

論文 壁柱部材を有する RC ラーメン高架橋の載荷実験と FEM 解析による耐震性能評価

岩田 秀治*1・関 雅樹*2・前川 宏一*3

要旨：東海道新幹線の防災強度向上のため、これまで各種構造物に対し、調査分析、構造実験・解析等を実施し、その耐震性能を評価し、対策の必要性の有無、或いは合理的な耐震補強工法の検討を行ってきた。今回、東海道新幹線の壁柱部材を有する RC ラーメン高架橋について、静的交番載荷実験と FEM 解析により耐震性能を評価した。この高架橋の壁柱部材は、現行の鉄道耐震基準での照査の適用範囲外ということもあり、正確な評価が困難なものであったが、本検討の結果、高い耐震性能を有することが判明した。

キーワード：壁式高架橋、載荷実験、FEM 解析、破壊形態、耐震性能

1. はじめに

兵庫県南部地震での鉄道構造物の甚大な被災を鑑み、これまで東海道新幹線の地震対策は、土木構造物の強化、早期地震警報システム（テラス）の導入など様々な取組みを実施してきた。RC 構造物の強化としては、脆性的なせん断破壊防止を図るため、高架橋や橋脚の耐震補強を実施し、現在までに駅部周辺等の協議を伴う箇所や JR 他社の在来線近接箇所等の一部を除き完了した。

その一環として、壁状の柱部材を有する RC ラーメン高架橋（以下、壁式高架橋）の耐震性能評価を実施した。その性能については、過去に何度か検討がなされているものの、柱部材が壁状で鉄筋比が低いため、設計基準の照査適用範囲外となり、正確な耐震性能の評価には至らず、今回、壁式高架橋は耐震補強が必要なのか否か、また、要対策なら合理的な補強工法を考案すべく、その耐震性能について、本構造を忠実にモデル化した試験体による静的交番載荷実験と FEM 解析によって、詳細に評価した結果を、以下に示すものである。

2. 壁式高架橋

本検討対象の壁式高架橋は、東海道新幹線のモデル線（小田原～熱海間）の高架橋に、従来の柱―梁―スラブからなるビームスラブ式ラーメン高架橋と異なった形式のスレンダーな構造ができないかと言う要望で標準設計がなされた。そのコンセプトは、柱の林立感を減じ、不経済にならない程度にスパンを長くし、よりスレンダーな柱となるよう薄くしたものであった（写真-1）。

壁式高架橋の構造は、高さ 7.0m、中間柱は主に鉛直力を負担し、水平力は橋台部で負担するため、中間柱の壁柱部は断面 200cm×30cm と非常に薄く設計された。また、高さに対して壁柱部の幅は、幅／高さ=1/23～1/33 とい

うもので、最も多い標準高架橋の 60cm 角柱の 1/10 と比較してもスレンダーな形状であることが言える。加えて、コンクリート容積当たりの鉄筋量は、壁式高架橋で 120kg/m³ 程度で従来の標準高架橋より少なく、低鉄筋量で設計されている。



写真-1 壁式高架橋

本検討対象の壁式高架橋の一般図を図-1 に示す。載荷実験は、図に示す壁柱部と橋台部の 2 箇所をモデル化した試験体を用い、載荷方向は、鉄道設計基準を準用した照査結果では、せん断破壊モードとなりクリティカルな線路直角方向に載荷するものである^{1), 2)}。

3. 壁柱部の載荷実験

3.1 実験方法

(1) 試験体

試験体は、壁式高架橋の壁柱の全長を忠実に 1/2 縮小モデル化したもので、そのスケールは加力装置の制約条件下で可能な限り最大寸法となるよう試験体の縮小率を決定した。配筋図を図-2 に示す。また、その諸元、使用材料および強度試験結果の物性値を表-1～表-3 に示す。

*1 JR 東海 総合技術本部 技術開発部 主幹研究員 博(工) (正会員)

*2 JR 東海 総合技術本部 技術開発部長 博(工) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 工博 (正会員)

