

地中壁と内壁との合成梁の曲げせん断実験

野村 敏雄 水谷 隆 入沢 賢一
(本社 土木本部 設計部)
小畠 克朗 武田 寿一

Shear-Bending Tests of Beams Composed of Cast-in-Situ Diaphragm Walls and Inner Walls

Toshio Nomura Takashi Mizutani Ken-ichi Irisawa
Yoshiro Kobatake Toshikazu Takeda

Abstract

In an underground structure, it is economical to use cast-in-situ diaphragm walls not only as temporary walls, but also as parts of structural walls by designing as an integral structure with inner walls. This report describes the conditions of bending failure, strength, continuation of axial strains, etc., obtained by experiments on composite beams subjected to shear and bending loads. As a result, structural behaviors of the composite beams were found to be equal to those of monolithic beams, and data were obtained for designing composite walls as underground structures.

概要

地中構造物において、地中壁と内壁で構成される合成壁を一体構造として設計し、地中壁を単に仮設山留、止水壁として使用するだけでなく、内壁本体として利用することは経済性を向上する上で実用的である。

本報告は、合成壁を想定した梁の単純梁2点集中荷重による曲げせん断実験を行ない曲げ破壊性状、強度、およびひずみの連続性などを検討したものである。その結果、合成梁の構造性能は一体打梁と同等であることなどがわかり、合成壁を地中構造物の内壁として設計する場合の資料が得られた。

1. まえがき

現在、地中構造物の建設に際して、地中連続壁（以下、地中壁と呼ぶ）は、単に本体構築のための土留、止水を目的とした仮設壁として使用されている。しかしながら、近年、地中壁の施工性は向上し、地中壁打設後に打継ぐ本体構造物（以下、内壁と呼ぶ）と同等の構造性能を有しており、単に仮設材として利用するだけでは不経済であると言える。

以上の背景を考慮して、本実験は、地中壁と内壁との合成壁を地中構造物本体に利用する場合の技術的諸問題の一部を実験的に検討し、合成壁を一体構造として設計するための基礎資料の一端を得ることを目的としている。

本報告では、地中壁と内壁で構成される合成壁を想定

した梁（以下、合成梁と呼ぶ）、および同一断面の一体打梁の2種類について、単純梁2点集中荷重による曲げせん断実験を行ない構造性能を比較検討した結果を述べている。

2. 供試体

供試体は一体打梁2体、合成梁6体の合計8体である。供試体一覧を実験結果と共に表-1に、供試体寸法と配筋を図-1に示す。

各供試体は40 cm×30 cmの地中壁と内壁を合成した40 cm×60 cmの梁で、地中壁は複筋配置であるが内壁は単筋配置である。全断面の主筋量は1.07%、引張（最下段）鉄筋比は0.70%である。接合面のシベル筋は2-D19@250で接合面積の0.57%である。

供試体は木製型枠により気中製作した。シベル筋で補

強した合成梁の接合面は木製型枠脱型後無処理とし、目荒しした合成梁の接合面は粗骨材が現れる程度とした。また、初期応力（根切り時の地中壁軸力，50 kg/cm²）はコンクリート打設後7日目に、PC鋼棒を用いて外部から導入している。使用材料の内コンクリートの圧縮強度を表一1に、鉄筋の性質を表一2に示す。

3. 載荷および測定方法

図一2に載荷方法の概略を示す。地中壁の初期応力と定軸力および内壁の定軸力は、

それぞれ独自のオイルジャッキで加え、これら所要の初期応力と定軸力を一定に保ちながら、面外曲げ方向（地中壁側が圧縮）に2点集中載荷で加力した。荷重の加え方は、一方向漸増載荷とし、破壊まで加力している。

測定は、荷重、梁の変位、接合面の相対変位、軸方向変位、およびコンクリートと鉄筋のひずみの項目について実施し、ひびわれ発生状況を目視で観察した。

4. 実験結果

本章ではまずひび割れ状況と破壊性状について述べ、次に強度、変位性状、純曲げ区間の曲げ剛性、接合面の性状を以下の4項目について検討した結果を述べる。

- (1) 地中壁と内壁との接合面をジベル筋で補強した合成梁と一体打梁の比較（接合面ジベル筋効果）
- (2) 根切り時の地中壁軸力の有無による比較（地中壁初期応力の有無）
- (3) ジベル筋で補強した合成梁と接合面を目荒ししたのみの合成梁との比較（接合面処理方法の相違）
- (4) 完成後合成壁に作用する軸力（以下定軸力と呼ぶ）の有無

