

論文 鋼管・コンクリート複合構造橋脚のせん断挙動解析

天野 修*¹ 中村 光*² 檜貝 勇*³ 田中浩一*⁴

要旨：鋼・RC・付着部を個別に考慮した有限要素法プログラムにより、鋼管・コンクリート複合構造物のせん断挙動を解析的に評価することを試みた。まず、RC要素と鋼要素が鉛直方向と水平方向のパネで連結されているという付着モデルを鋼管の付着実験に適用し、付着応力-すべり関係の同定を行った。次に、対象とする複合構造橋脚のせん断破壊実験の評価を試み、解析的にそのせん断挙動が正確に再現できることを示した。さらに、付着強度および高強度 PC ストランドを要因とした解析を行い、そのせん断耐力に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード：合成構造、せん断挙動、付着特性、有限要素解析

1. はじめに

近年、高耐震性、経済性、省力化、急速施工性という性質を兼ね備えた鋼・コンクリート合成構造が大きな注目を集めている。

しかし、そのような合成構造は新しい構造形式であるために、その力学的挙動は必ずしも明らかになっていない。また、合成構造の力学的挙動は、従来、主に実験的に検討されてきたが、今後のより広範な適用のためには、解析的にその力学的挙動を評価することが望まれると考えら

れる。そこで、本研究では合成構造の一例である鋼管・コンクリート複合構造橋脚¹⁾を取り上げ、そのせん断挙動の解析的評価を試みた。

2. 解析概要

2.1 材料モデル

解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ関係を図1に示す。圧縮領域においては最大圧縮応力(f_c)までを二次曲線とし、その後、直線的に応力が零まで減少するモデ

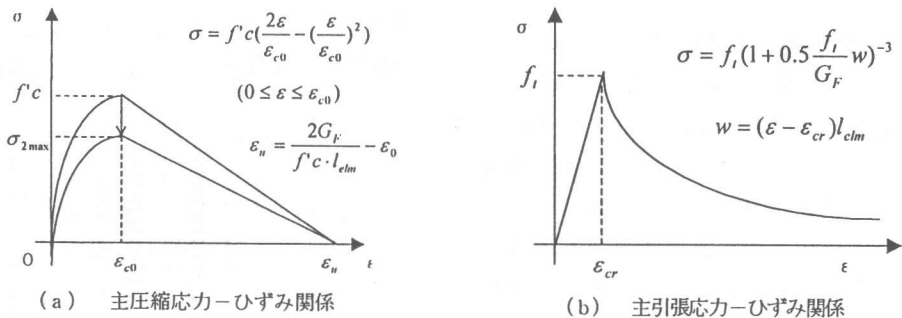


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

- | | | | |
|-----|---------|------------------|-------|
| * 1 | 山梨大学大学院 | 工学研究科土木環境工学専攻 | (正会員) |
| * 2 | 山梨大学助教授 | 工学部土木環境工学科 工博 | (正会員) |
| * 3 | 山梨大学教授 | 工学部土木環境工学科 工博 | (正会員) |
| * 4 | (株)大林組 | 技術研究所 土木第四研究室、工修 | (正会員) |

ルを用いた。ここで、最大圧縮応力は Collins らの提案した式に従い主引張ひずみにより低減させた。また、応力零時のひずみ (ϵ_u) は圧縮破壊エネルギー ($G_F = 0.015f_c$) を考慮して決定した²⁾。一方、引張領域においては、最大引張応力 (f_t) までは直線的に応力が増加すると仮定し、最大引張応力後は軟化特性と破壊エネルギーを考慮した、応力-ひび割れ幅関係より応力を求める-3乗モデル³⁾を用いた。ここで、破壊エネルギーの値には 150N/m を設定した。破壊エネルギーを考慮したモデルを用いる場合、要素の等価長さ (l_{elm}) が必要となるが、本解析では圧縮・引張とも要素の対角線を等価長さとして用いた。鉄筋の材料モデルは、降伏点以降の剛性を零とした完全弾塑性モデル、鋼管の材料モデルは2次元の挙動を扱うために Von Mises の降伏基準を考慮したモデルとした。材料定数には実験供試体¹⁾より得られた値を用い、鋼管のポアソン比は 0.3 とした。