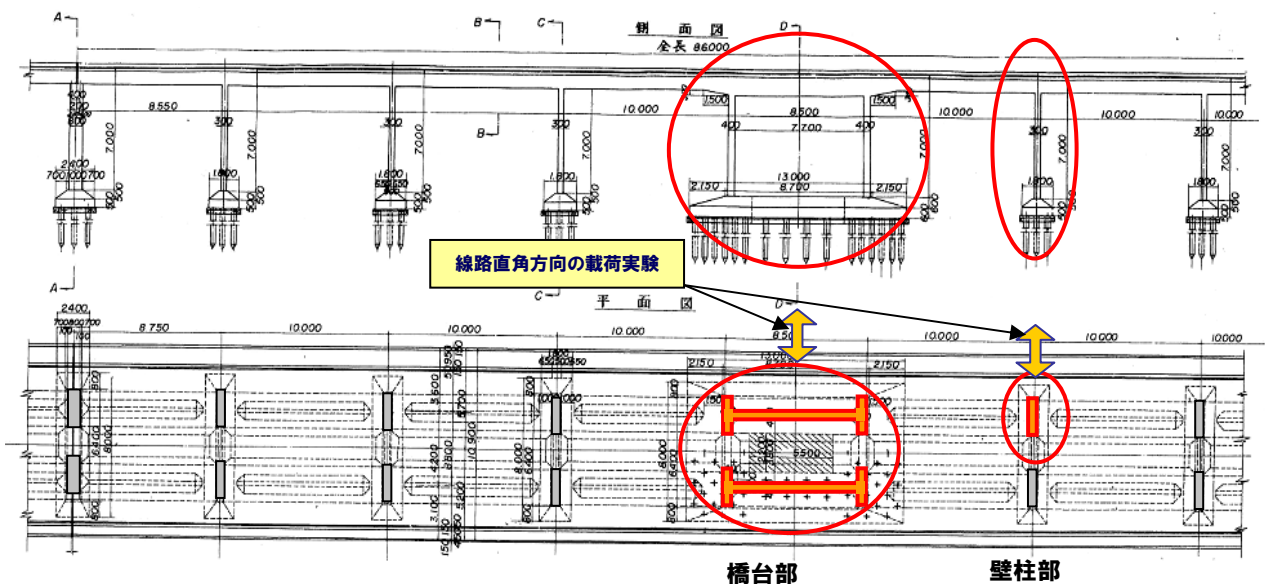


図-1 壁式高架橋一般図

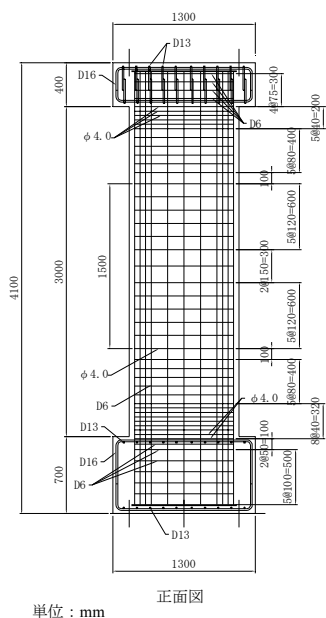


図-2 壁柱部の試験体配筋図

(2) 荷重装置

荷重方法は、写真-2 に示すように加力フレームに壁柱上端のスタブを固定し、それを介して2台のアクチュエータによって、試験体に一定の軸方向圧縮力(死荷重+列車荷重相当分の一定軸力 343kN)を作用させた状態で、水平方向にとりつけたアクチュエータにより正負交番荷重を作用させる方法とした。これにより、試験体に一定軸力を作用させた状態で、逆対称曲げ荷重を作用させるので、壁式高架橋のラーメン式壁柱部が模擬できことになる。

(3) 荷重方法

荷重は、降伏変位 δy を基準とした繰返しで、その降伏変位は最外縁の主筋に貼り付けたひずみゲージの測定値が、事前に実施した鉄筋の引張試験により求めた降伏ひずみに達した時点の変位とした。また、降伏荷重を

表-1 試験体諸元

断面形状	断面 (mm)	高さ (mm)	軸方向鉄筋比(%)	せん断スパン比	縮小比 (%)
壁式	幅 1,000 高さ 150	3,000	0.70	3.00	50

