論文　高強度領域を配置した中層はりを有する RC2 層ラーメン高架橋の耐荷特性に関する基礎的検討

小林　薫[*1]・山下　洋平[*2]・佐々木　尚美[*3]

要旨：本研究は，高強度領域を配置した中層はりを有する RC2 層ラーメン高架橋の構造全体系の耐荷特性に着目し，解析的な検討を行ったものである。既存の新幹線用 RC2 層ラーメン高架橋を基本構造とし，高強度領域を配置した中層はりを有する場合，基本構造から中層はりをなしにした場合の 3 ケースについて，非線形 3 次元 FEM 解析モデルを設定した。高強度領域を配置した中層はりを有することで，構造全体系の耐荷特性は，基本構造に対して，線路方向で 3%程度，線路直角方向で 13%程度の向上が確認された。高強度領域を配置した中層はりにより，基本構造に比べて構造全体系の耐荷性能の低下を抑制することが確認された。

キーワード：RC2 層ラーメン，高強度領域，FEM 解析

1. はじめに

鉄道高架橋では，RC ラーメン構造が多用されている。この理由は，合理的な構造であることと，経済的であることによる。RC ラーメン高架橋は，柱，梁，スラブなどの部材を剛結して構造物が構築されている。近年では，新幹線建設とともに RC ラーメン高架橋の構造の変遷[1)]はあるものの，RC ラーメン高架橋は鉄道高架橋として一般的な構造形式となっている。

RC ラーメン高架橋では，フーチング上面から上層スラブまでの高さが 10m を超えると中層はりを設けた 2 層ラーメン構造とする場合がある。中層はりは，構造全体の不静定次数を大きくし，柱部材の発生曲げモーメントを低減し，柱断面の縮小に寄与している。RC2 層ラーメン高架橋では，近年の比較的規模の大きな地震により，中層はりがせん断損傷する例が多く報告[例えば 2)]されている。中層はりのせん断損傷を防止するためには，中層はりの破壊モードを曲げ破壊型にする必要があり，一般的にはせん断補強鉄筋を必要量配置する必要がある。

RC2 層ラーメン高架橋の構造性能に関しては，鈴木らによる一連の研究[3)~6)]があり，曲げ破壊型の部材を対象とした地震時挙動や耐震設計法に関する提案がされている。また，中層はりの耐荷性能の違いが構造全体系の性能や挙動への影響に着目した検討[7)]も行われ，柱部材の損傷程度や残留変位を抑制できる可能性を示唆している。

本研究は，中層はりの耐荷特性が及ぼす構造全体系への耐荷特性に着目し，解析的な検討を行ったものである。中層はりの耐荷特性に関しては，RC 部材に高強度領域を配置することで，せん断性能や変形性能を付与することが可能となる著者らの既往の研究[8)~11)]を基本に実施した。

具体的には，既設計の新幹線用 RC2 層ラーメン高架橋を基本構造に，中層はりの断面高さ中央付近に高強度領域を配置した場合，基本構造から中層はりをなくした場合の 3 ケースの構造全体系解析モデルを設定した。上層位置の載荷方向は，線路方向，線路直角方向，平面的に 45 度方向の載荷を行い，解析的な検討から構造全体系の耐荷特性について考察を行った。