ひび割れたコンクリートは、回転ひびわれモデルによりモデル化した。回転ひびわれモデルを用いれば、RC 梁の場合にはそのせん断破壊挙動を概ね評価できることが明らかになっている。⁴⁾

2.2 モデル化および解析方法

鋼管・コンクリート複合構造橋脚の解析を行う場合、鋼管の影響が非常に大きいと予想されるため、図 2 に示すように鉄筋コンクリートと鋼管を独立した要素として個別にモデル化を行った。この時、鉄筋コンクリートと鋼管を独立と考えると、両者の挙動を関係づけるモデルが必要となる。そこで図に示すように RC 要素と鋼管要素が、RC と鋼管とのすべり挙動と剥離挙動を表す2方向のバネ要素で連結されているというモデル化を試みた。バネ要素の特性については、3章に示す付着試験の結果を

解析により精度良く表せるように同定することで求めた。なお、鋼管を配置することによりコンクリートの断面積が減少するが、これに対しては図 2 に示すように鋼管位置の RC 要素の面積を単純に減少させて対応した。

解析は二次元平面応力場問題として扱い、RC 要素、鋼管要素には四辺形アイソパラメトリック要素を用いた。非線形求解法は、変位制御の増分解析とし、Newton-Raphson 法に基づく収束計算を行った。

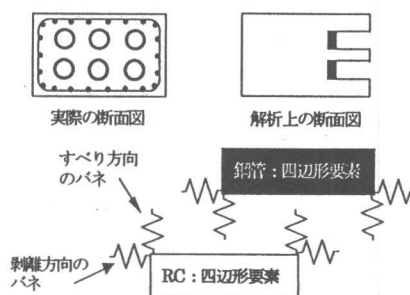


図-2 解析モデル

3. 鋼管とコンクリートの付着特性

3.1 実験概要

鋼管とコンクリートの付着特性を調べるため、図 3 に示すような鋼管の押し抜き、引き抜き実験を行った。鋼管 ($f_y = 274\text{MPa}$) の厚さは 3.5mm で、鋼管の内

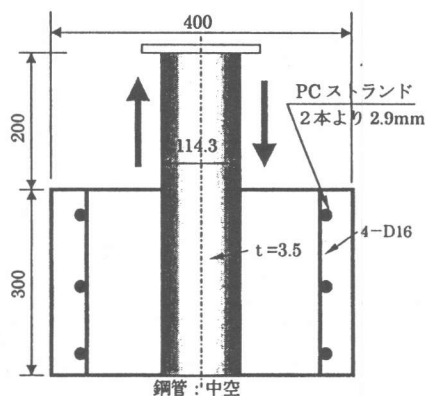


図-3 付着強度試験概略図

部は非充填とした。載荷は、押し抜き、引き抜きとも単調載荷で行った。なお、コンクリートの強度は $f_c=44.7\text{MPa}$ である。

3.2 付着モデル

実験より得られた荷重－変位関係を再現できるようにバネ要素の材料モデルを同定した。同定した付着応力－すべり関係は、図4に示すように最大付着応力後、徐々に付着応力が低下するモデルである。ここで、 S_0 は最大付着応力時のすべり量(0.043mm)で、 $\tau_{\max}$ は最大付着応力である。 $\tau_{\max}$ の値は押し側で2.4(MPa)、引き側で1.4(MPa)とし、押し側と引き側で異なる値を与えた。一方、接触力－接触量関係は、剥離方向に対しては常に零とし、接触方向ではコンクリートの初期剛性の反力が作用するモデルを仮定した。同定したモデルを用いた解析結果と実験結果の比較を図5に示す。図において直線が解析値、破線が実験値を示すが、解析値と実験値は概ね一致しているのが分かる。

