

鋼管・コンクリート合成橋脚と鋼上部工の接合に関する数値解析

FE analysis of connecting method of steel - pipe concrete composite pier to steel girder connection

(独) 北海道開発土木研究所	正員	池田憲二 (Kenji Ikeda)
(独) 北海道開発土木研究所	正員	皆川昌樹 (Masaki Minakawa)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設 (株)	フェロー	三上 浩 (Hiroshi Mikami)
三井建設 (株)	○正員	篠崎裕生 (Hiroo Shinozaki)

1. はじめに

近年、鋼上部構造とコンクリート下部構造を剛結する複合構造の研究が盛んに行われている。鋼上部工と RC (鉄筋コンクリート) 製橋脚を剛結する複合ラーメン橋は、PC (プレストレストコンクリート) ラーメン橋に比べて軽量化が計れ、基礎工を含めた下部構造を縮小化することができる。また、支承を不要とするために維持管理が容易となる。このように、複合ラーメン橋は建設コストや維持管理費の縮減に寄与できる構造であり、同時に優れた耐震性能を有する構造として注目されている。

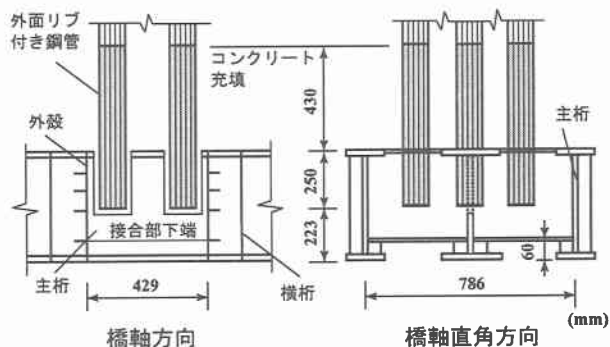
日本道路公団では既に複合ラーメン橋を正式に採用し、これまで数橋の施工実績がある¹⁾。複合ラーメン橋の重要な構造部位は、上部工と下部工の剛結接合部である。上記採用例では、RC 橋脚と鋼上部工を接合するため、橋脚に配筋された多くの太径異形鉄筋を確実に接合する必要がある。そのため施工は煩雑であり、必ずしも合理的な剛結構造とはなっていないのが現状と考えられる。

そこで本研究では、RC 橋脚に変わって既に施工実績のある外面リブ付き鋼管・コンクリート合成構造橋脚²⁾と鋼上部工 (3 主桁橋) を剛結する 2 種類の簡易な接合方式を提案し、その耐荷性能を数値解析によって検討した。

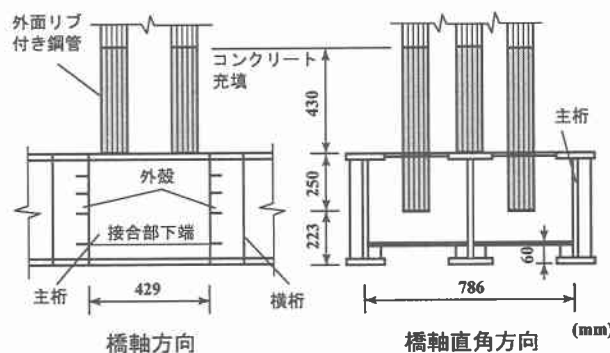
2. 剛結接合方式

図-1(a)に全埋め込み方式、図-1(b)に溶接・埋め込み併用方式の接合部断面図を示す。橋脚断面には橋軸方向 2 列、橋軸直角方向 3 列、計 6 本の外面リブ付き鋼管が配置されている。全埋め込み方式の場合、中央主桁と鋼管が交差するため、中央主桁の下フランジとウェブを一部で切り欠いている。この切り欠き部に鋼管を通し、他の鋼管と同じ高さまで埋め込んでいる。なお、主桁に直交して型枠および横桁を兼用する外殻鋼板を配置している。外殻鋼板内側には孔あき鋼板ジベルを配置し、鋼とコンクリートの応力伝達を可能とした。また、外殻鋼板外側には補剛材を配置し、過度な変形を抑制している。なお、接合部の中央主桁および両外側主桁のウェブにはスタッドジベルを溶接し、コンクリートの肌落ちを防止している。

