

(19) アラミドテープで補強した RC 橋脚模型の横方向衝撃載荷実験

LATERAL IMPACT TESTS ON RC COLUMNS WRAPPED WITH ARAMID TAPES

三上 浩^{*}, 佐藤昌志^{**}, 岸 徳光^{***}, 松岡健一^{****}

Hiroshi MIKAMI, Masashi SATO, Norimitsu KISHI and Ken-ichi MATSUOKA

^{*} 工博 三井建設(株)技術研究所 主任研究員 (〒270-01 千葉県流山市駒木 518-1)^{**} 北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062 札幌市豊平区平岸1-3)^{***} 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科(〒050 北海道室蘭市水元町 27-1)^{****} 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科(〒050 北海道室蘭市水元町 27-1)

キーワード: RC 橋脚、水平衝撃荷重、補修、アラミドテープ

(RC pier, lateral impact load, repair, Aramid tape)

1. はじめに

平成7年1月の阪神・淡路大地震により、多くの貴重な人命および社会基盤施設が失われた。地震後短期間で多くの建造物の復旧がなされたものの未だ完全に復旧されていない施設建造物も多い。社会基盤施設の復旧を代表するコンクリート製の橋脚の補強は、現在までのところ鉄板巻き立て工法、コンクリート巻き立て工法などの工法が多く採用されている。しかしながら、これらの補強工法は、①橋脚の剛性が大きくなり、基部の負担が大きくなり河川橋脚の場合は復旧が困難となる、②施工が複雑であり、工期が長くコストも比較的高い、③維持管理が比較的难度い、などの欠点も指摘されている。

このような観点より、著者らは軽量、高強度かつ耐久性に優れている連続繊維製のテープ (FRP テープ) を巻き付けて補強する工法を提案し、その補強効果を実験的に検討した。本実験では特に FRP テープとして、高弾性伸び率を有し、かつしなやかで施工性に優れたアラミド繊維製のテープを巻き付け材料として用い検討を行うこととした。また、今回の地震波が衝撃的な波形性状を示したことから、衝撃的荷重作用下での破壊性状を検討することを目的とし、段落しを有し、上部工の自重を想定して鉛塊を設置した橋脚模型の鉛塊の中心部に水平衝撃荷重を載荷した。なお FRP テープの巻き付けは、ひびわれ調査などの維持管理を容易にするため、橋脚全面巻きとせず適切な間隔に巻き付けることとした。また、破壊性状が橋脚の断面寸法比にも影響されると考えられることより、3種類の断面寸法比を設定し検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 試験体

試験体は表-1 に示す7体である。特に1:1試験体では、炭素繊維製のテープを用いた場合についても実験を行い、アラミド繊維製テープを用いた場合との比較検討も行っている。試験体の寸法は載荷方向に対する全断面有効時のコンクリートの断面2次モーメントがほぼ等しくなるように決定した。無補強の試験体は、断面分割法による計算結果から静的荷重に対して段落し部の曲げ破壊が先行することが明らかになっている。表中に断面分割法で求めた静的曲げ耐力を示している。なお、断面分割法は実測のコンクリートの圧縮強度と鉄筋の規格値を基に、解が安定し

て得られる分割数以上として 5 mm 厚の 60 分割以上で行なっている。また、() 中には参考のために段落し部のせん断耐力も示している。せん断耐力は側方筋を無視してコンクリート標準示方書にならって算定した。表中の载荷速度は重錘が橋脚模型に衝突する直前の速度であり、本実験では表に示すように繰り返し载荷を行っている。

表-1 試験体一覧

試験体の名称	補強材の種類	断面形状	断面寸法 (mm)	断面 2 次モーメント (cm ⁴)	鉄筋比 (%)	静的曲げ耐力 (tf)	载荷速度 (m/sec)
N-1:1	無補強	1:1	400 × 400	213,333	1.90	8.0 (16.2)	1,2,3
A-1:1	アラミド						1,2,3
C-1:1	炭素						1,2,3
N-1:2	無補強	1:2	330 × 660	197,654	1.86	8.1 (16.9)	1,2,3
A-1:2	アラミド						1,2,3,3.5
N-2:1	無補強	2:1	480 × 240	221,184	1.98	8.9 (17.2)	1,2,3,4
A-2:1	アラミド						1,2,3,4

