

地中連続壁を用いた合成構造ボックスラーメンの曲げ破壊実験

大内 一 東野 光男 入沢 賢一
(本社 土木本部 設計部)
小畠 克朗 武田 寿一

Experimental Study on Bending Behavior of Box Frame Structure Using Diaphragm Walls

Hajime Ohuchi Mitsuo Higashino Ken-ichi Irisawa
Yoshiro Kobatake Toshikazu Takeda

Abstract

This report describes the results of bending failure experiments on reinforced concrete frame structures constructed with diaphragm walls and inner walls with the purpose of making use of the diaphragm walls in permanent shaft structures. Three test models were adapted. These were BN, a monolithically-cast specimen, BCD, a specimen with joints between diaphragm and inner walls connected by dowel reinforcement, and BCC, a specimen with construction joint surfaces simply chipped before joining. The following were confirmed through the test results of these models subjected to comparatively low shear stresses ($\tau=Q/BD=8.8\text{ kg/cm}^2$): (1) The BCD and BCC models give almost the same strengths under design load, 87 percent under yielding load, and 88 percent under ultimate load in comparison with the BN model. (2) Compared with BN, they show about 80 percent absorbed energy. (3) Although both models behave as one body except at the final stage, they indicate 70 percent initial stiffnesses compared with that of BN because of the existence of shrinkage stresses and joint surfaces. (4) Differences in failure modes, strengths, and deformation quantities could not be observed between the two connecting methods, with dowels and with chipping.

概 要

地中連続壁（連壁）を立坑本体に利用する目的で、連壁と内巻壁の一体化を図った合成構造ボックスラーメンの曲げ破壊実験を行なった。試験体は一体打ちのBN試験体、ジベル筋で連壁と内巻壁を一体化したBCD試験体、および打継ぎ面をチップングしたのみのBCC試験体の計3体である。常時土水圧を対象に、せん断が小さく（短辺端部で $\tau=Q/BD=8.8\text{ kg/cm}^2$ ）曲げ破壊型の今回の試験結果より次のことが分かった。(1)各強度についてはBNに比しBCD、BCC共鉄筋許容応力まではほぼ同一、降伏荷重で87%、最大荷重で88%の値を示した。(2)最大荷重までの吸収エネルギーは、BNに比しBCD、BCC共ほぼ80%である。(3)鉄筋降伏荷重まではBCD、BCC共連壁内巻壁は一体として挙動するが、初期剛性はBNに比し70%である。(4)連壁内巻壁打継ぎ面処理法の違いによる破壊モード、強度、変形の差は認められない。

1. はじめに

地中連続壁（以下連壁と呼ぶ）の本体利用の動きは、近年一段と増加しつつある。本実験は東京電力㈱からの委託研究として実施されたものであり、連壁と内巻壁からなる合成壁を本体として利用する為の基礎研究である。

従来の連壁ではエレメント間を構造的に接合していない為、鉛直方向に限って応力負担が可能なものとして取

り扱って来た。本研究は、水平方向に応力を負担させる本体利用について検討する為、連壁と内巻壁で構成される合成構造ボックスラーメンの曲げ破壊実験によって、その強度、破壊モード及び変形状を調べるものである。

2. 試験体

試験体は表一に示す様に、一体打ちのBN試験体と、ジベル筋で連壁と内巻壁を一体化したBCD試験体、

および打継ぎ面をチップングしたのみの BCC 試験体、各 1 体の合計 3 体である。

2.1. 形状寸法と配筋

試験体の形状寸法と配筋を BCC の場合を例に示す(図一1)。形状寸法は既応の平均的な実物立杭を参考にその 1/2.5 とした。内巻壁の壁厚は、次の手順により決定した。実物立杭に完成時設計荷重を作用させた 3 次元 FEM 解析を行ない、G.L. -20 m での水平方向断面力をもとに、一体壁としての計算を行なって、これを決定した。配筋は、BCD を一体壁として計算し、BN, BCC は BCD に準じた。BCD, BCC において連壁の主筋は各連壁鉛直打継ぎ面を貫通させなかったが、短辺側の同打継ぎ面近傍では連壁隅角部の主筋を折り曲げ、内巻壁に定着させた。また BCD においてジベル筋は、連壁と内巻壁のスターラップを連結する様にスターラップと径、ピッチを同じくした。なお、最外端引張筋の全断面に対する鉄筋比は $P_t=0.13\sim 0.18\%$ となった。

