

論文 地中埋設を模擬した RC ボックスカルバートの非線形挙動に関する定量的評価

足立正信^{*1}・本田国保^{*2}・石川博之^{*3}・武田智吉^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計においては、地震後に許容される被災レベルに応じて所要の塑性変形能やねばりを有する設計が期待されるが、ボックスカルバートのような不静定次数の高い構造物では、静定系に比べてその非線形性や崩壊機構が複雑となるため、その終局域の挙動を的確に把握することが難しい。本研究は、非線形有限要素法を用いて、この種の構造物の荷重－変位関係に及ぼす要因について解析的な検討を行い、種々の影響因子が構造物の耐荷力やひび割れ性状に及ぼす影響について検討した。また、地盤との連成解析から、地盤との剥離の影響についても検討した。

キーワード：地中埋設、ボックスカルバート、非線形有限要素法、影響因子分析

1. はじめに

地中に埋設された構造物の地震時挙動は、高架橋などの地上構造物と異なり自己励起することなく、周辺地盤のせん断モードに依存していると考えられ、地震に対する影響は小さいとされてきた。しかしながら、兵庫県南部地震(1995. 1. 17)では、地下鉄構造物にも大きな被害が生じ、地中構造物の耐震安全性の重要性が改めて認識された。

RC構造物の耐震設計は、「コンクリート標準示方書 耐震設計編」の制定により、特にレベル2地震動に対しては、地震後に許容される被災レベルに応じて塑性変形能やねばりを有する設計が必要となる。地中に埋設されたボックスカルバートは、不静定次数の高い構造物であるため、部材降伏後でも大きな変形能力を有していると考えられるが、構造物の最大耐荷力およびそれに至る変形挙動について体系的に研究されたものは少ない。そこで本研究では、2連ボックスカルバート型の地中埋設構造物を対象に、岡村・前川らによって開発された二次元非線形有限要素解析プログラム [1] を用いて、部材降伏以降の非線形挙動および非線形挙動に及ぼす種々の要因について解析的な検討を行った。その影響因子としては、埋設深さをパラメータとした土被り厚、材料強度および主鉄筋比を選び、これらの諸因子が構造物の耐荷力やひび割れ性状にどの程度影響を与えるのかを検討した。また、地盤－構造物連成モデルによる静的解析により、地盤と構造物の剥離現象の影響についても検討した。

2. 解析概要

本解析で対象とした 2連ボックスカルバートの断面寸法と解析モデルを合わせたものを図-1に示す。この解析モデルでは、断面高さ方向を1分割で要素分割し、境界条件は底版両端部および中央部の3ヶ所を固定とした。また、解析に用いた材料定数および配筋条件は表-1に示す値を用いた。解析プログラムは岡村・前川らによって開発され、Shawky. Aらによって改良された『WCOMD-SJ』[2] を用いており、構成則関係についても、弾塑性破壊モデル(Maekawa and Okamura, 1983)など

*1 東電設計 (株) 技術開発本部 耐震技術部 (正会員)

*2 東電設計 (株) 技術開発本部 耐震技術部

*3 東京電力 (株) 技術開発本部 原子力研究所 耐震研究室

そのプログラムに組み込まれているものを用いている。構造物は 2 次元平面応力 RC 要素でモデル化しており、要素剛性はコンクリートと鉄筋を合わせた等価剛性としている。

解析は、まず、初期拘束荷重を加えた後、構造物のせん断変形をシミュレートするよう頂版に直接地震力に相当する荷重(変位制御)を作用させる方法で行った。解析パラメータは、ボックスカルバートの非線形挙動に及ぼす主な影響因子から、①土被り厚, ②材料強度, ③主鉄筋比を選んだが、材料強度と主鉄筋比のパラメータ解析では、土被り厚を 10m ($P_0=0.2$ MPa) とした。また、地盤-構造物連成系解析は 図-2 に示す地盤を表層と岩盤の 2 層モデルとし、表層部での相対変位をモデル側面から入力している。この解析では、地盤-構造物間の剥離や滑りが構造物の変形に及ぼ影響について検討した。

3. 解析結果

3. 1 土被り厚の影響

土被り厚の影響については、土被り厚 $H=0\sim 20\text{m}$ に相当する初期拘束荷重 $P_0=0\sim 0.4\text{MPa}$ の範囲内で設定した 4 ケース (caseA1~A4) を行った。