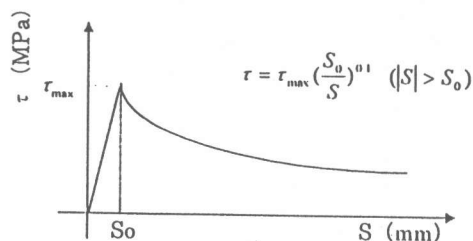


図4 付着応力－すべり関係

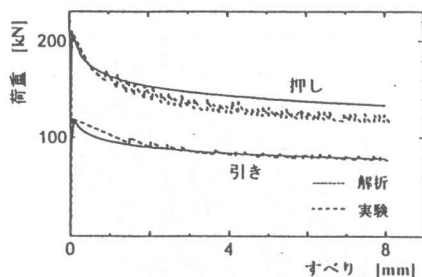
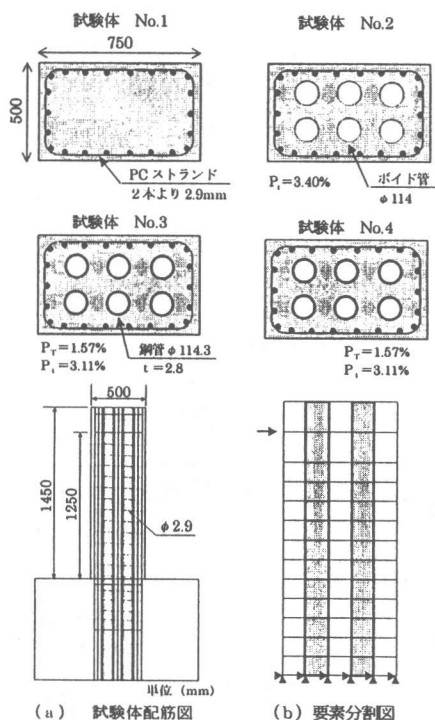


図5 荷重－すべり関係

4. 鋼管・コンクリート複合構造のせん断挙動解析

4.1 実験概要¹⁾

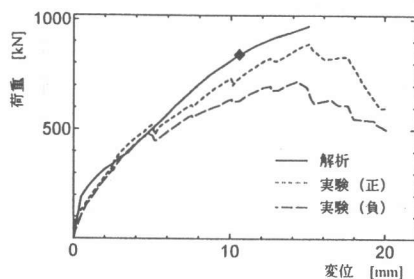
試験体形状寸法と配筋状況を図6に示す。試験体は断面高さ 50cm、断面幅 75cm、高さ 145cm、せん断スパン比 2.5 の単一柱部材であり、主鉄筋として高強度鉄筋(ゲビンデスタープ D26 B 種)を用い、せん断補強筋として高強度 PC ストランドをスパイラル状に配筋したものである。試験体 No.1、No.2 はそれぞれ高強度 PC ストランド、ボイドの影響を見るための部材である。一方、試験体 No.3、No.4 は、せん断補強筋量の異なった鋼管・コンクリート複合構造であり、No.3 は 0.014%、No.4 は 0.04%である。



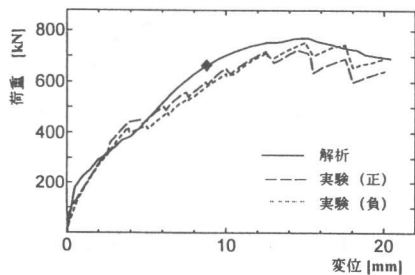
図－6 試験体形状寸法

4.2 実験結果との比較

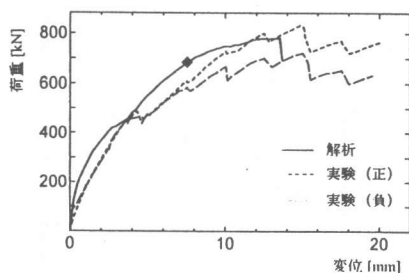
図6に示す要素分割図を用いて得られた各試験体における解析値と実験値の荷重－変位関係の比較を図7に示す。ここで、実験は正負繰り返し載荷で行われたため、正



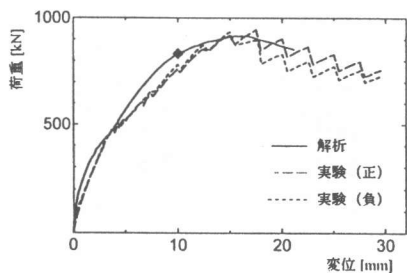
(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.3



(d) 試験体 No. 4

図-7 荷重-変位関係

負側両方の包絡線を実験値として示した。図中、実線は解析値、破線および点線は実験値を示しており、◆印は解析における PC ストランドが、引張試験より得た PC ストランドの降伏ひずみ (10444×10^{-6}) に達

