

樹脂材料を充填する柔な鋼管構造の動力的挙動とその耐震性能評価

Dynamic behavior of flexible resin material filled steel tube and its seismic performance evaluation

大分工業高等専門学校 都市・環境工学科 准教授 名木野 晴暢

(研究計画ないし研究手法の概略)

[1] 研究の概要

コンクリート充填鋼管 (Concrete Filled Steel Tube) 構造は、鋼材とコンクリートを組み合わせた複合構造の一種で、鉄骨構造 (S構造)、鉄筋コンクリート構造 (RC構造)、鉄骨鉄筋コンクリート構造 (SRC構造) に次ぐ、第4の構造として注目されている。CFT構造は、鋼管のみの場合に比べて高い耐震性が期待できる。しかし、コンクリートは脆性材料であるため、高いエネルギー吸収性能や振動吸収性能は、あまり期待できないように思われる。また、構造物への入力エネルギーが設計時の予想を上回るなど、何らかの原因によってコンクリートが脆性破壊を起こした場合には、局所的に耐力が低下する可能性がある。さらに、CFT構造の体積に占めるコンクリートの割合からその自重は大きくなるため、その軽量化も課題の一つであろう。

このような背景から、本研究では、コンクリート充填鋼管構造 (以下、CFT構造と略す) よりも軽量で柔な新しい鋼管構造を開発し、これを一般住宅などの柱部材として応用することを目標としている。研究目標を達成させる第一歩として、助成を受けた本研究では、軟質な樹脂材料を充填する鋼管構造 (以下、樹脂充填鋼管構造と略す) の動力的挙動とその耐震性能を評価することを目的としている。

[2] 研究手法の概要

樹脂充填鋼管構造の耐震性能を評価するためには、その基礎的な情報である固有周期と、これに対応する固有振動モードを明らかにする必要がある。また、樹脂充填鋼管構造は、波動の分散性が表れてくると考えられる。そこで、まず、理論解析的手法と数値実験的手

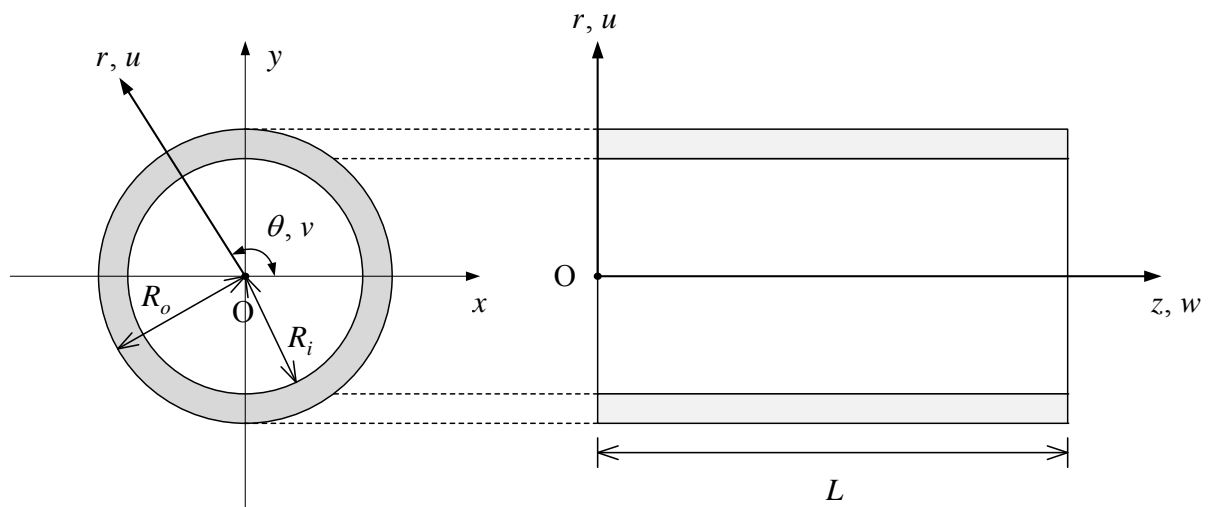


図-1 樹脂充填鋼管構造

法を用いて、樹脂充填鋼管構造の波動分散特性と自由振動特性を明らかにする。また、鋼管構造およびCFT構造の波動・振動特性と比較することで、樹脂充填鋼管構造の基礎的な耐震性能を評価する。

樹脂充填鋼管構造と円筒座標系 (r, θ, x) を図-1に示す。ここで、 $u(r, \theta, x, t)$, $v(r, \theta, x, t)$, $w(r, \theta, x, t)$ は、それぞれ、円筒構造の r, θ, x 方向の変位成分であり、 t は時間変数である。本研究では、樹脂充填鋼管構造を2層同心円筒体として取り扱う。鋼管は図の灰色の部分の中実円筒体とし、その外径を R_o 、内径を R_i 、長さを L で表す。図の白色の部分の中実円筒体が鋼管に充填する材料を意味している。中空円筒体の厚さは、樹脂充填鋼管構造の動力学的特性に大きく影響する。本研究では、文献1)～文献4)を参考にして、内径－外径比 R_i/R_o を0.98(薄肉)と0.90(中等厚)の2ケースに設定した。なお、鋼管の縦弾性係数、ポアソン比および密度は、それぞれ、 E_s, ν_s, ρ_s で表す。充填材料のそれらも同様に表すこととし、 E_f, ν_f, ρ_f は、それぞれ、充填材料の縦弾性係数、ポアソン比および密度である。鋼管と樹脂材料は、等質・等方な線形弾性体であるとし、これらの運動は微小ひずみである調和振動を仮定する。また、樹脂材料と鋼管は完全密着していると仮定する。

樹脂充填鋼管構造の波動分散特性は、面外慣性の影響を考慮したLoveの理論に基づいて2層同心円筒体の波動方程式を導出し、変位波動を仮定することで波の位相速度と波数の関係式を陽な形式で求めた。その詳細は、紙面の都合により割愛する。