2. RC 部材に高強度領域を配置した場合の部材挙動に関する既往の研究概要[8)~11)]

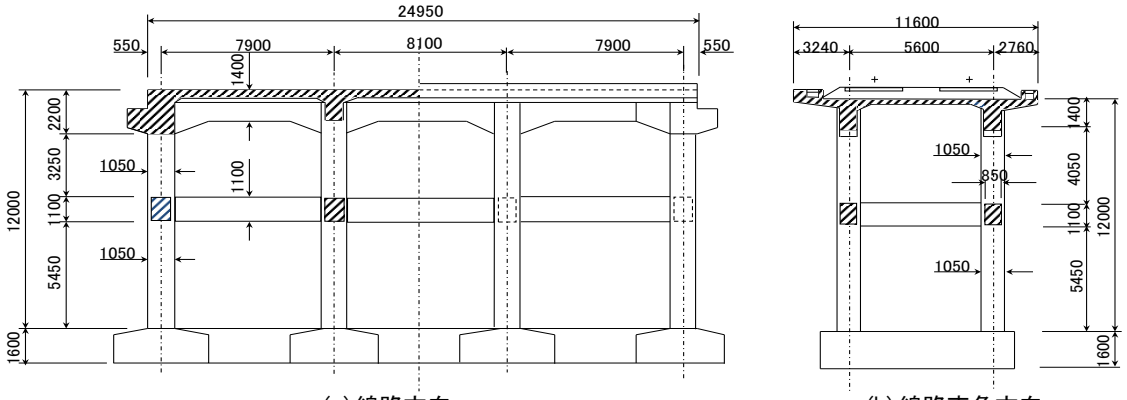
著者らによる高強度領域を RC 部材に配置する既往の研究は，主として模型試験体による実験的な検討が行われている。既往の研究では，高強度材料としてレジンコンクリートに着目し，RC 部材内に高強度領域を配置した模型試験体を製作し，載荷試験を行った。その結果，せん断耐力の向上や変形性能の向上が確かめられている。なお，レジンコンクリートに関しては，圧縮強度が 70～80N/mm^2，引張強度が 7.0～8.0N/mm^2，弾性係数については同程度の圧縮強度のコンクリートの弾性係数の 60%程度である。

参考文献 8)は，RC はり部材のせん断スパン内に部分的な高強度領域を意図的に配置することで，せん断破壊経路を任意制御するための検討を行ったものである。参考文献 11)は，柱部材を対象に，コア部分を高強度領域にすることで，比較的帯鉄筋を密に配置した試験体と同等以上の変形性能となることが示されている。

3. 解析の概要.

3.1 基本構造の RC2 層ラーメン高架橋の概要

*1 JR 東日本ｺﾝｻﾙﾀﾝﾂ（株）鋼構造設計部　部長　博(工)　(正会員)
*2 東日本旅客鉄道（株）JR 東日本研究開発センター　フロンティアサービス研究所　研究員　(正会員)
*3 東日本旅客鉄道（株）構造技術センター　耐震技術 PT　課長　博(工)　(正会員)



(a)線路方向　　(b)線路直角方向

図－1　RC2 層ラーメン高架橋の一般図

図－1(a)(b)に，基本構造とした 3 径間連続 RC2 層ラーメン高架橋の一般図を示す。本ラーメン高架橋は，フーチング上面から軌道階のスラブ上面までの高さが 12m で，中層はりが設けられ 2 層構造となっている。耐震設計は，設計水平震度 0.20 とした震度法により行われている。柱の断面寸法は，上層・下層ともに 1050mm×1050mm で，中層はりの断面寸法は線路方向，線路直角方向ともに 850mm×1100mm である。

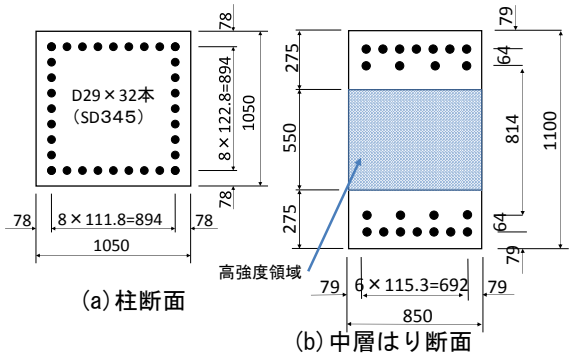
柱部材に配置されている軸方向鉄筋は，D29（SD345）が 32 本（図－2(a)）で，軸方向鉄筋比は 1.9%となっている。柱部材のせん断補強鉄筋は，D13 の帯鉄筋が 2 組配置され，1 層柱部材基部から 2250mm 区間は 150mm 間隔（せん断補強鉄筋比：0.32%），次の 1800mm 区間が 300mm 間隔で，2 層柱も含んで残りの区間は 150mm 間隔となっている。