各ケースの荷重-変位応答関係 (以降 $P-\delta$ 関係と称す) を図-3 に示すが、ボックスカルバートの $P-\delta$ 関係に及ぼす土被り荷重の影響が顕著であることが分かる。今回の解析では、構造物の最大耐荷力点を把えることは出来なかったが、 $\delta=50\text{mm}$

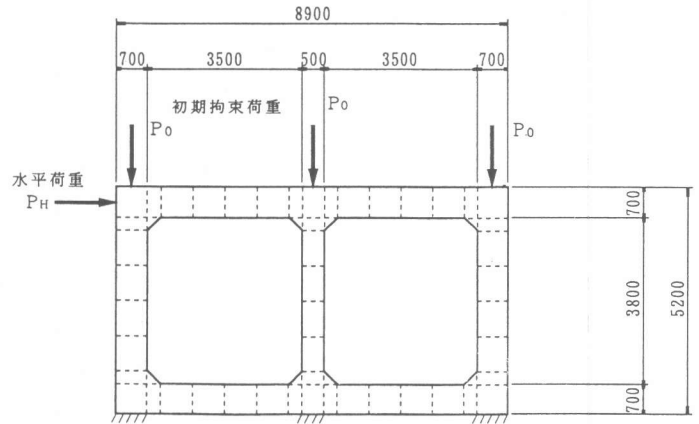


図-1 断面図

表-1 解析諸元

材料	項 目	記 号	数 値
コンクリート	単位体積重量	γ_c	23.5 KN/m ³
	圧縮強度	f'_c	29 N/mm ²
	引張強度	f_t	2.9 N/mm ²
	ポアソン比	ν	0.2
鉄筋	降伏強度	f_y	392 N/mm ²
	ヤング率	E_s	206 KN/mm ²
配筋	主鉄筋比		0.5%
	せん断補強筋比		0.2%

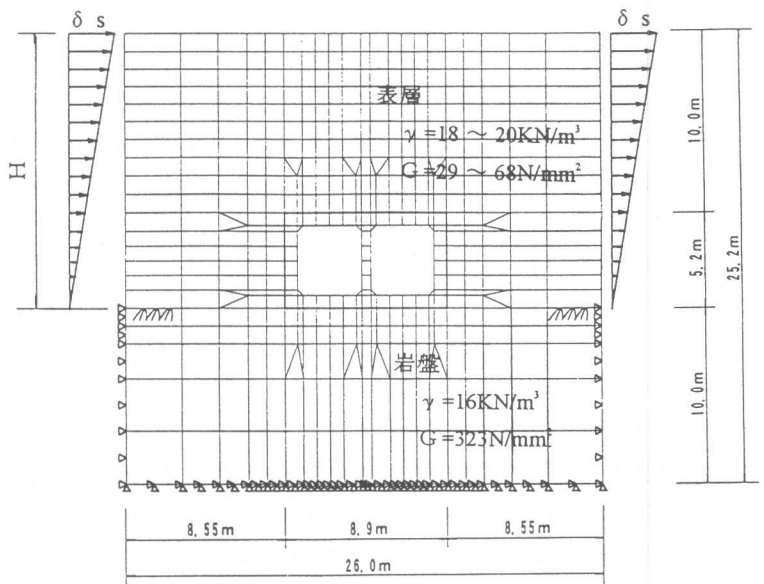


図-2 地盤-構造物連成解析モデル

(層間変形角 $\theta = 9.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$) 付近の大変形領域での耐荷力 ($P_{\delta=50\text{mm}}$) で見ると、 P_0 が約 0.1 Mpa ずつ (土被りで 5 m 分に相当) 増加する毎に、 $P_{\delta=50\text{mm}}$ は約 $15 \sim 20\%$ 程大きくなる。この耐荷力の増加は、側壁、隔壁に生じる軸力の大きさに依存したものと考えられる。そこで、隔壁に生じる平均軸圧縮応力 (σ_a) と $P_{\delta=50\text{mm}}$ の関係を調べた。結果を図-4に示すが、両者には正の相関が見られる。また、部材軸力の大きさは部材断面の曲げ耐力 (M_u) と関係することが知られていることから、 P_0 の変化に伴う曲げ耐力 (左側壁下端) と構造物の耐荷力との関係を調べた。その結果を表-2に示すが、構造物の耐荷力の増加率と側壁部材の曲げ耐力の増加率は比較的合っており、鉛直部材の曲げ耐力から構造物の耐荷力のある程度の精度で推定できると考えられる。