4.1. 破壊性状

ひびわれ発生と破壊性状を写真一1に示す。合成梁6体は、実験開始後、荷重5.5～6.0t（定軸力無）および24.0～29.0t（定軸力有）で曲げひびわれが発生し、荷重38.0～43.0t（定軸力無）、68.0～76.0t（定軸力有）で降伏した。その時、部材角（梁中央の変位 δ と支点から梁中央までのスパン長Lの比： δ/L ）は1/190～1/200（定軸力無）、1/140～1/160（定軸力有）であった。そして、荷重46.6～53.2t（定軸力無）、72.0～79.7t（定軸

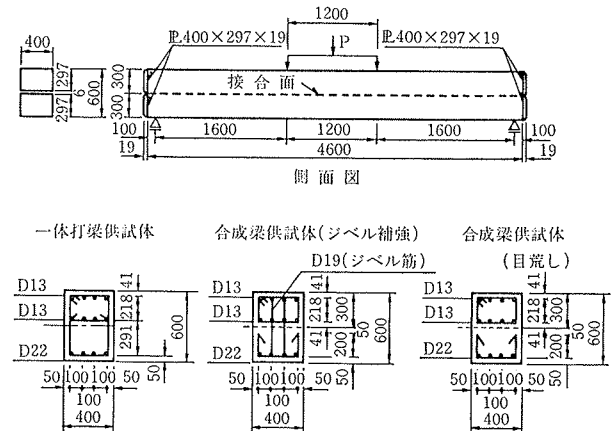
試供体記号	供試体の種類	接合面の処理	地中壁の初期応力(σ_0) kg/cm ²	定軸力(σ) kg/cm ²	実験値		計算値		コンクリート強度(f_c) kg/cm ²	備考
					降伏強度(Py) ton	最大強度(Pu) ton	降伏強度(Py) ton	最大強度(Pu) ton		
A-a	一体打梁	-	-	49.6	71.0 (18.4)	79.8 (20.7)	67.8	73.5	296	地中壁側 定軸力 σ
A-b				0	37.5 (9.7)	46.6 (12.1)	37.4	43.4	287	地中壁側
B-a	合成梁	ジベル筋補強	50	56.2	76.0 (19.7)	79.7 (20.7)	69.3	72.0	287 290	地中壁側 + 初期応力 σ_0 定軸力 σ
B-b				0	45.0 (11.7)	53.2 (13.8)	41.4	49.3	283 295	地中壁側 初期応力 σ_0
B'-a		0	49.6	69.0 (17.9)	75.1 (19.5)	67.8	73.5	287 287	地中壁側 定軸力 σ	
B'-b			0	38.0 (9.9)	48.6 (12.6)	37.4	43.4	308 294	地中壁側	
C-a	目荒し	50	56.2	68.0 (17.7)	72.0 (18.7)	69.3	72.0	295 299	地中壁側 + 初期応力 σ_0 定軸力 σ	
C-b			0	43.0 (11.2)	51.0 (13.2)	41.4	49.3	280 300	地中壁側 初期応力 σ_0	

〔降伏、最大強度の()内の値はせん断断力 $\tau=Q/bjd$ を示す。コンクリート強度は上段：地中壁部分、下段：内壁部分〕

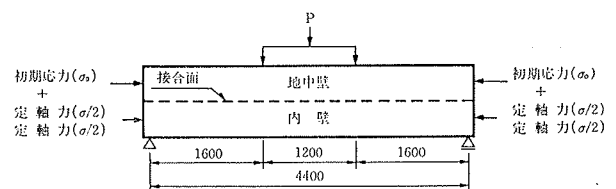
表一1 供試体および実験結果一覧

径	公称断面積 (cm ²)	降伏点強度 (kg/cm ²)	弾圧係数 (kg/cm ² × 10 ⁶)	備考
D13	1.267	3770	1.78	地中壁主筋 フープ筋
D19	2.865	3730	1.89	ジベル筋
D22	3.871	3780	1.90	内壁主筋

