

PC 橋脚の耐震設計の動向

日紫喜 剛啓*¹・須田 久美子*²

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震により被災した橋脚の震災復旧の教訓から、地震後の供用性能を考慮した耐震設計法が導入され、橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度をもつ地震動（以下、大規模地震動と略記）に対して変形性能に関する安全性を確保することはもちろんのこと、重要度の高い橋については残留変形が制限値以下におさまるように耐震設計を行うこととなった。

プレストレストコンクリート橋脚（以下、PC橋脚と略記）は、鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚と略記）に適度のプレストレスを導入することによって橋脚の耐震性能を改善できること^{1),2)}を利用して、橋梁の耐震設計の自由度を高めることができる新構造である。同じ地震荷重に対してRC橋脚に比べよりスレンダーな断面に絞り込むことが可能であり、主として、橋脚による免震効果や残留変形を小さく制御できる効果などが期待できる。

PC橋脚の耐震設計法に関する本格的な研究は、(社)プレストレストコンクリート技術協会において平成9～11年にかけて設置された橋脚PC構造研究委員会（委員長：池田尚治）で行われ、数多くの実験的および解析的な検討（たとえば3～6）を踏まえて「プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン」⁷⁾（以下、ガイドラインと略記）としてまとめられた。また、その成果は「PC構造物耐震設計規準（案）」⁸⁾の中にも反映された。

ここでは、ガイドラインとその後の研究動向を踏まえつつPC橋脚の耐震設計のポイントについて紹介する。

2. PC 橋脚の耐震性能に関する一般的知見

PC橋脚の耐震性能に関する一般的な知見を整理すると以下のとおりである。

1) プレストレス量が大きくなるほど、PC橋脚の復元力特性は原点指向型に近づき、エネルギー吸収能力は小さくなる傾向になるが^{3),9)}、残留変形は小さくなり地震後の供用性能に優れた構造となる³⁾。RC橋脚試験体に比べてプレストレス導入量が2MPa, 4MPa, 8MPaと増えるにしたがって変位量にかかわらずエネルギー吸収能力が73%, 53%, 42%と小さくなるという実験例³⁾、プレストレス導入量としては3～4MPaを境にエネルギー吸収能力が大きく変化するという実験例⁹⁾などが示されている。残留変形は、RCや低レベルのプレストレス導入量（2MPa）の試験体がそれぞれ最大変位の60～75%, 50～65%程度であるのに対し、高レベルのプレストレス導入量（4MPa, 8MPa）では25～30%, 20～25%であり、プレストレス導入量が4MPa程度以上であれば優れた供用性能を有することが明らかにされている。

2) 適切にPC鋼材を配置し、適度なプレストレスを導入したPC橋脚では、最大荷重以降においても急激な耐力の減少はなくじん性に富んだ構造とすることができる。導入プレストレス量が0～8MPaの範囲では、導入プレストレス量が増加するにしたがってじん性率が増加する実験例³⁾が示されている。また、PC鋼材の耐力分担率 γ （式（1）または式（2））、PC鋼材の有効緊張応力度がPC橋脚の耐震性能に及ぼす影響が実験的に確認されており、PC橋脚の優れた復元力特性とじん性に富んだ構造を兼ね備えるためにはPC鋼材の耐力分担率を0.5以上にすることが望ましいこと、PC鋼材の有効緊張応力度がPC鋼材の降伏応力度の0.5～0.75倍の範囲では有効緊張応力度の違いがPC橋脚の耐荷挙動に及ぼす影響が小さいことが明らかにされている¹⁰⁾。さらに、PC鋼材とシースの間にグラウトが充填されている場合であっても大変形時には付着抵抗力が減少してひずみの局所化が緩和するため、PC鋼材の破断の危険性は少なくなるとされている¹¹⁾。

$$\gamma = \frac{M_{pu}}{M_{su} + M_{pu}} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 M_{pu} はPC鋼材のみが負担する抵抗曲げモーメント、 M_{su} は鉄筋のみが負担する抵抗曲げモーメント

