

## [2014] 膨張コンクリートを用いたRC箱型構造の変形解析

前川宏一<sup>\*1</sup>・Ashraf Shawky<sup>\*2</sup>・畠中俊輔<sup>\*3</sup>・今野修<sup>\*4</sup>

## 1. はじめに

地中に建設される鉄筋コンクリートでは、建設後の点検補修が困難を極めるため、耐久性に対する充分な配慮や設計・事前評価が望まれる。この目的から膨張混和材によるケミカルプレストレスを導入して、ひび割れ発生荷重を高める等の配慮が地中RC箱型構造に加えられてきた[1]。導入プレストレスは膨張ひずみエネルギー則から予測可能であり[2]、ひび割れ限界状態に対する設計を合理的に行うことが可能である。

一方、膨張混和材はひび割れ発生以後の鉄筋コンクリートの変形（ひび割れ分散性、引張剛性等）にも影響を及ぼす。ひび割れ発生の使用限界状態のみならず、不静定力の算定を伴う終局限界状態の照査、地盤との相互作用を考慮した地震時断面力算定等で、膨張コンクリートのRC性状を合理的に解析することがさらに必要となる。地下空間の高度利用と設計・施工の合理化は益々、その重みを増している。本研究は、地中構造の限界状態の照査を念頭に、膨張コンクリートを用いたRC構造の有限要素解析法を提案するものである。

RC構造の解析領域は図1に示す通り、分散したひび割れの集合を連続体構成則（分散ひび割れモデル）で代表する要素と、異種部材間に存在する離散ひび割れを表現する接合要素に分けられる[3]。初期応力の存在と膨張コンクリートが有する高い伸び能力は、ひび割れ以後の引張剛性に大きく影響を及ぼすことが予想される。そこで、本研究ではひびわれ以後の膨張コンクリートの引張剛性に着目し、一般RC構造との比較検討を行った。また、地中環境下での施工の合理化に関連して、プレキャスト接合を代表する離散ひびわれモデルの提案を行う。

## 2. プレキャスト接合部の力学モデル

部材間の接合域は、RC離散ひびわれモデルを用いて解析が可能である[4]。ただし、同一断面の鉄筋が接合面を交差することが前提である。埋設カップラと指し筋で接合されたプレキャスト

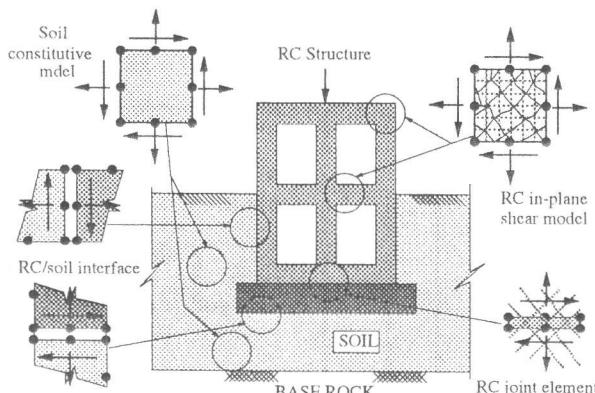


図1 鉄筋コンクリート構造の離散化  
とひび割れのモデル化

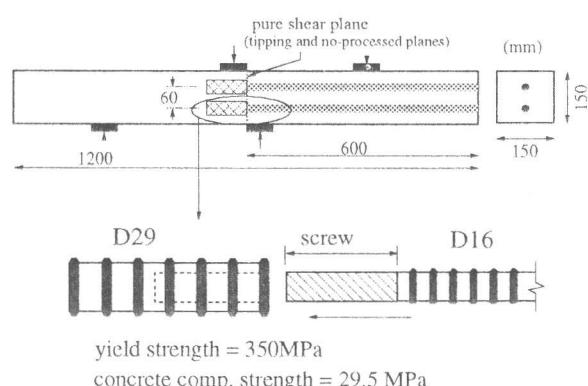


図2 カップラによる鉄筋接合を含むRC接合面の  
要素実験

\*1 東京大学助教授、工博（正会員）

\*2 東京大学大学院、工修（正会員）

\*3 鶴見コンクリート技術部（正会員）

\*4 鶴見コンクリート（正会員）

接合面への適用性は現時点では不明である。今後、地中RC構造の施工の合理化を考慮して、図2のプレキャスト接合面の純せん断耐力と限界状態を検討した。接合面のコンクリートにチッピング処理を施したものと、打ち継ぎ面処理を省略した（型枠面）ケースを取り上げ、せん断力・せん断すべり量・接合面位置での鉄筋応力（ひずみゲージより算出）・ひびわれ開口量の四者を測定した。鉄筋の降伏強度とコンクリート圧縮強度は、それぞれ350MPaと29.5MPaである。

