大型試験体の荷重-変位履歴特性を再現可能な鋼上部構造の縮小試験モデルの開発

木下　幸治[1]・岩田　隆弘[2]・井上　一磨[2]

[1]正会員　岐阜大学准教授　工学部社会基盤工学科（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）
E-mail:kinosita@gifu-u.ac.jp

[2]学生会員　岐阜大学大学院　修士課程（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）
[3]学生会員　岐阜大学大学院　修士課程（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1）

本研究は，既往の研究で構築された大型試験体とよく一致する鋼上部構造縮小試験体を構築することを目的とし，既往の研究の大型試験装置を基に作成した鋼上部構造縮小試験体の載荷試験を実施した．また，ファイバー要素を用いた鋼上部構造の解析手法，具体的には各部材の要素分割などについての提案を行った．その上で，提案した解析手法を縮小モデルにも適用し，縮小試験体の実験と解析の比較より，縮小試験体への解析方法の適用性を検討した．その結果，本研究で開発した縮小試験体は大型試験体の最大耐力までの履歴曲線の形状を良く再現でき，かつ各 Drift 時の最大耐力はよく一致した．ただし，最大耐力以降の再現性は低いが，ハンチ部の再現性を高めることで，更なる精度向上が期待できると考えられる．

Key Words: *steel superstructure, small-scaled model, fiber analysis*

1.　はじめに

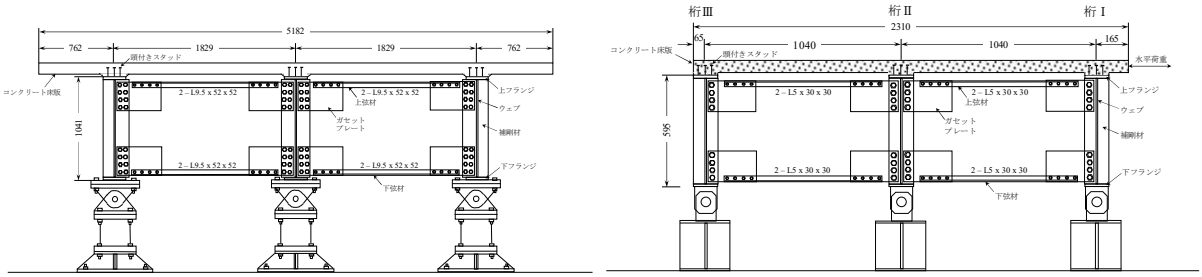
巨大地震に対する橋梁構造物の安心・安全の要求を背景に，国内外において振動台実験や載荷実験に基づき，橋梁構造物の解析技術の高度化や高耐震性能化が図られている．それらの既往の研究の内，橋梁の鋼上部構造を対象とした研究では，鋼上部構造の解析技術の高度化のみならず，鋼上部構造への地震エネルギー吸収部材であるダンパー・ブレースの適用性が検証されてきている [1]．鋼上部構造体内部，すなわち対傾構などの二次部材へのダンパー・ブレースの適用は，橋梁下部構造が負担する地震エネルギーの低減に繋がり，橋梁構造物全体の高耐震性能化を実現できる．例えば，ネバダ大学リノ校で行われた既往の研究 [1]では，実大の 0.42 スケールの鋼上部構造の載荷実験と，鋼桁とコンクリート床版間のスタッドのモデリングを含む解析モデルが提案された．しかし，既往の研究 [1]の 0.42 スケールの試験体は比較的大型であり，パラメトリックな載荷試験を実施することは困難であると考えられる．そのため，大型試験体の強度・変形能を再現することができ，鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検討可能な，より小さなスケールの試験体の開発が必要である．また，鋼上部構造を対象とした既往の解析技術は，多主桁の橋梁型式や橋梁床版の剛性が正確に反映されてない簡易な解析モデル [2]か，シェル要素やソリッド要素などを組み込んだ高精度な解析モデルの提案に留まっている [1]．このため，今後の鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検証可能な簡易で，かつ高精度な実用的な解析技術の開発が必要と考えられる．

本研究は，既往の研究で構築された大型試験体とよく一致する鋼上部構造縮小試験体を構築することを目的とし，既往の研究 [1]の大型試験装置を基に作成した鋼上部構造縮小試験体の載荷試験を実施した．また，ファイバー要素を用いた鋼上部構造の解析手法，具体的には各部材の要素分割などについての提案を行った．その上で，提案した解析手法を縮小モデルにも適用し，縮小試験体の実験と解析の比較より，縮小試験体への解析方法の適用性を検討した．