樹脂充填鋼管構造の自由振動特性は、三次元動弾性論に基づいて2層同心円筒体の運動方程式を導出した。しかし、この運動方程式を任意の支持条件下で解くことは困難であるため、これまでに申請者が構築した中空および中実円筒体の自由振動問題の高精度解析手法⁵⁾を2層同心円筒体へ拡張し、樹脂充填鋼管構造の縦振動($n=0$)と曲げ振動($n=1$)に対応する固有周期と固有振動モードを解析した。樹脂充填鋼管構造の支持条件は任意に与えることができるが、本研究では、 $(z=0)$ の面を完全固定し、 $(z=L)$ の面を自由とした片持柱を対象とした。申請者が構築した解析手法の数値解の収束状態は、2層同心円筒体の問題においても良好で、精度の高い上界の結果が得られる。これらの詳細についても、紙面の都合により割愛するが、学術雑誌にて発表する予定である。

数値実験に用いた材料特性値を表-1に示す。また、鋼管の縦弾性係数比 E_s 、ポアソン比 ν_s および密度 ρ_s に対する充填材料のそれら E_f, ν_f, ρ_f の比の大きさも纏めてある。これより、コンクリート(Concrete)と樹脂(Resin)の密度比 ρ_f/ρ_s は0.3~0.2と同程度であるが、コンクリートの縦弾性係数比 E_f/E_s は0.12であるのに対して樹脂のそれは0.02とかなり小さい。他方、樹脂のポアソン比の比 ν_f/ν_s は1よりも大きくなる。

表-1 数値実験に用いた材料特性

	Steel tube	Concrete	Resin
Young's modulus [GPa]	200	23 ($E_f/E_s = 0.115$)	3 ($E_f/E_s = 0.015$)
Poisson's ratio	0.30	0.20 ($\nu_f/\nu_s = 0.667$)	0.37 ($\nu_f/\nu_s = \mathbf{1.233}$)
Density [kg/m ³]	7,850	2,350 ($\rho_f/\rho_s = 0.299$)	1,200 ($\rho_f/\rho_s = 0.153$)

最後に、樹脂充填鋼管構造の静的圧縮試験と縦振動実験を行い、そのエネルギー吸収特性について考察した。図-2に実験に使用した試験片の形状を示す。試験片の外径は20.6 mm、

長さ100 mmである．試験片の中空円筒体の材料は，アルミニウム合金 (A6063TD-H14) とした．中空円筒体に充填する材料は，その軟質性の影響を調べるために，シリコーンゴム (KE-103とKE-118) を使用した．また，試験片の厚さは0.3 mmと非常に薄いため，軸圧潰時に薄肉部先端が巻き上がるのを防ぐために円筒体の両端にリブを設けた形状とした．

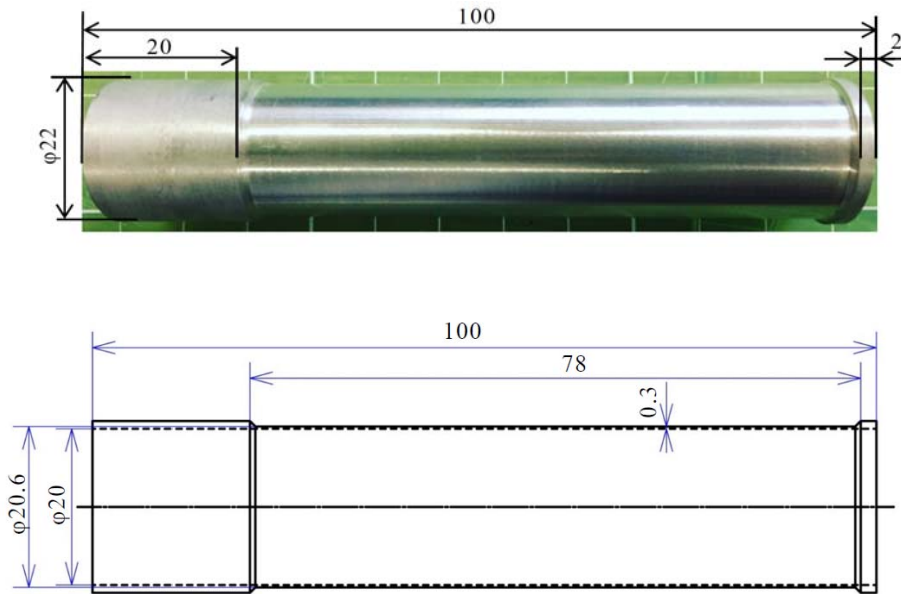


図-2 試験片の形状 (単位: mm)

(実験調査によって得られた新しい知見)

[1] 2層同心円筒体の縦波の分散特性

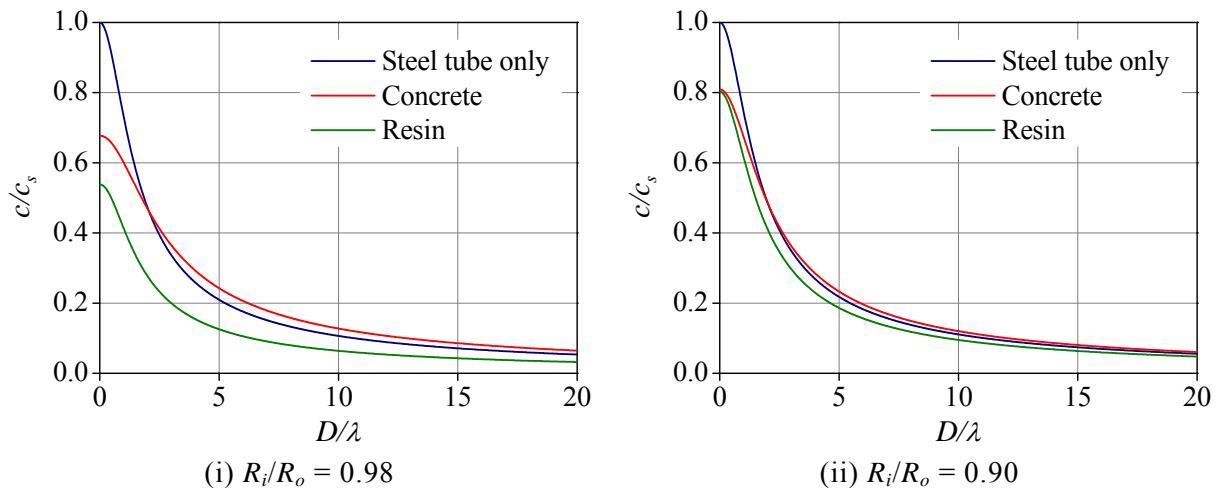


図-3 2層同心円筒体の縦波の分散特性

2層同心円筒体の縦波の分散特性を図-3に示す．ここで， c_s は鋼管の位相速度， $D (= 2R_o)$ は直径であり， $\lambda (= 2\pi)$ は波長である．図-3の(i)は， $R_i/R_o = 0.98$ である無限長さを有する中空円筒体の縦波の位相速度 c/c_s と直径一波長比 D/λ との関係を表したものである．図中の