表-2 コンクリートの材料試験結果 (実験時)

規格	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
21-12-13H*	10.5	3.7	30.0	26,500

*コンクリート粗骨材の最大寸法は 13mm

表-3 鉄筋の材料試験結果

鉄筋の種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ(μ)	ヤング係数 (N/mm ²)
SD295A D6	385	521	4,040	1.89E+05
SWM-P ϕ 4	476	548	4,360	2.03E+05

維持した最大の変位を終局変位とした。

荷重パターンは、降伏変位 δy (4.0mm) の $\pm 0.5 \delta y$ 程度のひび割れ荷重の荷重から、 $\pm 1 \delta y$, $\pm 2 \delta y$, $\pm 4 \delta y$, $\pm 6 \delta y$, $\pm 8 \delta y$, $\pm 10 \delta y$, $\pm 12 \delta y$ と 3 サイクル荷重とし、最終的な破壊性能を把握するため、 $20 \delta y$ (80.0mm) の押切りを行い実験終了とした。

3.2 荷重実験結果

(1) 損傷状況

試験体の損傷破壊経過の状況を写真-3 に示す。損傷は、まず水平荷重約 50kN において、壁脚部に曲げひび割れが発生し、 $\delta = \pm 2.0\text{mm}$ の繰返しにおいて、曲げひび割れは脚部より、約 20cm の範囲において進展した。

$1 \delta y$ の 1 サイクルで、最外縁の主筋ひずみが降伏ひずみを超え、その後の変位漸増繰返し荷重により、 $2 \delta y$ の荷重において、曲げひび割れが曲げせん断ひび割れへと移行しはじめた。 $4 \delta y$ の繰返しでは、壁柱端部より高さ 1.0m の範囲にまで曲げおよび曲げせん断ひび割れが進展し、圧縮部コンクリートの圧壊がみられた。 $6 \delta y$ の繰