2.　縮小試験体による載荷実験

(1)　試験システムの概要

図-1(a)に既往の研究 [1]で使用された実大橋梁の 0.42 ス



(a)　大型試験体 [1]　　(b)　縮小試験体

図-1　大型試験体と縮小試験体の図面

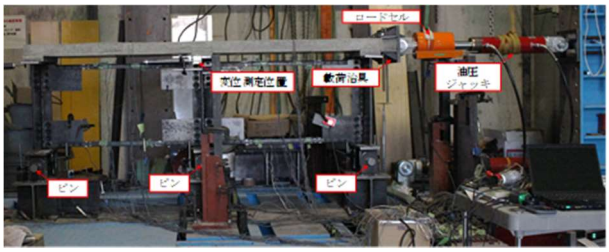


図-2　縮小試験システム写真

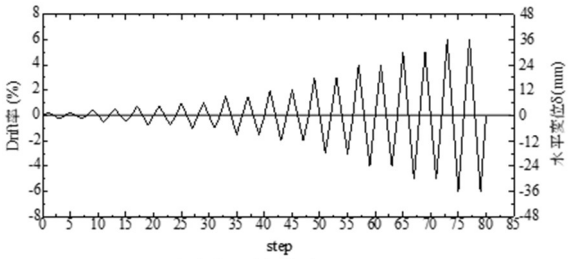


図-3　載荷サイクル

ケールの大型試験体を示す．この試験体は California Department of Transportation が 2007 年に発表した設計例 [3]を基に作成されており，コンクリート床版を有する鋼 I 桁断面 3 主桁の橋軸方向から一部を抜き出したものである．試験体下端はピン構造とされ，主桁上部とコンクリート床版の結合部にずれ止めとしてスタッドが用いられている．この大型試験体を参考に，その大型試験体を 0.57 倍した縮小試験体（実大の 0.24 スケール）を作成した．図-1(b)，図-2 に縮小試験体の図面と試験システムを示す．ここでは，載荷部近傍の桁からそれぞれ桁Ⅰ，桁Ⅱ，桁Ⅲとする．縮小試験体は，実構造との再現性を出来る限り高めるため，試験体寸法を相似則に従い，大型試験体 [1]を 0.57 倍した縮小試験体（実大の 0.24 スケール）を作成した．鋼桁高さは 595mm，桁間隔は 1040mm，床版厚 65mm，床版の橋軸直角方向長さは 2310mm，橋軸方向は 520mm とした．なお，今回作成した縮小試験体では，試験体製作の都合上，ハンチ部の勾配は製作しておらず，後述のようにハンチ部での損傷が大型試験体と縮小試験体で異なったが最大耐力までは縮小試験体による高い再現性が確保できたことから，今後の検討を進めるダンパー・ブレースの適用性検討では利用できると考えている．

試験方法は，鋼製フレーム内に試験体を設置し，油圧ジャッキにより繰り返し水平力を与える．繰返し載荷は，既往の研究 [1]の大型試験体の実験と同様に漸増型繰返し載荷で，各 2 サイクル載荷を行う．載荷は変位制御で行われ，主桁高さに対する水平変位 δ（mm）の割合を Drift 率（%）とし，1.0%までは±0.25%ずつ，2.0%までは±0.5%ずつ，それ以降は±1.0%ずつ変動させた（図-3）．

(2)　損傷状況

図-4，5 に縮小試験体と大型試験体 [1]の試験終了時の損傷状況を示す．また，図-6 に Drift 率 2.0%時の桁Ⅱにおける損傷状況，図-7，8 に鋼桁と床版の結合部の縮小試験体と大型試験体 [1]の損傷状況を示す．Drift 率 2.0%の時，大型試験体では鋼桁とコンクリート床版の接合部に斜め方向のひび割れが確認されたが，縮小試験体では，そのひび割れが確認されていない．また，載荷終了時，縮小試験体では，桁Ⅰ，Ⅱではハンチ部と床版部が交差する応力集中部からの横方向へのひび割れが確認でき，桁Ⅲでは応力集中部から斜め方向のひび割れや縦方向のひび割れが確認された．一方で，大型試験体 1)では，桁Ⅰ，Ⅱでは斜め方向のひび割れが発生し，床版の一部が剥離し，桁Ⅲでは，損傷が非常に軽微となっていた．