Steel tube onlyは鋼管のみの結果，Concreteはコンクリートを充填した鋼管の結果，Resinは樹脂を充填した鋼管の結果を意味している．これより， R_i/R_o に関わらず，波長 λ に対して直径 D が大きくなると， c/c_s は曲線的に減少する．ここで， $R_i/R_o = 0.98$ に着目すると， $D/\lambda < 2$ の範囲では，位相速度 c/c_s の大きさは，Steel tube only $>$ Concrete $>$ Resin であるが， $D/\lambda \geq 2$ の範囲では，Steel tube onlyとConcreteの位相速度 c/c_s に大きな差が見られなくなる．他方， $R_i/R_o = 0.90$ でも同様の傾向を示しているが，ConcreteとResinの結果の差異は $R_i/R_o = 0.98$ よりも小さくなる．これらの結果より，2層同心円筒体の縦波の分散特性には R_i/R_o が影響し，薄肉中空円筒体であれば充填材料の特性の効果が表れることがわかる．

[2] 2層同心円筒体の最小振動数

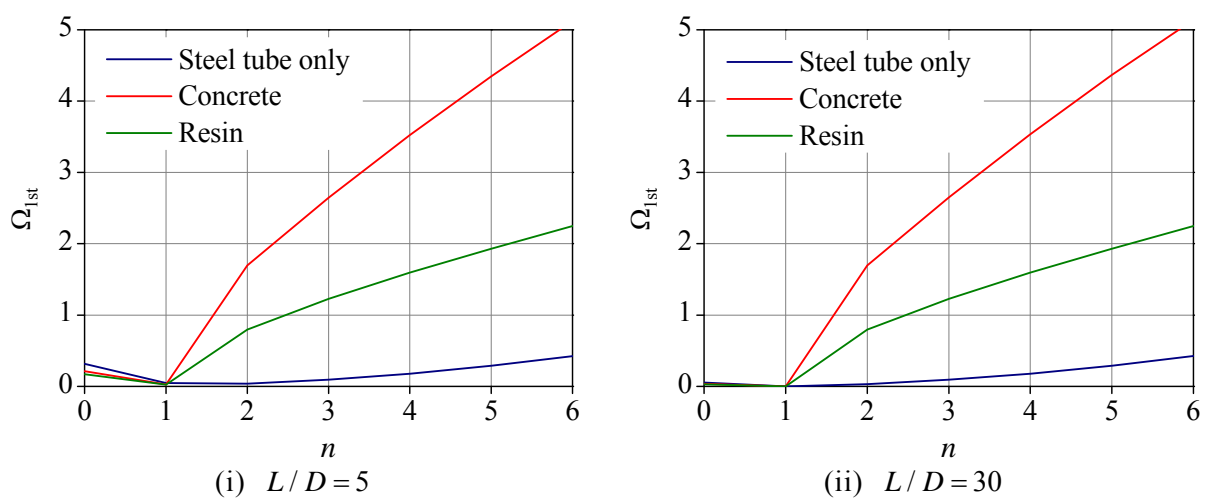


図-4 2層同心円筒体の最小振動数： $R_i/R_o = 0.98$

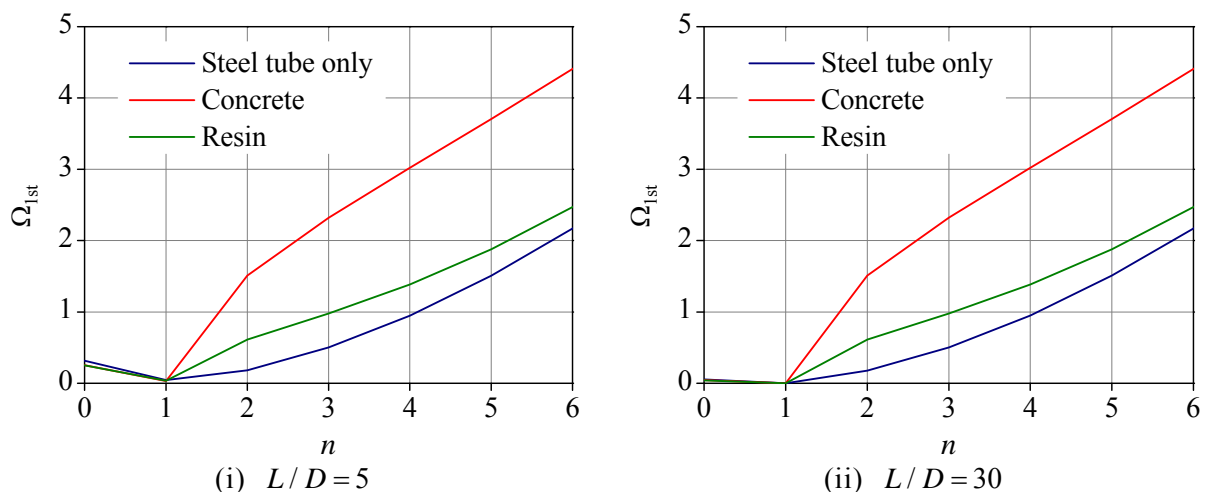


図-5 2層同心円筒体の最小振動数： $R_i/R_o = 0.90$

図-4と図-5には，それぞれ， $R_i/R_o = 0.98$ と $R_i/R_o = 0.90$ である2層同心円筒体の1次の無次元振動数 Ω_{1st} に与える円周方向の波数 n の影響を示した．ここで，無次元振動数 $\Omega = \omega D/c_s$ である．なお， $n = 0$ は縦振動（軸対称振動）， $n = 1$ は曲げ振動に相当し，ねじれ振動は考慮していない．これより，ConcreteまたはResinを充填した鋼管の最小振動数は， R_i/R_o と L/D に関わらず， $n = 1$ の曲げ振動である．また， L/D が大きくなると，縦振動 ($n = 0$) の1