2.2. 製作

試験体はすべて屋外で木製型枠を組み立て、空中で製作した。コンクリートは、BN については 1 回で打設し、BCD, BCC については実物との対応から連壁隅角部、連壁中間部、内巻壁の順序で 3 回に分けて打設した。なお、連壁部ではコンクリート打設直前にポリマー安定液を主筋全周に塗布した。連壁鉛直打継ぎ面については木製型枠によるコンクリート面に直接新たなコンクリートを打継いだ。連壁内巻壁打継ぎ面は、BCD では木製型枠脱型後無処理のまま新たなコンクリートを打継ぎ、ジベル筋は連壁部作製の際に内巻壁の型枠を貫通してさし筋した。BCC では材令 5 日の脱型直後、全面にわたって手はつりで 5 mm 程度の凹凸の目荒しを行ない、水洗いして骨材表面を出す程度とした。

2.3. 使用材料

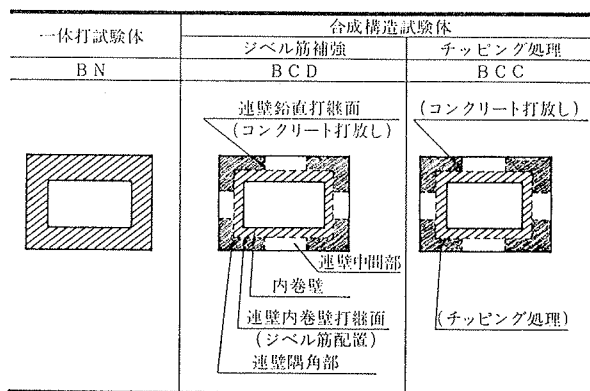
今回使用したコンクリート、鉄筋の材料試験結果を表一2に示す。コンクリートはすべての部分で同一の配合とし、鉄筋は SD30 を用いた。

3. 実験方法

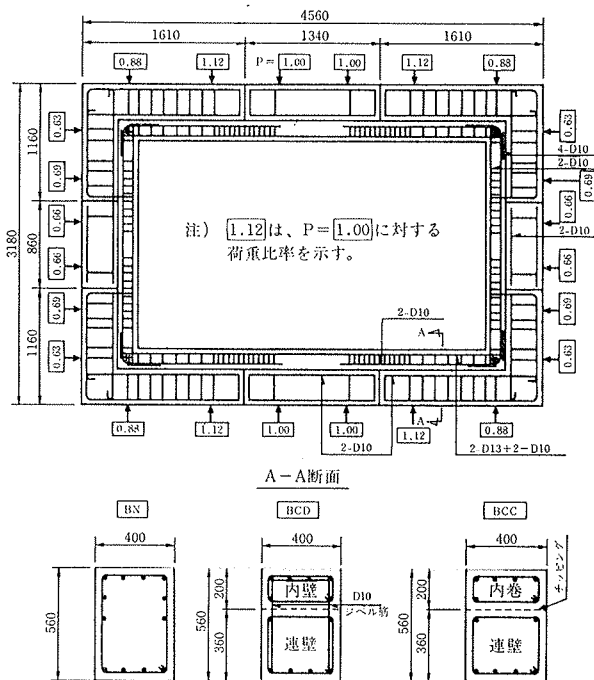
3.1. 荷重方法

土水圧による等分布荷重を図一1に示す様な多点集中荷重で近似させ、4 段階(ひび割れ、許容応力度、鉄筋降伏、最大→破壊)の一方方向繰返し荷重とした。荷重装置は図一2に示す様に 2 軸の対称性を考慮し、PC 鋼棒を用いて試験体に反力を伝える内部バランス方式とした。また、長辺側と短辺側の荷重はそれぞれ独立させ、2 台の油圧ポンプを使用した 2 系列のシステムとした。