ただし、断面形状および鋼材配置が正負対称で、かつPC鋼材が断面外縁付近に配置されている場合は、



*¹ Yoshihiro HISHIKI

鹿島建設(株) 技術研究所
土木技術研究部 上席研究員



*² Kumiko SUDA

鹿島建設(株) 技術研究所
土木技術研究部 主管研究員

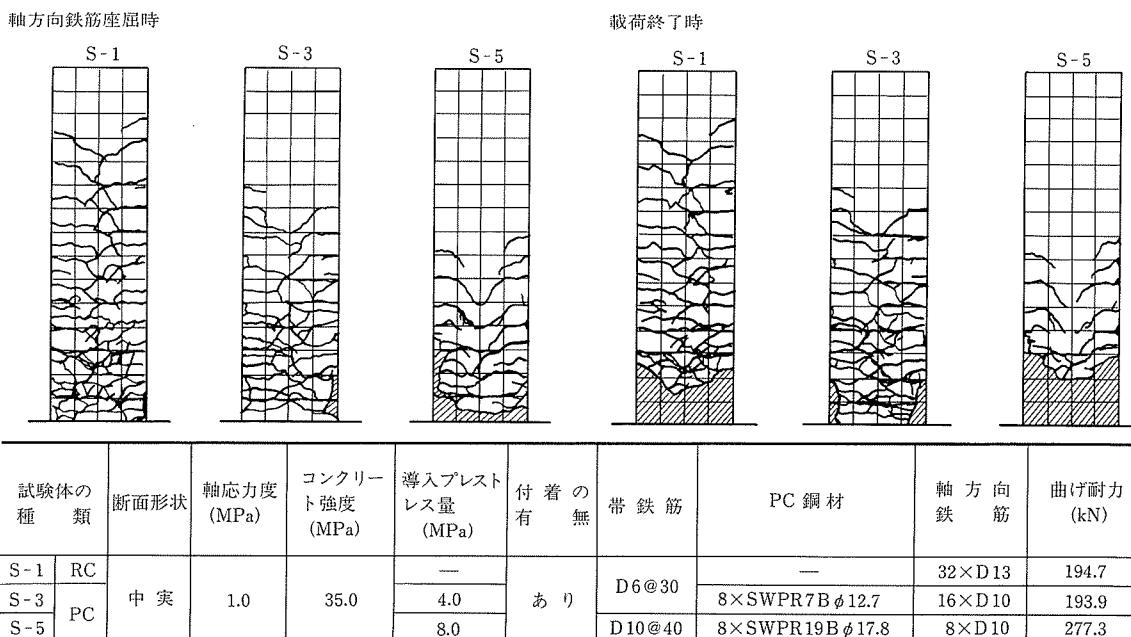


図 - 1 導入プレストレス量の違いによる損傷状況の対比³⁾

$$\gamma = \frac{A_p f_{py}}{A_s f_{sy} + A_p f_{py}} \quad \text{式(2)}$$

ここに、 A_p は PC 鋼材の断面積、 f_{py} は PC 鋼材の降伏応力度、 A_s は鉄筋の断面積、 f_{sy} は鉄筋の降伏応力度

- 3) PC 橋脚は RC 橋脚に比べて、部材降伏程度以上の荷重が作用する場合、相対的にひび割れが少なく、ひび割れ幅が大きくなる。図 - 1 に導入プレストレス量をパラメータとした試験体の損傷状況³⁾を示す。PC 橋脚試験体 (S-3 および S-5) は RC 橋脚試験体 (S-1) に比べてひび割れの本数が減少し、発生範囲も狭く、また、斜めのせん断ひび割れも少なくなることがわかる³⁾。
- 4) アンボンド構造の場合には、ボンド構造に比べて一般に慣性力による PC 鋼材の増加はずみ小さくなるため、曲げ耐力は小さくなる^{3),11)}。ただし、曲げ耐力が同等になるように設計した場合にはボンド構造よりも残留変位は小さくなる。この場合の両者間のエネルギー吸収能力の差はごくわずかである³⁾。
- 5) PC 橋脚におけるかぶりコンクリートの剥離や軸方向鉄筋の座屈などの地震時の損傷過程は、適切な横拘束筋 (帯鉄筋および中間帯鉄筋) を配筋した場合には、一般の RC 橋脚と大きな違いはない^{3),6),9),12)}。