図-1 に試験体の形状寸法および配筋の例を示す。図-2 は FRP テープの巻き付け位置を示す。アラミド繊維は 2 層、炭素繊維は 4 層巻き付けとし、体積補強割合をほぼ同様とした。巻き付けは、ともに幅 37.5 mm のテープを中心間隔 75 mm で行った。FRP テープの巻き付けは、コンクリート表面をケレン仕上げした後にプライマーを塗付し、テープを巻き付けた後にエポキシ樹脂を含浸硬化させて成形している。試験体はいずれも橋脚高さの 1/3 の位置 (h = 50 cm) で段落しを行っている。なお、用いた鉄筋は全て SD295A である。試験体のコーナー部には長辺が 20 mm の二等辺三角形形状のスペーサを配置してコンクリートを打設することにより面取りを行っている。なお、アラミド繊維及び炭素繊維性テープを用いた補強を、以後それぞれ単にアラミド、炭素補強と呼ぶこととする。

2.2 材料の特性

FRP テープの材料特性 (カタログ値) を表-2 に示す。アラミドテープ 2 層の E × A (弾性係数 × 断面積) 及び引張耐力は炭素テープ 4 層の約半分である。なお、用いたコンクリートは設計基準強度が 240 kgf/cm² で、実験時の材令 (24 ~ 35 日) における圧縮強度は 265 ~ 267 kgf/cm² であった。

2.3 実験方法

図-3 に実験方法の概要を示す。橋脚模型の頭部

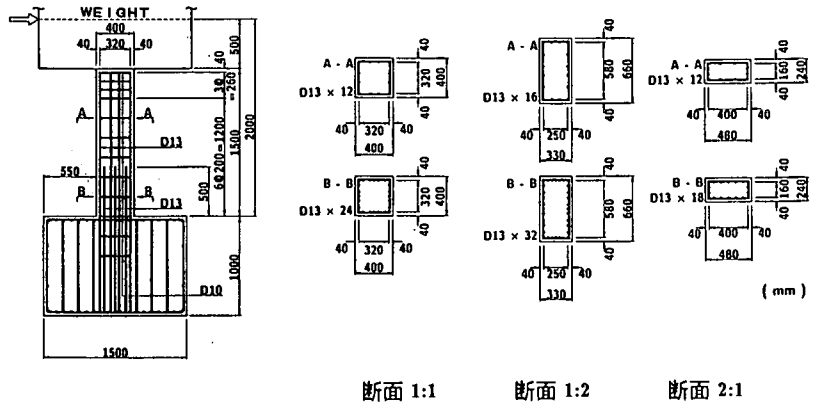


図-1 試験体の形状寸法および配筋

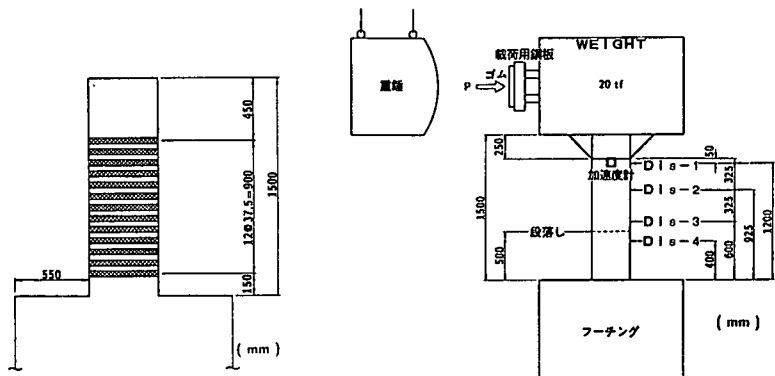


図-2 FRP テープの巻き付け位置

図-3 実験方法の概要

には上部工の死荷重を模擬して鉛塊（重量 20 tf）を設置した。また、橋脚頭部は衝撃荷重載荷時に鉛塊

表-2 材料特性

補強材 (37.5 mm 幅)	弾性係数 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	1 層の厚さ (mm)	巻き付け層数	E×A (tf)	引張耐力 (tf)
炭素テープ	23,500	50,000	0.165	4 層	581.6	12.4
アラミドテープ	11,100	29,000	0.306	2 層	254.7	6.7