次に、初期拘束荷重の違いによる構造物の損傷をひび割れ状況で調べた。 $\delta = 50 \text{ mm}$ でのひび割れ図を図-5に示すが、ひび割れ性状は構造物のせん断変形に応じたものとなっているが、初期拘束荷重の違いによるひび割れの大きさなどから考えられる各部位の損傷程度の差異は $P-\delta$ 関係ほど見られなかった。

3. 2 材料強度の影響

構造物の耐荷力を評価する上で、コンクリートの引張強度や鉄筋降伏強度の影響は大きく、コンクリート圧縮強度の影響は小さいと考えられる。ここでは、材料強度が構造物の $P-\delta$ 関係に及ぼす影響を調べるため、コンクリート引張強度を圧縮強度の $1/10$ として、圧縮強度を $f'_c = 19.6 \sim$

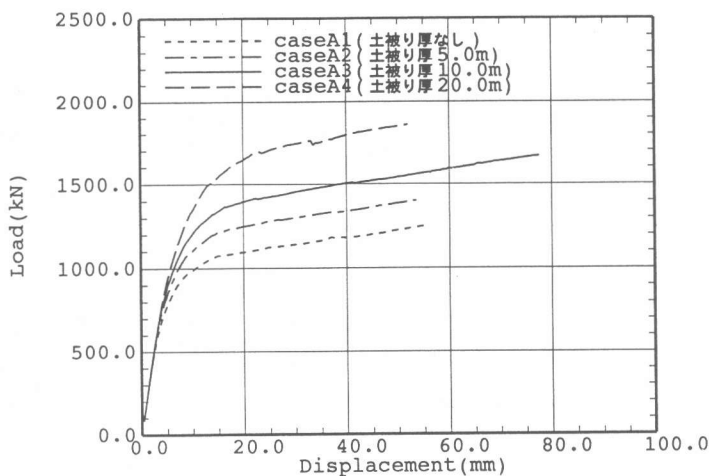


図-3 荷重-変位関係(土被り厚の影響)

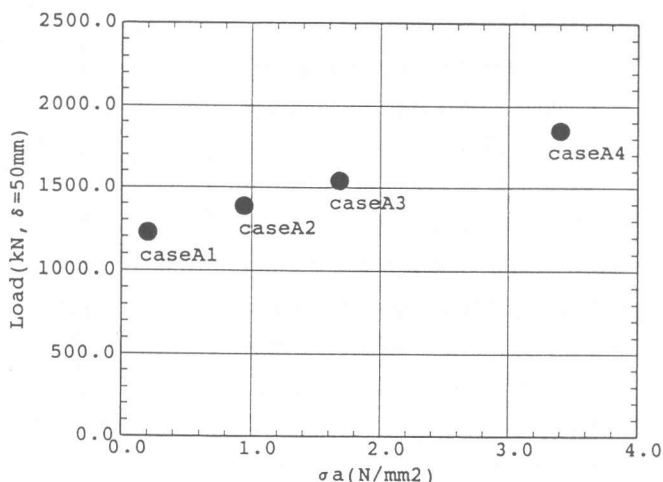


図-4 構造物耐荷力と軸圧縮応力(隔壁)の関係

表-2 構造物耐荷力と曲げ耐力(側壁)の関係

土被り厚 (m)	構造物の耐荷力		側壁部材の曲げ耐力		
	荷重(KN) ($\delta = 50 \text{ mm}$)	比率	軸力 (KN)	曲げ耐力 M_u (KNm)	比率
0.0	1224	1.00	91	733	1.00
5.0	1385	1.13	309	790	1.08
10.0	1542	1.26	528	848	1.16
20.0	1848	1.51	1030	983	1.34

M_u は応力-ひずみ関係と断面の応力分布から軸力の偏心を考慮して求めた。

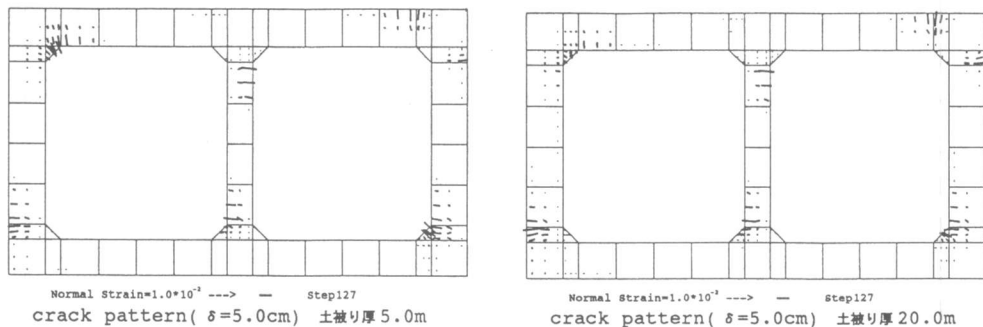


図-5 $\delta=50\text{mm}$ でのひび割れ図(土被り厚5m, 20m)