表一2 鉄筋の性質



図一1 供試体寸法および配筋



図一2 載荷方法の概略

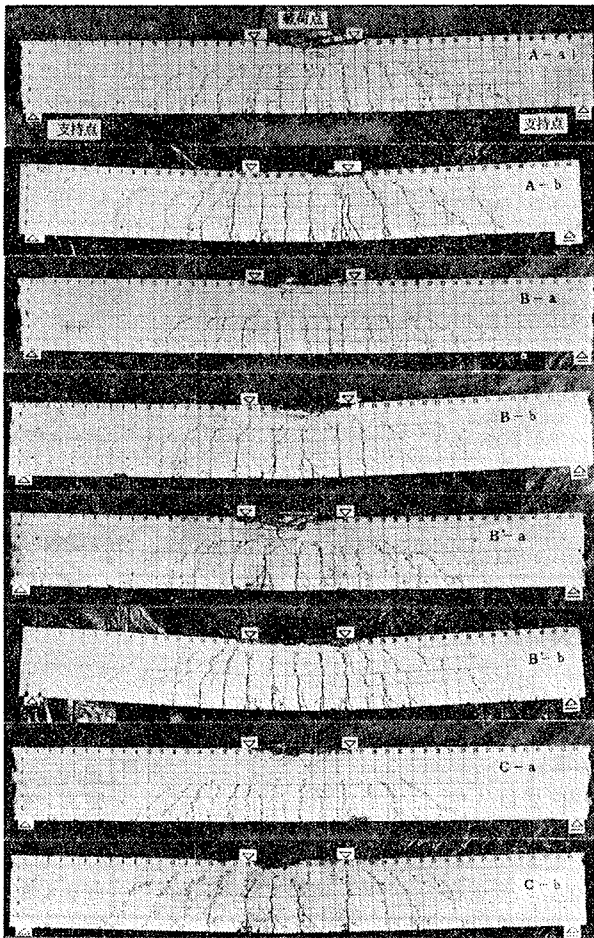


写真-1 ひび割れ発生と破壊性状

力有)で純曲げ区間のコンクリートが曲げ圧縮破壊して最大荷重に達した。その時、部材角は1/30~1/80(定軸力無), 1/110~1/120(定軸力有), また、コンクリートの圧縮縁ひずみは3,000~4,000 μ に達していた。これらの接合面をジベル筋補強または目荒しした合成梁の実験経過は一体打梁と同等であり、最終的な破壊性状は初期応力と定軸力の有無による顕著な影響はない。

4.2. 強度

表-1に示した各供試体の降伏強度と最大強度に関する、前記(1)~(3)項での強度比較を図-3に、また、実験値と計算値の比較を図-4に示す。なお、降伏強度は下段鉄筋が降伏ひずみに達した荷重とした。降伏強度と最大強度についてまとめると次のようである。

- (1) 接合面ジベル筋の効果 ジベル筋補強した合成梁の強度は、一体打梁と同等である。
- (2) 地中壁初期応力の有無 初期応力がある合成梁の強度は初期応力がない合成梁と比較してやや(9~16%)高い。
- (3) 接合面処理方法の相違 目荒しした合成梁の強度は、ジベル筋補強した合成梁と比較してやや(4~11