3.2. 測定方法



表一1 試験体一覧



図一1 形状寸法、配筋および加力方法

コンクリート (空中養生)

試験体	圧縮強度 kg/cm ²		引張強度 kg/cm ²		弾性係数 kg/cm ² × 10 ⁵		
	連壁		連壁		連壁		内巻壁
	隅角部	中央部	隅角部	中央部	隅角部	中央部	
B N	—	—	312	—	—	—	2.55
B C D	336	329	282	34	30	27	2.53 2.53 2.41
B C C	341	329	283	35	30	27	2.64 2.55 2.35

鉄筋

径	降伏点度 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²) (×10 ⁶)	用途
D10	3590	5260	1.93	主ジベル筋
D13	3530	5280	1.85	主筋

表一2 材料試験結果

荷重はすべての PC 鋼棒端部でロードセルにより検出した。変位は高感度変位計を用いたが、部材相対変位(辺のたわみ, 伸び)は試験体隅角部に埋込んだボルトに一端をピン, 他端をローラーとしたゲージホルダーを取り付けて測定した。打継面の相対変位はずれと開きを測定した。また鉄筋とコンクリートのひずみはワイヤーストレインゲージを用いた。

4. 弾塑性解析

合成構造評価の基準となる一体打ち試験体 BN に関して弾塑性解析を行なった。本法は 2 軸対称性より 1/4 領域をラーメン置換したのち, 材軸方向に要素分割し, さらに厚さ方向にも層分割して各層応力を平面保持則に立脚して逐次評価していく増分解法である。なお, 鉄筋はバイリニア, コンクリートはトリリニアの応力-ひずみ関係を用いた。¹⁾

5. 実験結果と考察

表-3 に実験結果一覧を, 図-3~5 に各試験体最終破壊状況を, また図-6 には荷重-変位スケルトン関係を示す。

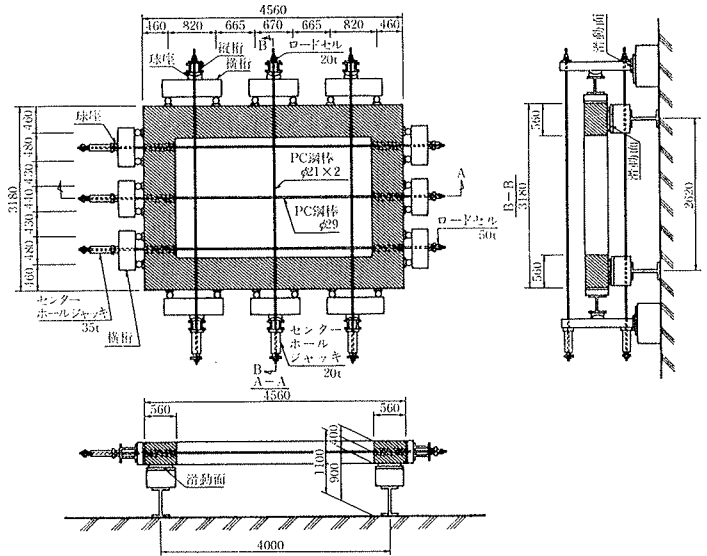


図-2 荷重装置

試験体	曲げひび割れ発生荷重 Pc(t)	鉄筋許容応力度荷重 Pa(t)	鉄筋降伏荷重 Py(t)	最大荷重と相対変位 Pu(t)	最大荷重と相対変位		破壊状況
					長辺	短辺	
MODEL-BN	3.8	7.4	11.3	17.3	44.7	-5.7	長辺中央, 曲げ圧壊
MODEL-BCD	—	7.0 (0.95)	9.8 (0.87)	15.2 (0.88)	43.1 (0.96)	-11.7 (2.04)	長辺中央, 曲げ圧壊
MODEL-BCC	—	7.6 (1.03)	9.8 (0.87)	15.2 (0.88)	44.6 (1.00)	-13.2 (2.31)	長辺中央, 曲げ圧壊