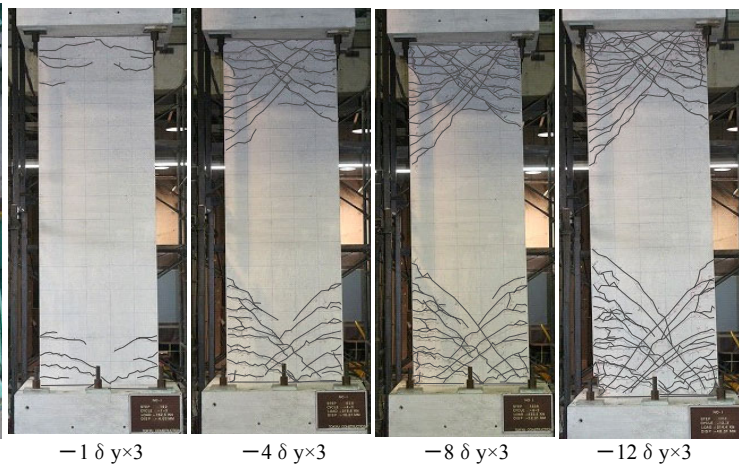


写真-3 試験体の損傷状況

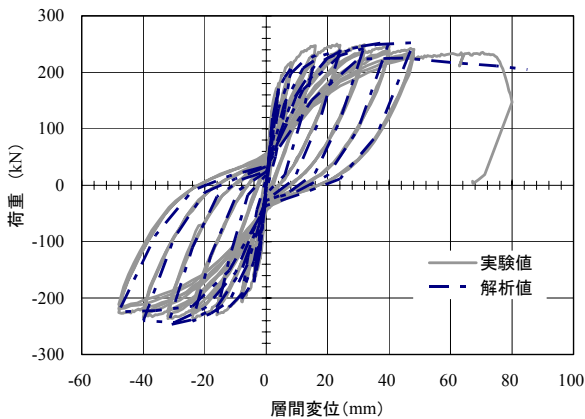


図-3 荷重—変位曲線（実験値—解析値）

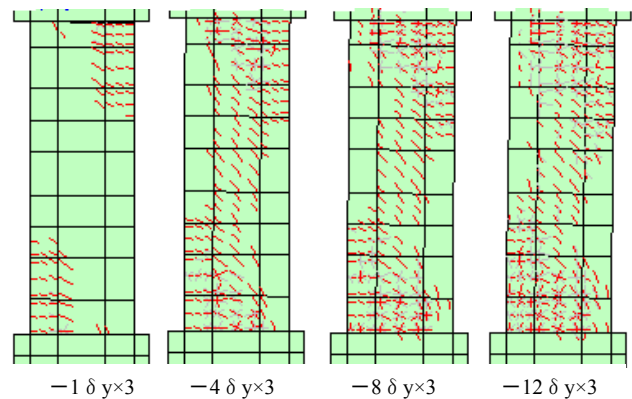


図-5 FEM 解析ひび割れ状況

返して曲げせん断ひび割れがさらに進展し、柱高さ 50cm 近傍に貼付した帯筋のひずみが大きくなりはじめた。これらのひび割れは 1 本に集中したのではなく、分散したひび割れとなった。さらに大変形の繰返し载荷においても、曲げおよび曲げせん断ひび割れが進展したが、高さ方向には壁端部より 1.2m までの範囲に止まった。

最終的に一方方向に押し切ったところ降伏荷重維持（終局変位）は $19.7 \delta y$ (79.6mm) となり、 $20.0 \delta y$ (=最大変位 80mm) で、壁脚部の曲げせん断ひび割れが大きく開き、また圧縮側において軸方向鉄筋が座屈するとともに、帯鉄筋が破断し、最終的に軸方向圧縮力を保持できなくなり、実験終了とした。

(2) 荷重変位関係

試験体の荷重—変位曲線を図-3 に示す。履歴曲線は、ややスリップ型を示す形状となったが、変形性能に優れたループを呈する結果となった。

3.3 FEM 解析

载荷実験の結果を非線形 FEM 解析により解析上表現できるか検証し、さらに解析モデルを実構造化して耐震性能評価を行った。なお、非線形 FEM 解析には WCOMD を用いた³⁾。

(1) 実験試験体の FEM 解析

(a) 解析モデルと荷重条件

解析モデルを図-4 に示す。材料定数は、前述の実験試験体の諸元値を用い、実験と同様の繰返しのプッシュオーバー解析とした。

(b) 解析結果

ひび割れ状況を図-5 に示す。 $1 \delta y$ 载荷での壁脚端部に曲げひび割れが進展、 $2 \delta y$ 载荷での曲げひび割れから曲げせん断ひび割れへの移行、その後、多くのひび割れが進展するものの、破壊には至らなかったことなど、実験状況（写真-3）とよく一致している。

荷重—変位関係の比較を、図-3 に示す。解析値は実験値の曲げ耐力および変形性能ともによく一致し、履歴曲線の形状は、ややスリップ型の紡錘形であるが、これについても実験結果と精度良く一致していると言える。