線路方向の中層はりは，側径間部と中央径間部で主筋の配筋に若干の相違が見られる。側径間中層はり接合部の下側主筋は 2 段配筋で D32(SD345)が 7 本配置され，線路方向の 3 本の中層はりに連続的に配置されている（図－2(b)）。側径間中層はり接合部端部下側の 2 段目は，D32（SD345）が 4 本配置され，接合部から 4m の位置で段落しされている。側径間中層はりの中央径間側接合部では 2 段目の主筋がない。中央径間中層はり下側の主筋は D32（SD345）が 7 本の 1 段配筋となっている。線路方向中層はりの上側の主筋は 2 段配筋で線路方向の中層はり全長に渡って配置されている。線路方向中層はりのせん断補強鉄筋は，D13（SD345）1 組が 250mm 間隔で配置されている。

線路直角方向の中層はりは，4 本とも全て同じ配筋となっている。上下の主筋配置は同じで，1 段目は D29（SD345）が 7 本，2 段目は D29（SD345）が 4 本配置されている。線路直角方向の中層はりのせん断補強鉄筋は，D13（SD345）1 組が 250mm 間隔で配置されている。

3.2 解析モデルの概要

本検討では，中層はり部材のみの耐荷特性を確認するための確認用モデルと RC2 層ラーメン高架橋構造全体系の解析モデルを設定した。解析に適用した構成則は，東京大学コンクリート研究室で開発された任意の載荷経路依存性を考慮した材料構成則に基づく RC 平面モデル[7]を 3 次元に拡張したものである。高強度領域にはレジンコンクリートを使用するものとし，2 章で示した材料特性を既往の研究[10]を参考に設定した。



(a)柱断面　　(b)中層はり断面

（高強度領域を有する場合）

図－2　柱部材・中層はりの断面

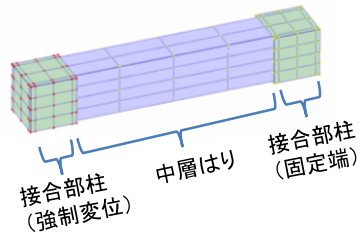
(1)中層はりの耐荷特性確認用解析モデル

図－3(a)(b)に，中層はりの耐荷特性を確認するための解析モデルの例を示す。検討対象中層はりは，線路方向の側径間部と中央径間部，線路直角方向の 3 種類である。

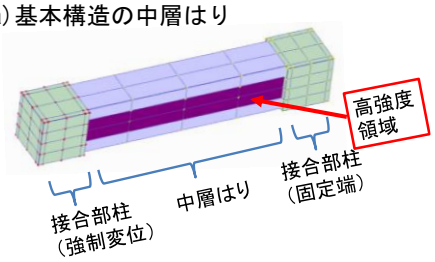
中層はりについては，両端固定はりとして載荷を行った。中層はりと接合する部分の柱部材もモデル化し，接合部柱部材の一端を固定し，もう一端側に強制変位を与えて解析を行った。

(2)RC2 層ラーメン高架橋構造全体解析用モデル

図－4 に，構造全体系の解析モデルを示す。解析対象の RC2 層ラーメン高架橋は，ゲルバー桁による接続形式となっている。ゲルバー桁部に関しては，ラーメン高架橋の桁受部に，ゲルバー桁と同じ桁高となる弾性部材を配置し，単位体積重量を調整し，ゲルバー桁の反力を作用させた。上層位置の軌道重量などの版上荷重は，スラブ上面にソリッド要素で板材を配置して模擬した。