39.2N/mm²の範囲で3ケース (caseB1～B3)、また、鉄筋降伏強度については、 $f_y=294\sim392\text{N/mm}^2$ の範囲で3ケース (caseC1～C3)を設定して材料強度の影響を調べた。

caseB1～B3およびcaseC1～C3のP- δ 関係を図-6および図-7に示す。図-6に示したP- δ 関係から、 $\delta=30\text{mm}$ 以降の大変形領域では、コンクリート強度の違いによる構造物の耐力力差は小さくなる傾向にあり、最大耐力力点まで考えると、コンクリート強度が構造物の耐力力に与える影響は小さいと言える。

ただし、鉄筋降伏時点 (caseB1; 10.8mm, caseB2; 8.0

mm, caseB3; 7.6mm)では、コンクリート強度の影響が比較的現れている。これは、設計では一般にコンクリートの引張強度を考慮しないが、このような解析では、コンクリートの引張強度を考慮し、しかも、ひび割れ発生後において、tension stiffeningを考慮しているため、引張強度や引張特性の違いによるものと考えられる。そこで、引張強度の影響を調べるため、圧縮強度を $f'_c=39.2\text{N/mm}^2$ として、引張強度をそれぞれ $f_t=2.9(1/13f'_c)$, $3.9\text{N/mm}^2(1/10)$ の2ケース (caseB3.1とB3.2)を行った。この解析結果を図-8に示すが、図-6と同様、鉄筋降伏点付近で荷重応答での違いが現れており、鉄筋降伏点当たりでの構造物の耐力力はコンクリートの引張強度に依存していることが分かる。鉄筋の降伏強度の影響については、図-7から分かるように、鉄筋が降伏する時点から各ケースの応答経路に差が生じ、その後は鉄筋強度に応じてほぼ一定の荷重応答の差となっている。これについては、各部材断面での曲げモーメント-部材回転角(M- θ)関係でも調べたが、構造物の耐力力差と鉄筋降伏強度の違いによる部材の曲げ降伏耐力の差はほぼ同じであった。

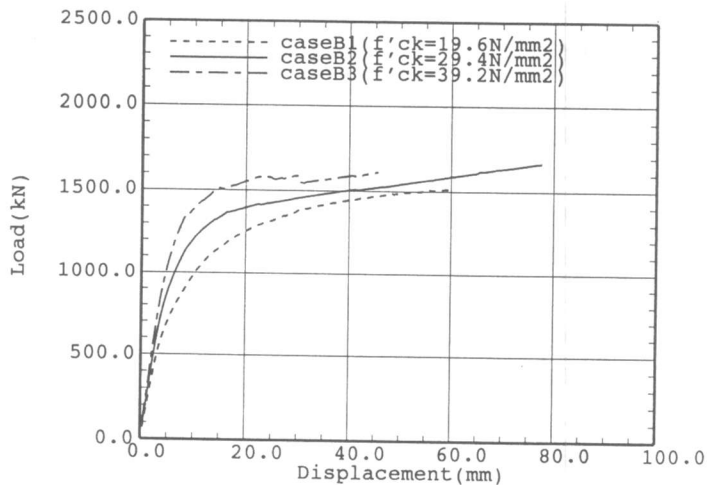
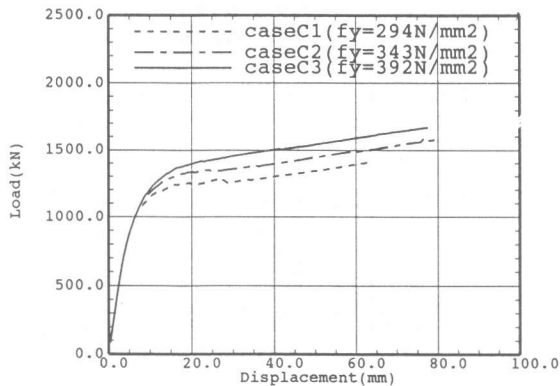
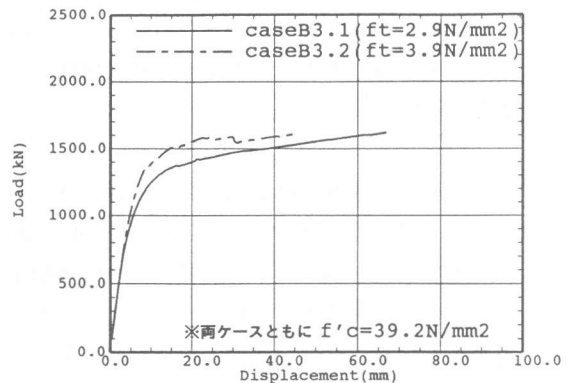