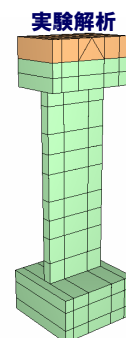


図-4 解析モデル

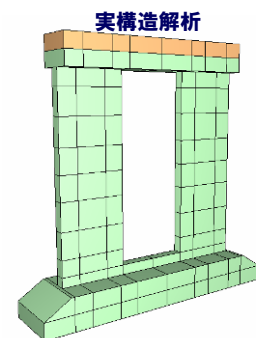


図-6 解析モデル

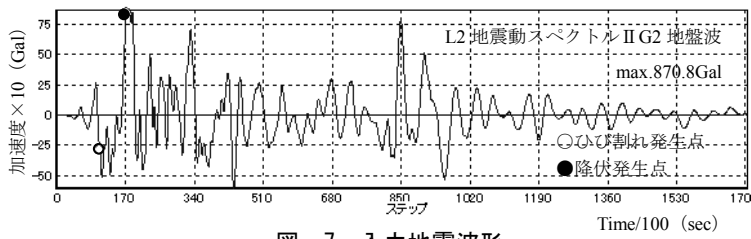


図-7 入力地震波形

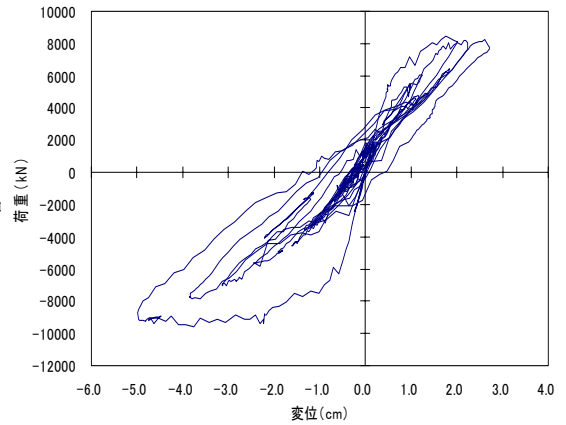


図-8 荷重—変位曲線

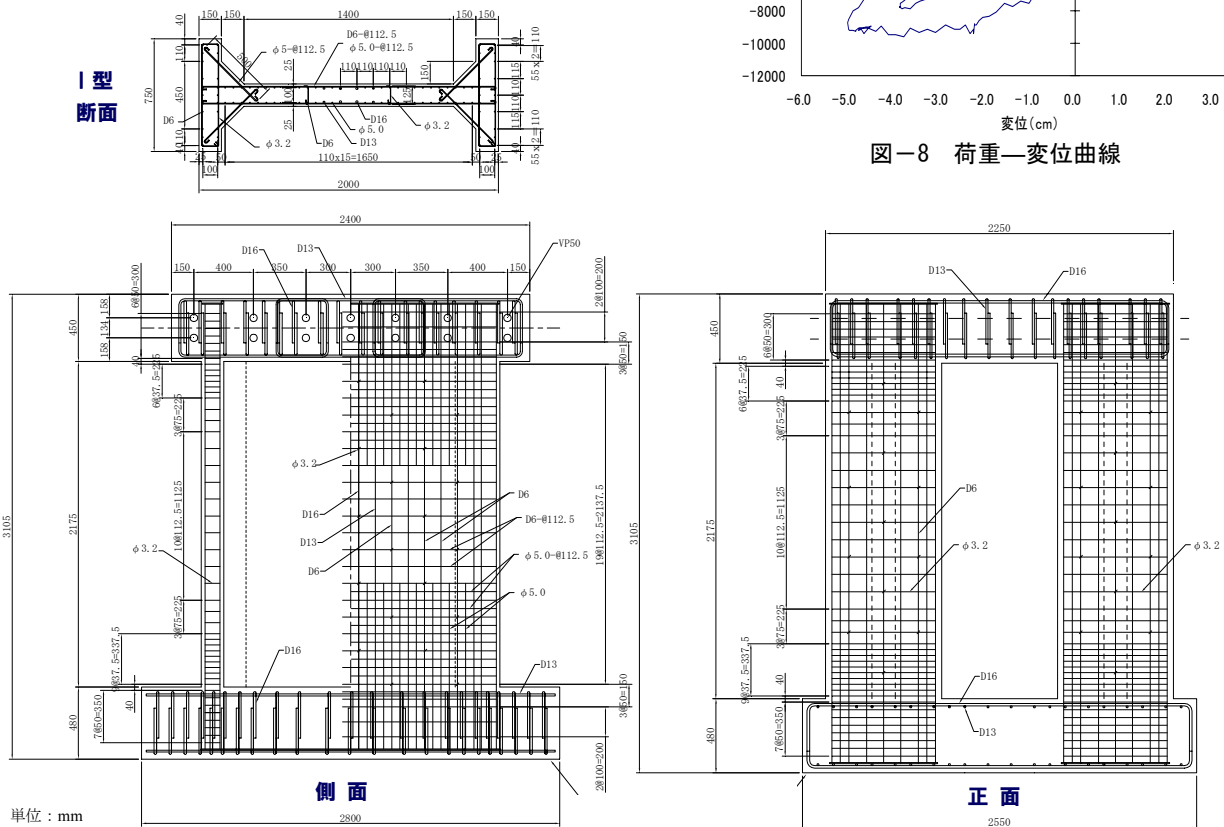


図-9 橋台部の試験体配筋図

(2) 実大構造物のFEM解析

(a) 解析モデルと荷重条件

解析モデルを図-6に示す。これは実験結果を精度良く示せた実験解析モデルを展開するもので、モデルを2倍に拡大し2柱式ラーメン構造とした。上部工は死荷重等をモデル化、基礎は解析的には壁式高架橋にとって厳しい条件となる固定とした。また、履歴減衰のほかには減衰を考慮しないこととした。

材料強度の物性値は、設計値であるコンクリート強度 24N/mm^2 、鉄筋降伏強度は 295N/mm^2 とし、入力地震動は、図-7に示すL2地震動スペクトルII (G2地盤波: $\text{max.}870.8\text{Gal}$) とした¹⁾。

(b) 解析結果

壁柱部の天端の荷重—変位の関係を図-8に示す。履歴は安定した形状の応答となり、最大応答変位は負側で 4.99cm となった。また、図-7の○印はひび割れ発生点、●は降伏発生点を示す。主筋は降伏するものの、せん断破壊は生じず、十分な耐震性能を有する結果となった。