次振動は、曲げ振動 ($n = 1$) のそれに接近してくる。更に、鋼管にコンクリートまたは樹脂を充填したことによる効果により、ConcreteとResinの $n \geq 2$ の振動の振動数はかなり大きくなる。

[3] 2層同心円筒体の縦振動特性

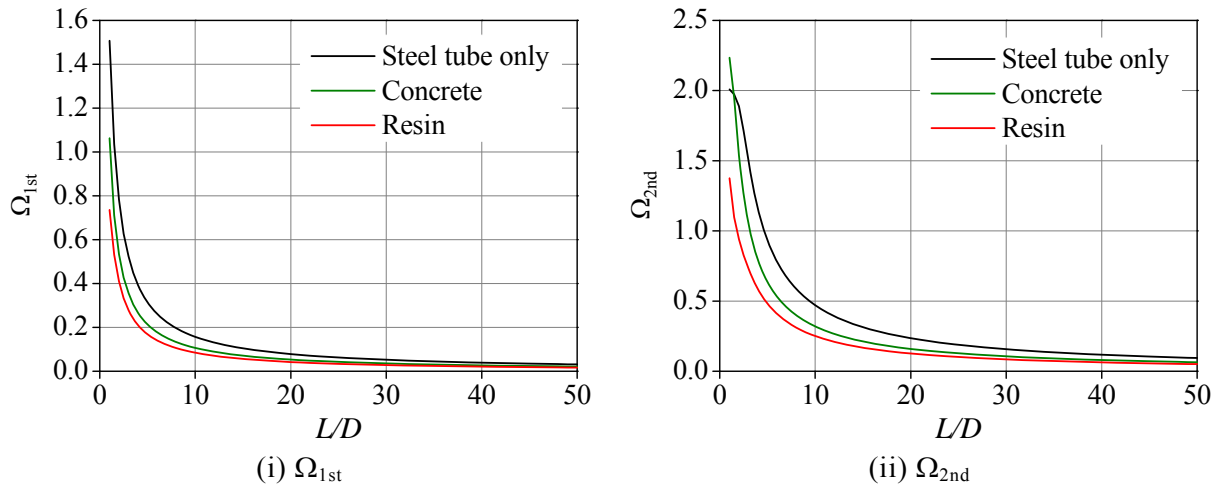


図-6 2層同心円筒体の縦振動特性 : $R_i/R_o = 0.98$

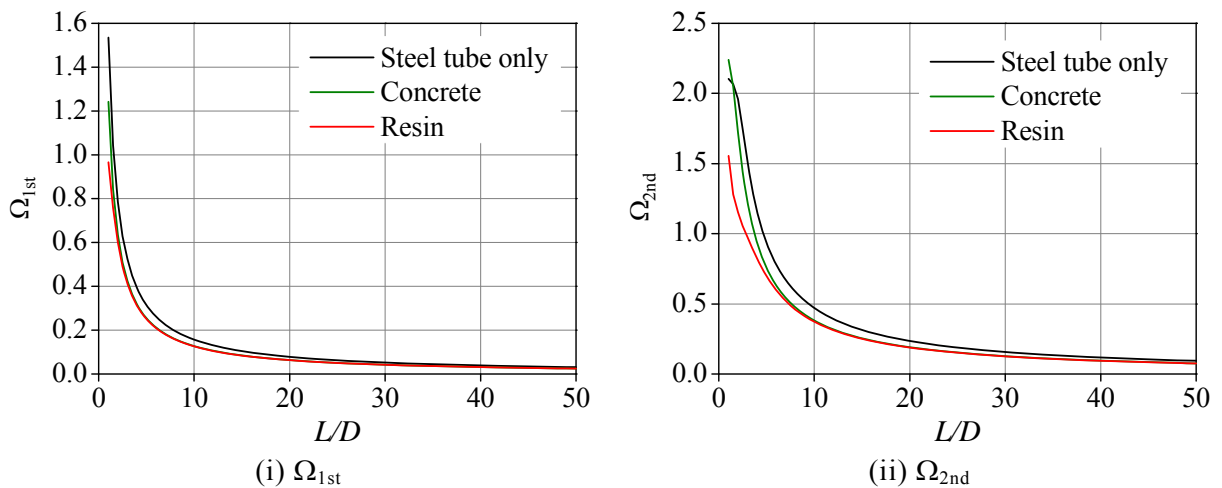


図-7 2層同心円筒体の縦振動特性 : $R_i/R_o = 0.90$

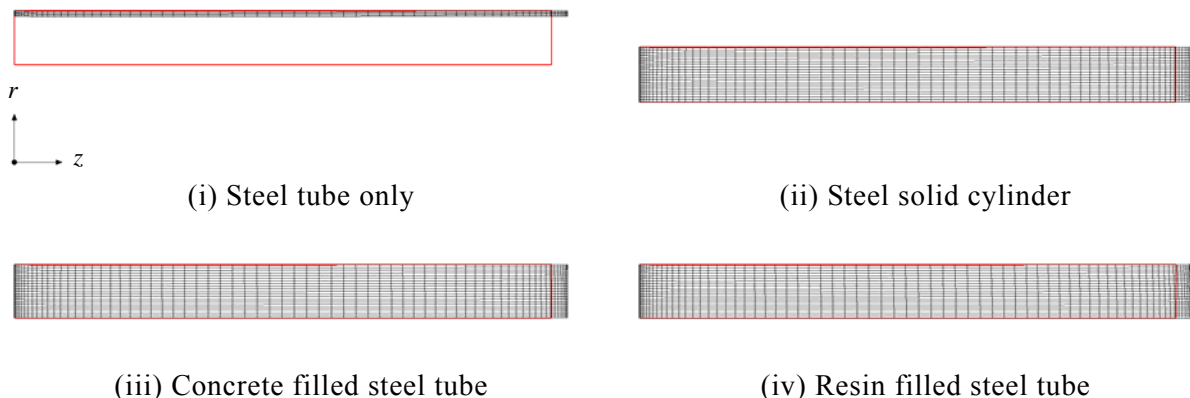


図-8 2層同心円筒体の縦振動1次モード : $R_i/R_o = 0.90, L/D = 5$

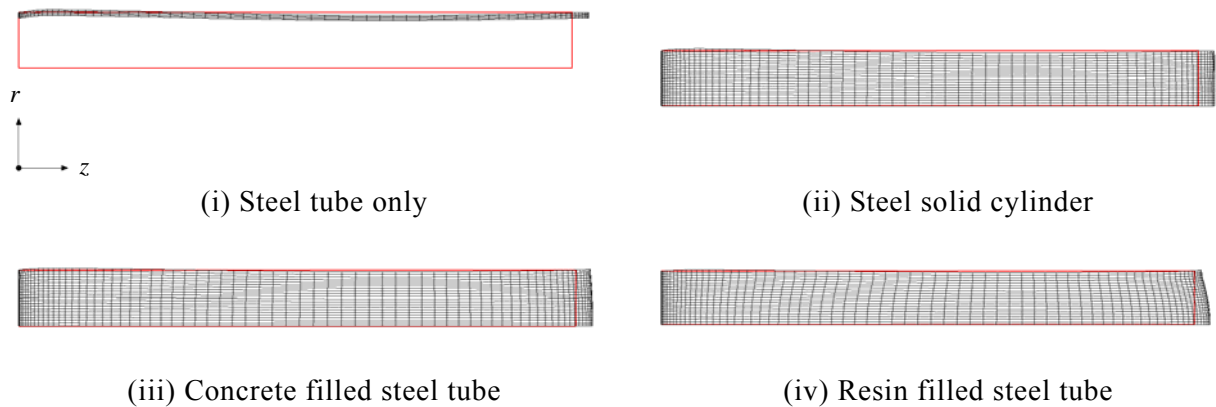


図-9 2層同心円筒体の縦振動2次モード : $R_i/R_o = 0.90, L/D = 5$

図-6は $R_i/R_o = 0.98$ である2層同心円筒体の1次と2次の縦振動特性，図-7は $R_i/R_o = 0.90$ である2層同心円筒体の1次と2次の縦振動特性を示す．また，図-8は $R_i/R_o = 0.90, L/D = 5$ に設定した2層同心円筒体の縦振動1次モード，図-9は縦振動2次モードである．(i)は中空鋼管，(ii)は中実鋼管，(iii)はCFT，(iv)は樹脂充填鋼管を意味する．