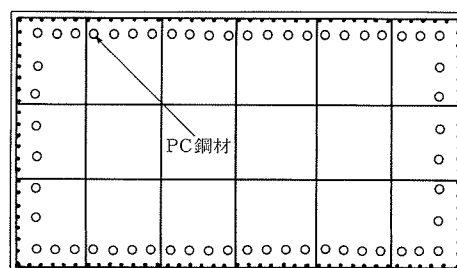
3. PC 鋼材配置のポイント

ガイドラインでは、PC 鋼材の配置は① PC 鋼材と鉄筋との耐力分担、② 橋脚軸応力度およびプレストレス量とコンクリート強度、を考慮して適切な PC 鋼材量を配置するものとする規定している。

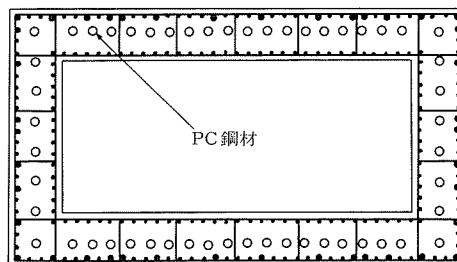
2. に前述したとおり、導入プレストレス量を適度に大きくすると、復元力特性に優れ、じん性にも富んだ構造を実現できるが、導入プレストレス量が大きすぎると圧縮側コ

ンクリートの圧壊が顕著になったり、PC 鋼材の降伏が早まって、破壊挙動が異なり十分な変形性能を発揮できない可能性がある。したがって、最適な導入プレストレス量を、橋脚に作用する軸圧縮応力度、コンクリート強度および横拘束筋量とのバランスに配慮して決定する必要があると考えられる。ガイドラインの解説では、導入プレストレス量としては 2 ~ 4MPa 程度、有効緊張応力度としては PC 鋼材の規格降伏点の 0.5 倍程度を目安とすることが示されている。

また、6. および 8. に後述するように、PC 鋼材の耐力分担率 γ は残留変形およびエネルギー吸収能力と密接な関係にあり、PC 鋼材の断面配置にあたってはこれらの関係に十分配慮しておく必要がある。



(a) 中実断面の場合



(b) 中空断面の場合

図 - 2 PC 鋼材の標準的な断面配置例⁷⁾

ガイドラインでは、PC鋼材の軸方向配置については全高にわたって配置することを原則としているが、施工性や経済性などの理由から必ずしも全高にわたって配置することが得策ではない場合には曲げ耐力などの構造的な照査を十分に行えば途中定着をおこなってもよいとしている。自動定着具などによる橋脚基部へのプレストレスの導入の開発例¹³⁾など実用的な開発研究も進んでいる。

4. 標準的な耐震設計の流れ

標準的な耐震設計の流れを図-3に示す。7.に後述する検討結果^{7),8),14)}および準動的載荷実験の結果^{6),12)}をもとに、PC橋脚においてもRC橋脚と同様に、簡便的に地震時保有水平耐力法の適用を認めている。なお、固有周期がおおよそ0.5秒以下の構造系では、履歴減衰が小さい場合は、地震動の特性によって応答がかなり増幅される場合もあるので、固有周期の比較的短い橋への地震時保有水平耐力法の適用には注意が必要である。