表-4 試験体諸元

部位	断面 (mm)	高さ (mm)	軸方向鉄筋比 (%)	せん断スパン比	縮小比 (%)
フランジ	幅 750 高さ 150	2,175	0.62	2.90	37.5
ウェブ	幅 1,700 高さ 150		0.81	—	

表-5 コンクリートの材料試験結果 (実験時)

規格	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
21-12-13H*	11.0	3.6	33.5	26,600

*コンクリート粗骨材の最大寸法は13mm

表-6 鉄筋の材料試験結果 (追加材料分)

鉄筋の種類	降伏強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (N/mm^2)
SD295A D13	351	504	1,840	$1.91\text{E}+05$
SD295A D16	347	499	1,820	$1.90\text{E}+05$
SWM-P $\phi 3.2$	494	554	4,420	$2.04\text{E}+05$
SWM-P $\phi 5$	466	501	4,180	$2.13\text{E}+05$



写真-4 載荷実験装置による加力状況

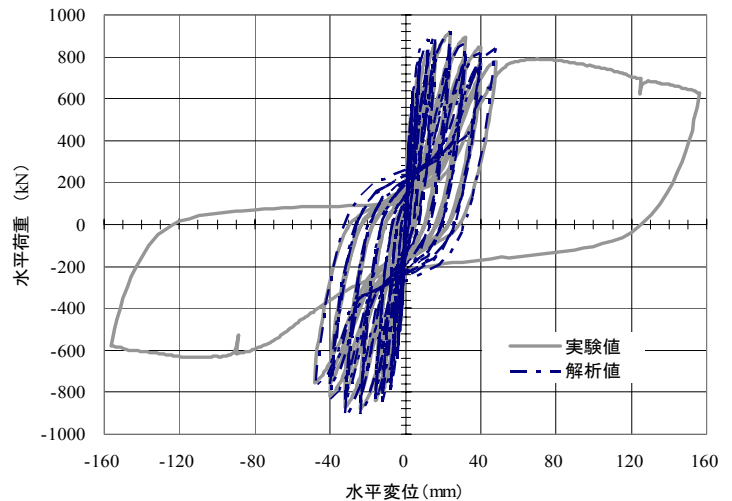


図-10 荷重—変位曲線 (実験値—解析値)