以上の様に，縮小試験体と大型試験体では，ハンチ部の勾配の有無によりハンチ部周辺の損傷状況が異なる結果となった．

次に，試験終了後の縮小試験体のスタッドの変形・損傷について確認した．スタッドの変形状況を図-9 に示す．桁Ⅰと桁Ⅱは，最終ステップの載荷方向にスタッドが変形しているのに対し，桁Ⅲは逆方向に変形していることが分かる．この時，桁Ⅲが逆方向に変形している要因は，桁Ⅲ部直上のコンクリート床版は他の桁より損傷が大きく，他のスタッドより変形が小さかったためと考えられる．この為，試験終了後に，試験体の変位をゼロに戻した際に，逆方向に変形したと考えられる．なお，スタッド細部を観察したところ，低サイクル疲労によるき裂発生は確認されなかった．

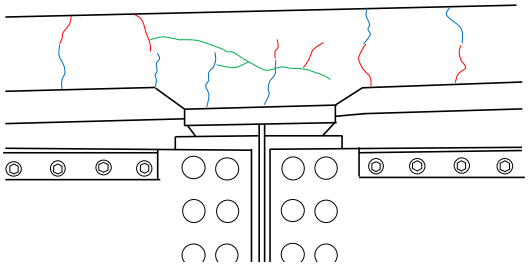
(3) 荷重変位関係

た縮小試験体の載荷実験の結果を示す．この時，水平変

図-4　載荷終了時の縮小試験体

図-5　載荷終了時の大型試験体[1)]

(a)　縮小試験体

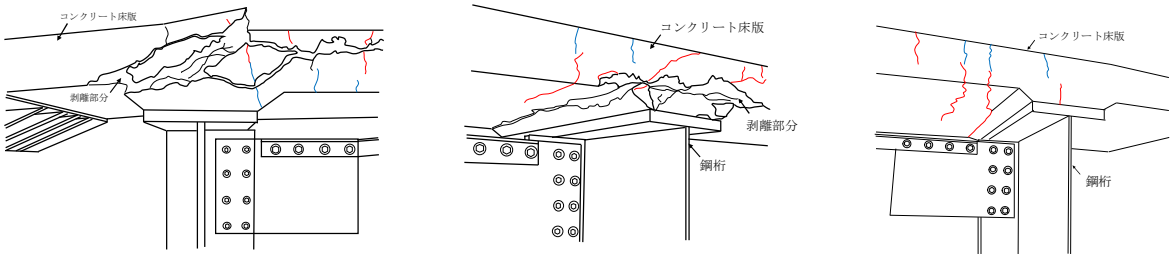


(b)　大型試験体

図-6　縮小試験体と大型試験体における Drift 率 2.0%時の桁IIの損傷状況

(a)　桁I　　(b)　桁II　　(c)　桁III

図-7　縮小試験体の載荷終了時のコンクリート床版の損傷状況



(a)　桁I　　(b)　桁II　　(c)　桁III

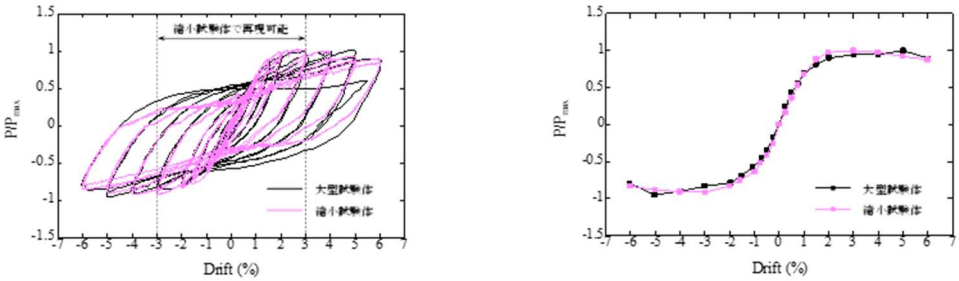
図-8　大型試験体の載荷終了時のコンクリート床版の損傷状況[1)]