した時点を示している。いずれの試験体に対しても、解析値は実験値の荷重-変位関係を妥当に評価している。このことは鋼管の影響、ボイドの影響、高強度 PC ストランドの影響のいずれも本解析により概ね再現できることを意味していると考えられる。また、解析では PC ストランドが降伏した後に最大荷重に至ることが示された。図 8 は試験体 No.4 に対して最大荷重時における部材高さ方向の PC ストランドのひずみを比較したものである。図によれば解析値は実験値よりひずみを大きく算出しているが、部材高さ方向に対するひずみ分布傾向およびひずみが卓越している箇所は一致していることが分かる。また、試験体 No.4 におけるひび割れ状況を図 9 に示すが、実験・解析ともせん断ひび割れが卓越するとともに、鋼管に沿ったひび割れの進展が顕著であるのが分かる。

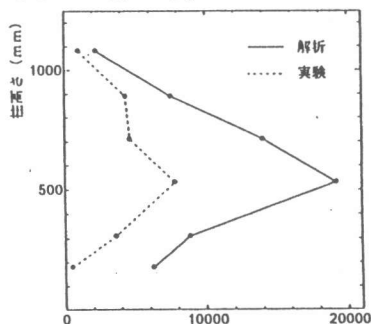


図-8 ひずみ分布の比較

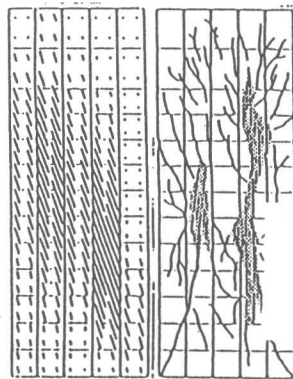


図-9 ひび割れ状況の比較

4.3 せん断力負担割合の変化

試験体 No.4 に対して、PC スtrand、鋼管、コンクリートのせん断力負担割合の変化を求めた結果を図 10 に示す。ここで、PC スtrandの負担分は、解析により得られた斜めひび割れの角度および PC スtrandの応力を用いてトラス理論で求め、鋼管の負担分は、せん断応力に鋼管の断面積を乗ずることで算出した。コンクリートの負担分については、全体の耐力から PC スtrandと鋼管の負担分を差し引いたものとした。図によれば斜めひび割れが発生するまでは PC スtrandおよび鋼管の負担割合は小さいが、それ以降は両者の負担割合が急激に増加している。一方、斜めひび割れ発生以降では、コンクリートの負担分はほとんど増加していないのが分かる。最大荷重時におけるせん断力負担割合は、PC スtrandが全体の約 40%、鋼管が約 15%、コンクリートが約 45%となり、対象とした部材の場合、全体の約 2 割程度のせん断力を鋼管が負担することが分かる。

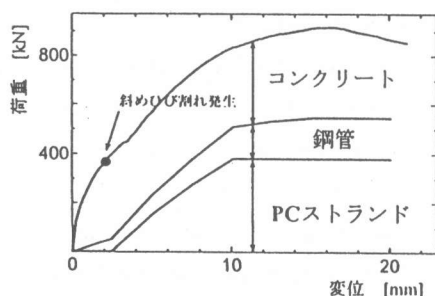


図-10 せん断力負担割合の変化

5. せん断耐力に及ぼす各種要因の影響

5.1 付着強度の影響

鋼・コンクリート合成構造の場合、鋼管とコンクリートの付着がせん断耐力に大きく影響すると考えられるため、試験体 No.4 に対して鋼管とコンクリートの最大付着応力を変化させた解析を行った。図 11 に

いて 1 が完全付着を仮定した場合で、2,3,4,5 の順に引張側最大付着応力を 10.0MPa、2.50MPa、1.40MPa、0.50MPa と仮定した場合である。また、4 は実験試験体の解析に用いた値である。圧縮側最大付着応力については、引張側最大付着応力との比が一定 (12 : 7) となるように設定した。図によれば最大付着応力が大きくなるにつれてせん断耐力が増加することが分かる。また、完全付着を想定したケースでは耐力が非常に大きくなっており、本論文で対象としたような構造物を解析する際には、鋼管とコンクリートの付着モデルを適切に与える必要があることが明らかに示された。