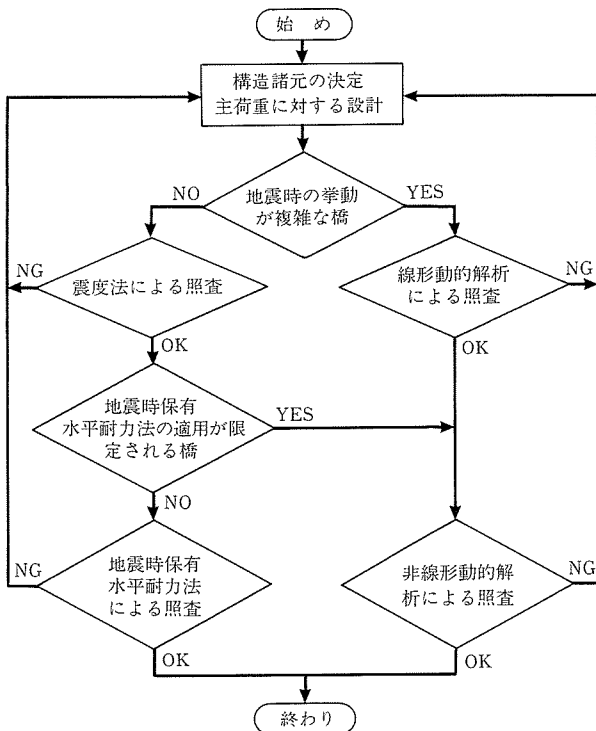


図-3 標準的な耐震設計の流れ⁷⁾

5. コンクリートの負担できるせん断応力度の割増し

PC部材はプレストレスによる圧縮力の効果によりせん断耐力が増加する。ガイドラインでは橋の供用期間中に発生する確率が高い地震動（中規模地震動）に対しては、プレストレスによるコンクリートの負担できるせん断応力度の増加を考慮し、デコンプレッションモーメント（プレストレスおよび軸方向力によるコンクリートの応力度が部材引張縁でゼロとなる曲げモーメント）による割増を行ってよいこととしている。ただし、大規模地震動に対する破壊形

態を判定する場合のせん断耐力の算定にはプレストレスによるコンクリートの負担できるせん断応力度の割増しは考慮しない。

6. PC部材の復元力モデル

PC橋脚の特徴である残留変形の抑制効果などを耐震設計に反映させるためには精度の高いPC部材の復元力モデルが必要である。ガイドラインでは、前に紹介した橋脚PC構造研究委員会で行った数多くの実験結果をもとに、設計レベルで適用可能なPC部材の復元力モデルが新しく提案されている^{5)~8)}。

図-4にPC部材の復元力モデルを、図-5に第一除荷点および残留部材回転角の詳細を示す。

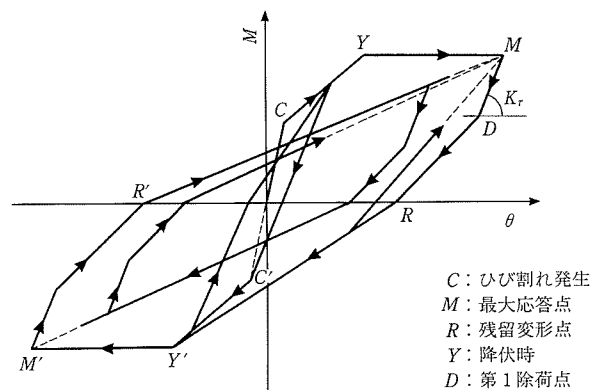
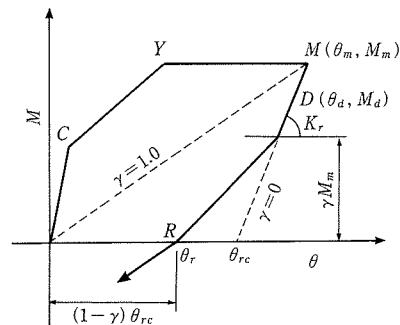


図-4 PC部材の復元力モデル⁷⁾



- M_m : 最大応答モーメント
- θ_m : 最大応答部材回転角
- M_d : 第1除荷点モーメント $M_d = \gamma M_m$ ($0 \leq \gamma \leq 1.0$)
- θ_d : 第1除荷点部材回転角
- θ_r : 残留部材回転角 $\theta_r = (1 - \gamma) \theta_{rc}$ ($\gamma \geq 0.8$ のとき $\gamma = 0.8$)
- θ_{rc} : RCのときの残留部材回転角 $\theta_{rc} = \theta_m - M_m / K_r$
- K_r : 除荷剛性
- γ : PC鋼材の耐力分担率

図-5 第一除荷点および残留部材回転角の詳細

本モデルでは第一除荷点と残留部材回転角を定義する必要があるが、ガイドラインでは、図-6および図-7に示す実験結果をもとにPC部材の耐力分担率 γ を変数とした評価式で定義している。