のロッキング振動等により破損しないように十分な補強を行っている。衝撃荷重は重量が 5 tf の重錘を所定の高さにセットした後、振り子式で鉛塊の重心位置に載荷した。なお、載荷用鋼板の前面には積層の板ゴムを設置し、橋脚頭部の変位応答周波数が 1 ~ 2 Hz 程度（周期：0.5 ~ 1 sec）になるようにゴムの積層厚、硬さを調整した。本実験での測定項目は、橋脚頭部に取り付けた容量 5 G の加速度計による加速度応答と非接触式変位計（レーザー式変位計：容量 80 mm）で測定した橋脚模型の変位応答である。また、実験終了時にはひびわれをスケッチし破壊性状を検討した。

3. 実験結果

3.1 衝撃荷重と変位の関係

図-4 に、橋脚の天端に取り付けた加速度計の応答波形と最上段の変位計の応答変位波形の一例を示す。試験体の寸法比は 1 : 1 で、無補強とアラミド補強を行った試験体の $V = 2$ m/sec 載荷における波形を示した。なお、加速度波形には衝撃載荷直後に高周波成分が含まれていることより、50 個のサンプリングデータ（50 msec に相当）を用いた移動平均法によって波形の平滑化を行った。

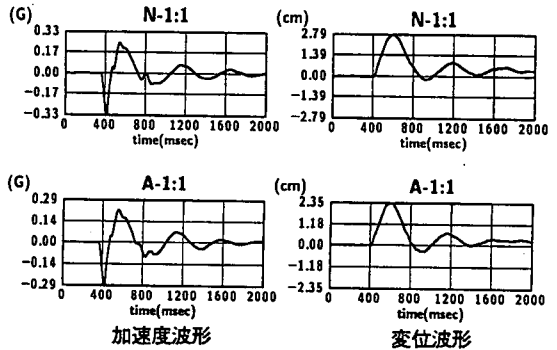


図-4 加速度応答と変位応答の一例

両波形の比較により加速度波形と変位応答波形の応答周期が 0.8 sec 程度と両者良く対応していることが分かる。図-5 には、柱に直接作用する衝撃荷重（鉛塊の最大加速度と鉛塊の質量の積として評価）と最大応答変位との関係を図示した。

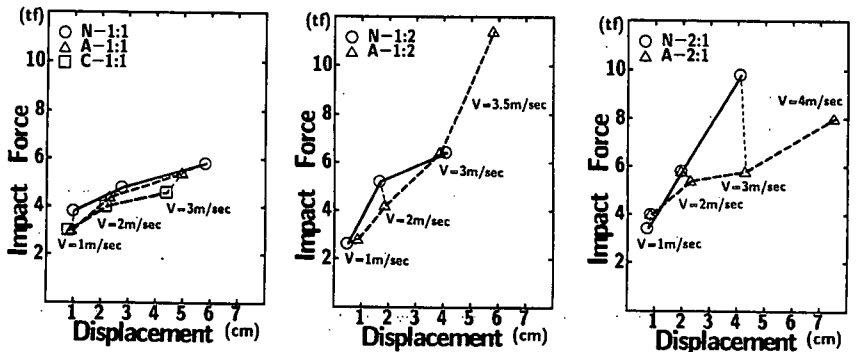


図-5 衝撃荷重と最大応答変位の関係

1 : 1 試験体は、補強の有無や補強材の種類によらずほぼ同様な衝撃荷重-変位関係を示している。載荷速度に対する衝撃荷重の増加割合は他の寸法比の場合に比較して小さい。1 : 2 試験体では、 $V = 3$ m/sec における衝撃荷重が補強の有無によらず 1 : 1 試験体よりも大きいのに、最大応答変位量は小さく示されている。特に、アラミド補強の場合の $V = 3.5$ m/sec 載荷では $V = 3$ m/sec 載荷の 2 倍程度の大きな衝撃荷重を示している。

一方、2 : 1 試験体の $V = 3$ m/sec において、無補強の衝撃荷重はアラミド補強の 2 倍程度に大きく励起されている。これは、2 : 1 試験体では無補強の試験体が段落し部分のせん断破壊を示したのに対して、アラミド補強では基