まず，基本振動 Ω_{1st} に着目すると， R_i/R_o に関わらず， L/D が大きくなるにつれて，Steel tube only, ConcreteおよびResinの振動数の値は曲線的に減少する．鋼管の縦振動特性に与える充填材料と R_i/R_o の影響は， L/D が小さい範囲に表れており， $R_i/R_o = 0.98$ よりも $R_i/R_o = 0.90$ の振動数の方が高くなる． $R_i/R_o = 0.98$ なる薄肉中空円筒体では， $R_i/R_o \leq 20$ の範囲で振動数に与える充填材料の影響が表れているが， $R_i/R_o = 0.90$ では振動数に与える充填材料の影響があまり見られなくなる．また，図-8より，縦振動1次モードに与える充填材料の有無や違いの影響はあまり見られない．他方，2次振動は，基本振動よりも振動数 Ω および振動モードに与える R_i/R_o と充填材料の違いが表れている．しかし， $R_i/R_o = 0.90$ では， $L/D \geq 8$ 程度の範囲になると振動数 Ω に与える充填材料の影響がほとんど見られない．よって，ある程度の長い鋼管であれば，コンクリートと樹脂のどちらを充填しても振動数は変わらない可能性がある．

[4] 2層同心円筒体の曲げ振動特性

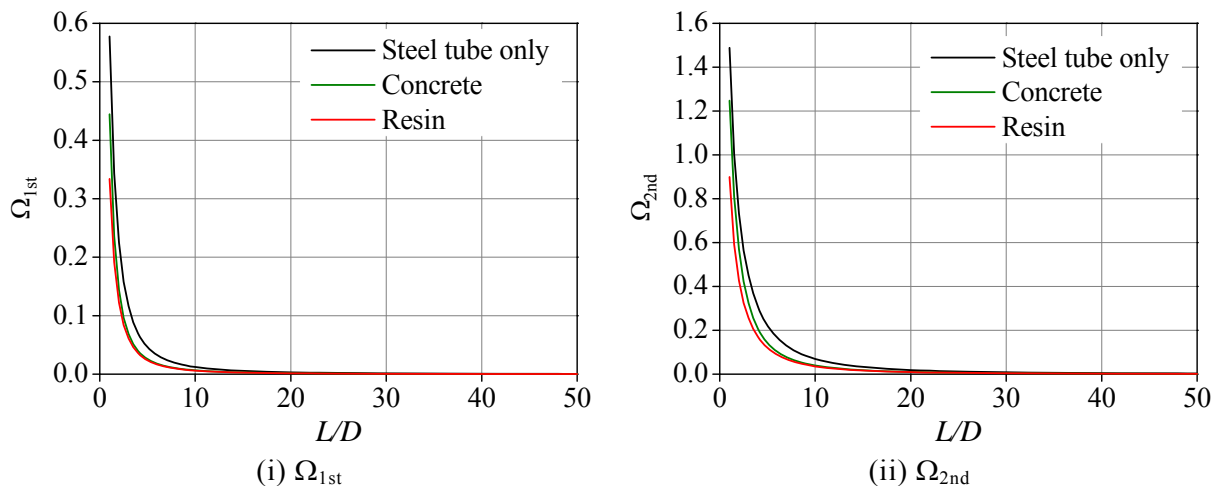
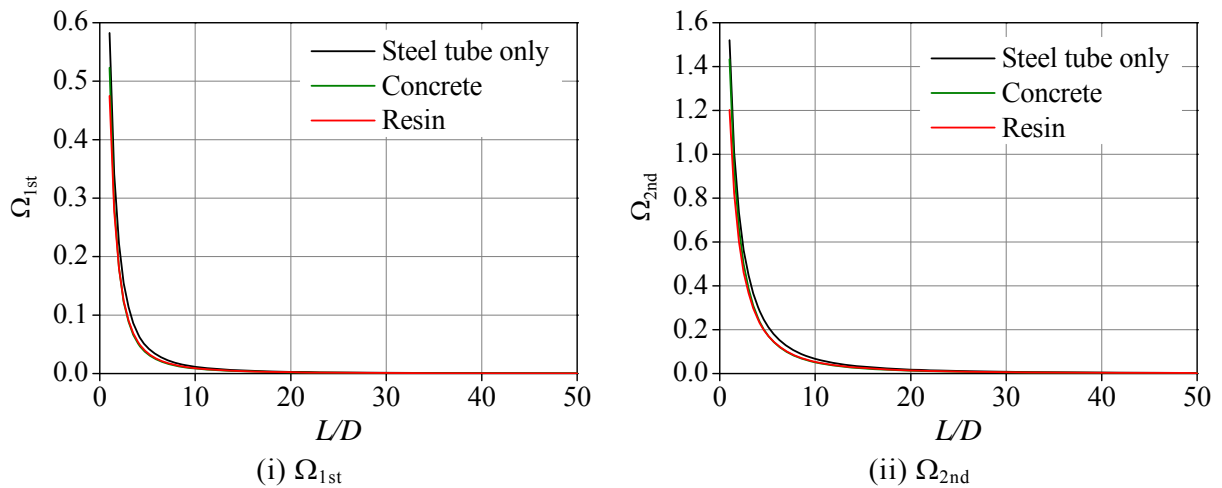
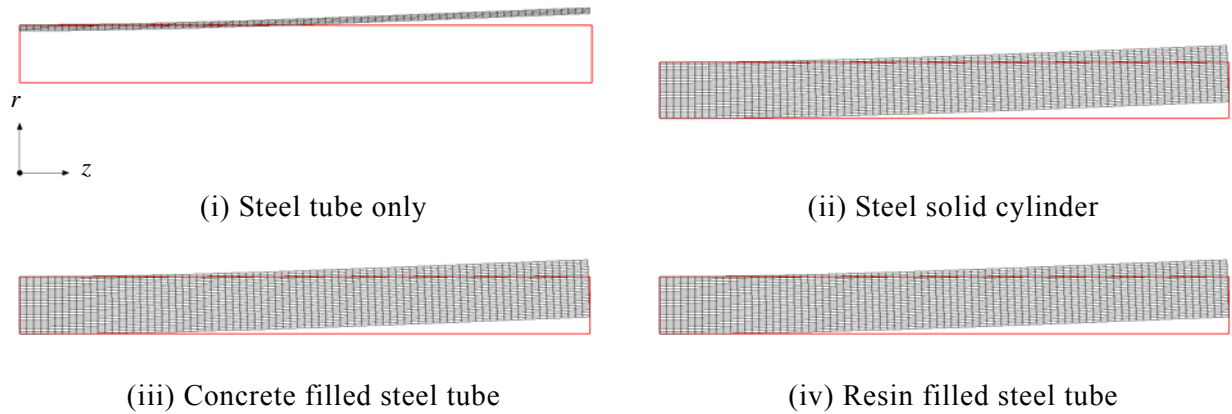


