

線路上空建物における 梁せい縮小工法



原口 圭*



林 篤*



増田 達*

線路上空建物は線路を跨ぐために線路直交方向のスパンが大きくなり、梁せいも大きくなる。そのため、階高が大きくなり、増築時には既存上家へ梁が支障することや、既存床レベルと桁下空頭によって梁せいの制約を受けることがある。そこで、大梁を3本並べたトリプルガーダーを考案し、応力を分散させることで梁せい縮小を図ることとした。また、梁3本がダイアフラムを介して柱に接続する柱梁接合部を考案した。本架構によって15mスパンでおおよそ梁せいが80cmから50cm程度に低減可能であること、本柱梁接合部について梁3本が有効に機能することや十分な耐力や変形性能を有することを解析や実験で確認した。

●キーワード：線路上空建物、梁せい、トリプルガーダー、柱梁接合部、ダイアフラム

1. はじめに

線路上空建物の構造的な特徴として、線路を跨ぐ関係で線路直交方向のスパンが大きくなる、地中梁を設置しない事例も多い等が挙げられる。そのため、フレームとしての剛性および耐力を確保するために梁せい（梁高さ）も大きくなり、階高も大きくなる。また、図1に示すように増築時には既存上家へ梁が支障することや、既存床レベルと桁下空頭によって梁せいの制約を受けることがある。その結果、仮上家を設置したり、床レベルを合わせるために既存建物の床の嵩上げを実施したりしている。

梁せいを縮小するためには梁幅を大きくし、扁平化することによって断面性能を確保することができる。しかし、柱幅に対して梁幅が極端に大きくなる場合、柱梁接合部における応力伝達機構は複雑となり、設計手法が確立されていないのが現状である。今回、梁せいを縮小するために図2に示すように同一断面の梁を3本並べたトリプルガーダーおよび3本の梁がダイアフラムを介して柱に接続する柱梁接合部を考案した。本稿ではフレーム解析による梁せい縮小効果、有限要素解析や載荷試験による柱梁接合部の性能評価について紹介する。

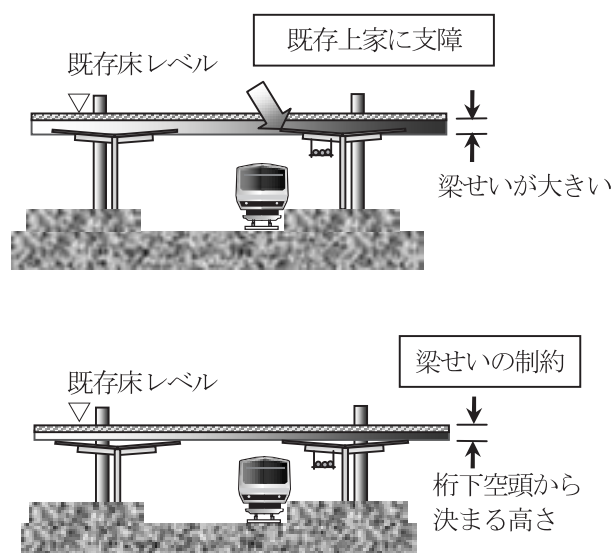


図1 線路上空建物増築時の制約条件

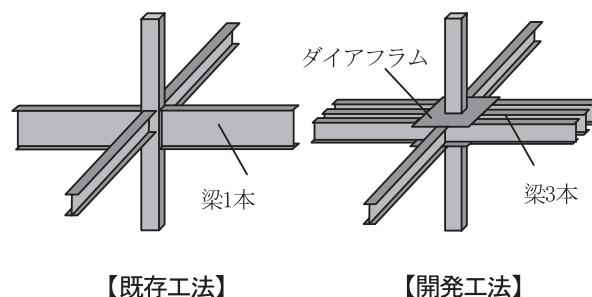


図2 柱梁接合部イメージ

2. 柱梁接合部の詳細

柱梁接合部の詳細図を図3に示す。トリプルガーダーでは、外側梁は柱に対して偏心して接続することになる。

そのため、外側梁の応力を柱へ伝達するため、梁の軸方向と直交方向にリブを設けている。また、対象を線路上空建物としており、ダイアフラムと梁はウェブ、フランジともに高力ボルト接合としている。そこで、梁間隔に

については、梁間にレンチを入れてボルト締めを行うため、目視確認作業も考慮して、300mm程度の間隔を確保することとした。梁材に関しては、ロール材の活用を考えて広幅H形鋼のH400×400を目安としている。