溶接・埋め込み併用方式は、中央主桁と鋼管が交差する部分の鋼管を主桁下フランジに直接溶接するもので、その他は埋め込み方式と同様である。この方式は全埋め込み方式と異なり中央主桁の細工が一切不要であるが、溶接部の残留応力の大きさによっては構造性能上の弱点になる可能性がある。なお、本剛結構造では、外面リブ付き鋼管がせ

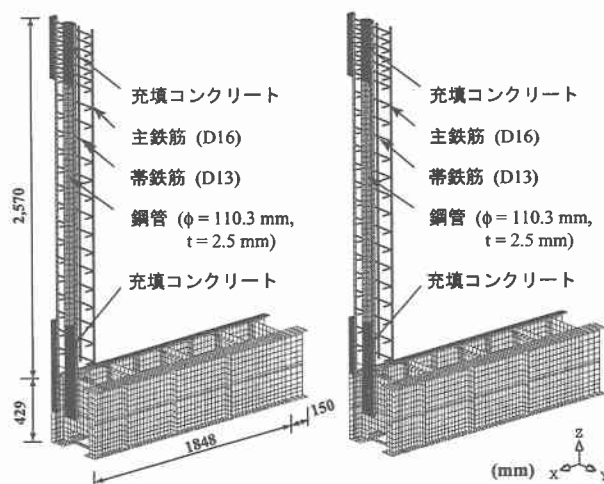


(a) 全埋め込み方式



(b) 溶接・埋め込み併用方式

図-1 接合部断面図



(a) 全埋め込み方式 (b) 溶接・埋め込み併用方式

図-2 要素分割図

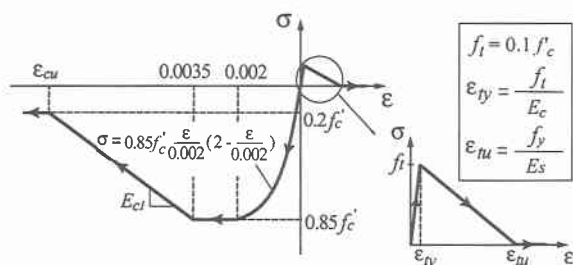
表－1 使用材料の物性値

(a) コンクリート

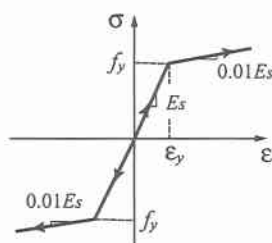
弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	降伏歪 ϵ_{ty} (μ)	終局歪 ϵ_{tu} (μ)
24.4	0.2	28.3	2.83	116	1,786

(b) 鋼材

鋼種	材質	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s	降伏応力 σ_y (MPa)	塑性硬化係数 H'
鋼桁	SM400A	206	0.3	283.4	$E_s / 100$
鋼管	STK100			353.0	
鉄筋	SD345			367.9	



(a) コンクリート



(b) 鋼材

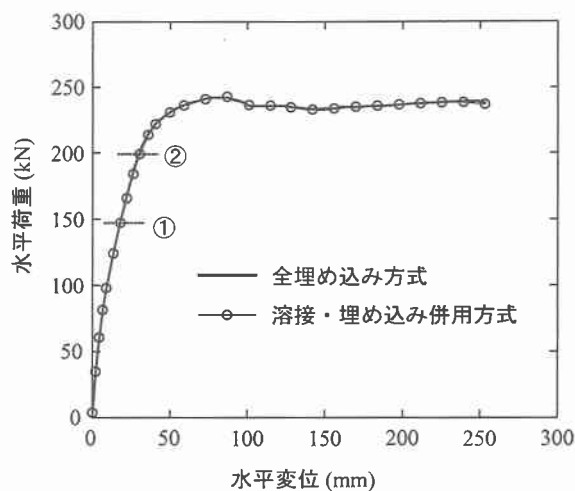
図－3 材料構成則

ん断力を大きく負担することから³⁾、接合部内には帯鉄筋を配置していない。橋脚に配筋される軸方向鉄筋は、必要定着長を確保して接合部内に定着するものとした。また、鋼材と交差する鉄筋は交差部で切断して鋼材と溶接接合し、同本数の鉄筋を接合部内に別途配筋した。両接合方式ともに、外面リブ付き鋼管の接合部コンクリート内への埋め込み深さは、既往の研究成果⁴⁾を参考に鋼管外径の2.5倍程度である250 mmとした。また、載荷点付近および接合仕口部（接合部天端）より上方に断面短辺長までの鋼管内部にはコンクリートを充填している。