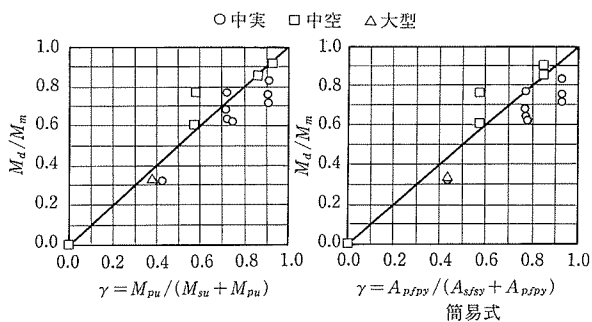


図-6 第一除荷点と γ の関係⁷⁾

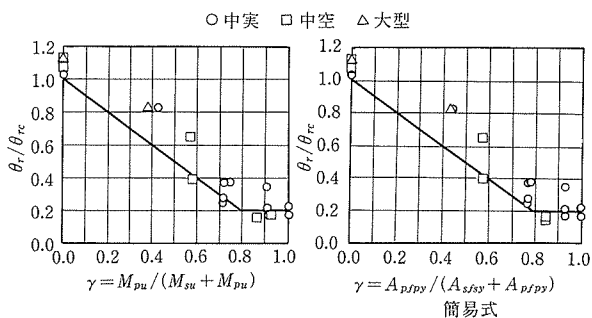


図-7 残留部材回転角と γ の関係⁷⁾

7. エネルギー一定則の適用性

RC 橋脚の耐震設計では地震時非線形応答を簡便的に推定方法として、一般的に Newmark らによるエネルギー一定則に基づいた地震時保有水平耐力法が用いられている。

しかし、PC 部材の復元力特性は、一般に RC 部材よりも履歴減衰が小さく、原点指向型に近い履歴特性を示すことから、エネルギー一定則をそのまま適用することには問題が生じる可能性が多いと考えられる。

橋脚 PC 構造研究委員会では、1 自由度系のモデルを対象に非線形動的解析を行って、復元力モデルの違いが非線形応答値に及ぼす影響を確認し、エネルギー一定則の適用性を検討した⁷⁾⁸⁾¹⁴⁾。

検討の結果をまとめると次のとおりである。

- 1) 初期の固有周期が 0.3 秒の場合、非線形応答をして固有周期が変化しても、地震力のパワーがタイプ I の場合 1.2 秒程度、タイプ II の場合 0.7 秒程度までほぼ一定であるため、固有周期が長くなることによる応答値の低減が図られず、かえって応答値が大きくなる傾向にある。PC 部材の復元力モデルのように履歴減衰が小さい場合には、このような帯域では地震波のスペクトル特性の局所的形状に応答値が左右されやすいと考えられる。
- 2) 初期の固有周期が、タイプ I で 0.9~1.2 秒以上、タイプ II で 0.6 秒以上であれば、非線形応答をして剛性が変化した結果、固有周期が長くなると、応答値の低減効果が、履歴減衰による低減効果よりはるかに大きく、RC 部材と PC 部材の復元力モデルの違いによる応答値の差はほとんど見られなくなる。

したがって、初期の固有周期が比較的長い場合にはエネルギー一定則の適用が可能であると結論付け、ガイドラインでは PC 橋脚における耐震設計に地震時保有水平耐力法をとり入れている。

8. 残留変位の照査

ガイドラインでは、残留変形の照査方法について、基本的にエネルギー一定則の適用を前提に、算定方法が示されている。残留変位の算定式は、実験結果から求めた前掲の図-7 の関係を用い、PC 鋼材の耐力分担率を変数とした式で表されている。

9. プレキャストセグメント橋脚

ガイドラインでは、プレキャストセグメントへの適用を想定して、中規模地震動に関する照査の部分のみを適用可能とし、大規模地震動に対する照査についてはプレキャストセグメント橋脚の特性を十分に反映させた解析モデル、解析方法および照査方法を別途検討する必要があることを明記した。

耐震設計と施工の合理化を目的に、プレキャストセグメント PC 橋脚の開発がすでに行われており（たとえば 15）、図-8、図-9 参照）、PC 橋脚構造の実務レベルでの展開が期待される。