(a)　桁I　　(b)　桁II　　(c)　桁III

図-9　縮小試験体のスタッドの変形状況

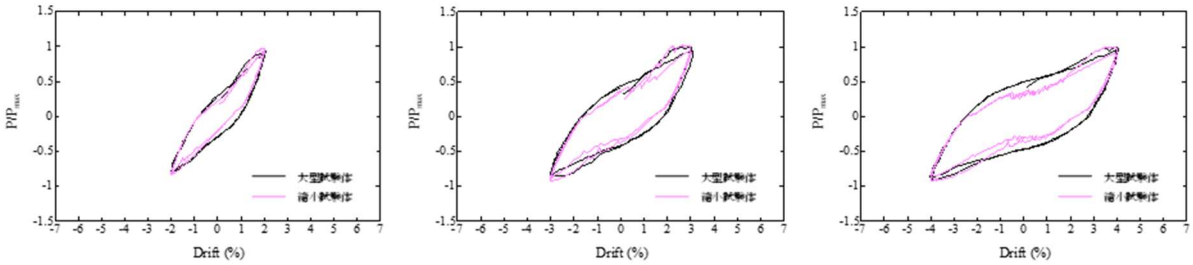
図-10に大型試験体の載荷実験結果[1)]と本研究で実施し

位 δ は Drift 率とし，水平荷重 P は最大耐力 Pmax にて除



(a)　履歴曲線　　(b)　崩落線

図-10　大型試験体実験と縮小試験体実験の比較



(a)　Drift±2.0%　　(b)　Drift±3.0%　　(c)　Drift±4.0%

図-11　無次元化した各 Drift 率時の大型試験体と縮小試験体の履歴曲線

している．なお，大型試験体の最大耐力 Pmax は Drift 率 4.0%時に 134.6kN であり，縮小試験体の最大耐力は Drift 率 3.0%時に 38.6kN である．この結果より，Drift 率が±2.0%，3.0%，4.0%の時の大型試験体と縮小試験体の履歴挙動を比較したものを図-11 に示す．大型試験体，縮小試験体の両者は±3.0%まで耐力，履歴曲線の形状は良く一致している．しかし，±4.0%以降になると，耐力は一致しているが，縮小試験体の履歴曲線の形状が大型試験体と比べて逆 S 字型の挙動を示すことが分かった．履歴挙動が逆 S 字型となる原因としては，横方向のひび割れ面を境に，それより上側のスタッドのみで水平力を受けて変形し，下側はそれに遅れて変形していたためと考えられる．

3.　ファイバー要素解析モデルの検討

本章では，載荷実験の荷重変位関係を再現できるファイバー要素モデルを構築する．ここでは，大型試験体のファイバー要素解析モデルを構築し，パラメトリック解析により要素分割数について検討を行った．その上で，構築した解析方法を縮小試験体に適用し，大型試験体と縮小試験体の実験結果の差異について検討した．

(1)　大型試験体の解析モデル

図-12 にファイバー要素を用いて作成した解析モデルを示す．一般的に，ファイバー要素で上部構造をモデル化する場合，橋軸方向にファイバー要素を用いる 2)，4) が，本解析では橋軸直角方向にファイバー要素を用いている．鋼 I 桁は補剛材を考慮した断面とし，コンクリート床版は鉄筋を考慮したファイバー断面とした．また，各桁の下部はピン支点としてモデル化している．

図-13 にコンクリートの応力－ひずみ関係を示す．コンクリートの材料特性には非線形性を考慮でき，圧縮強度の 10 分の 1 程度の引張強度を考慮した Hoshikuma モデルを用いた 5)．コンクリートの圧縮強度は既往の材料試験の結果 1)より 34.1N/mm2 とした．図-14 に鋼材の応力－ひずみ関係を示す．全ての鋼材は 2 次勾配を弾性係数の 1.0%程度とするバイリニアモデルとした．鋼材の降伏強度は，既往の実験で用いられた鋼種の規格より，鉄筋は 295N/mm2，上下弦材は 245N/mm2，その他鋼材は 315N/mm2 とした．繰返し載荷は，縮小試験体の載荷実験と同様に，1.0%までは±0.25%ずつ，2.0%までは±0.5%ずつ，それ以降は±1.0%ずつ変動させた（図-3）．