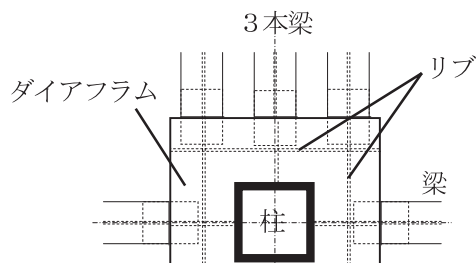


図3 柱梁接合部詳細図

3. フレーム解析

本架構による梁せい縮小効果を確認するために、フレーム解析を実施した。解析モデルとしては図4、5に示すような3層1スパンの線路上空建物を想定し、スパンは線路直交方向15m、線路平行方向8mとした。解析プログラムについては一貫構造計算プログラムSuper Build / SS2(ユニオンシステム株式会社)を使用した。また、トリプルガーダーにはせん断力が均等に伝達され、梁端部で破壊すると仮定して解析を行った。

その結果、既存工法では線路直交方向の梁せいが80cm必要なのに対して、開発工法では梁せい50cm程度まで低減できることを確認した。

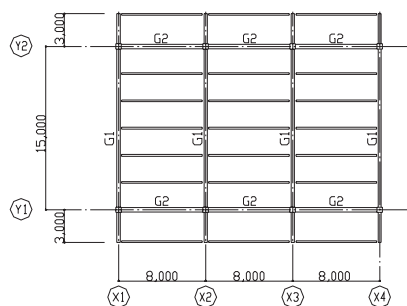


図4 線路階伏図

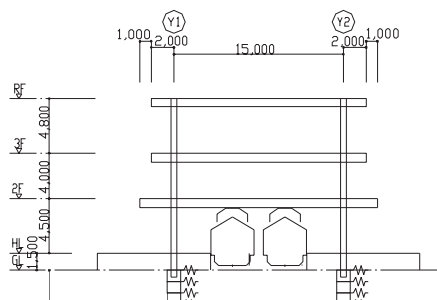


図5 線路直交方向断面図

4. 柱梁接合部の有限要素解析

4.1 解析概要

縮小試験体による載荷試験を実施する前に、本柱梁接合部についておおよその性能を把握するために有限要素解析（弾性範囲）を実施した。柱と梁の部材断面は表1に示すとおりであり、柱梁接合部を図6に示すような板要素でモデル化した。モデル化時の条件としては、階高は5m、スパンは線路直交方向で15m、線路平行方向で8mを想定した。トリプルガーダーとしたのは線路直交方向のみであり、線路平行方向については単梁とした。また、ダイアフラムには前述のように梁軸方向と直交方向共にリブを設け、接合部については高力ボルト接合を想定しているが、弾性範囲の解析であるため、高力ボルトが滑らないと仮定し、スプライスプレートをダイアフラムおよび梁フランジに剛結させている。

水平荷重の加力点は図6に示す通りで、荷重は一次設計程度の地震力として200kNと設定した。境界条件については、図6においてA：鉛直方向の変位を固定、B：ピンとした。なお、解析プログラムについては、MSC/Nastran for Windows (ver.2003) を使用した。

表1 部材断面

番号	断面
①	H-400×400×13×21
②	H-400×500×16×28
③	□-600×600×25

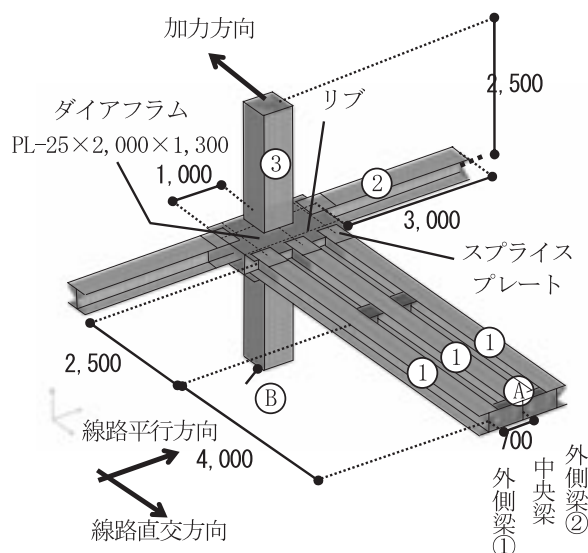


図6 解析モデル

4.2 解析結果

4.2.1 梁せん断力負担比率

図7には、梁端部におけるせん断力負担比率および括弧内には負担せん断力を示す。比率は、3本梁の平均せん断力である44.3kNを基準とした。外側梁は負担比率0.92、中央梁は負担比率1.15となっており、外側梁も有効に機能していることが分かる。