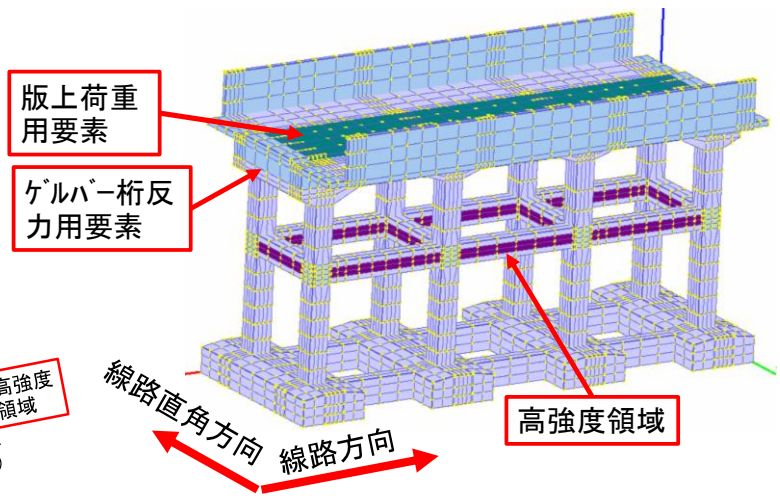


(a) 基本構造の中層はり



(b) 高強度領域を配置した中層はり

図－3　中層はりの解析モデル



図－4　構造全体系解析モデルの例
（高強度領域を配置した中層はりを有する場合）

3.3　解析パラメータの概要

表－1 に中層はりの耐荷特性，**表－2** に構造全体系を確認するため，本検討で設定した解析条件を示す。

表－1 は，中層はりの耐荷特性を確認する場合の載荷条件を示したものである。載荷方向は，部材軸に対して，鉛直方向（重力作用方向）と水平方向（重力作用に直交する方向）のそれぞれ単独に載荷した場合と鉛直方向変位と水平方向変位を同時に同じ変位量を連成させ，45 度方向に強制変位させた場合である。

表－2 は，構造全体系の耐荷特性を確認するための載荷条件を示したものである。**表－2** において，「基本構造」としたケースは，既設計の RC2 層ラーメン高架橋の柱部材，中層はりを再現したものである。「中層はり高強度領域配置」は，「基本構造」と配筋は同じであるが中層はり中央部に高強度領域を配置し，部材の耐荷特性を変化させた場合である。「中層はり無し」は，基本構造から中層はりを取り除いた場合で，基本構造において構造全体系で中層はりの影響を確認する目的で設定した。

構造全体系の耐荷特性を確認する場合の載荷条件は，線路方向，線路直角方向に単独に載荷した場合と線路方向と線路直角方向に同じ水平変位量を連成させ，平面的に 45 度方向に水平変位させた場合である。45 度方向の載荷（以下「連成載荷」という）を行う理由は，基本構造における線路方向と線路直角方向の中層はりの耐荷特性に違いがあり，線路方向と線路直角方向の耐荷特性を連成させることで，中層はりの耐荷特性が構造全体系への影響を明らかにするにしたいとの意図から設定した。また，地震動の作用方向によっては，45 度方向の応答も生じることも考えられるため，検討対象とした。

表－1　中層はり耐荷特性確認解析条件

解析ｹｰｽ	載荷方向（中層はりの耐荷特性確認）		
	鉛直方向（重力作用方向）	水平方向（重力作用と直交方向）	鉛直方向と水平方向の連成
基本構造	○	○	○
中層はり高強度領域配置	○	○	○

表－2　構造全体系の耐荷特性確認解析条件

解析ｹｰｽ	載荷方向（構造全体系の耐荷特性）		
	線路方向	線路直角方向	線路方向と線路直角方向の連成
基本構造	○	○	○
中層はり高強度領域配置	○	○	○
中層はり無し	○	○	○

4.　解析結果の概要

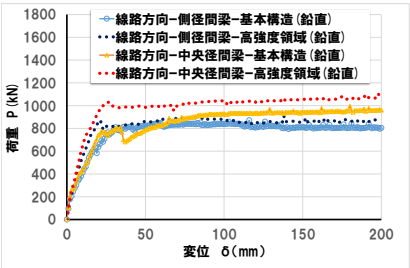
4.1　中層はりの耐荷特性

(1) 線路方向の中層はり（側径間部，中央径間部）

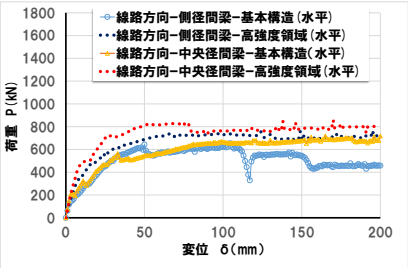
図－5 (a)～(e) に，線路方向の側径間部と中央径間部の中層はりの荷重・変位関係を示す。載荷は，柱接合部に鉛直方向に強制変位を与え，その反力を示したものである。検討は，「基本構造」と「中層はりに高強度領域」を配置としたケースである。