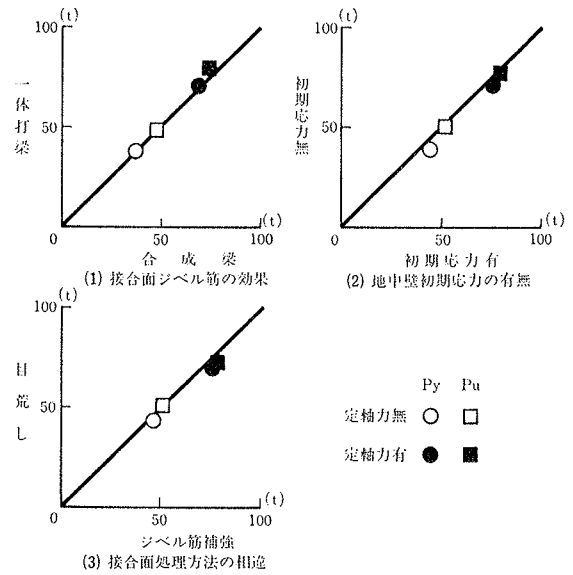


図-3 強度の比較

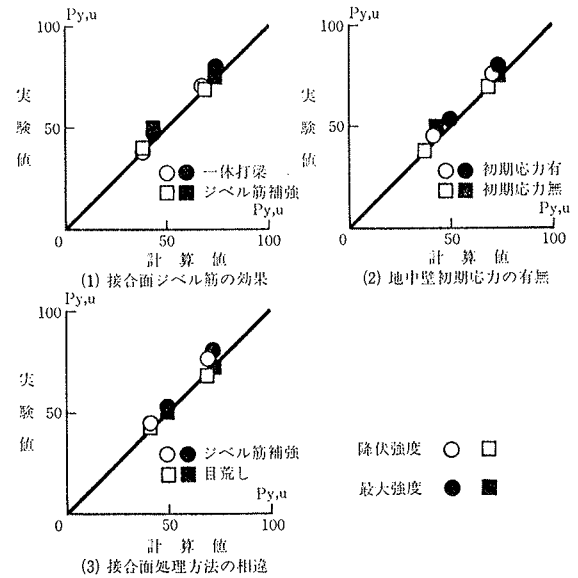


図-4 実験値と計算値の比較

%)低い。

(4) 軸力の有無 定軸力がある合成梁の強度は一体打梁と同様に定軸力がない合成梁と比較して高くなる。

合成梁の解析は一体打梁と同様に通常の曲げ理論により、初期応力の影響を考慮して以下のように行なった。

すなわち、初期応力によるひずみを算定した後、ある荷重増分に対してコンクリート圧縮縁ひずみを増加させ、ひずみ分布を仮定し内力を算定する。そして、内力と外力の釣合条件により断面力増分を算定しつつ、これをコンクリートひずみが終局ひずみ(3,500 μ)に、または、鉄筋ひずみが降伏もしくは、終局ひずみに至るまで繰返すことにより強度を求めた。なお、コンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係はそれぞれ放物線型¹⁾および完全弾塑性体として取扱った。

その結果、実験値と解析値の比は、 P_y が0.98~1.10 (平均1.03) で、 P_u が1.00~1.11 (平均1.06) であり実験値と計算値はよく一致している。また、これらは、初期応力を偏心軸力として扱い、手計算で求めることも可能である。

4.3. 変位性状 (荷重~変位曲線)

各供試体の荷重 (P) とスパン中央での変位 (δ) との関係を図-5に、また、降伏荷重時の変位 (δ_y) と最大荷重時の変位 (δ_u) を図-6に、それぞれ比較項目別に示す。なお、図-5で◇と◆印は曲げひび割れ発生荷重 (P_c) 時を、○と●印は下段鉄筋のひずみで求めた降伏荷重 (P_y) 時を、および△と▲印は最大荷重 (P_u) 時をそれぞれ示す。

P - δ 曲線で変位増大の割合が大きくなり始める (部材降伏) 荷重と鉄筋のひずみから求めた前記降伏荷重 (P_y) とを比較すると、初期応力と定軸力の両軸力がないジベル筋補強の合成梁と定軸力がない一体打梁はほぼ同じであるが、両軸力がある合成梁と一体打梁は P_y が低く、

その割合は両軸力の和が大きいものほど大きい。

変位性状についてまとめると次のようである。

(1) 接合面ジベル筋の効果 ジベル筋補強の初期応力がない合成梁の変位性状は定軸力がある場合もない場合も一体打梁と同等である。

(2) 地中壁初期応力の有無 初期応力がある合成梁は初期応力がない合成梁と比較して定軸力がない場合は δ_u が約 1/3 となり、曲率も対応している。

(3) 接合面処理方法の相違 目荒しした合成梁はジベル筋補強した合成梁と比較して、 δ_y は同等であるが δ_u はやや大きくなる。

(4) 定軸力の有無 定軸力がある合成梁は定軸力がない合成梁と比較して、一体打梁と同様に δ_y はやや大きくなり δ_u は反対に小さくなる。

4.4. 純曲げ区間の曲げ剛性

梁の純曲げ区間の相対変位から下式で求めた曲げ剛性 [EI] と曲げモーメント (M) の関係を図-7に示す (図において、最初の直線部分は計算より求めた弾性時の曲