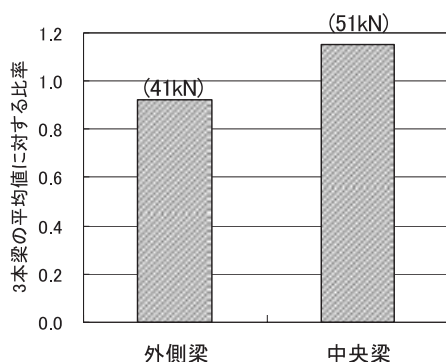


図7 梁せん断力負担比率

4.2.2 応力分布

図8には梁フランジおよびダイアフラムの応力分布図 (Mises相当応力) を示す。梁端部に加えてダイアフラムの柱前面付近 (図中○印) で大きな応力が発生しており、特に柱のコーナー前方で集中が顕著である。

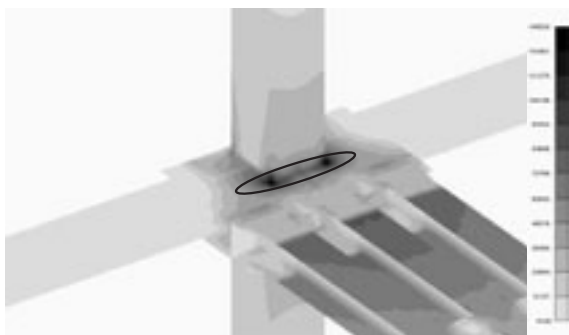


図8 梁フランジおよびダイアフラム応力分布図

図9には梁ウェブおよびリブ、柱パネルゾーンの応力分布図 (Mises相当応力) を示す。図より柱パネルゾーン (図中○印) の応力が大きくなっているのが確認できる。これは、今回のモデルではパネルの厚さを柱と同一にしているが、3本の梁の曲げモーメントが柱パネルゾーンを介して柱の曲げモーメントとつりあっており、柱パネルゾーンで大きなせん断応力が生じているためと考えられる。この部分を先行降伏させないためにはパネルゾーンの板厚を十分に確保しておく必要があることが分かる。

リブについては図9のリブBに応力が集中していることが確認できる。これは外側梁のせん断力がリブAを介してリブBから柱へと伝達されているためと考えられる。つまり、リブAが外側梁から柱への応力伝達において有効に機能していることが分かる。

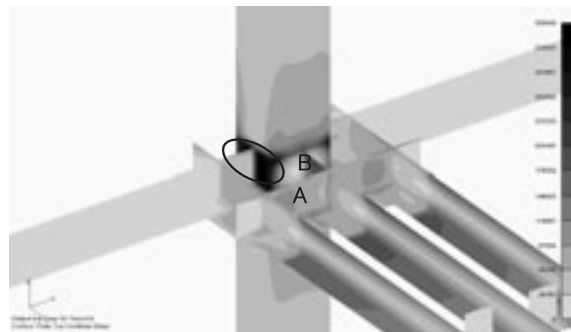


図9 梁ウェブおよびリブ、柱パネルゾーン応力分布図

5. 縮小試験体による載荷試験

5.1 試験概要

本柱梁接合部の性能を確認するために、縮小試験体による載荷試験を実施した。試験体の概要を表2および図10に示す。試験体は柱梁接合部を実構造物の1/2に縮小したT型試験体で、梁3本がフランジと同厚のダイアフラムに接合されており、基本的な性能を確認するためにフランジは溶接接合、ウェブは高力ボルト接合としている。試験体R1-1は直交方向にも梁3本が収まるようにダイアフラムの大きさを決定し、R1-2は直交方向が単梁の場合を想定して、梁の軸方向のダイアフラムのサイズを小さくしている。なお、両試験体とも柱で降伏しないように断面を決めている。

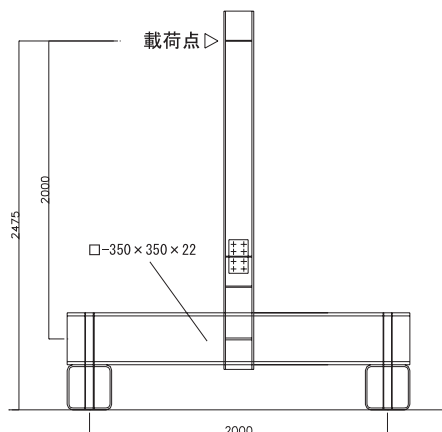
試験体の材料強度を表3に示す。鋼材は角型鋼管のみBCR295とし、それ以外はSS400を使用している。図10に示すように梁には一軸ひずみゲージ、ダイアフラムには三軸ひずみゲージを貼付し、載荷方法については、±100mmの範囲内で交番載荷を実施し、その後、破壊するか変位が500mmに達するまで引き側への単調載荷を実施した。