図3にせん断耐力とせん断力一すべり関係に関する実験結果と、継ぎ手の無い連續鉄筋を用いた場合の解析結果（接触面密度関数による応力伝達モデルと付着・ダボ作用モデル[5]より構成された三島・Qureshiらの解析法）を示す。せん断耐力は連続鉄筋を前提とした解析より数%低下している。なお、解析は接合境界の剥離以後を対象とする。一面せん断耐力の限界状態は、コンクリート中の鉄筋断面がダボによる曲げと開口に伴う軸力で終局に達し、鉄筋が断面降伏強度に至る以前に拘束力が喪失する状態に対応していることを、Qureshiらは指摘している[5]。図4はその機構の概説と、鉄筋軸応力（拘束力）と開口変位の関係を示したものである。

純せん断終局時の鉄筋拘束力の解析値（連続鉄筋仮定）は全降伏の60%程度であり、実験も同様である[6]。しかし、カップラー接合の終局拘束力は全降伏の35~40%まで低減している。一軸引張りではカップラー接合鉄筋は全断面降伏に至ることから、指し筋あるいはカップラー内の螺子を施した鉄筋断面が、連続鉄筋に比較して早期に終局に至ったと言える。しかし、鉄筋拘束力の低下が耐力に及ぼす影響は表面処理を施さない場合では小さく、連続鉄筋から求められた解析モデルを使用することができる。表面処理を行う場合は、拘束力の割引きが必要である。