3. 数値解析法

3.1 数値解析法の概要

図－2に要素分割の一例を示す。数値解析モデルは、実施予定の模型実験と合わせるように上部を橋脚下端、下部を接合部とする逆T型にてモデル化した。なお、解析には構造解析用汎用ソフト DIANA を使い、橋脚下端の自由端に強制変位を与える3次元弾塑性静的解析として実施した。鋼桁、鋼管、鉄筋（軸方向鉄筋、帯鉄筋）およびコンクリートをモデル化し、構造の対称性および計算時間の短縮化のため1/2モデルとしている。使用した要素は、鋼桁および鋼管を4節点シェル要素、軸方向鉄筋および帯鉄筋は DIANA に組み込まれている埋め込み鉄筋要素、コンクリートは8節点ソリッド要素でモデル化した。総節点数および要素数は各々24,000～25,000程度である。



図－4 水平荷重－水平変位曲線

なお、本解析は、予備設計で想定した支間50 m、幅員8.5 m、橋脚高さ20 m程度の実構造物の1/7スケールとして実施している。しかし、細径の外面リブ付き鋼管を板厚1.29 mmで製作することは困難なため、外面リブ付き鋼管の板厚には相似則を適用せずに2.5 mmとした。境界条件は、解析対象の連続性を考慮して対称切断面においてその面に対する法線方向変位成分を拘束し、主桁端部は実験と同様に桁端から150 mm内側の桁高中心位置をピン支持としている。鋼－コンクリートの要素間は、外面リブ付き鋼管を用い、孔あき鋼板ジベルやスタッドを溶接していることから、いずれも完全付着を仮定した。なお、解析での載荷は、上部工の死荷重に対応する軸圧縮力として橋脚自由端に148 kN (1/2モデルのため74 kN) を載荷した後、載荷点に水平変位を単調増加することで作用させている。

3.2 材料構成則

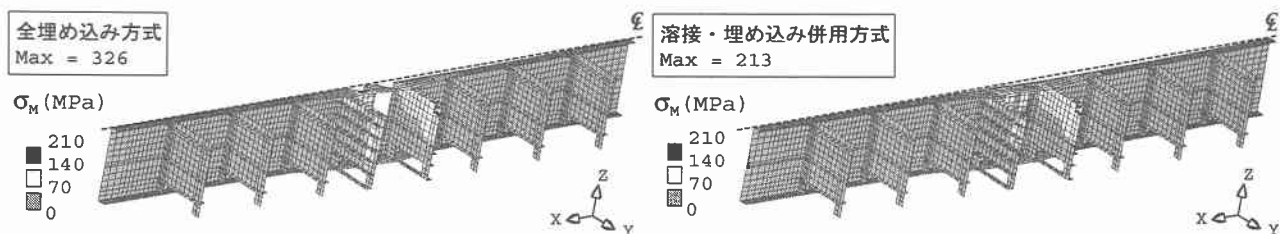
本数値解析では構造部材の塑性化を考慮した解析を行うため、各要素には非線形性を考慮した材料構成則を定義した。図－3(a)にコンクリート要素に適用した応力－歪関係を示す。圧縮側は、表－1に示す圧縮強度 f'_c を用い、圧縮歪3,500 μ まではコンクリート標準示方書に基づいて定式化し、3,500 μ 以降は初期弾性係数の0.05倍 ($E_{c1} = 0.05 E_c$) で $0.2 f'_c$ まで線形軟化するモデルを設定した。なお、降伏判定には von Mises の降伏条件を適用した。一方、引張側は、図－3(a)中の拡大図に示すような線形引張軟化モデルを用いた。すなわち、引張応力は初期剛性 E_c で引張強度 f_t まで線形に増加し、その後、終局引張歪 ϵ_{tu} まで線形に減少するモデルである。なお、終局引張歪 ϵ_{tu} は、DIANA のマニュアルを参考にして、引張側鉄筋の降伏歪 $\epsilon_y (= \sigma_y / E_s)$ と等しい値を設定した。