部の曲げ破壊を示したことに関連するものと考えられる。すなわち、衝撃荷重が大きく増加する一方で応答変位量が増加しにくい場合は、せん断のひびわれが荷重-変位関係に顕著な影響を与えているものと考えられる。

3.2 応答変位及び残留変位分布

図-6(a)に1:1試験体の各載荷速度における応答変位分布(最上段変位計が最大値を示した時間における分布)ならびに $V = 3 \text{ m/sec}$ 載荷後の残留変位分布を示す。図より段落し部の上側の測点を除き、一般的に無補強、アラミド補強、炭素補強の順に応答変位量は小さくなっている。一方、段落し部の上側の測点では、無補強の次に炭素補強が大きく、アラミド補強が最も小さい応答変位及び残留変位を示している。残留変位分布に注目すると、無補強および炭素補強の試験体では段落し部分に明瞭にせん断変形が残留していることが分かる。一方、アラミド補強した試験体では段落し部で変形の曲率が大きく変化しているが、これらの主たる変形は曲げ変形である。巻き付け材の剛性($E \times A$)や引張耐力を考慮すると、炭素繊維で補強する場合は応答変位や残留変位を小さくすることができるものと予想される。しかしながら、段落し部分の補強の観点からは、せん断変形を抑制して曲げ変形モードに改善させているアラミドテープによる補強の方がより有効であるものと考えられる。

図-6(b)に1:2試験体の応答変位分布および残留変位分布を示す。 $V = 1 \text{ m/sec}$ 載荷では、アラミド補強の方が全測点で無補強の場合よりも若干大きな応答変位を示している。 $V = 2 \text{ m/sec}$ では段落し部分周辺の変位はアラミド補強の方が小さく、それより上側では無補強の変位が小さい。 $V = 3 \text{ m/sec}$ では、全測点でアラミド補強の方が応答変位及び残留変位が小さい。残留変位分布を比較すると、無補強の試験体のせん断変形の残留が顕著である