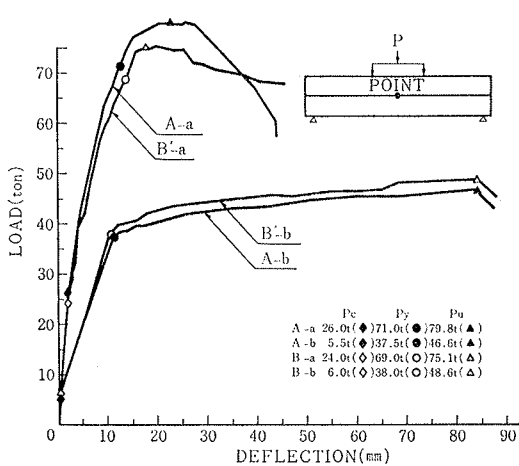


図-5- (1) 接合面ジベル筋の効果

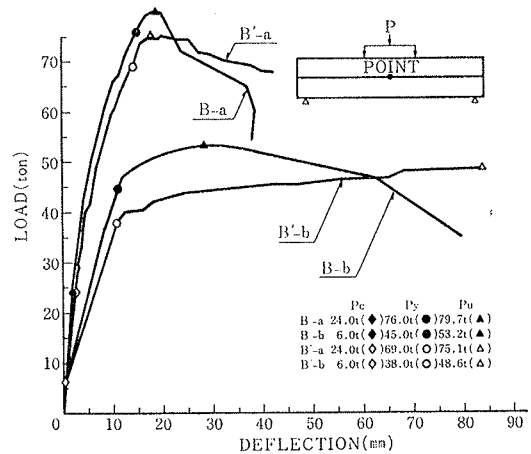


図-5- (2) 地中壁初期応力の有無

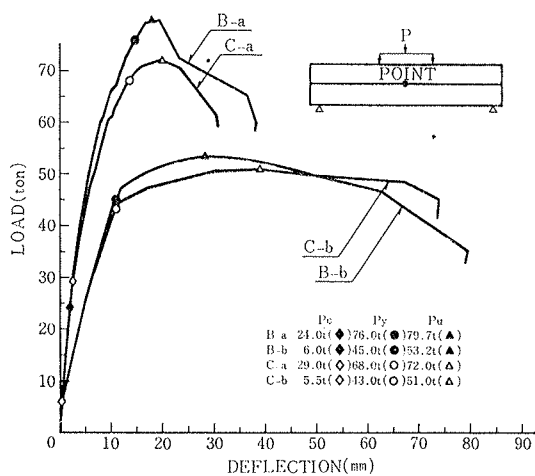
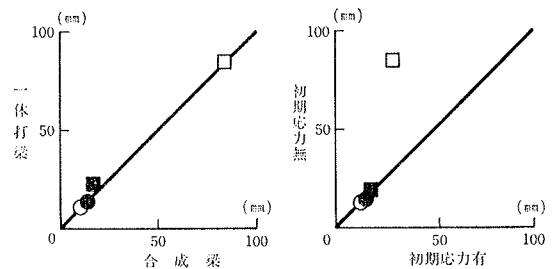


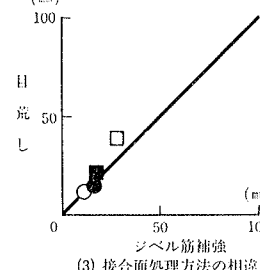
図-5- (3) 接合面処理方法の相違

図-5 荷重~変位曲線



(1) 接合面ジベル筋の効果

(2) 地中壁初期応力の有無



(3) 接合面処理方法の相違

図-6 δ_y および δ_u の比較

げ剛性である)。

$$[EI] = M / \phi,$$

$$\phi = (8/L^2) \times (\delta_1 - \delta_2)$$

ここに、 ϕ : 曲率,
L: 純曲げ区間の距離,
 δ_1 : スパン中央の変位,
 δ_2 : 左右の載荷点における変位の
平均値, である。

M~EI 曲線をみ
ると合成梁の曲げ剛

性は定軸力がない場合には曲げひびわれ発生後、急激に低下し、降伏時まではあまり変化を示さず、降伏後にまた急激に低下して最大強度時にいたる。それに対して、定軸力がある場合は曲げひびわれ発生後、ゆるやかに低下してゆき、降伏後にやや急激に低下するものの定軸力のない場合と比較してわずかであり、降伏強度時では定軸力の有無の影響が顕著ではないが、最大強度時ではその影響が現われる。これらの傾向は、一体打梁の場合も同様である。