図－3(b)に鋼材の応力－歪関係を示す。ここでは、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルを適用することとした。塑性硬化係数 H' は、弾性係数 E_s の1%と仮定し、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いている。表－1(a)、(b)に本解析で用いたコンクリートおよび鋼材の材料物性値を示す。

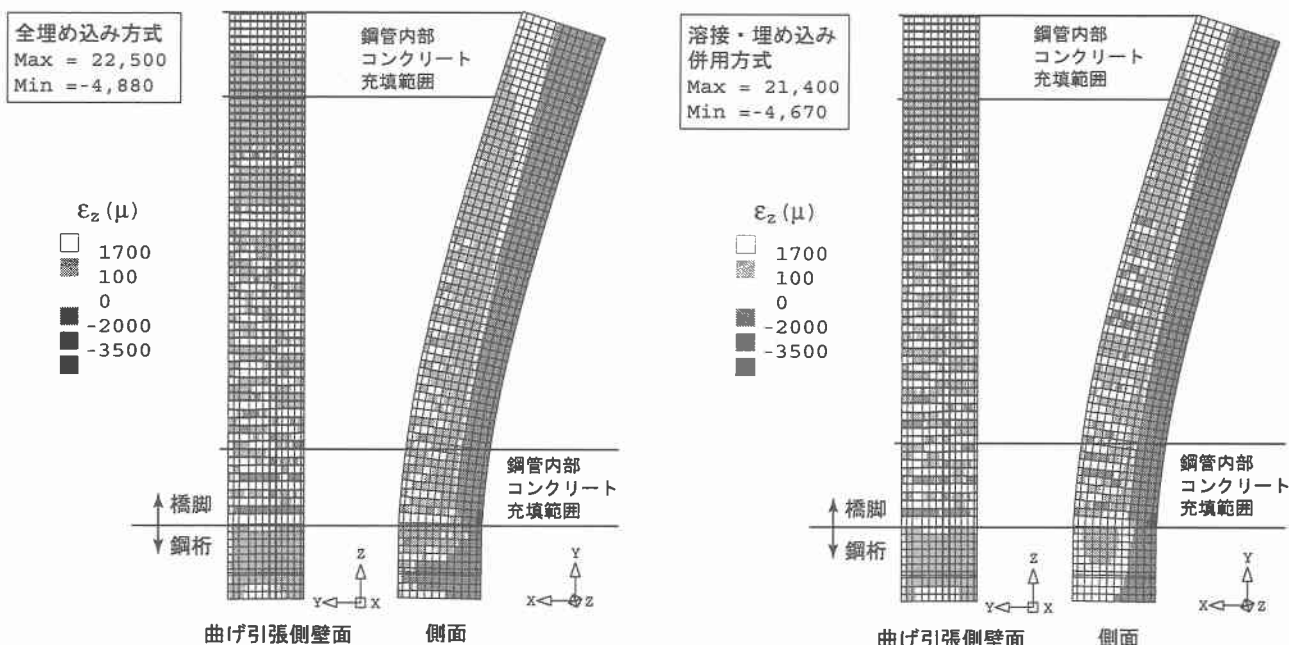
4. 数値解析結果

4.1 荷重－変位関係

図－4に両接合方式における水平荷重－水平変位の関係



(a) 鋼桁部における Mises 相当応力 (σ_M) 分布図 (変形倍率: 20 倍)



(b) コンクリート部の鉛直方向歪 (ϵ_z) 分布図 (変形倍率: 20 倍)

図-5 設計終局時の解析結果

を示す。図から、両接合方式がほぼ同等の荷重-変位関係を示すことが分かる。いずれも、載荷初期に荷重の増加とともに変位が双曲線的に増大し、240 kN 程度の最大荷重を示した後若干減少して、それ以降はほぼ 230 ~ 240 kN 程度の一定荷重を保持している。