(2)　要素分割数に関するパラメトリック解析

ここでは，コンクリート床版と上下弦材の要素分割数について検討する．コンクリート床版は 1，5，10 分割の 3 パターンで行った．この結果を図-15 に示す．1 分割の場合，最大耐力が大型試験体の実験結果と大きく異なっている．5 分割，10 分割の場合，最大耐力と履歴曲線の形状がともに一致する結果となった．5 分割，10 分割を比べた場合，10 分割の方が大型試験体の結果と近くなったため，コンクリート床版の分割数は 10 分割とすると大型試験体の実験結果を良く再現できる．一方，鋼桁の分割数についても検討を行ったが，鋼桁については

分割数の影響がなかったため割愛する．

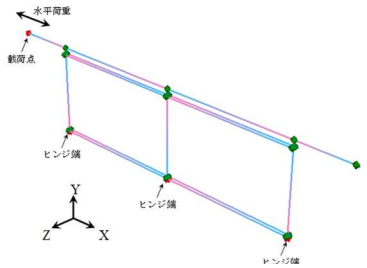


図-12　解析モデル

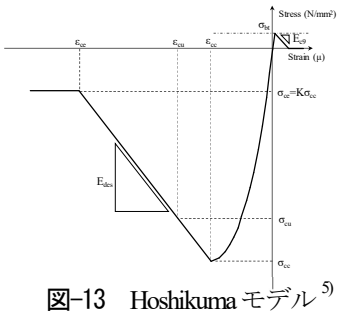


図-13　Hoshikuma モデル[5)]

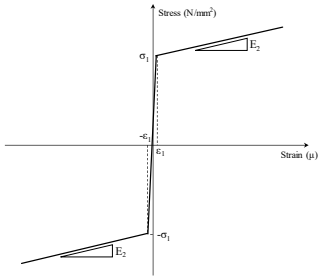
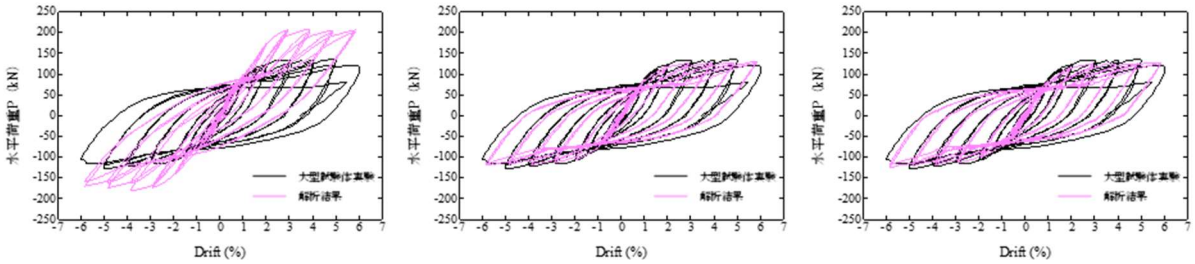
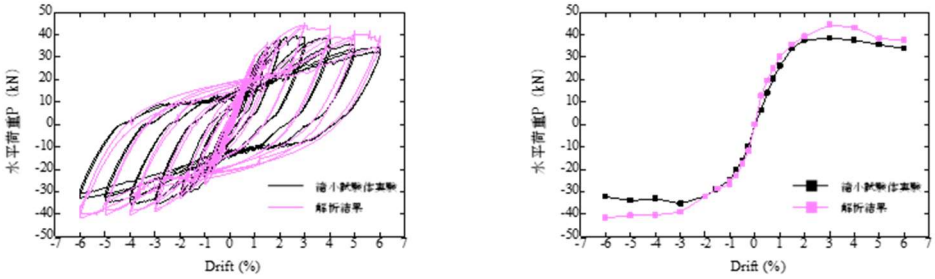


