾向を示している。

$t = 20 \sim 25$ ms 時点では、N 試験体の場合には、ひずみ及び変位は零近傍の値を示した後、上下縁のひずみ値が負曲げの状態になっていることや、変位分布から梁が上反りの傾向を示していることが分かる。また、R 試験体の場合には、変位が進行し未だ正曲げの状態にある。 $t = 30$ ms 時点では、N 試験体の場合には、梁が上反りになっておりかつ衝突部近傍下縁ひずみが引張ひずみを示している。これは、ひび割れの発生に伴って残留ひずみが発生したことによるものと推察される。また、R 試験体の場合にも N 試験体と同様に上反りの傾向を示していることが分かる。

$t = 40 \sim 50$ ms 時点では、図-4 からも明らかなように、いずれの試験体も除荷状態にあるものの、N 試験体は復

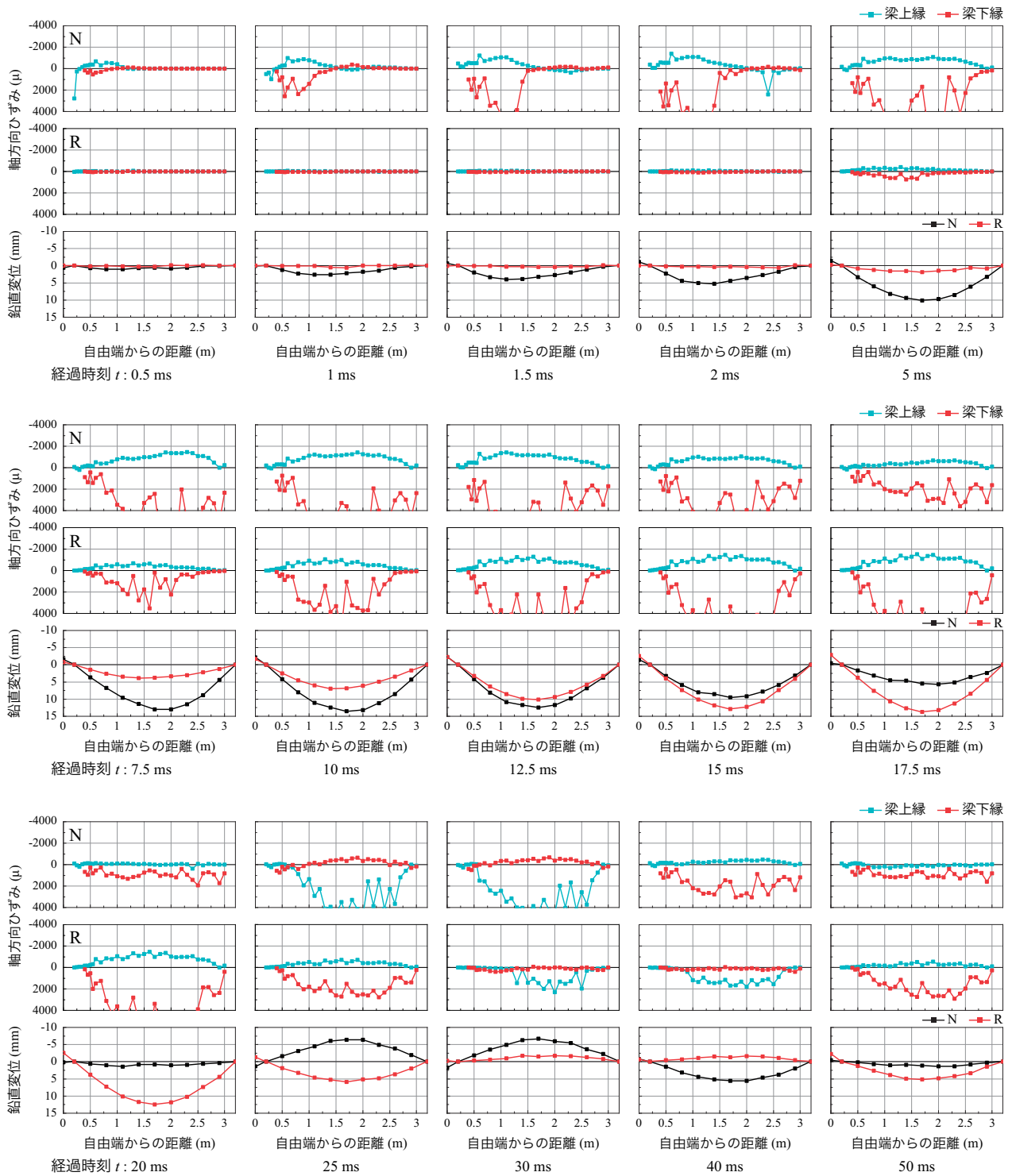


図-5 軸方向ひずみ分布および剛体成分を除去した変位分布の時間的な推移状況

元力によって再度正曲げの様相を呈していることが分かる。一方、R 試験体の場合には、上反りの変位が最大値に達し、正曲げ状態に移行する状況が確認できる。

3.3 最大変位時における軸方向ひずみおよび梁側面の変位分布

図-6には、N、R 試験体の最大変位到達時 (N 試験体：10 ms 時、R 試験体：17.5 ms 時) における、梁上下縁ひず

み分布および梁側面の変位分布を比較して示している。なお、N、R 試験体の結果はそれぞれ黒線、赤線で示している。

梁上縁部のひずみ分布に着目すると、両試験体共にスパン中央近傍において 1500 μ 程度の圧縮ひずみが確認でき、支点に向かって徐々に零ひずみに向かって減少していることが分かる。梁下縁部のひずみ分布は、スパン中