なお、図中の 148 kN ①および 199 kN ②は、各々橋脚基部（剛結接合仕口部）の設計降伏抵抗曲げモーメント (412 kN·m) および設計終局抵抗曲げモーメント (552 kN·m) に対応する荷重である。これから、本構造の終局耐力 240 kN は、設計終局耐力の 1.2 倍、設計降伏耐力の 1.6 倍であり、接合部が橋脚基部に先行して破壊に至ることがないことが分かる。

4.2 設計終局耐力時の解析結果

図-5(a) に鋼桁部における Mises 相当応力の分布図を対称断面における主桁および外殻と横桁に着目して示す。両接合方式ともに設計終局耐力時の最大応力は外殻の接合部上端隅角部に発生し、局所的に 300 MPa を越えるものの応力レベルは全般的に 140 MPa 程度以下であることが分かる。このように、設計終局耐力時においても主桁、外殻、横桁は十分に安全であることが分かる。

図-5(b) にコンクリート部の鉛直方向歪分布を示す。両接合方式ともに、橋脚の引張側壁面には大きな引張歪が

生じ、ひび割れの開口を示す大歪領域が上方に進展して自由端付近にまで至っていることが分かる。一方、側面の歪分布から、接合部には 100 μ 以上の引張歪が発生していることが分かる。この傾向は、全埋め込み方式の方が顕著である。なお、全埋め込み方式の場合は、接合部下端周辺の引張側領域にも圧縮歪が発生していることが分かる。これは、鋼管の埋め込み端部付近において大きな曲げ引張力が作用するものの、鋼管は未だ抜け出す傾向がなく、埋め込み端部近傍で確実に定着されていることを示すものと考えられる。

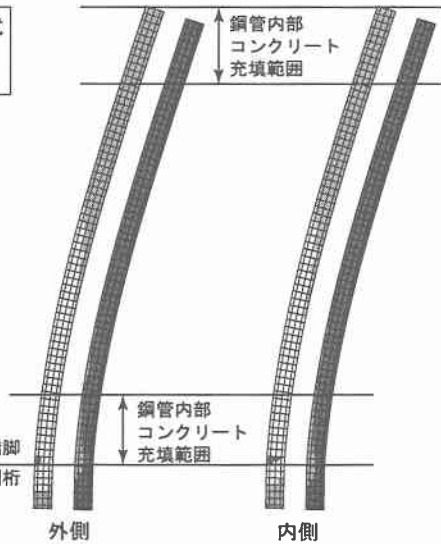
図-5(c) に鋼管部の軸方向応力分布を示す。埋め込んだ鋼管には鋼管の位置（外側、内側）に限らず、接合部天端の引張側で局所的に 400 MPa 程度の応力が発生している。また、溶接した鋼管は溶接部において 400 MPa 以上の応力が発生している。なお、この段階でも接合部内の鋼管は埋め込み端部近傍で無応力であることから、上述したように外面リブ付き鋼管の定着が確保されていることが分かる。

図-5(d) に接合部における中央主桁の Mises 相当応力を示す。全埋め込み方式の場合は、切り欠いたフランジとウェブの上側ならびに下側の切り欠き隅角部周辺で応力が大きく、局所的に 300 MPa 以上の応力が発生している。一方、溶接・埋め込み併用方式の場合は、引張側鋼管を溶接