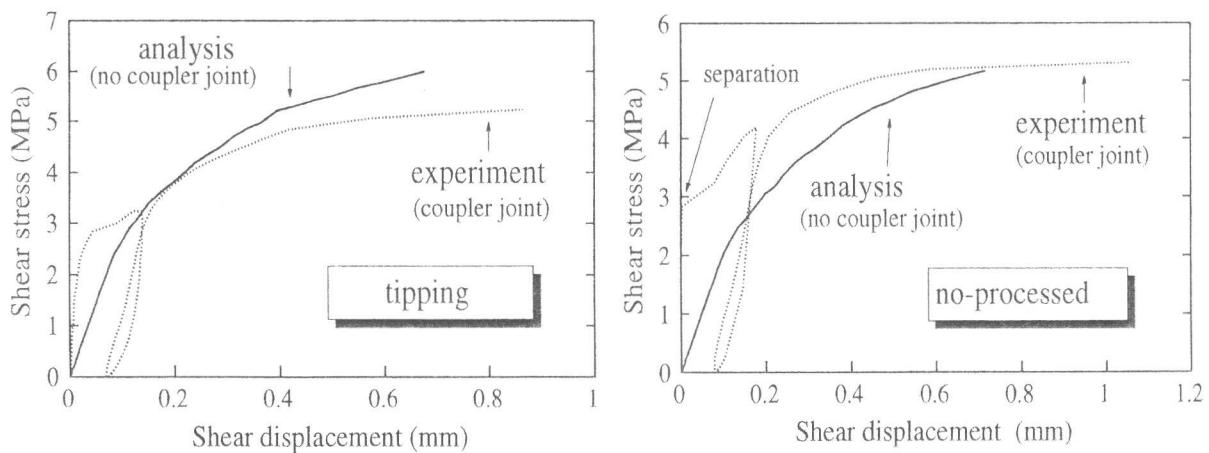


図3 カップラー接合面での純せん断変形と耐力 (A) 打ち継ぎ面処理有り、(B) 無処理

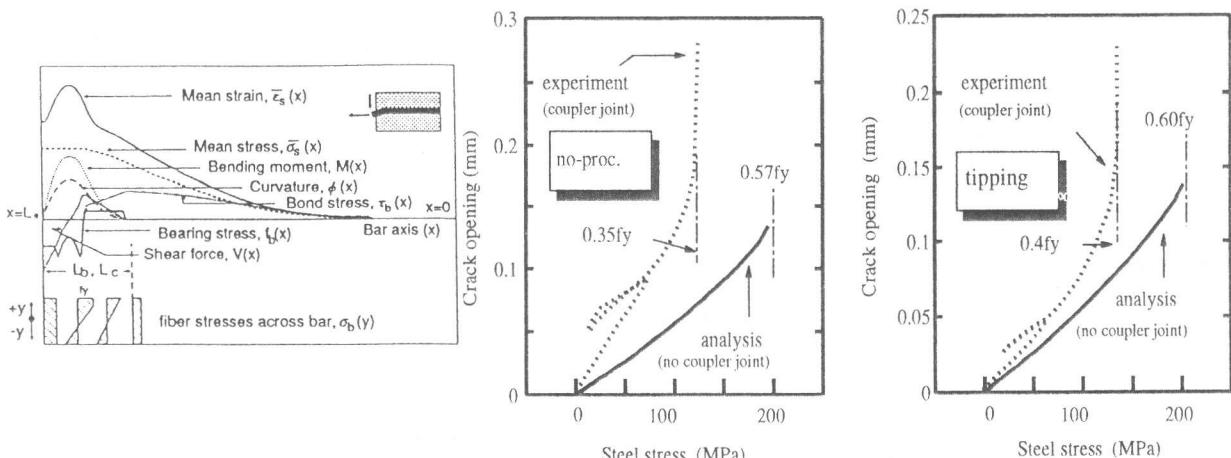


図4 せん断と開口を受けるRC接合面の限界状態[5]と、カップラー接合鉄筋の拘束低減

### 3. 膨張コンクリートRC要素のモデル化

図5、図6はせん断および曲げを受けるRC箱型構造の荷重変形関係を表したものである。二次元単純箱型供試体には上下載土圧に対応させた二点支持・加力を行った。二連箱型構造には、地中箱型構造のせん断変形を模擬する目的で等せん断力域を与えた。なお、単純箱型供試体には図2に示すカップラー接合（表面無処理）を設置した。ほぼ同じ圧縮強度の普通コンクリートと膨張コンクリートを用いた供試体をそれぞれの構造に対して作製し、両者の比較を行った。