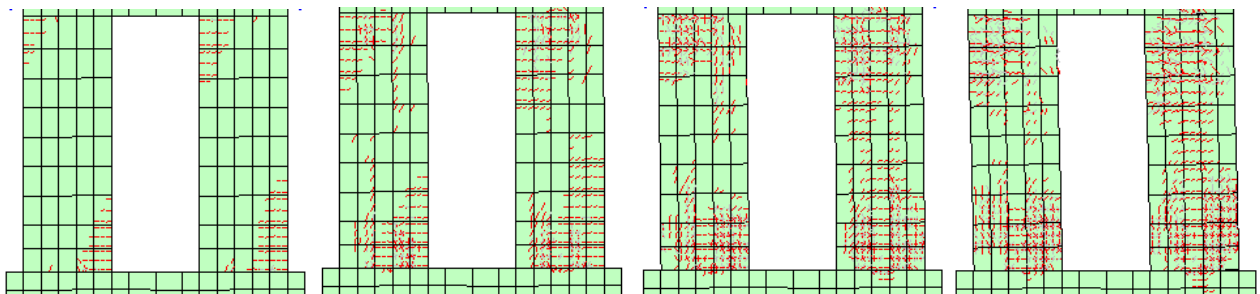
-1 δ y×3

-4 δ y×3

-12 δ y×3

-24 δ y×3

写真-5 試験体の損傷状況



-1 δ y×3

-4 δ y×3

-12 δ y×3

-24 δ y×3

図-12 FEM 解析ひび割れ状況

4. 橋台部の載荷実験

4.1 実験方法

(1) 試験体

橋台部の試験体は、壁柱部の載荷実験と同様に、加力装置等の制約条件から実構造の 3/8 スケールとした。

橋台部は線路方向に I 型の断面を有する二組の壁で構成されるが、I 型壁単体の面外（線路直角）方向に逆対象モーメントを作用させることは現状の試験装置では困難であるため、二組の I 型断面をスラブで連結し、フレームとして面外方向に加力するものとした。I 型壁の面外方向加力では、フランジ部分の耐力が実験対象となるため、ウェブ部分については、断面を短縮するものとした。ただし、実構造物と軸力比を合わせた場合の I

型壁の耐力が同等となるように、鉄筋量を調整している。

配筋図を図-9 に示し、その諸元、追加使用材料および強度試験結果の物性値を表-4～表-6 に示す。

(2) 載荷装置および載荷方法

載荷方法は、写真-4 に示すように 4 台のセンターホールジャッキにより、試験体に一定の軸方向圧縮力（死荷重+列車荷重相当分の一定軸力 679.1kN）を作用させ、水平方向に取付けた 2 台のアクチュエータにより、正負交番荷重を作用させる方法とした。

壁柱部の実験と同様、載荷パターンは、降伏変位 δy (2.0mm) の $\pm 0.5 \delta y$ 程度のひび割れ荷重の載荷から、 $\pm 1 \delta y$, $\pm 2 \delta y$, $\pm 4 \delta y$, $\pm 6 \delta y$, $\pm 8 \delta y$, $\pm 12 \delta y$, $\pm 16 \delta y$, $\pm 20 \delta y$ を 3 サイクル載荷とし、最終的な破壊性能を把握

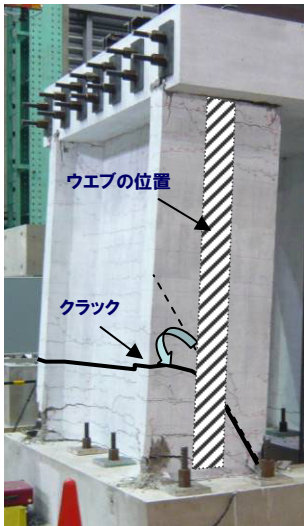


写真-6 クラック方向

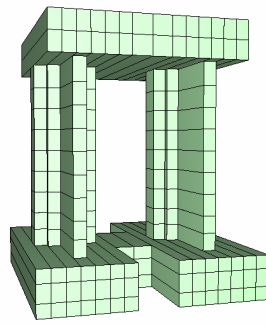


図-11 解析モデル

するため、 $\pm 24 \delta y$ 、 $\pm 78 \delta y$ (156mm) を 1 サイクル 載荷し、実験終了とした。

4.2 載荷実験結果

(1) 損傷状況

試験体の破壊経過状況を写真-5 に示す。試験体の破壊経過は、まず水平荷重約 220kN において、基部に曲げひび割れが発生し、 $\delta = \pm 2.0\text{mm}$ において、頭部および基部の最外縁鉄筋ひずみが降伏ひずみを超過したため、2.0mm を降伏変位とした。