注: ()内はMODEL-BNの結果に対する比率を示す。

表-3 実験結果一覧

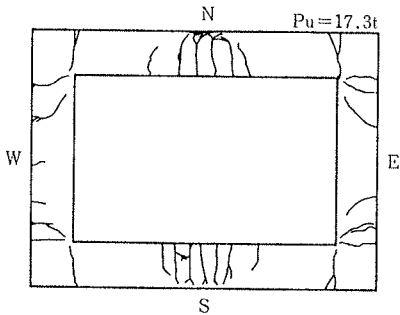


図-3 最終破壊状況 (BN)

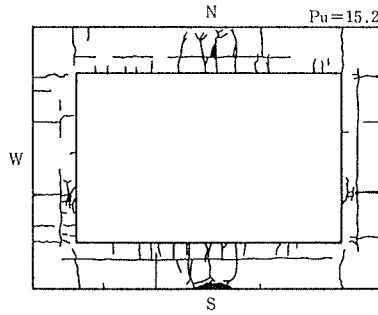


図-4 最終破壊状況 (BCD)

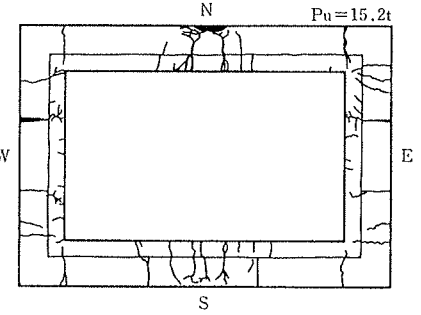


図-5 最終破壊状況 (BCC)

5.1. 破壊性状

BN 試験体の諸強度は表-3 に示す通りであるが, 最終破壊は $P=17.3t$ で長辺中央コンクリートが圧壊して破壊に至るが, この時長辺中央, 短辺端部引張筋はすべて降伏している (ここに P は長辺中央集中荷重値, q は等分布荷重換算値)。図-6 に示す様に解析値は良好な対応を示し, ひび割れ, 許容応力, 鉄筋降伏, 最大の諸強度も各々実験: 3.8t, 7.4t, 11.3t, 17.3t に対し解析: 6.6t, 9.0t, 11.8t, 17.8t とひび割れを除き良い対応を得ている。なお, 最大荷重に対する解析値は長辺中央も高応力ながら, 短辺端部コンクリートが厳しく同部の圧壊をもってこれを定義した。なお, 実験では $P=15.7t$

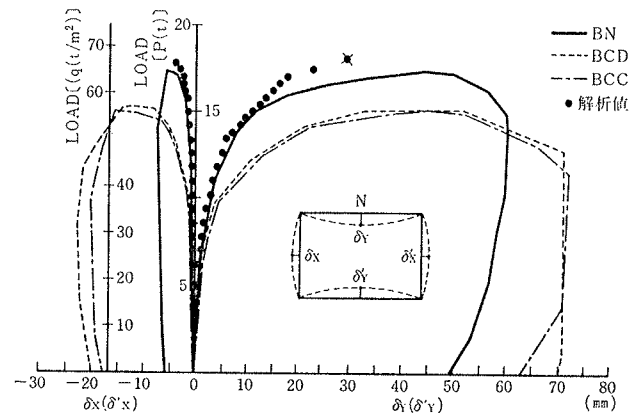


図-6 荷重-変位関係 (スケルトン)