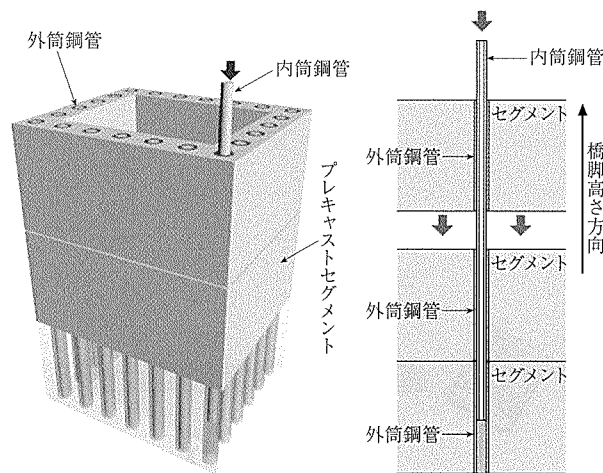


図-8 プレキャスト PC 橋脚の開発例¹⁵⁾

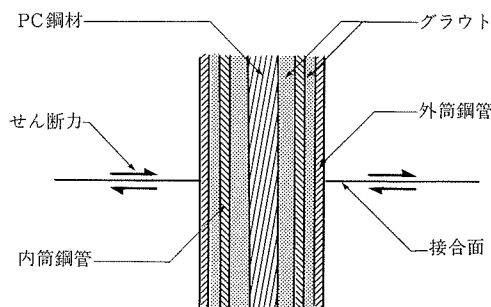


図-9 新しい連結構造の概念図¹⁵⁾

10. おわりに

PC 橋脚構造については、現在も、PC 鋼材の効率的配置や定着方法、高強度鉄筋と PC 鋼材との組み合わせによる合理的鋼材配置、短繊維コンクリートの利用による復旧性の確保など実用化に向けたさまざまな検討が進められている。PC 橋脚は免震性・復元性に優れた構造であり、今後の展開が期待される。

参考文献

- 1) Ikeda,S. : Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns and Improvement by Vertical Prestressing, Proceedings of the 13th FIP Congress on Challenges for Concrete in the Next Millennium, Vol.2, pp.879-884, 1998.5
- 2) 伊藤, 山口, 池田: 軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の曲げ変形挙動, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 第7回, pp.71-76, 1997.10
- 3) 池田, 森, 吉岡: プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.5, pp.40-47, プレストレストコンクリート技術協会, 1998.9
- 4) 葛野, 山口, 池田: プレストレストコンクリート橋脚の地震応答挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.883-888, 日本コンクリート工学協会, 1999
- 5) 稲田, 睦好, Zater : プレストレスを導入した RC 橋脚の耐震性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.739-744, 日本コンクリート工学協会, 1998
- 6) Zater,W., Mutsuyoshi,H., Inada,H. : Dynamic Response Behavior of Prestressed Concrete Piers under Severe Earthquake, Vol.20, No.3, pp.1003-1008, 日本コンクリート工学協会, 1998
- 7) プレストレストコンクリート技術協会: プレストレストコンクリート橋脚の耐震設計ガイドライン, 1999.11
- 8) プレストレストコンクリート技術協会: PC 構造物耐震設計規準(案), 1999.11
- 9) 中村, 松下, 坂口, 榎本: PC 橋脚の耐震性能とプレストレス量に関する実験的研究, 土木学会年次学術講演会, 第53回, 第V部門, V-565, pp.1130-1131, 1998.10
- 10) 朴, 山口, 池田: PC 鋼材の緊張レベルを考慮した PC 橋脚の耐震性能と耐震設計に関する基礎的研究, プレストレストコンクリート, Vol.43, No.2, pp.141-148, プレストレストコンクリート技術協会, 2001.3
- 11) 中村, 松下, 佐川, 脇坂: 交番水平力を受ける PC 橋脚の破壊過程と鋼材の挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.3, pp.721-726, 日本コンクリート工学協会, 2001
- 12) 河野, 倉川, 大熊, 山崎: PC 橋脚に対して異なる地震波形を入力した場合の応答挙動に関する実験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 第11回, pp.887-892, プレストレストコンクリート技術協会, 2001.11
- 13) 野中, 藤原, 山口, 池田: 基部にプレストレスを導入したコンクリート橋脚の研究, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 第11回, pp.881-886, プレストレストコンクリート技術協会, 2001.11
- 14) 増川, 日紫喜, 新井: PC 構造へのエネルギー一定側の適用検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 第9回, pp.703-708, プレストレストコンクリート技術協会, 1999.10
- 15) 新井, 日紫喜, 須田, 山本, 滝沢, 尾鍋: 新しいプレキャスト PC 橋脚の開発, 鹿島技術研究所年報, 第48号, pp.25-30, 2000.9

【2002年10月4日受付】



刊行物案内

プレストレストコンクリートの 新たななる発展—21世紀—

第30回 PC 技術講習会

(平成14年2月)

頒布価格(会 員): 5,000 円(送料 500 円)

(非会員): 6,000 円(送料 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会