図-6 荷重-変位関係(コンクリート圧縮強度の影響)



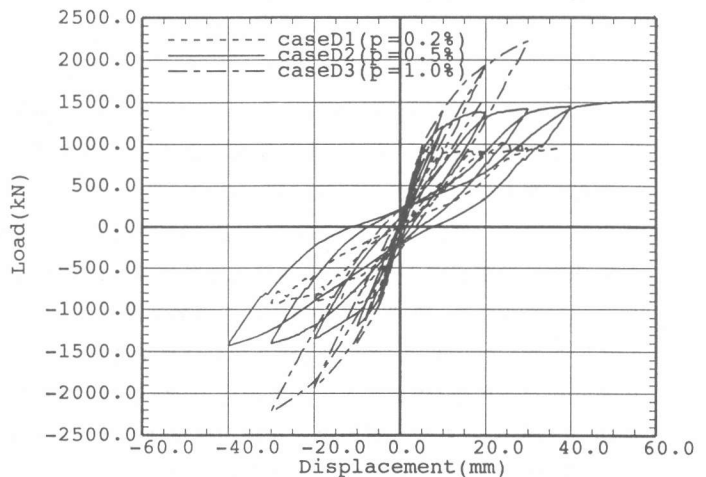
図－７ 荷重－変位関係(鉄筋強度の影響)



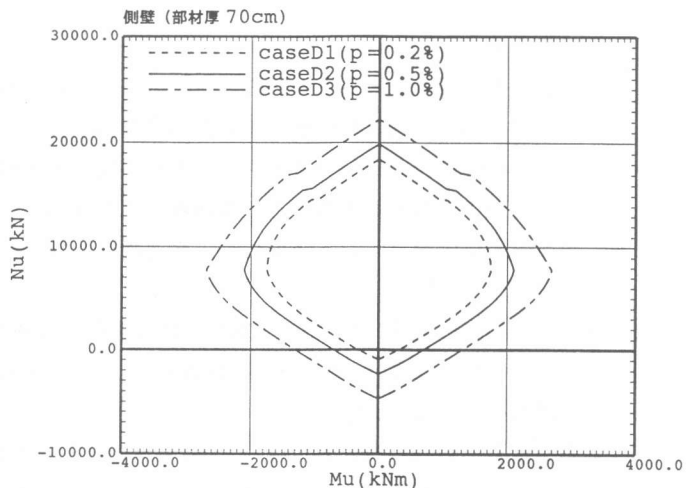
図－８ 荷重－変位関係
(コンクリート引張強度の影響)

３．３主鉄筋比の影響

曲げと軸力を受ける部材断面の耐力や変形能を支配する要因の一つに主鉄筋比が挙げられる。一般に主鉄筋比が大きくなると、耐力や剛性も向上すると考えられるが、不静定系の場合、主鉄筋比が構造物の耐力にどの程度寄与するのか、その定量的な評価は確立されていない。ここでは、主鉄筋比が構造物の耐力に及ぼす影響を検討するため、主鉄筋比を $p=0.2\%$ 、 0.5% 、 1.0% (caseD1～D3)と変化させた。なお、せん断補強筋は一律 0.2% とし、荷重は頂版中央部で正負繰返し載荷(変位制御)で行った。caseD1～D3の $P-\delta$ 関係を図-9に示すが、主鉄筋比の大きさと構造物の耐力はよく対応しており、 $\delta=30\text{mm}$ での $p=0.2\%$ 、 0.5% 、 1.0% での耐力はそれぞれ $P=922\text{KN}$ 、 1422KN 、 2226KN となり、主鉄筋比が構造物の耐力に与える影響は非常に大きいことが分かる。そこで、構造物の耐力と部材断面の耐力との関係を調べるため、側壁下端での曲げ耐力(M_u)を求めた。側壁下端での $M-N$ 相互作用曲線を図-10に示すが、側壁の軸力を、