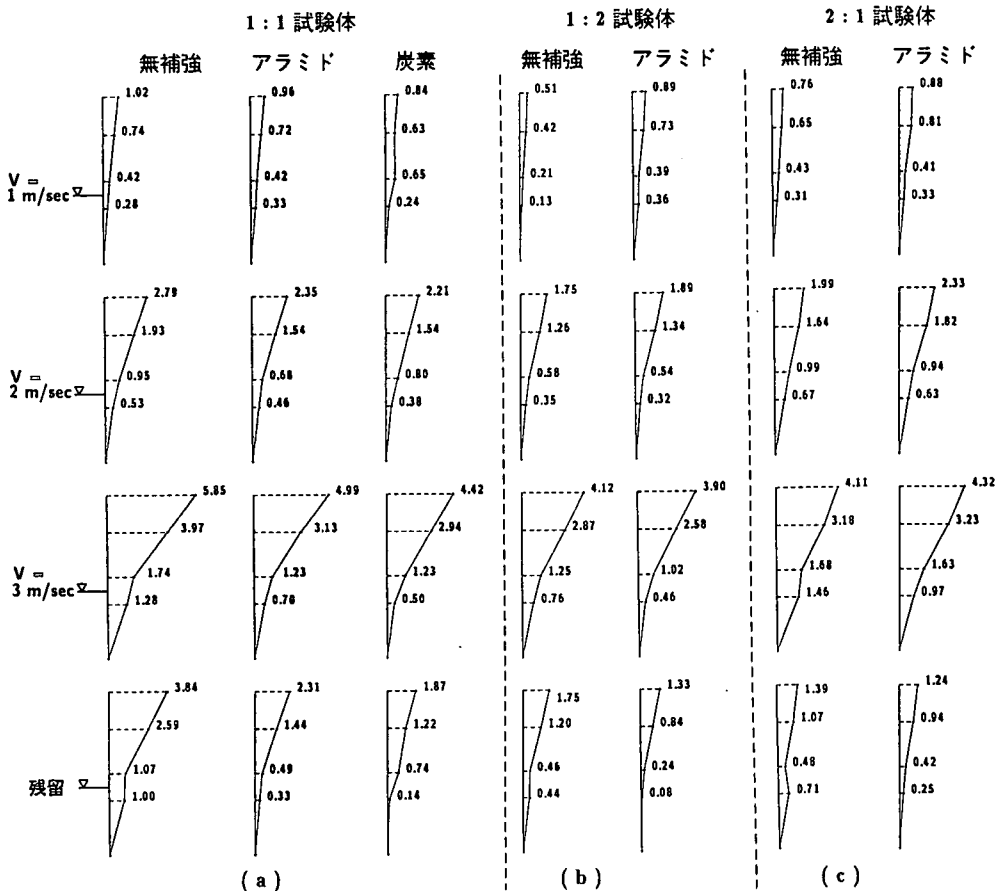


図-6 応答変位及び残留変位分布

ことが分かる。一方、アラミド補強では 1:1 試験体と同様に段落し部で曲げの曲率に変化するものの、せん断変形の残留はみられない。

図-6(c) に 2:1 試験体の応答変位分布及び残留変位分布を示す。V = 1 ~ 2 m/sec 載荷までは両者の変位応答に顕著な差はないが、V = 3 m/sec では無補強の試験体の段落し周辺でせん断変形の発生が顕著に認められる。一方、アラミド補強した場合は、段落とし部分の応答変位及び残留変位を抑制し、曲げ卓越型の変形モードを示している。このように、アラミド補強は断面寸法比に関わらず段落し部のせん断変形を顕著に抑制していることが分かる。

3.3 ひびわれ性状

図-7 に載荷面を基準に時計回りに A、B、C、D 面として各試験体のひびわれ性状を示している。図-7(a) は 1:1 試験体に関する結果である。無補強の試験体では A 面の段落し部とその上方の試験体幅と同程度の領域に曲げのひびわれが水平に発生し、B、D 面ではそのひびわれが断面の中心から斜め下方に大きく進展して圧縮側のコンクリートが大きな範囲で剥落している。いわゆる、曲げ・せん断型の破壊性状を示している。一方、アラミド補強では段落し部とその上側に水平方向の曲げによるひびわれが発生し、D 面では段落しより上側部分で一部せん断ひびわれが発生しているがさほど顕著には進展していない。炭素補強の試験体もアラミド補強の試験体と同様なひびわれ性状を示し、水平方向の曲げによるひびわれが数本発生している。D 面では段落し部より上側で数本の斜めひびわれが発生しており、これもアラミド補強の場合と同様である。

図-7(b) に 1:2 試験体のひびわれ性状を示す。無補強の最終載荷速度が V = 3 m/sec であるのに対して、アラミド補強では V = 3.5 m/sec のため、アラミド補強の方が大きく変形している。しかしながら、無補強の B、D 面で顕著に発生している斜めひびわれは、アラミド補強の場合には最終載荷速度が大きいにも関わらず顕著ではない。これより、アラミドテープ巻き付けによるせん断補強効果が大きいことが分かる。

図-7(c) に 2:1 試験体のひびわれ性状を示す。無補強では、A 面の段落し部及びその上下試験体幅と同程度の領域に水平方向の曲げひびわれが多数発生し、B、D 面ではそのひびわれが柱の中心から斜め下方に大きく進展してい

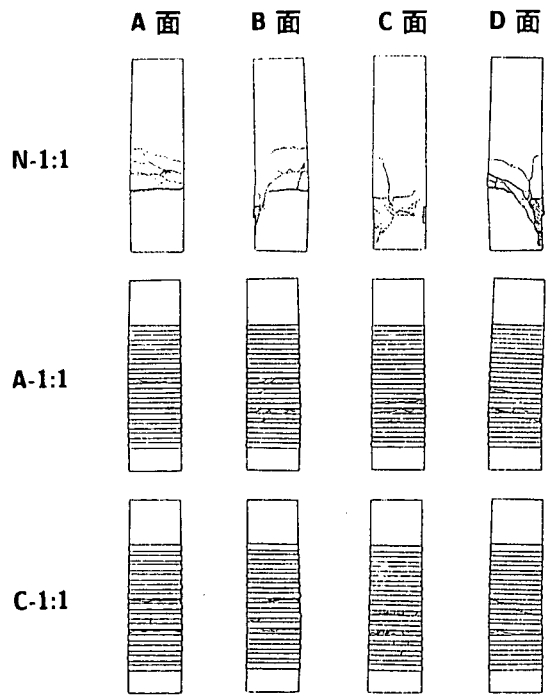


図-7(a) ひびわれ性状 (1:1)