($\tau=Q/BD=9.0 \text{ kg/cm}^2$) 時に曲げせん断ひび割れが発生した。

合成構造試験体 (BCD, BCC) については製作時収縮応力の存在により加力直後内巻壁に、又連壁内巻壁打継面に沿い各々ひび割れが発生した為、明確な曲げひび割れ荷重は捉えることは出来なかった。鉄筋降伏荷重までひび割れ発生や鉄筋ひずみ発生状況は BN とほぼ同じであるが、長辺中央引張筋で決る降伏荷重は両者共 9.8 t と BN に比しやや低めの荷重を示した。最終サイクルでは降伏荷重を過ぎたあたりより短辺側連壁鉛直内継面の開きが大きくなり、同部内巻壁のひずみが增大すると共に長辺中央部コンクリートが圧壊して最終破壊に至った。BCD, BCC は最終破壊までほぼ同様の挙動を示し、許容応力度荷重までは BN に比し 7 割程度の剛性を、また最大荷重は 88% の値を示した。最大荷重時変位は長辺中央部では差異は認められないが、短辺側では連壁鉛直打継面の開きの為 BN に対しほぼ 2 倍の値を示した。

5.2. 曲げひずみ性状

図-7~8 に曲げひずみ分布を示す。合成構造試験体はほぼ同様であるので BCC の結果で代表させる。降伏荷重までは試験体間に顕著な差はない。最大荷重時では特に短辺側で挙動差が現われ、連壁鉛直打継部近傍では内巻壁のみで応力を負担している様相がうかがえる。長辺側ではこの種の挙動は観察されず、最終まで連壁内巻壁が一体として挙動している。また BCD, BCC の場合、長辺端部は勿論、短辺端部引張筋のひずみが BN に比し小さい。

5.3. 打継面の性状 (短辺側連壁鉛直打継面近傍)

図-9 に主筋を折り曲げてジベル筋として用いた鉄筋の荷重-ひずみ関係を、図-10~12 に連壁鉛直打継面の開き、同断面内巻型の引張筋ひずみとコンクリート圧縮ひずみについて荷重との関係を示す (BCC の結果を代表として示す)。降伏荷重以後各変位、ひずみ共増大し始め、最終直前の 14 t 程度で急激に増加する傾向にある。コンクリート圧縮ひずみも大きく、同部での破壊を示唆する。なお、当部分から離れた他の打継面では、ずれ、開き共極めて小さい。

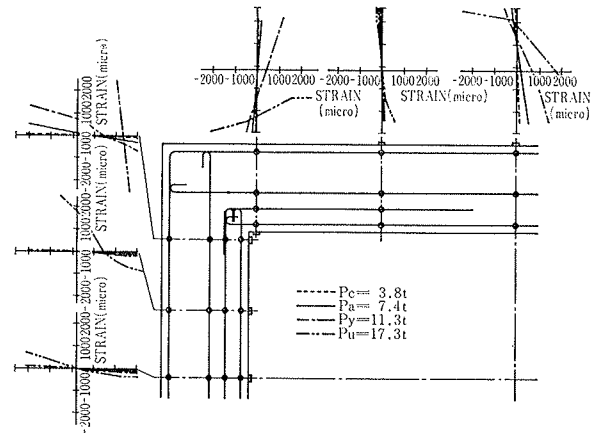


図-7 曲げひずみ分布 (BN)

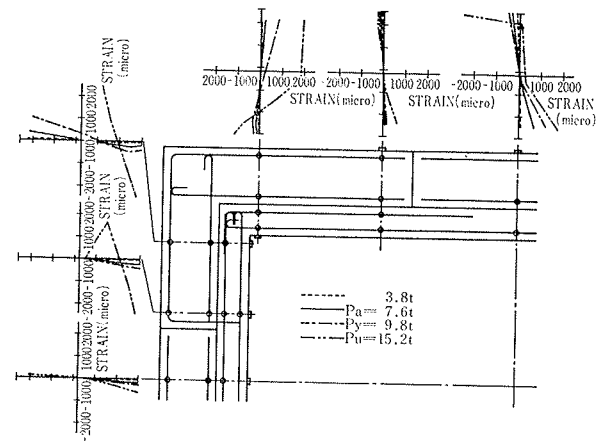


図-8 曲げひずみ分布 (BCC)