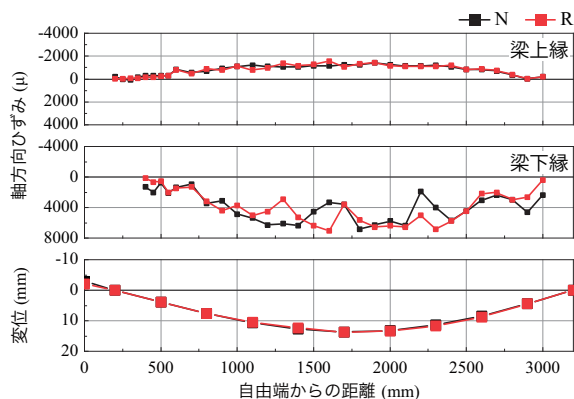


図-6 最大変位時における梁の軸方向ひずみおよび梁側面の変位分布

央近傍において最大引張ひずみが7000 μ 程度の値を示しており、上縁と同様に支点部に近づくにつれて零に漸近していることから、正曲げの状況が確認できる。また、上縁のひずみ分布とは異なり、両試験体間において部分的に若干の差異が確認できる。これは、両試験体のひび割れ発生位置が必ずしも等しくないためと推察される。

変位分布に着目すると、両試験体共にスパン中央部で最大13mm程度の値を示し、衝突部および支点部では変位が零となっていることが確認できる。

以上より、荷重初期における衝突部近傍のひずみ分布性状や変位、軸方向ひずみの立ち上がり時間を除き、最大ひずみ及び梁側面の最大変位を含むその挙動性状は、緩衝ゴムの設置の有無によって大きな差異のないことが明らかとなった。

3.4 ひび割れ分布

図-7には、各試験体側面における実験終了後のひび割れ分布を比較する形で示している。なお、N, R試験体の結果はそれぞれ黒線、赤線で表している。

まず、衝突部近傍に着目すると、N試験体の場合には、梁上縁から衝突点に向かって負曲げの作用による曲げひび割れが発生するとともに、斜めひび割れが発生していることが分かる。一方で、R試験体の場合には、ひび割れは全く生じていない。

また、支点部近傍に着目すると、N試験体の場合には斜めひび割れに加えて上縁からの曲げひび割れが確認できる。しかしながら、R試験体の場合にはそれらのひび割れは生じていない。これは、R試験体の場合には荷重点部に緩衝ゴムが設置されていることによって、図-5と対応して、N試験体の場合に生じる荷重初期の最大衝撃力を示す継続時間の短い1波が著しく緩和されたためと推察される。すなわち、衝突部や支点近傍における局所的な損傷は、梁端落下部に緩衝ゴムの設置することによって著しく軽減されることが分かる。

次に、スパン中央周辺におけるひび割れ分布に着目す

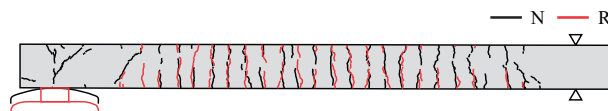


図-7 実験終了後における梁側面のひび割れ分布状況

ると、ひび割れは両試験体ともに上下縁から等間隔に発生していることが確認できる。これは、いずれの試験体においても衝突後リバウンドによって跳ね返り、複数回の正曲げと負曲げ状態に至ったことによるものと推察される。なお、ひび割れ発生位置がせん断補強筋の配置位置とほぼ対応していることから、衝突部や支点近傍とは異なり、両試験体のスパン中央部は同程度の損傷状態にあるものと推察される。これは、前述の通り、梁の全体的な変形挙動は緩衝ゴム設置の有無によって大きく変わらないことを示唆している。

4. まとめ

本研究では、地震発生時に橋桁が段差防止構造上に落下した場合を想定し、基本的な構造部材である矩形RC梁を対象に、梁落下時における耐衝撃挙動の基礎的なデータ収集を目的として、一端をピン支持とし他端を自由落下させる衝撃荷重載荷実験を実施した。ここでは、RC梁落下地点に緩衝ゴムの設置する場合と、直接鋼製基礎に落下する場合の2ケースの実験を実施した。本研究より得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 最大重錘衝撃力および衝突初期の負反力は、緩衝ゴムの設置することによって直接衝突と比較して1/10程度に抑制される。また、各最大応答値に到達するまでの経過時間も遅くなる。
- 2) RC梁の軸方向ひずみ分布に関しては、衝突初期には衝突位置近傍において梁上縁に引張ひずみ、梁下縁に圧縮ひずみが発生する。その傾向は、緩衝ゴムの設置せずに直接衝突した場合に顕著である。
- 3) 衝突部直上および支点近傍部に発生するひび割れは、緩衝ゴムの設置することによって抑制可能である。
- 4) 一方で、緩衝ゴム設置のRC梁に生じる最大ひずみや最大変位等の全体挙動への影響は、小さい。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所，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，国総研資料第967号，土研資料第4359号，2017。
- 2) （公社）日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，2017。