図-14　バイリニアモデル



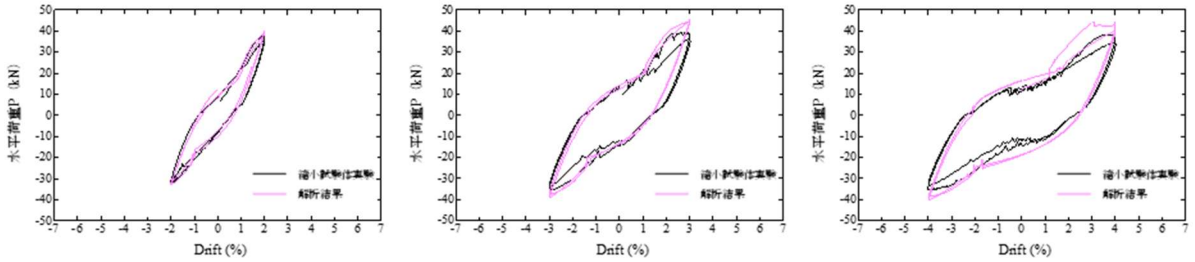
(a)　1 分割　　(b)　5 分割　　(c)　10 分割

図-15　コンクリート床版と上下弦材の要素分割数の比較



(a)　履歴曲線　　(b)　包絡線

図-16　縮小試験体実験の結果とファイバー要素解析結果の比較



(a)　Drift±2.0%　　(b)　Drift±3.0%　　(c)　Drift±4.0%

図-17　各 Drift 率時の解析と実験の履歴曲線

(3)　縮小試験体の解析的検討による大型試験体との差異に関する考察

前節でパラメトリックに検討し提案した要素分割数で縮小試験体のファイバー要素解析を行った．ここでは鋼桁の要素分割数は 4 分割とし解析を行った．図-16，図-17 に解析結果と縮小試験体の載荷実験の履歴曲線および包絡線と，各 Drift 率における履歴曲線の形状の比較を示す．解析結果と縮小試験体の実験結果を比較すると，正側の初期剛性が解析の方が大きくなったが，負側の初期剛性は一致し，Drift 率が±2.0%までは各 Drift 率に対する水平荷重 P も比較的一致した．また，Drift 率±3.0%では最大耐力は異なるものの履歴形状は概ね一致したが，Drift 率±4.0%では縮小試験体実験においてハンチ部での損傷が影響を及ぼし，ハンチ部の損傷が比較的考慮されていないファイバーモデルでは再現できないことがわかる．これより，解析的にも縮小試験体における大型実験

との差異については，ハンチ部での損傷に起因したものであったと判断できる．

4. まとめ

最本研究では，今後の鋼上部構造に関する研究を進める上で不可欠となる大型構造物の再現性の高い縮小試験体と解析モデルを構築することを目的とし，縮小試験体の載荷実験とファイバー要素解析モデルの構築を行った．その成果を以下にまとめる．

1) 本研究の縮小試験体は大型試験体の最大耐力までの履歴曲線の形状を良く再現できた．また，各 Drift 時の最大耐力はよく一致した．ただし，最大耐力以降の再現性は低いが，ハンチ部の再現性を高めることで，更なる精度向上が期待できると考えられる．
2) ファイバー要素解析モデルの要素分割に関するパラメトリック解析により，大型試験体の実験結果を良く再現できる鋼桁とコンクリート床版の要素分割数を提案した．
3) 提案した要素分割数を基に縮小試験体のファイバー要素解析を行い，Drift 率±3.0%までは縮小試験体の実験値を再現できること，並びに解析的にも縮小試験体における大型実験との差異は，ハンチ部での損傷に起因していることが明らかとなった．

参考文献

1) Bahrami, H., Itani, A. and Buckle, I. : Guidelines for the seismic design of ductile end cross frames in steel girder bridge superstructures, Center for Civil Engineering Earthquake Research, UNR, Report No. CCEER 09-04 , July.2010.
2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書（耐震設計編），丸善，pp.50-63，2008.
3) California Department of Transportation : Steel Girder Bridge Design Example，2007.
4) 日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震設計の現状と信頼性向上，JSSC テクニカルレポート No.93，2011.
5) Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A.W. : Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers，J. struct. Enginnering，ASCE，Vol.123, No.5，pp.624-633，1997.

(2017. 9. 8 受付)

DEVELOPMENT OF SMALL-SCALED STEEL SUPERSTRUCTURE MODEL FOR EXPERIMENTAL LOADING TEST

Koji KINOSHITA, Takahiro IWATA and Kazuma INOUE

This study aims to develop an experimental small-scaled model of the steel superstructure that can agreed well with the large-scaled model developed in previous study. This study focuses on the reproduction of a small-scaled model, which can be capture the strength and deformation of large-scaled model. A 0.24-scaled model, which is scaled from a full-scaled structure and is 0.57 scaled of large-scaled model in the previous study, was made in this study, and its cyclic loading test was conducted. In addition, this study investigates analytical models and validate the analytical models through the comparison between experimental and analytical results.