図－5 (a) (b) は，鉛直方向載荷と水平方向載荷の解析結果を示したものである。基本構造の中層はりでは，側径間部，中央径間部ともに荷重変位関係は，最大荷重からの低下が少ない安定した挙動を示した。高強度領域を配置した中層はりでは，中央径間部で最大荷重が約 10%程度向上した。

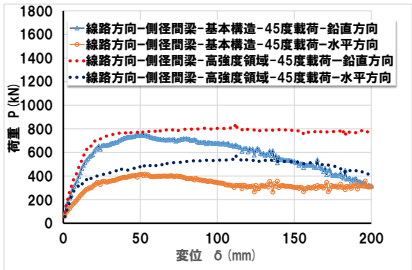
図－5 (c)，(d) は，鉛直方向と水平方向の連成載荷の解



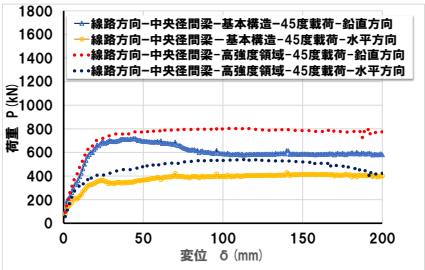
(a)鉛直方向の耐荷性能



(b)水平方向の耐荷性能

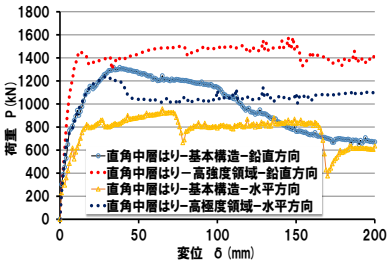


(c)側径間部の連成載荷時の耐荷特性

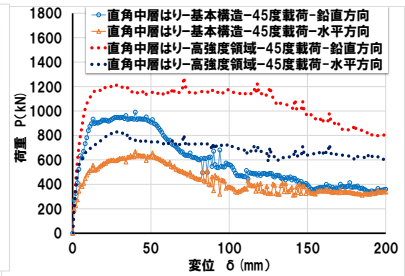


(d)中央径間部連成載荷時の耐荷特性

図－5　線路方向中層はりの耐荷特性



(a)鉛直方向と水平方向の耐荷特性



(b)連成載荷時の耐荷特性

図－6　線路直角方向中層はりの耐荷特性

析結果を示したものである。基本構造では，側径間部の中層はりの鉛直方向の耐荷特性が最大荷重以降，荷重が徐々に低下する挙動を示した。水平方向は，最大荷重400kN から 100kN 程度荷重が低下するが，その後，荷重の低下の小さい安定する挙動を示した。中央径間部の中層はりは，鉛直方向で最大荷重 700kN から 100kN 程度荷重が低下するが，600kN 程度からの荷重低下は小さくなっていた。水平方向については，最大荷重が 400kN 程度でほぼ一定の荷重を維持する荷重変位関係を示した。

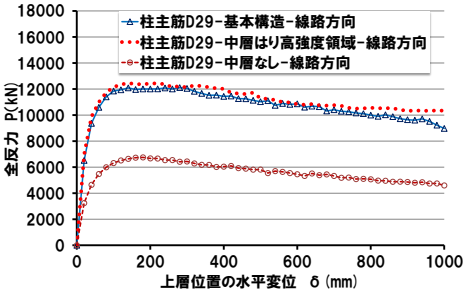
高強度領域を配置した中層はりは，側径間部，中央径間部ともに，連成載荷でも荷重低下のない，安定した耐荷挙動を示した。