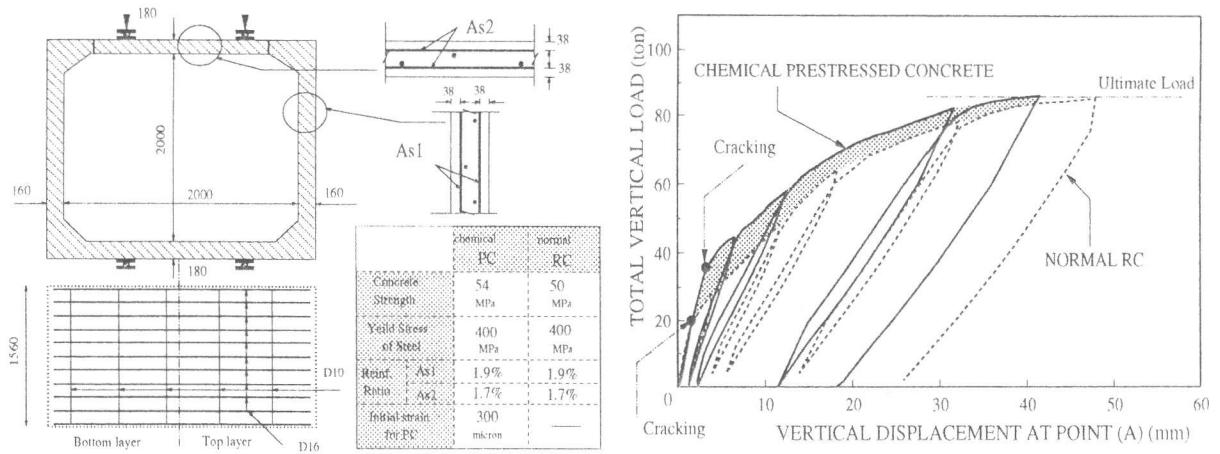


図5 単純箱型試験体と荷重一変形関係（普通および膨張コンクリート使用）

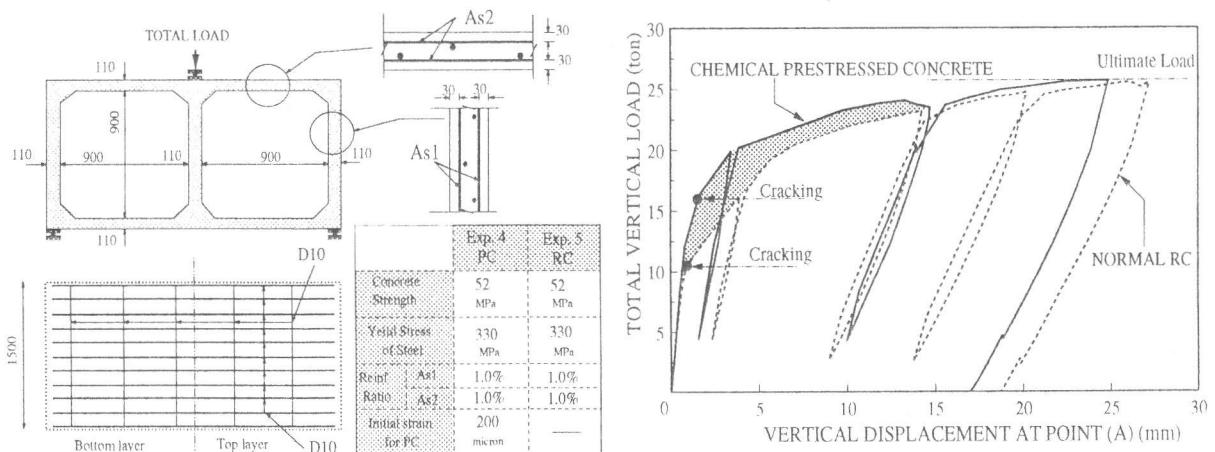


図6 2連箱型試験体と荷重一変形関係（普通および膨張コンクリート使用）

ケミカルプレストレスにより、ひび割れ発生荷重は増加する。また、ひびわれ直後から降伏以後に至る全域で、剛性は普通コンクリートのそれと比較して高いことが分かる。鉄筋のひずみ硬化領域（大変形）では、膨張、普通コンクリートとともにほぼ同じ耐力と変形能を示すに到り、見掛け上、ケミカルプレストレスの効果は消失している。しかし、膨張コンクリートを使用した供試体のひび割れ間隔は、最終変形においてもおよそ普通コンクリート供試体のひびわれ間隔の約二倍であり、ひび割れ分散性の観点から、膨張コンクリートの使用による引張伸び能力の変化が伺える。接合面におけるせん断ずれ、及び開口変形に伴う回転変位は何れのケースも、全体変位の凡そ数%以下であった。耐力に関しても、接合面は本実験の範囲内では限界断面とはならず、隣接断面の鉄筋降伏以後は接合面での変形は頭打ちとなった。

比較実験からも明らかな通り、膨張材によるコンクリートと鉄筋の初期応力や膨張コンクリートの力学的特性の違いは、ひび割れ荷重とひび割れ以後の剛性に影響を与えるので、従来のRC平面構成則をそのまま用いることはできない。ただし、ひび割れ面の応力伝達はひび割れ面形状が支配的であること、ひび割れに平行方向の変形に及ぼす初期応力の効果は本対象では充分に小さいと考えられる。そこで、RC構成則を構成する鉄筋およびコンクリートのTension-stiffnessモデルを、膨張コンクリートに対応する形で修正することを検討した。鉄筋とコンクリートに作用する応力の釣り合い条件より、以下の関係が成立しなければならない。

$$\sigma_{rc} = \sigma_c + p \sigma_r \quad \sigma_c = \sigma_{c0} + \Delta \sigma_c (\varepsilon), \quad \sigma_r = \sigma_{r0} + \Delta \sigma_r (\varepsilon) \quad (1)$$

ただし、 $\sigma_{rc}$ :RC 平均応力、 $\sigma_{i0}$ : i 材料初期応力、 $\Delta \sigma_i$ : i 材料増分応力、p:鉄筋比

図7は一軸引張を受ける膨張コンクリートの、平均応力—平均ひずみ関係を岡村らの研究[1]から模式的に表したものである。鉄筋とコンクリートの初期応力の釣り合い条件 ( $\sigma_{c0}+p \sigma_{r0}=0$ ) と増分応力の単純加算則から、増分応力ひずみ関係を定式化することで全応力を算定することができる。この時、見掛けの材料強度は導入プレストレス分だけ増減する。

$$\sigma_{rc} = \Delta \sigma_c (\varepsilon) + p \Delta \sigma_r (\varepsilon) \quad (2)$$