5.4. 曲げ終局強度

今回の実験結果を踏まえ、表-4 に示す様な崩壊形に対して終局強度を求める、BN は Case-1 を検討する。BCD, BCC は主筋配置が同様であり、材料特性もほぼ同じであるの

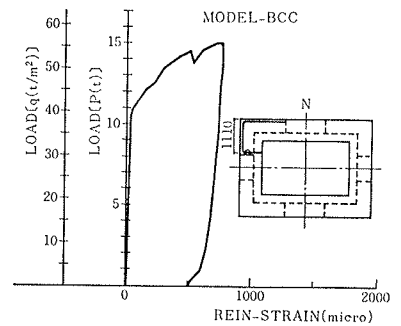


図-9 荷重-ジベル筋ひずみ (BCC)

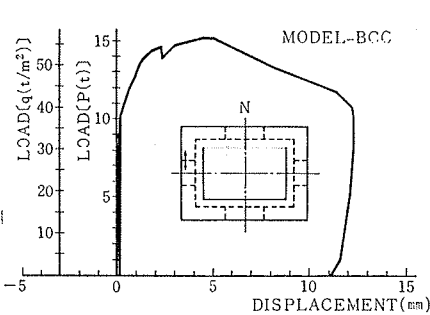


図-10 荷重-連壁鉛直打継面開き

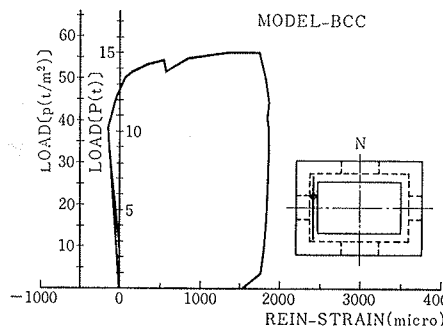


図-11 荷重-内巻壁引張筋ひずみ

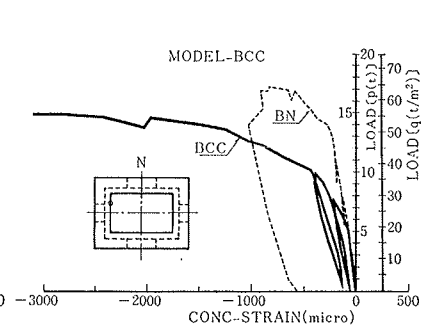


図-12 荷重-内巻壁圧縮ひずみ

でBCDをもって代表させるが、これは Case-1 は勿論、長短辺端部で塑性ヒンジが出来ないとした Case-2 (実験結果に対応) についても検討する。又実験最終段階で短辺側は内巻壁の応力負担が急増したことから Case-3 に示す様な短辺側を重ね壁とした場合の終局強度も補足的に検討する。なお、終局強度の算定にあたっては塑性ヒンジの形成される断面を対象に、M-N 関係を一次式で近似し、系の釣合を考慮することにより求める。