(2)線路直角方向の中層はり

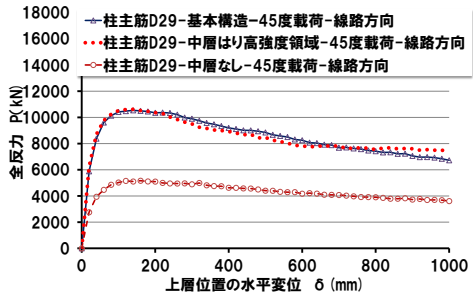
図－6(a)(b)に，線路直角方向の中層はりの荷重・変位曲線を示す。載荷は，線路方向の中層はりと同様，接合部の柱部に強制変位を与えた。

基本構造の鉛直方向の耐荷特性は，鉛直方向変位が35mm 付近で最大荷重 1300ｋN を示し，その後徐々に荷重が低下する挙動を示した。基本構造の水平方向の耐荷特性は，最大荷重が 900kN 程度で，最大荷重以降 100kN 程度荷重低下するが 800kN 程度でほぼ一定となる耐荷特性を示した。

高強度領域を配置した中層はりでは，鉛直方向，水平方向ともに，基本構造に比べて耐荷性能の改善が見られた。鉛直方向では，最大荷重以降の荷重低下が抑制され，ほぼ一定の荷重を維持する耐荷特性となった。最大荷重も約 8%（100ｋN 程度）向上した。水平方向に関しては，最大荷重が約 30%向上した。



(a)線路方向載荷時



(b)連成載荷時

図－7　線路方向構造全体系の耐荷特性

連成載荷時でも，高強度領域を配置することで，鉛直方向，水平方向の耐荷特性は，基本構造に比べて約 1.2 倍最大荷重が向上し，変形特性の改善も見られた。

4.2 構造全体系の耐荷特性

(1)線路方向載荷の耐荷特性

図－7(a)(b)に，線路方向の構造全体系の耐荷特性として，上層位置の水平変位と水平方向の全反力の関係を示す。図－7(a)は，上層位置で線路方向に強制変位を与え

た場合である。**図－7(b)**は，線路方向と線路直角方向の水平変位を同時に同じ大きさを与えて 45 度方向の連成載荷した場合である。

図－7(a)からは，高強度領域を配置した中層はりを有する場合を基本構造と比較すると，全水平反力の最大値は 3%程度大きくなっており，耐荷特性向上への影響は小さかった。ラーメン高架橋の構造全体系の最大耐力は，塑性化する中層はりも含めて塑性ヒンジ部の耐力の総和で表されるため，高強度領域を配置した中層はりの耐力向上分が加味されても，構造全体系では微増となった。

上層位置で 1000mm（上層位置での層間変形角で 1/12）の水平変位時の全水平反力と最大水平反力との比率は，基本構造で 0.74 となるのに対して，高強度領域を配置した中層はりを有する場合は 0.83 となり，全水平反力の低下割合が改善された。なお，基本構造で中層はりをなくすと，全水平反力の最大値が約 40%低減した。

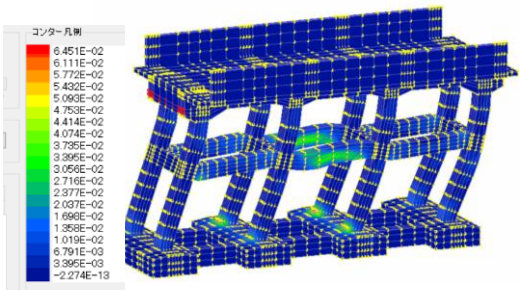
図－7(b)は，上層位置を 45 度方向に連成載荷した場合で，線路方向成分として，上層位置の水平変位と全水平反力の関係を示したものである。

基本構造と高強度領域を配置した中層はりを有する場合を比較すると，上層位置での水平変位が 620mm 程度（上層位置での層間変形角で 1/20 程度）までは単純に線路方向に載荷した場合，連成載荷時，それぞれの載荷方向毎で比較すると大きな違いを示さなかった。水平変位が 620mm を超えると高強度領域を配置した中層はりを有する方が全水平反力の低下が小さくなった。線路方向成分の水平変位が 1000mm 時点では，基本構造と高強度領域を配置した中層はりを有する場合の全水平反力を比較すると，高強度領域を配置した方が 11%大きかった。これは，高強度領域を中層はりに配置することで大変形領域での中層はりの耐荷特性が安定するため，構造全体系の耐荷特性も改善されたものと考えられる。