図－９ 荷重－変位関係(主鉄筋の影響)



図－１０ $M-N$ 相互作用曲線

530KNとすると、主鉄筋比が $p=0.2$ から $p=1.0\%$ に増えると、 M_u は $474\text{KN}\cdot\text{m}$ から $1451\text{KN}\cdot\text{m}$ と、約3.1倍となり、構造物の耐力向上と同様な傾向にあることが分かる。

4. 地盤－構造物連成系による非線形解析

本来、地中埋設構造物は周辺から分布荷重(静止土圧)を受けており、その状態から地震時動土圧などの地震時荷重が作用する。また、地震力が大きくなるに従い、地盤と構造物間に剥離や滑り現象が現れてくる。ここでは、これらの要因が構造物の変形挙動に及ぼす影響を調べるた

め地盤との連成解析を行った。検討ケースは、構造物と地盤との剥離や滑りを考慮したcase-1、剥離などを考慮しないcase-2と、構造物の非線形性の影響を検討するために、構造物を線形(剛性を一律初期剛性の50%, 剥離を考慮)としたcase-3の3ケースである。地盤については、Masing則に基づいた大崎の履歴曲線モデルを用いており、また、剥離、滑りについては、引張側での応力伝達を考えない接合要素と微小な滑り剛性を考慮した滑り要素とした。地盤変位 δ_s と構造物変位 δ_d (頂底板間の相対変位) の関係を図-11に示すが、それぞれの変位は地盤高さ H や構造物高さ h で正規化している。同図から、case-1とcase-2の応答性状を比較するとほとんど一致しており、地盤と構造物の剥離現象が構造物の非線形挙動に及ぼす影響は小さいと言える。また、case-1, 2とcase-3の比較から、構造物の非線形性の影響を調べると、 $\delta_s/H=0.02$ 以降の領域では構造物の変位の違いが明らかである。そこで、構造物の非線形性が顕著となるcase-1の挙動を調べてみたが、構造物に加わる荷重(構造物周辺の要素応力)や構造物の断面力は変位の増加ほど増えておらず、これは、 $\delta_s/H=0.02$ 以降、構造物の非線形性が強くなるに従い、地盤とのコントラストも大きくなるため、荷重が地盤側に逃げてしまうためと考えられる。従って、構造物の変形性能を適切に評価するためには、構造物の非線形性のモデル化が重要であると言える。

5. まとめ

本解析から以下のことがまとめられる。土被り厚の影響では土被りが厚くなるほど構造物の耐力は上がるが、これは鉛直部材の軸応力に依存していると考えられる。材料強度の影響については、構造物の耐力はコンクリートの圧縮強度よりも引張強度や鉄筋強度に大きく依存している。また、地盤との連成解析から、構造物の変形挙動では、地盤と構造物の剥離の影響は小さいが、地盤の変形が大きくなる領域では、構造物の非線形性のモデル化の影響が強く現れることが確認された。

謝辞：本研究の実施に当たり、東京大学社会基盤工学専攻 前川宏一教授には多大な御協力と御指導を頂きました。また、清水建設技術研究所 長谷川俊昭氏には貴重な助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

- 【参考文献】 [1] 岡村甫, 前川宏一, : 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂, 1991.5
[2] Shawky, A, and Koichi, M, : Nonlinear Static and Dynamic Analysis for Underground Reinforced Concrete, University of Tokyo, Japan, September 1994

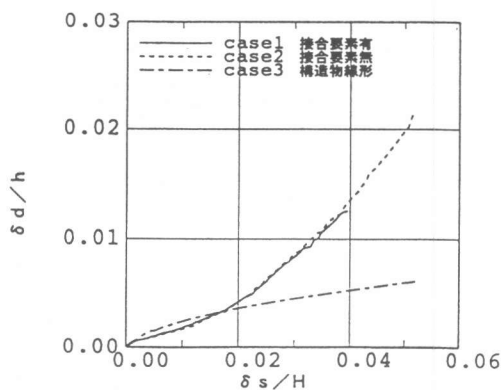


図-11 地盤変位 δ_s/H と構造物変位 δ_d/h