各比較項目ごとに曲げひびわれ後の曲げ剛性をみると、ジベル筋補強した合成梁の曲げ剛性は一体打梁とほぼ同等であり、初期応力のある合成梁はない合成梁よりも、また、ジベル筋補強した合成梁は目荒した合成梁よりもやや高い。

4.5. 接合面の性状

純曲げ区間の軸方向変位から求めた、断面の軸ひずみ分布の例を図-8に示す。他の供試体も同様であり、合成梁の曲げモーメントによる断面のひずみ分布は、定軸力の有無にかかわらず、一体打梁と同様に直線的に変化し接合面で連続している。また、①接合面ジベル筋の効果、②地中壁初期応力の有無、③接合面処理方法の相違による顕著な影響はない。

合成梁の最大強度時のせん断スパン内での接合面の相対変位は、0.08 mm 以下でありジベル筋の軸ひずみは 670 μ 以下 (図-9 参照) であるが、これらの変位とひずみは曲げせん断ひび割れによるものと考えられる。

5. あとがき

合成梁と同一断面の一体打梁の単純梁2点集中荷重による曲げせん断実験における、曲げ破壊状況および強度について検討した。その結果、合成梁のそれらは一体打

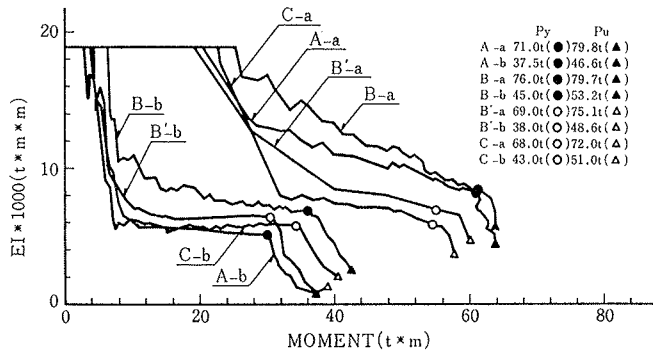


図-7 M~EI 曲線

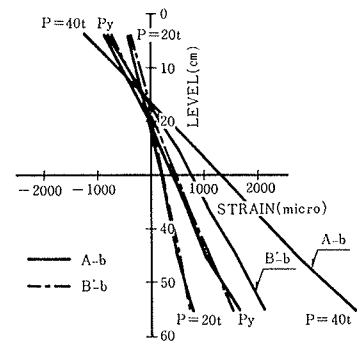


図-8 軸ひずみ分布

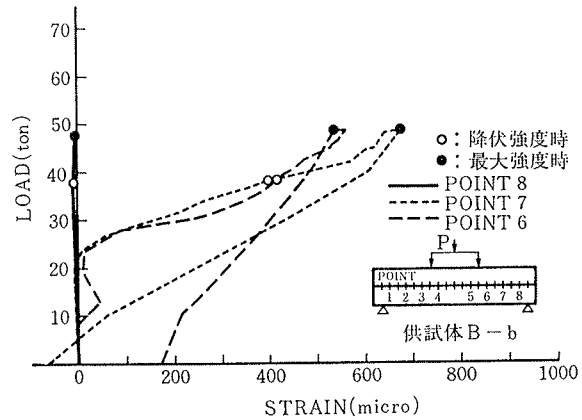


図-9 ジベル筋の軸ひずみ

梁とほぼ同等であり、ジベル筋補強または目荒した合成梁の曲げ強度は、地中壁と内壁を一体打ちと仮定し、一体打梁と同様に、通常の方法で計算できると言える。

また、変位性状、曲げ剛性、接合面の性状は接合面をジベル筋補強または目荒した合成梁とともに、一体打梁と比較して顕著な差がなく、根切り時の地中壁残留軸力による顕著な影響もないこと、また、合成梁の純曲げ区間の曲げひずみ分布は一体打梁と同様に連続していることがわかった。

以上の実験結果から、地中壁と内壁で合成される壁を地中構造物の本体として利用する場合の曲げ設計に関する設計資料が得られた。

なお、本実験は、東京電力(株)技術開発研究所土木建築研究室の依頼により、東電設計(株)と共同で行なったものであり、関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) 土木学会: コンクリート構造物の限界状態設計法指針(案), コンクリートライブラリー-52号, (1983. 11)