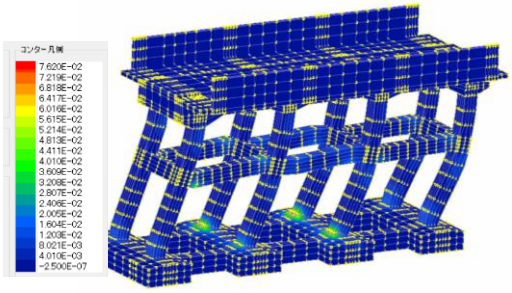
連成載荷において，中層はりを無しにした場合の線路方向成分の全水平反力は，中層はりがある基本構造に比べて，最大値で約 50%低下した。**図－8(a)(b)**に，基本構造，高強度領域を配置した中層はりの場合で，単純線路方向載荷時の最大主ひずみコンターと変形状況を示す。**図－8(a)(b)**は，全水平反力の最大値付近（上層位置の水平変位で 300mm 程度）の変形状況である。中央径間部の中層はりの最大主ひずみの発生状況（基本構造で約 3.0%，高強度領域中層はりで約 1.0%）の相違が見られ，高強度領域中層はりを有する構造の方が，全水平反力の最大値を保持する水平変位が大きくなっている。

(2)線路直角方向載荷時の耐荷特性

図－9(a)(b)に，線路直角方向の全体系の耐荷特性として，上層位置の水平変位と全水平方向反力の関係を示す。**図－9(a)**は，上層位置で線路直角方向に強制変位を与え

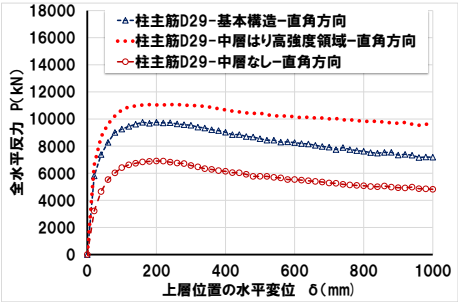


(a)基本構造

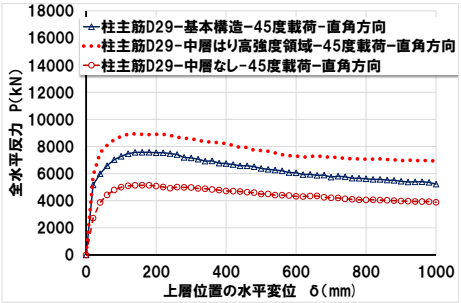


(b)高強度領域を有する中層はりの場合

図－8　線路方向載荷時の変形性状



(a)線路直角方向載荷時



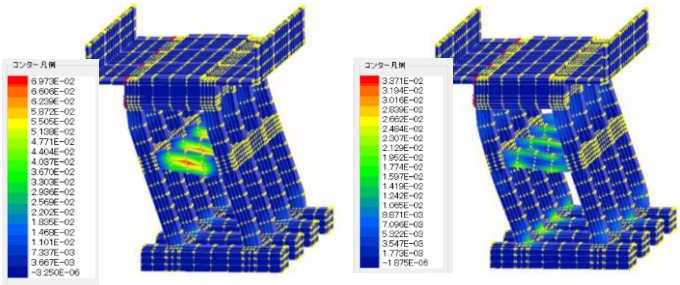
(b)連成載荷時

図－9　線路直角方向の構造全体系の耐荷特性

た場合である。**図－9(b)**は，線路方向と線路直角方向の水平変位を同時に同じ大きさを与え，45 度方向の連成載荷の場合である。

図－9（a）からは，高強度領域を配置した中層はりを有する場合を基本構造と比較すると，全水平反力の最大値は約 13%向上した。最大水平反力以降の低下度合も，高強度領域を配置した中層はりを有することで基本構造と比較して小さくなった。基本構造から中層はりを無くした場合，全水平反力の最大値で約 30%低減した。**図－9(b)**は，連成載荷した場合の線路直角方向成分として，