鉄筋の増分平均応力—ひずみ関係は、見掛け上、導入初期応力の分だけ見掛けの降伏強度が低下した形となる。コンクリートの構成則は、ひび割れ発生までの弾性域では引張強度が見掛け上、初期応力分だけ増加する。ひび割れ以後の引張剛性が普通コンクリートのそれと同等であれば、図8のように、引張剛性曲線が初期応力分だけ平行移動することになる。しかし、既往の研究から観られる通り、膨張コンクリートの引張剛性は相対的に小さく、かつひびわれ断面での鉄筋の降伏も若干、早まる挙動も見られる[1]（図7）。これは、膨張材を混和したコンクリートの引張伸び能力の増大、および膨張拘束の開放に伴う付加膨張の効果と理解することができよう。この点は大ひずみ域でのひびわれ分散性の違いからも説明される。この場合、鉄筋の自由変形を拘束する度合いは低減するため、引張剛性は低下する。本研究では、ケミカルプレストレスによる見掛けの引張強度が上昇することによる、引張剛性効果の増大と、膨張コンクリートの伸び能力と付加膨張に伴う低下を考慮して、RC平板に関する構成モデル[3]を修正した。

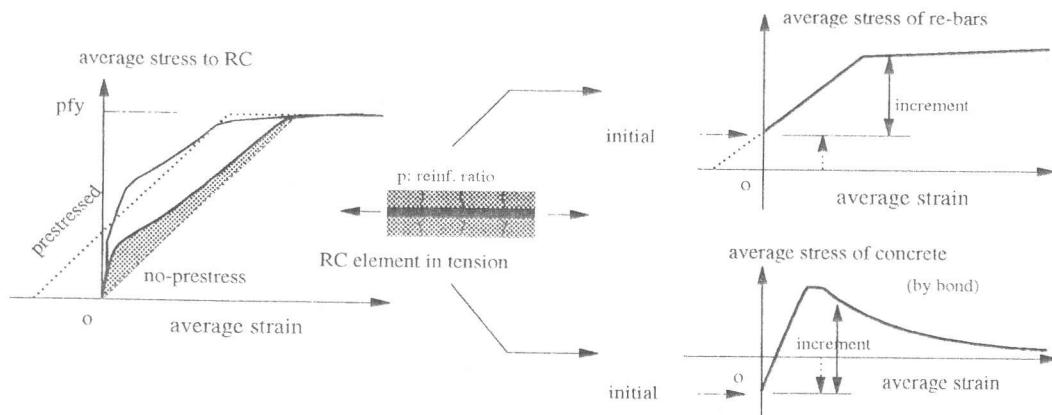


図7 初期応力を有するRC部材の変形と平均応力の分担

$$\Delta \sigma_c = (f_t + \sigma_{c0}^*) [\varepsilon_0 / \varepsilon]^\beta$$

$$\varepsilon_0 = 2(f_t + \sigma_{c0}^*)/Ec, \quad \beta = 0.4 + 1000(\sigma_{c0}^*/pEs) \quad (3)$$

ここに、 $\beta$ ：応力緩和に関する指数、 $\sigma_{c0}^*$ ：導入コンクリート初期応力（圧縮正）、 $f_t$ ：一軸引張強度、 $E_s, Ec$ ：コンクリートおよび鋼材の弾性係数、 $\varepsilon$ ：RC部材の平均引張ひずみである。

鉄筋降伏以後の鉄筋の平均応力ひずみ関係は、出雲・申のモデルを使用している[7,8]。引張剛性が変化すれば、降伏以後の局所ひずみの分布も変化するために、鉄筋降伏以後の空間平均化した応力ひずみ関係も変化する[8]。ただし、式(3)は増分応力に対する構成則であり、初期応力レベルに応じた原点のシフトを含んでいる。また、ひび割れ断面での鉄筋応力は初期応力に係わらずRC応力が同じであれば等しく、ひび割れ間の局所ひずみ分布も相似形と考えられることから、ここでは普通コンクリートの鉄筋モデルと等しいと仮定した。以上の仮定を総合的に検証する目的で、図5、図6のケースに対して解析と実験との比較を行なう。解析は二次元交番載荷解析プログラム『WCOMR』を使用した[3]。