表2 試験体諸元

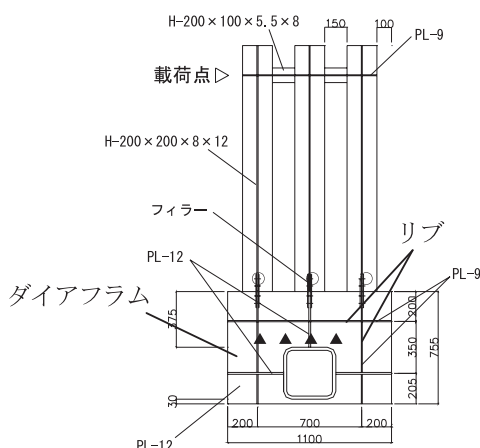
試験体名	鉄骨梁 (mm)	ダイアフラム 大きさ (mm)	フランジ 接合	ウェブ接合
R1-1	H200×200×8×12	1,100×755	溶接	F10T:4-M20
R1-2		1,100×630	溶接	F10T:4-M20

表3 材料強度

部位	材質	厚さ (mm)	降伏 荷重 (N/mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)	降伏 ひずみ (μ)
PL12	SS400	12	258	420	1192
PL9	SS400	9	298	447	1395
梁フランジ	SS400	12	260	435	1261
梁ウェブ	SS400	8	286	461	1341
角型鋼管	BCR295	22	300	429	1675



【試験体側面図】



【R1-1立面図】

図10 試験体概要図

5.2 試験結果

5.2.1 梁せん断力負担比率

図11には弾性時の3本梁の平均せん断力に対する外側梁および中央梁のせん断力負担比率を示す。図より外側梁は中央梁と比べてせん断力負担比率が若干低いものの、R1-1、R1-2ともに平均値の9割を超えており、4.2解析結果同様に外側梁が有効に機能していることが分かる。

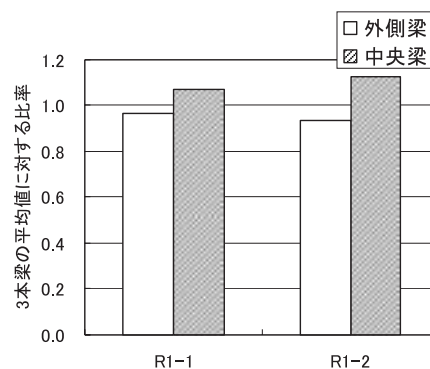


図11 梁せん断力負担割合

5.2.2 破壊状況および荷重変形関係

図12、13に示すようにR1-1はダイアフラムの柱前面で破断し（図中○印）、R1-2は梁フランジに局部座屈を生じて载荷試験を終了した。R1-1の破断箇所については、4.2解析結果の図8における応力集中箇所とも一致する。

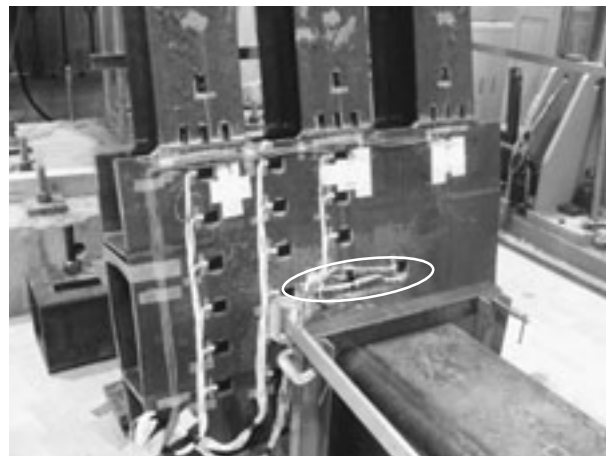


図12 R1-1破壊状況



図13 R1-2破壊状況

図14には荷重変形関係の骨格曲線（等価な単調載荷曲線）¹⁾を示す。両試験体においてダイアフラム降伏後に梁降伏しているが、ダイアフラム降伏荷重の2倍程度までは初期剛性を維持しているのが分かる。梁降伏荷重は応力が均等に伝達されると仮定して計算した値を両試験体で下回っているが、これは中央梁と外側梁で応力負担割合が違うことが原因と考えられ、外側梁の応力負担割合が小さいR1-2の方が計算値との差が大きい。また、ダイアフラムで破断したR1-1の方が、梁降伏後の非線形化の進展が早いものの、R1-1、R1-2ともに梁の全塑性耐力（設計上の梁耐力）を上回る耐力を保有しているとともに、梁の全塑性耐力時の変形を超えても耐力を維持し続けており、十分な変形性能を有していることも確認した。