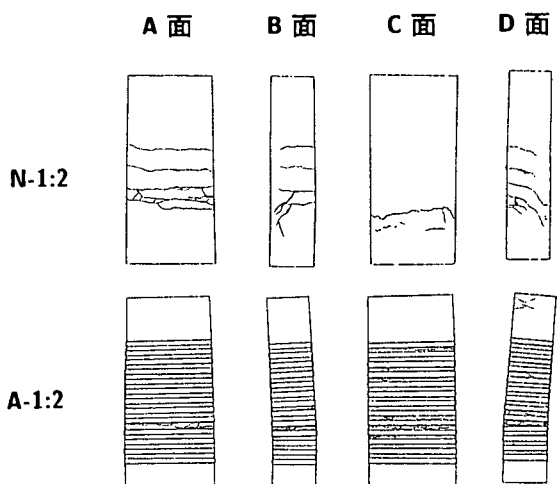


図-7(b) ひびわれ性状 (1:2)

る。さらに、段落し部より上方試験体幅程度の位置から圧縮側に向けて斜めひびわれが直線的に発生している。圧縮側のコンクリートは段落し部分で大きく剥落し、一部で軸方向鉄筋が露出している。ただし、基部の圧縮側には健全な部分も見られる。一方、アラミド補強の場合には、段落し部分で水平方向に進展する曲げのひびわれが発生し、B、D面では斜め方向に進展するひびわれも数本見られる。柱基部との付け根部分の圧縮側ではコンクリートが大きく剥落している。すなわち、基部の曲げ圧縮破壊型の性状を示している。これは、段落し部分のせん断破壊がアラミドテープの巻き付けによって抑制されているのに対し基部が曲げに対して補強されていないためと考えられる。

無補強の試験体は、静的荷重載荷時には曲げで破壊すると予想されるが、水平衝撃荷重載荷では曲げ・せん断型の破壊性状を示している。このことから、衝撃的な荷重が橋脚に作用する場合には、静的に荷重が作用する場合よりもせん断ひびわれの発生やせん断破壊を防止するための配慮を十分に行う必要があると考えられる。

4. まとめ

段落しを有する断面寸法比の異なる RC 橋脚模型にアラミドテープを巻き付け、水平衝撃載荷実験を行って動的な破壊性状を検討した。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 橋脚上部の加速度から推定した衝撃荷重と応答変位の波形の周期は良く対応する。
- (2) 衝撃荷重と変位の関係には断面寸法比や補強の有無が影響し、これは破壊性状と密接に関連している。
- (3) 橋脚模型の応答変位および残留変位分布から、アラミド補強の場合は炭素補強や無補強に比べて段落し部のせん断変形量が少なく、曲げ変形モードに改善する効果大きい。
- (4) 断面寸法比に関わらずアラミド補強によって段落し部のせん断ひびわれの進展が抑制される。
- (5) 静的荷重載荷に対して曲げ破壊する橋脚でも、衝撃的な荷重載荷状態では曲げ・せん断破壊する可能性がある。

最後に本研究を行うに当たって御支援を頂いたショーボンド建設(株)の皆様に感謝致します。

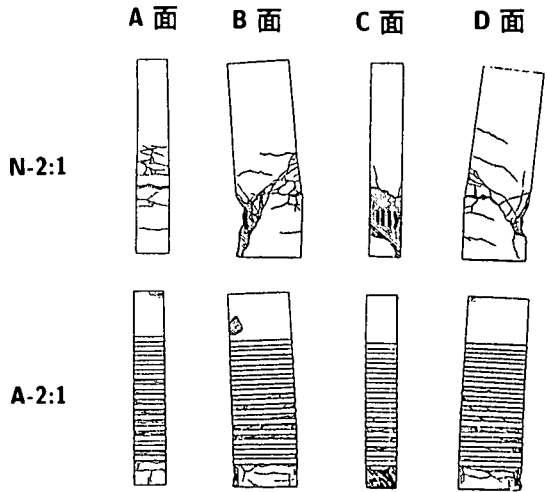


図-7(c) ひびわれ性状(2:1)