その後の変位漸増繰返し載荷により、 $4 \delta y$ の載荷において、曲げひび割れが曲げせん段ひび割れへと移行しはじめた。 $8 \delta y$ の繰返しでは、圧縮部コンクリートの圧壊がみられた。さらに $20 \delta y$ の繰返しで圧壊がさらに進展してかぶりコンクリートが剥落し、主筋の座屈および壁柱頭部の主筋が破断した。

さらに大変形の繰返し載荷においても、曲げおよび曲げせん断ひび割れが進展したが、高さ方向には頭部からは 20cm、基部からは 30cm 程度の範囲であった。

最終的には、鉄筋の破断を伴いながら 80mm 程度から荷重がなだらかに低下し、実験装置の限界値 (156mm) に達したところで交番載荷を行い、実験を終了とした。

また、写真-6 に示すように I 型断面であるため、斜めクラックが発生するも、クラックが進展する段階でウェブの位置でクラック進行方向が水平方向に角度を変える現象が見られた。これはクラックが貫通することを妨げ、急激な耐力低下を阻止する効果があるものと考えられる。

(2) 荷重変位関係

試験体の荷重-変位曲線を図-10 に示す。結果はややスリップ型の変形性能に優れた履歴となった。

4.3 実験試験体の FEM 解析

(1) 解析モデルと荷重条件

壁柱部の載荷実験と同様に、実験結果を非線形 FEM 解析により検証した。解析モデルを図-11 に示す。

(2) 解析結果

ひび割れ状況を図-12 に示す。壁柱部の実験と同様、多くのひび割れが進展したが、せん断破壊は生じなかつ

たことなど、実験状況 (写真-5) とよく一致している。

繰返し載荷 $\pm 24 \delta y$ (48mm) の範囲の荷重-変位関係の比較を図-10 に示す。これも同様、解析値と試験体の曲げ耐力、変形性能ともによく一致する結果となった。

5. まとめ

本検討は、東海道新幹線の壁式高架橋の耐震性能を縮小モデル化した試験体を用いた載荷実験と FEM 解析により評価した。得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) 前段で行った耐震標準に準拠した照査結果では、せん断破壊モードであったが、載荷実験・FEM 解析とも、脆性的なせん断破壊は生じない結果となった。これは、せん断耐力の算定に最外縁付近の主筋しか有効と考えない安全サイドの照査によるため、本構造のような諸元に対しては、せん断耐力には逆算すると中立軸付近までの鉄筋が有効と考えられる。
- (2) 壁柱部の載荷実験結果では、多数のクラックが生じるも、あるクラックに損傷が集中してことなく分散するため、顕著な主筋の座屈、耐力低下は生じず、良好な変形性能が発揮できたものと考えられる。
- (3) 橋台部の載荷実験結果においては、I 型断面であるため、せん断クラックが発生するも、進展する段階でウェブにより、クラックが貫通することを制御され、損傷が一部分に集中することなく、多数のクラックで作用力を分散する損傷であるため、大変形領域でも耐力が急激に低下することなく、十分な耐震性能を確認することができた。
- (4) 本構造の鉄筋比は、壁柱部 0.70%、橋台部フランジ 0.62%と、軸力が作用する鉛直支持部材としては現行の設計基準の仕様規定を満たさない低鉄筋比となっている。しかし、この鉄筋比と配筋、コンクリートの断面積、付着・圧縮強度のバランスが関連しあい、多数の微細なクラックが生じるため、損傷が効果的に分散する。これより破壊しにくい構造となっていると推測する。
- (5) 壁柱部および橋台部の実験結果と WCOMD による FEM 解析結果の比較は、曲げ耐力、変形性能およびスリップ型の紡錘形履歴形状とも極めて精度よく一致することを確認した。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 国交省鉄道局監修, (財)鉄道総合技術研究所編, 1999.10.
- 2) 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造), 国交省鉄道局監修, (財)鉄道総合技術研究所編, 2004.4.
- 3) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形特性と構成則, 技報堂出版, 1991.5.