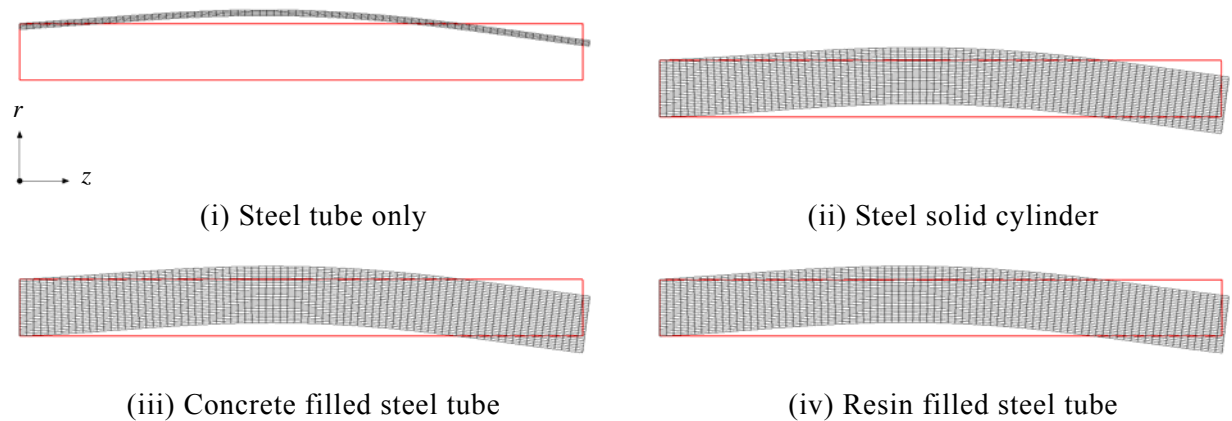
図-10 2層同心円筒体の曲げ振動特性 : $R_i/R_o = 0.98$



(i) Ω_{1st} (ii) Ω_{2nd}
 図-11 2層同心円筒体の曲げ振動特性 : $R_i/R_o = 0.90$



(i) Steel tube only (ii) Steel solid cylinder
 (iii) Concrete filled steel tube (iv) Resin filled steel tube
 図-12 2層同心円筒体の曲げ振動1次モード : $R_i/R_o = 0.90, L/D = 5$



(i) Steel tube only (ii) Steel solid cylinder
 (iii) Concrete filled steel tube (iv) Resin filled steel tube
 図-13 2層同心円筒体の曲げ振動2次モード : $R_i/R_o = 0.90, L/D = 5$

$R_i/R_o = 0.98$ である2層同心円筒体の1次と2次の曲げ振動特性を図-10に、 $R_i/R_o = 0.90$ である2層同心円筒体の1次と2次の曲げ振動特性を図-11に示す。また、図-12は $R_i/R_o = 0.90, L/D = 5$ に設定した2層同心円筒体の曲げ振動1次モード、図-13は曲げ振動2次モードである。 R_i/R_o と充填材料に関わらず、振動数 Ω と L/D の関係は、縦振動とほぼ同様である。しかし、縦振動特性と比較すると、曲げ振動特性に与える R_i/R_o と充填材料の影響はあまり見られない。これは、曲げ振動に与えるポアソン効果の影響が小さいためだと考えられる。