全埋め込み方式
Max = 411
Min = -244

σ_z (MPa)
400
200
0
-300

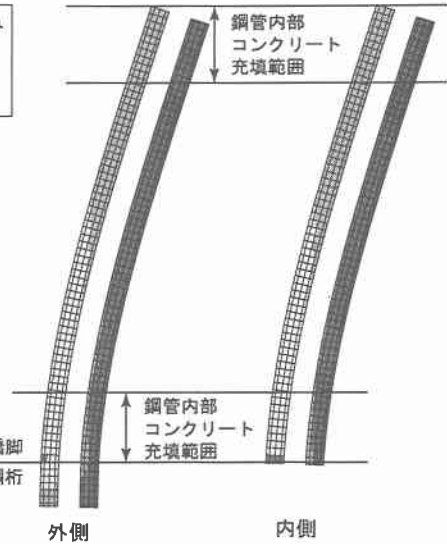
Z
↑
橋脚
↓
鋼桁
X ← Y



溶接・埋め込み併用方式
Max = 414
Min = -341

σ_z (MPa)
400
200
0
-300

Z
↑
橋脚
↓
鋼桁
X ← Y

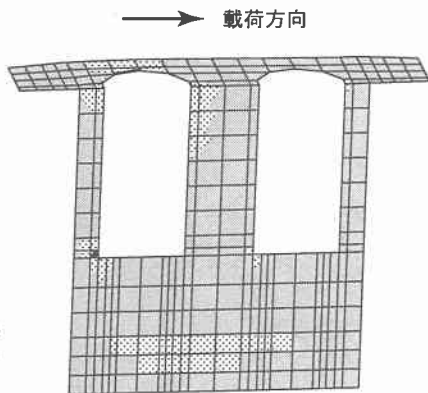


(c) 鋼管部における軸方向応力 (σ_z) 分布図 (変形倍率: 20 倍)

全埋め込み方式
Max = 326

σ_M (MPa)
200
100
0

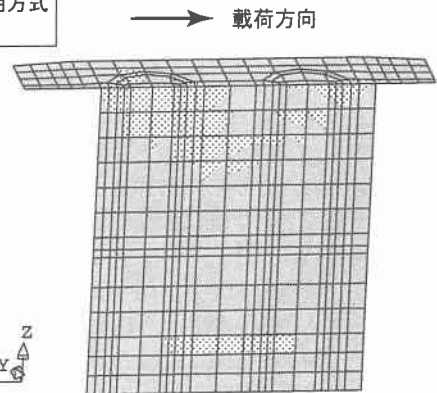
Z
↑
Y
← X



溶接・埋め込み併用方式
Max = 207

σ_M (MPa)
200
100
0

Z
↑
Y
← X



(d) 中央主桁部における Mises 相当応力 (σ_M) 分布図 (変形倍率: 20 倍)

図-5 設計終局時の解析結果 (続き)

したフランジ近傍のウェブ上端に最大で 200 MPa 程度の応力が発生しているものの、未だ降伏には至っていない。

5. まとめ

複合ラーメン橋における簡便な接合方式として、外面リブ付き鋼管を用いた橋脚と鋼上部工を接合する方式を提案し、非線形 3 次元 FEM 解析によって耐荷性状を検討した。検討は、全ての鋼管を接合部内コンクリートに埋め込む方式と、中央の鋼管を主桁に溶接し、他の鋼管を埋め込む方式の 2 方式で行った。本研究の範囲内で得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- (1) 両接合方式ともに同様な荷重-変位関係を示し、橋脚基部破壊を想定した設計終局耐力の約 1.2 倍の耐力を有する。すなわち、接合部の破壊が橋脚の破壊に先行して生じることはない。以上から、両接合方式を採用することは可能と考えられる。
- (2) 設計終局耐力時における接合部内コンクリートの引張歪は上端では 100μ 程度以上であり塑性化が進んでいるが、接合部下端は終局でも弾性に近い状態にあるといえる。
- (3) 主桁フランジ、ウェブおよび外殻に生じる応力は全般的に終局耐力時でも降伏応力以下である。

的に終局耐力時でも降伏応力以下である。

- (4) 橋脚部の外面リブ付き鋼管は降伏応力を超過するが、接合部下端の鋼管埋め込み端部では無応力であり、鋼管が抜け出る兆候は見られない。
- (5) 溶接方式の場合は溶接部で局所的に高い応力が発生し、残留応力も考慮する必要があるため、全埋め込み方式の方がより安定した構造であると判断される。

参考文献

- 1) 望月秀次, 湯川保之, 和田信良, 石崎茂, 田中俊彦: 岡豊橋の設計と施工, 橋梁と基礎, pp.23 - 28, 1999.
- 2) 福本英一郎, 川端淳, 久正, 田村多佳志, 篠崎裕生: 鋼管・コンクリート合成構造橋脚 (ML 工法) の設計と施工, 橋梁と基礎, pp.10 - 15, 1999.
- 3) 三上浩, 田村多佳志, 岸徳光, 池田憲二: 外面リブ付き鋼管を用いた合成構造橋脚の耐荷性状に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1433 - 1444, 2001.
- 4) 篠崎裕生, 三上浩, 岡本隆, 水谷慎吾: 鋼管を用いた合成構造橋脚定着部の耐荷性状、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1313 - 1318, 1996.