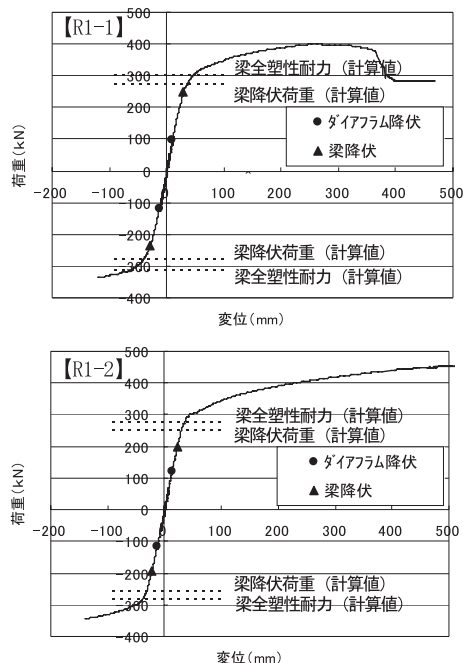


図14 荷重変形曲線

5.2.3 ダイアフラム応力分布

図15には降伏前（50kN、100kN）および降伏後（200kN、300kN）の柱面に沿うダイアフラムのひずみ分布を示す。縦軸に梁軸方向の主ひずみ、横軸に柱芯からの距離を取っており、図中には柱位置も合わせて示す。R1-1はR1-2と比較してひずみの柱付近への集中度合いが著しく、特に降伏後の柱芯付近のひずみの進展が大きい。両者の破壊状況の違いはこのひずみ分布に起因していると考えられる。また、両試験体において、4.2解析結果同様に柱付近にひずみが集中している状況が分かり、R1-1については破壊箇所ともほぼ一致している。

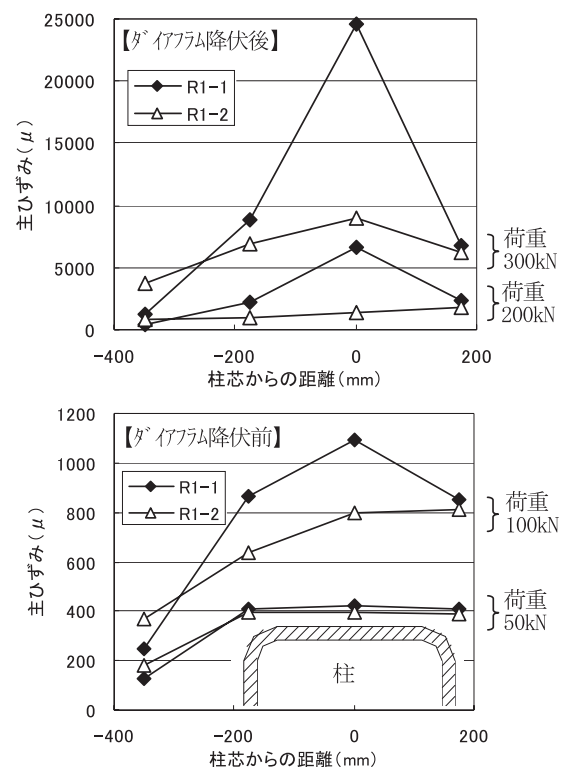


図15 ダイアフラムひずみ分布

6. まとめおよび今後の進め方

梁せいを縮小することが可能な架構や柱梁接合部を考案し、解析および載荷試験によって梁せい縮小効果と柱梁接合部の性能を確認した。今後は実験結果を非線形有限要素解析で追跡するとともに応力伝達機構を解明し、柱梁接合部の耐力評価手法を確立する。また、実プロジェクトを対象として梁せい縮小工法の適用性についても並行して検討していく。

参考文献

- 1) 加藤勉、秋山宏：鋼構造部材の耐力（その4）、日本建築学会論文報告集、No.151、pp15-20、1968.9