要素による離散化の収束を検証する目的で、断面厚み方向に歪みの線形補間の内挿を仮定する高次要素を1～3層配置した。1層～3層の解析では同一載荷点変位に対して反力は3%程度であった。高次要素1層で所定の精度を得ることができる理由は、断面厚さ方向に平均歪みが直線分布する現実に要素自体が対応しているからである。膨張および普通コンクリートの解析は、それぞれ実験結果に定量・定性的に対応している。なお、膨張材による初期応力は初期鉄筋ひずみから算出した（初期ひずみで200  $\mu$ ）。

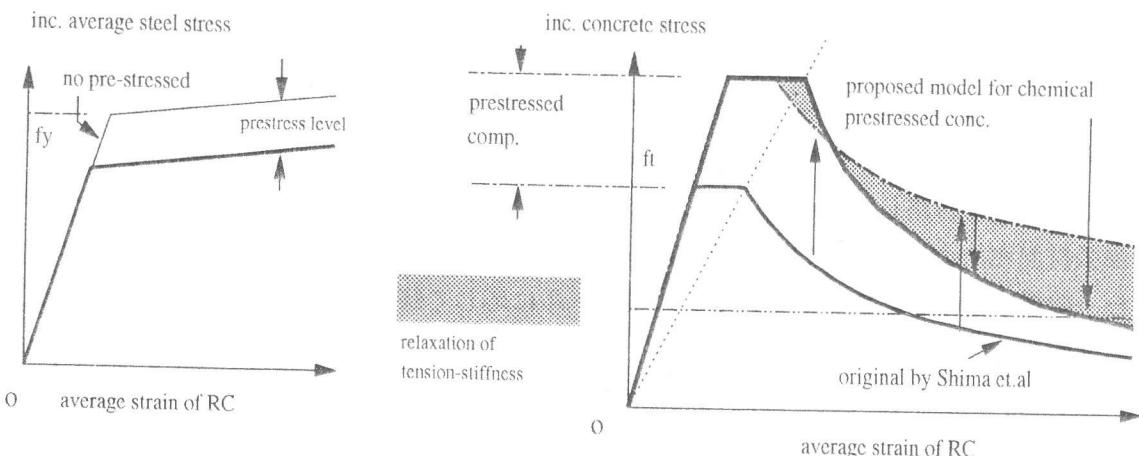


図8 プレストレスと膨張コンクリートの伸び能力を考慮したTension-stiffness モデル

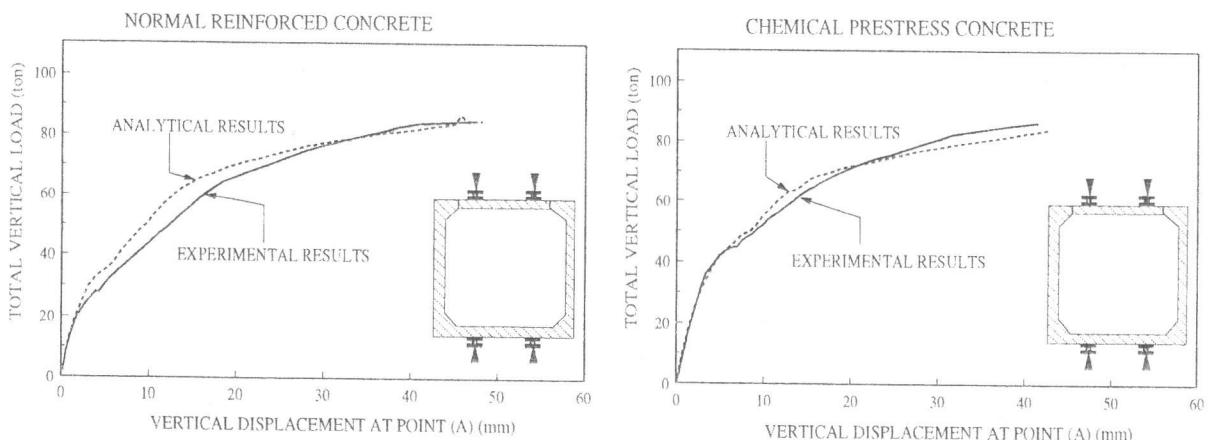


図9 単純箱型構造の有限要素解析と実験（普通および膨張コンクリート）

本解析では乾燥収縮の効果は考慮していないが、膨張および普通コンクリートとともに打設後1週の湿潤養生と試験材齢(1月)までの大気暴露環境は同一である。実験／解析共にひび割れから鉄筋降伏までの韌性の違いが解析されている。中規模地震に対応する荷重下で、残留変形とひび割れは膨張材の使用により低下することも解析で追跡することができる。鉄筋降伏以後の韌性も両者で異なるが、大ひずみ領域の地中構造の耐震性と膨張材の効果は、周辺地盤との連成を考慮する必要がある[9]。この領域の構造評価は今後の課題としている。