上層位置の水平変位と全水平反力の関係を示したものである。基本構造は，全水平反力の最大値以降，水平変位の増加とともにほぼ一定の割合で低下する挙動を示した。高強度領域中層はりを有する場合は，上層位置の水平変位が 600㎜ 以降，全水平反力の低下割合が抑制されるような挙動を示し，基本構造との違いが見られた。**図－10(a)(b)**に，線路直角方向載荷時の最大主ひずみコンターと変形状況を示す。**図－10(a)(b)**は，全水平反力の最大値付近(上層位置の水平変位で 300㎜ 程度)の変形状況を示している。線路直角方向中層はりの最大主ひずみの発生状況（基本構造で約 6.0%，高強度領域中層はりで約 2.0%）の相違が見られる。高強度領域により直角方向中層はりの耐荷特性が向上したことで，構造全体系の耐荷特性も向上した。



(a)基本構造　　(b)高強度領域を配置した中層はりを有する場合

図－10　線路直角方向載荷時の変形状況

5. まとめ

RC2 層ラーメン高架橋において，高強度領域を配置した中層はりを有する場合の構造全体系の耐荷特性について，検討を行った。本検討結果を以下に示す。

(1) 高強度領域を配置した中層はりの鉛直方向耐荷特性は，線路方向の中央径間部で約 10%，線路直角方向で約 8%，最大耐力が向上した。

(2) 高強度領域を配置した中層はりは，最大荷重以降の荷重低減が小さくなる耐荷特性になった。特に，線路直角方向の中層はりの耐荷特性の改善効果が顕著だった。

(3) 構造全体系の耐荷特性として，全水平反力の最大値に着目し，中層はりに高強度領域を配置した場合を基本構造と比較すると，線路方向で 3%程度，線路直角方向で 13%向上した。

(4) 線路直角方向の構造全体系の連成載荷結果からは，高強度領域を配置した中層はりを有する場合，最大水平反力以降の耐荷性能の劣化が抑制され，層間変形角が 1/12 時点での全水平反力を基本構造と比較すると 10%程度向上した。

参考文献

1) 大庭光商：鉄道高架橋（東海道新幹線から最近の高架橋），コンクリート工学，vol.51，No.1，2013.1

2) (社)土木学会芸予地震被害調査団：2001年3月24日芸予地震被害調査報告

3) 鈴木基行，秋山允良，田中慎介，丸中孝通：降伏過程を考慮したRC2層ラーメン高架橋の合理的耐震設計法の提案，土木学会論文集，No.634/V-45，pp269-278，1999.11

4) 田中慎介，武田篤史，井林康，鈴木基行：RC2層ラーメン構造の耐震性能に及ぼす中層ばりの力学的特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.2，pp.435-440，1997

5) 丸中孝通，田中慎介，鈴木基行：RC2層ラーメン構造物の耐震性に及ぼす部材の降伏過程の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.3，pp.1033-1038，1998

6) 秋山充良，田中慎介，丸中孝通，鈴木基行：RC2層ラーメン構造物の合理的耐震設計法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.3，pp.1255-1260，1999

7) 斎藤成彦，小林薫：RC2層ラーメン橋脚の耐震性能に関する一考察，日本コンクリート工学協会，近年の被害地震におけるコンクリート構造物の耐震性能評価に関する研究委員会報告会，pp.427-432，2004.7.16

8) 小林薫，佐々木尚美：RC部材に引張強度の高い領域を付与してせん断破壊制御を行うための基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.7-12，2014

9) 佐々木尚美，小林薫：鉄筋コンクリート梁の内部に引張強度の高い領域を有するRC 梁試験体の破壊性状について，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.1483-1488，2013

10) 小林薫，佐々木尚美，伊東佑香：鉄筋を集中配置し高引張強度領域を構築したRC梁のせん断破壊挙動に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.253-258，2015

11) 佐々木尚美，小林薫，伊東佑香：内部に引張強度の高い領域を有するRC柱の破壊挙動と変形特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1591-1596，2016