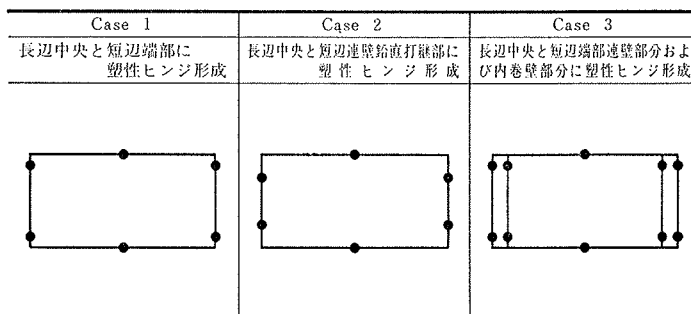


表-4 崩壊形

以上により求めた結果を表-5 に示す。BN は実験値 17.3 t に対し、14.4 t と低めの値を与えた。BCD は実験と異なり Case-1 の崩壊形で決り、14.2 t (実験 15.2 t) になった。実験では破壊を決定づけた短辺側連壁鉛直打継部断面の内巻壁には最終段階で材軸方向の割裂的なひび割れや、斜めのひび割れが発生しており、複雑な応力状態での破壊といえる。また短辺側を重ね壁として計算した Case-3 の結果は、軸力を内巻壁にすべて負担させた場合 9.2 t、断面積比に応じて負担させた場合 7.6 t となり、実験値はこれよりかなり大きくなっている。

試験体	Case 1	Case 2	Case 3	実験値
BN	14.4	-----	-----	17.3
BCD (BCC)	14.2	17.4	*1) 9.2 *2) 7.6	15.2

* 1) 軸力を内巻壁にすべて負担させた場合
* 2) 軸力を断面積比に応じて負担させた場合

表-5 曲げ終局強度

5.5. 吸収エネルギー

図-13には荷重-換算累積変形を示す。ここに換算累積変形とは試験体各位置の集中荷重とこれに対応する荷重方向変位の積の総和を長辺中央荷重Pで除した変位の次元を有する量である。従って図中包絡線に囲まれた部分の面積は外力仕事量であり、試験体吸収エネルギーといえる。最大荷重までの吸収エネルギーを対象に求めたエネルギー比率はBNに比しBCD: 80%, BCC: 79%であった。

6. 結び

以上より常時土水圧を対象とした、せん断が小さく(短辺端部で $\tau = Q/BD = 8.8 \text{ kg/cm}^2$)、曲げ破壊型の今回の試験体から次のことが言える。

①長辺中央、短辺端部塑性ヒンジで終局強度が決ったBNの実験結果を弾塑性解析で比較的良好に追跡できた。BCD, BCCは長辺中央塑性ヒンジ形成後、短辺側連壁鉛直打継面の開きが大きくなり同断面内巻壁が破壊して終局強度が決った。崩壊形による曲げ終局強度計算とは異なる結果を与え、実験結果は純粋な曲げ破壊ではないことを示唆する。②BNに比し、BCD, BCC共鉄筋降伏まではほぼ同一、降伏荷重で87%, 最大荷重で88%の強度を示した。③BNに比し、最大荷重までの吸収エネルギーはBCD, BCC共ほぼ80%であった。④鉄筋降伏

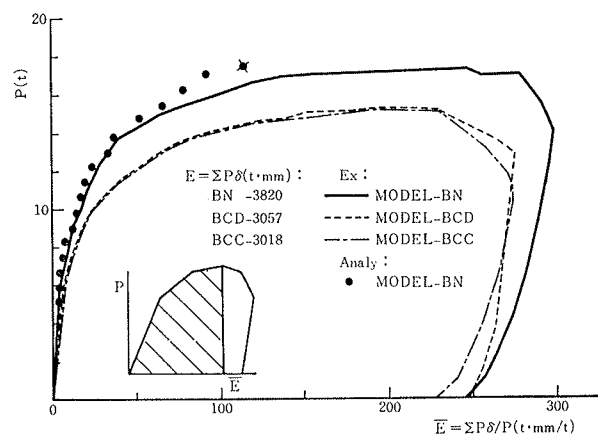


図-13 荷重-換算累積変形関係

荷重まではBCD, BCC共連壁内巻壁は一体壁として挙動するが初期剛性はBNに比し70%であった。⑤連壁内巻壁打継面処理法 (BCD: シベル筋補強, BCC: チッピング処理) の違いによる破壊モード, 強度, および変形の差は認められなかった。

参考文献

- 1) 大内, 他: RC大型冷却塔模型の水平加力実験と弾塑性解析, 土木学会論文報告集, No. 266, (1977. 10), pp. 39~50
- 2) 土木学会: コンクリート構造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)