[5] 樹脂充填鋼管の静的圧縮試験

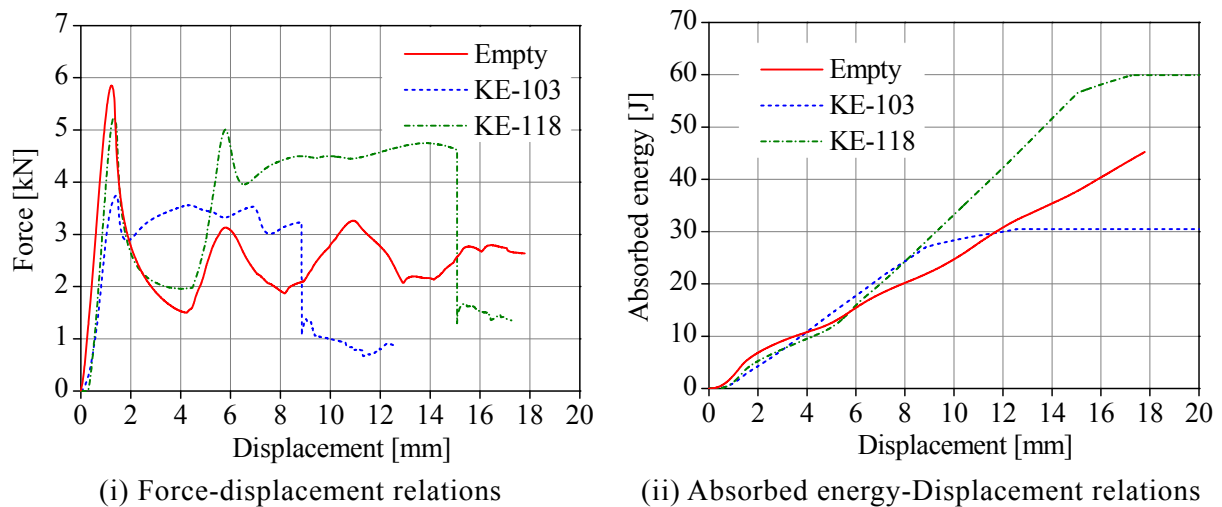


図-14 樹脂充填鋼管の静的圧縮試験の結果

図-14 (i) に静的圧縮試験により得られた変位と荷重の関係，(ii)に変位と吸収エネルギーの関係を示す．試験は，4 mm/min の変位速度を与えて行った．ここで，Emptyは充填材が入っていない中空円筒体を意味する．Emptyの荷重は，変位が1.2 mm程度まで直線的に増加し，荷重の最大値5.8 kNを取る．その後，変位を与えると荷重の値は急激に低下するが，変位が4.1 mm程度になると再び荷重は増加する．これ以降も与える変位の増加に対して荷重は増減を繰り返す，明確な荷重のピークを3つ確認することができ，これは塑性ヒンジが3箇所できたことを意味している．なお，Emptyは塑性ヒンジを増やしながらか潰れが進行していくため，変位が17.0 mm程度で試験を中止した．これまでの過程で中空円筒体が吸収したエネルギーを計算すると，およそ45 Jであった．他方，KE-103は，変位が約1.4mmのときに荷重の最大値約3.7 kNを取り，それ以降は，変位の増加に対して荷重はほぼ一定の値を取り，変位が約8.9 mmのときに試験片が破断した．KE-103を充填した鋼管が吸収したエネルギーは約30 Jであり，Emptyの吸収エネルギーよりも小さい．これに対して，KE-118は，変位が約1.3mmのときに荷重の最大値約5.2 kNを取り，その後はEmptyと同じように変位の増大に対して荷重の値は低下する．変位4.1 mm程度で再び荷重は大きくなり，5.0 kNまで増加する．更に変位を増大させると，ほぼ一定の荷重の値を取り，変位が約15mmのときに試験片が破断した．KE-118を充填した鋼管が吸収したエネルギーは約58 Jであった．KE-103とKE-118を比較すると，KE-103の方が小さい変位で破断した．これは，KE-103がKE-118より柔らかいために変形し易く，面外方向に作用する圧力によって中空円筒体の面外変位が大きくなることが原因であると考えられる．KE-118は，EmptyとKE-103の両者の特徴を持つような変位－荷重関係を記録しており，充填材料の効果により荷重のピーク値はEmptyよりも大きくなり，KE-103よりも変位が伸び続けるので吸収エネルギーも大きくなる．