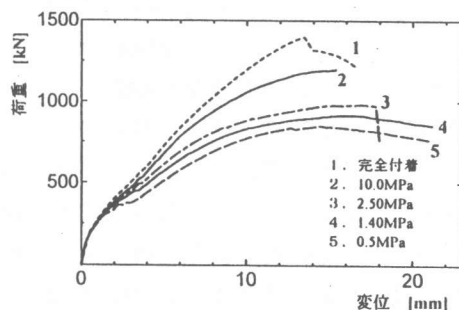


図-11 付着強度の影響

5.2 高強度 PC スtrandの影響

試験体に用いられた PC スtrandは鉄筋に比べ強度が非常に高い。そこで高強度材料がせん断耐力に及ぼす影響を調べるために、PC スtrandの強度、量をパラメータとした解析を行った。

鋼管の無い試験体 No.1 に対して、PC スtrandの降伏強度をパラメータとして行った解析結果を図 12 に示す。このとき、PC スtrandがその強度を十分に発揮できるかが懸念されたが、図を見ると強度が高くなるにつれてせん断耐力も大きくなるのが分かる。また、今回の実験で用いた 1852MPa の場合と 2500MPa を仮定した場合ではほぼ耐力について差がなく、ある

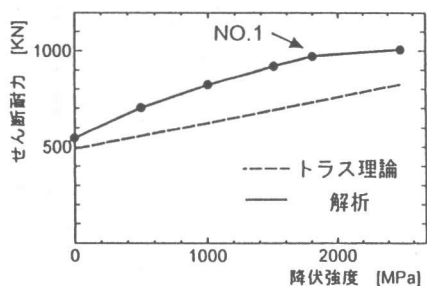


図-12 降伏強度とせん断耐力の関係

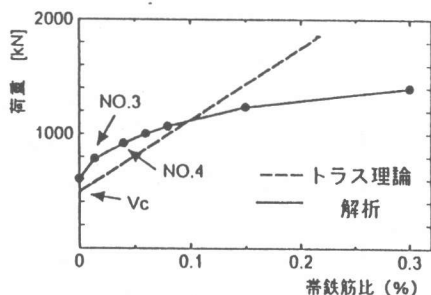


図-13 帯鉄筋量の影響

程度以上の強度では、せん断耐力が一定となることが示されている。ただし、解析の対象とした諸元では約 2000MPa 以下の強度であれば、全強度を概ね発揮できると考えられる。なお、同図には斜めひび割れの角度を 45 度としたトラス理論により算出した値を併せて示しているが、解析結果は同理論よりもせん断耐力が高くなることが示された。

次に、鋼管のある部材に対して帯鉄筋量をパラメータとして行った解析結果を図 13 に示す。図によれば、帯鉄筋量を増やすとせん断耐力が上がる事が分かる。また、その増加傾向としては線形的ではなく帯鉄筋量が多くなるにつれてその度合いが徐々に緩やかになることが分かり、最終的にはある一定値となることが予想される。

6. 結論

鋼管・コンクリート複合構造物のせん断挙動を解析的に評価し、以下の結論を得た。

1. 鋼管・コンクリート複合構造物を解析するためのモデルとして、鋼管、コンクリート、付着部を個別に考慮した解析手法を開発するとともに、鋼管とコンクリートの付着特性のモデル化を行った。

2. 鋼管・コンクリート複合構造物を解析するためには、付着特性の正確な評価が必要となる。

3. 高強度 PC スtrand の降伏強度またはその量を増加させればせん断耐力も上がるがこれには上限がある。

4. 本解析手法を用いれば、鋼管・コンクリート複合構造橋脚のせん断挙動を解析的に解明することが可能と考えられる。

【参考文献】

- 1) 田中浩一、今泉安雄、渡辺将之、大内一：鋼管・コンクリート複合構造橋脚模型のせん断試験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.2、pp.933-938 1997.6
- 2) Nakamura H. and Higai T. : Fracture Zone and Fracture Energy of Concrete under Uniaxial Compressive Stress, Int. Conf. on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century, pp.D105-D110, Nov.20-23, 1996, Bangkok, Thailand
- 3) Hillerborg A. : Stability Problems in Fracture Mechanics Resting, Fracture of concrete and Rock, Elsevier Applied Science, pp.369-378, 1989
- 4) 山谷敦、中村光、飯塚敬一、檜貝勇：回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、pp.359-364, 1996.6