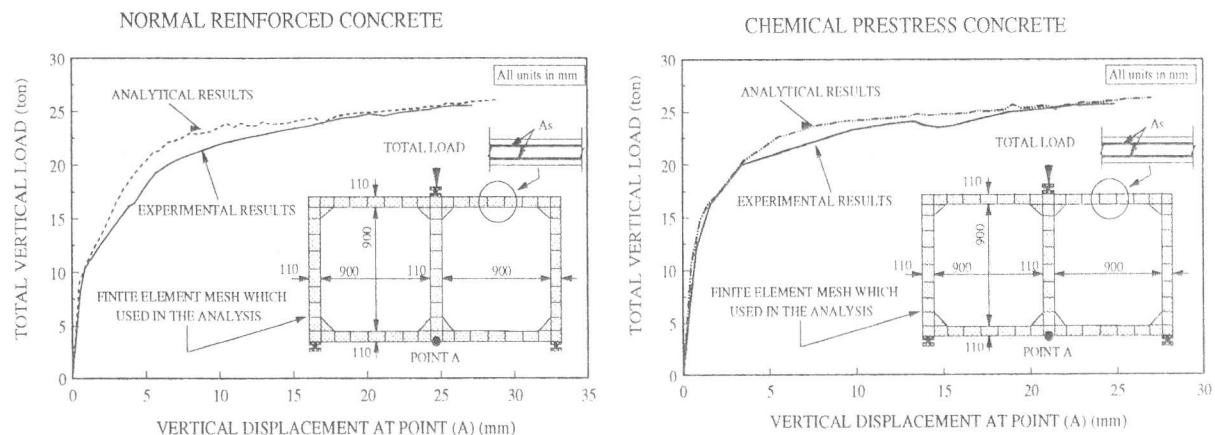


図10 2連箱型構造の有限要素解析と実験（普通および膨張コンクリート）

#### 4. あとがき

実験および有限要素解析結果との比較検証の結果、以下の結論を得た。

- 1) カップラー接合された鉄筋が、施工打ち継ぎ面でせん断変位と引き抜けを同時に受ける場合、連続鉄筋と比較して拘束係数が30%程度さらに低下し、耐力はおよそ数%程低下する。ただし、打ち継ぎ処理を省略した接合面に対しては、従来のRC離散ひびわれモデルが適用できる。
- 2) 膨張材混和による初期応力とひびわれ以後のコンクリートによる引張拘束は、鉄筋とコンクリートの構成則をケミカルプレストレスのレベルに応じて修正することで対応可能である。

#### 参考文献

- 1) Okamura, H., Tsuji, Y. and Maruyama, K. : Application of expansive concrete in structural elements, J. Facul. Eng., The Univ. of Tokyo(B), Vol. XXXIV, No. 3, 1978.
- 2) Tsuji, Y. : Fundamental study on the use of chemical prestress in concrete, Trans. JSCE, No. 235, March, 1975.
- 3) Okamura, H. and Maekawa, K. : Nonlinear analysis and constitutive models of reinforced concrete, Gihodo, 1990.
- 4) Mishima, T. and Maekawa, K. : Development of RC discrete crack model under reversed cyclic loads and verification of its applicable range, Concrete Library of JSCE, JSCE, No. 20, 1992.
- 5) Qureshi, J. and Maekawa, K. : Computational model for steel bar embedded in concrete under combined axial pullout and transverse shear displacement, Proc. of JCI, Vol. 15, No. 2, pp. 1249-1254, 1993.
- 6) Qureshi, J. and Maekawa, K. : Stress transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and dowel action, Proc. of 4th. East Asia-Pacific Conf. on Structural Eng. and Const., Seoul, 1993.
- 7) Shin, H: 繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素解析、東京大学学位論文 1988
- 8) 出雲淳一、島 弘、岡村 甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル、コンクリート工学、Vol. 25, No. 9, 1987.
- 9) Maekawa, K. and Shawky, A. : Kinematic nonlinear interaction of RC/soil system under seismic excitation, EURO-C, Innsbruck, 1994.