[6] 樹脂充填鋼管の縦振動実験

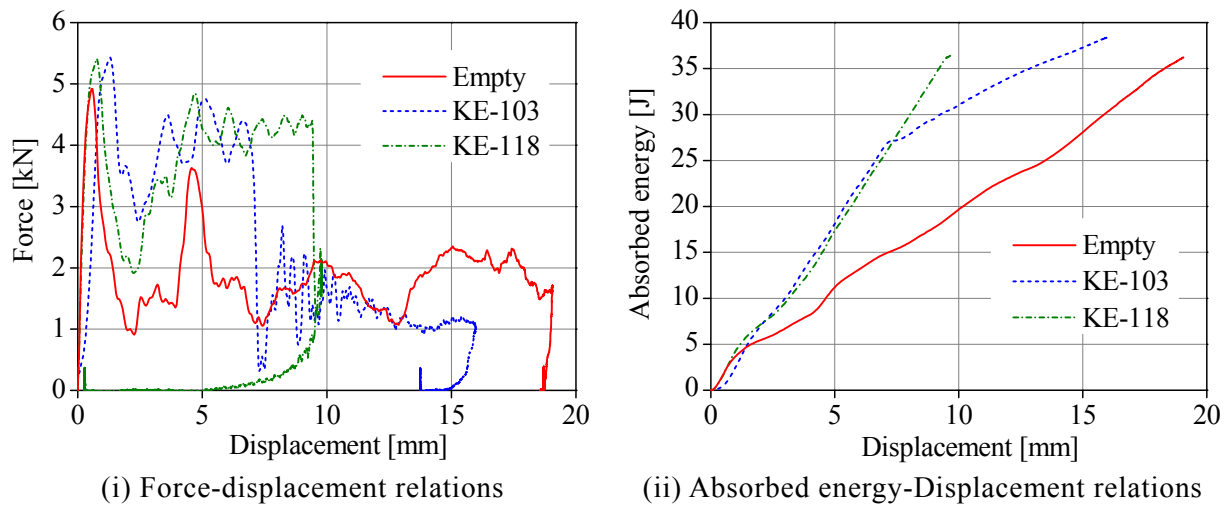


図-15 樹脂充填鋼管の縦衝撃実験の結果

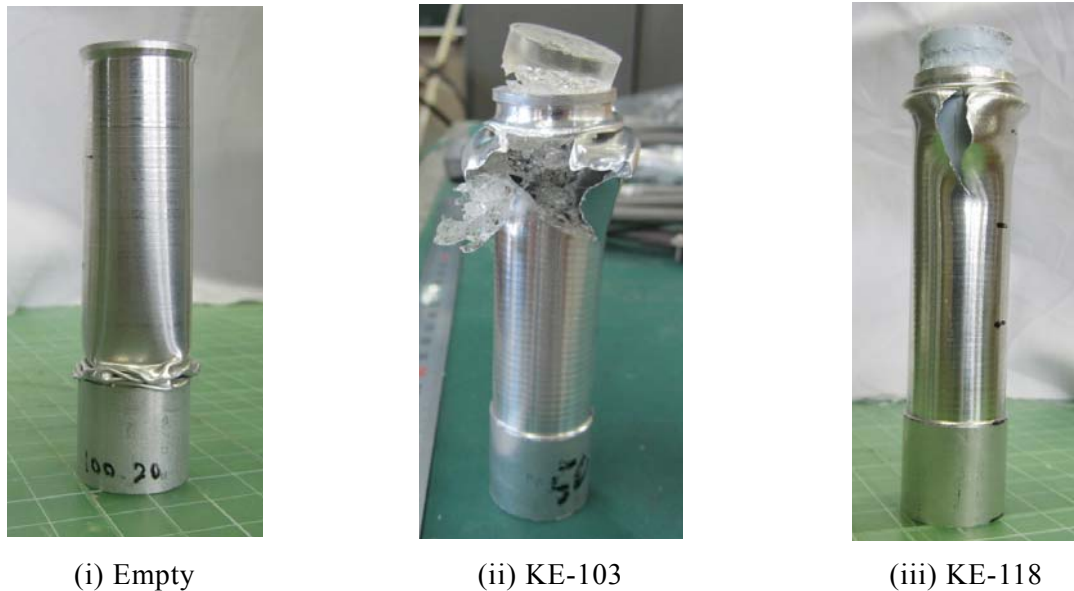


図-16 樹脂充填鋼管の縦衝撃実験後の試験片

図-15 (i) に縦衝撃実験により得られた変位と荷重の関係，(ii)に变位と吸収エネルギーの関係を示す．また，図-16は，樹脂充填鋼管の縦衝撃実験後の試験片である．実験は，重錘落下による衝撃力を樹脂充填鋼管に与えることで行った．実験は，ガイドに沿って衝撃棒を自由落下させ，クロスヘッドを介して試験片に衝撃を与える．衝撃棒は，直径50 mm，長さ750 mmの軟鋼製であり，最大落下高さ1.7 m，衝突速度5.8 m/sec，最大出力193 Jとした．衝撃荷重は試験片下部に置いたロードセルにより計測し，変形量は高速度カメラにより撮影したクロスヘッド部の変位量を画像解析した．得られた荷重および変位量からエネルギー吸収量を算出した．Emptyは，変位が約0.6 mmのとき，荷重の最大値である約4.9kNを取る．その後，変位の増大に対して荷重は低下し続けるが，再び荷重は増加し，変位約4.8 mmのときにおおよそ3.5 kNの値を記録している．変位18.0 mmまで変形する過程で中空円筒体が吸収したエネルギーは，おおよそ36 Jであった．KE-103は変位が約1.3mmのとき，

荷重の最大値である約5.4 kNを取り、それ以降は変位の増加とともに荷重の増減を繰り返し、変位が約6.6 mmのときに鋼管が破断した。しかし、その後もほぼ一定の荷重の値を取りながら変位は16.0 mm程度まで増大し続けた。これまでの過程でKE-103が吸収したエネルギーは、約38 Jであるが、充填材料も大きく破断していた。これに対して、KE-118の変位と荷重の関係の立ち上がりは、KE-103に類似しており、最大荷重約5.4 kNを取り、それ以降はほぼ一定の荷重を取りながら変位は増大し、KE-103よりも大きな変位約9.4 mmのときに試験片が破断した。変位10.0 mmまで変形する過程でKE-118が吸収したエネルギーは、約36 Jであり、Emptyと同程度であった。しかし、KE-103と異なり、充填材料は破断していなかった。KE-103とKE-118が高い荷重値を維持するのは、充填材料を入れたことによって中空鋼管が面外方向に膨張することが原因であると考えられる。また、KE-103とKE-118は、大きな荷重に対して小さい変位でエネルギーを吸収しているが、Emptyは、KE-103とKE-118よりも小さな荷重に対して大きな変位でエネルギーを吸収している。しかし、いずれの試験片も吸収したエネルギー量に大きな差は見られなかった。エネルギー吸収性能が最も高いのは、鋼管破断後もエネルギーを吸収し続けたKE-103であると考えられるが、実験後の試験片の状態から判断すると、建設部材の状態としては好ましくないとする。他方、KE-118は、約10.0 mmという小さい変位量で、EmptyとKE-103と同程度のエネルギーを吸収している。また、KE-118は、高い荷重を維持しながらKE-103よりも変位が伸びており、KE-103と異なりKE-118は破断しなかった。

[7] まとめ

樹脂充填鋼管の数値実験と実験の結果から、鋼管に樹脂材料を充填することにより、エネルギー吸収性能が高くなることを確認した。また、充填する材料によっては、中空鋼管よりも性能が低下してしまう可能性がある。今回の研究結果から判断すれば、材料にある程度の硬さがあり、かつポアソン比が大きい材料を充填すれば、構造部材の耐震性能とエネルギー吸収性能を向上させられる可能性がある。

参考文献

- 1) 森下益臣, 青木徹彦, 鈴木森晶: コンクリート充填円形鋼管柱の耐震性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.73-83, 2000.
- 2) 魏華, 岩崎正二, 長谷川明, 塩井幸武, 宮本裕: 鉄筋コンクリート充填円形鋼管の耐力評価式に関する研究, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.999-1010, 2003.
- 3) 藤井堅, 藤井崇文, 臺博幸: 繰り返し水平力を受けるコンクリート充填円形鋼管柱の有限要素解析, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.1041-1050, 2003.
- 4) 松村寿男, 水野英二: 軸圧縮下で曲げ変形を受けるコンクリート充填鋼管柱の内部性状に関する三次元FEM解析, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1057-1068, 2007.
- 5) 名木野晴暢, 三上隆, 水澤富作: B-spline Ritz法による中実円筒体の3次元自由振動解析, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.90-101, 2008.

(発表論文)

特になし (準備中)